



FACULTAD DE  
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

# Viabilidad del uso de energías renovables en latitudes superiores a los 60<sup>o</sup>

Caso particular, Base Científica Antártica Artigas.

Gabriel Guigou Griot

Programa de Posgrado en Ingeniería de la Energía  
Universidad de la República

Montevideo – Uruguay

Octubre de 2023



FACULTAD DE  
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

# Viabilidad del uso de energías renovables en latitudes superiores a los 60<sup>o</sup>

Caso particular, Base Científica Antártica Artigas.

Gabriel Guigou Griot

Tesis de Maestría presentada al Programa de Posgrado en Ingeniería de la Energía, de la Universidad de la República, como parte de los requisitos necesarios para la obtención del título de Magíster en Ingeniería de la Energía.

Director:

D.Sc. Prof. Dr. Ing. José Cataldo Ottieri

Montevideo – Uruguay

Octubre de 2023

Guigou Griot, Gabriel

Viabilidad del uso de energías renovables en latitudes superiores a los 60° / Gabriel Guigou Griot. - Montevideo: Universidad de la República,

XI, 164 p. 29, 7cm.

Director:

Dr. Ing. José Cataldo Ottieri

Tesis de Maestría – Universidad de la República, Programa en Ingeniería de la Energía, 2023.

Referencias bibliográficas: p. 143 – 157.

1. Energías Renovables, 2. Climas Extremos, 3. Antártida, 4. Tecnologías Renovables, 5. Sostenibilidad Energética. I. Cataldo Ottieri, Dr. Ing. José, . II. Universidad de la República, Programa de Posgrado en Ingeniería de la Energía. III. Título.

INTEGRANTES DEL TRIBUNAL DE DEFENSA DE TESIS

---

Dr. Ing. Rodrigo Alonso Suarez

---

Dr. Ing. Gabriel Cazes Boezio

---

Mg. Ing. Pablo Gianoli Kovar

Montevideo – Uruguay

Octubre de 2023

## RESUMEN

En este estudio, se **investigaron las posibilidades de aumentar el uso de energías renovables en latitudes superiores a los 60°**, focalizándose en la región Antártica, aunque no específicamente. Teniendo como objetivo comprobar la viabilidad de desarrollar sistemas energéticos renovables, considerando las condiciones climáticas extremas y las limitaciones logísticas de esta área remota. Se llevó a cabo un análisis de los recursos disponibles, centrándose en la energía Solar Fotovoltaica, la energía Eólica y, en menor medida, la energía geotérmica y otras fuentes marinas. Se evaluaron las características y viabilidad de cada recurso en función de las condiciones locales y los fenómenos atmosféricos específicos de la región.

Como resultado de este análisis, se estableció que la energía Solar Fotovoltaica y la energía Eólica son las tecnologías más adecuadas y maduras para la región. A pesar de las variaciones estacionales y las condiciones extremas, estas tecnologías ofrecen una solución práctica y efectiva para aprovechar los recursos presentes en el área. La combinación de energía **Solar Fotovoltaica** con módulos planos y energía **Eólica** a través de diversos dispositivos se presenta como un modelo viable, marcando un paso hacia un futuro energético más sostenible en esta región.

Además, se identificaron desafíos importantes, como la necesidad de alejarse de los combustibles fósiles, los altos costos asociados a la logística de transporte y mantenimiento, así como la importancia de una gestión cuidadosa de la demanda eléctrica. A pesar de estos desafíos, se observa una tendencia positiva hacia la adopción de energías renovables en la región, especialmente en la Base Científica Antártica Artigas, donde se están implementando con éxito tecnologías Eólicas y Solares Fotovoltaicas.

Este estudio proporciona una hoja de ruta para avanzar hacia un futuro energético sostenible. La implementación de sistemas renovables, se presenta como **una solución viable** y práctica para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y promover un entorno más limpio y ecológicamente res-

ponsable en este tipo de territorio desafiante.

Palabras claves:

Energías Renovables, Climas Extremos, Antártida, Tecnologías Renovables, Sostenibilidad Energética.

## ABSTRACT

In this study, the **possibilities of increasing the use of renewable energies at latitudes above 60°** were investigated, focusing on the Antarctic region, though not exclusively. The objective was to assess the feasibility of developing renewable energy systems, considering the extreme climatic conditions and logistical limitations of this remote area. An analysis of available resources was conducted, with a focus on Photovoltaic Solar Energy, Wind Energy, and, to a lesser extent, geothermal energy and other marine sources. The characteristics and viability of each resource were evaluated based on local conditions and specific atmospheric phenomena of the region.

As a result of this analysis, it was established that Photovoltaic Solar Energy and Wind Energy are the most suitable and mature technologies for the region. Despite seasonal variations and extreme conditions, these technologies offer a practical and effective solution to harness the resources in the area. The combination of **Photovoltaic Solar** energy with flat modules and **Wind** energy through various devices emerges as a viable model, marking a step towards a more sustainable energy future in this region.

Furthermore, significant challenges were identified, such as the need to move away from fossil fuels, high costs associated with transportation and maintenance logistics, and the importance of careful management of electrical demand. Despite these challenges, a positive trend towards the adoption of renewable energies is observed in the region, especially at the Antarctic Scientific Base Artigas, where Wind and Photovoltaic Solar technologies are being successfully implemented.

This study provides a roadmap for progressing towards a sustainable energy future. The implementation of renewable systems is presented as **a viable and practical solution** to reduce dependence on fossil fuels and promote a cleaner and environmentally responsible environment in this challenging area.

Keywords:

Renewable Energies, Extreme Climates, Antarctica, Renewable  
Technologies, Energy Sustainability.

# Tabla de contenidos

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Hipótesis, objetivo del estudio y alcance</b>	<b>5</b>
2.1	Hipótesis . . . . .	5
2.2	Objetivo general . . . . .	6
2.3	Objetivos específicos . . . . .	6
2.4	Alcance . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Contexto y análisis</b>	<b>8</b>
3.1	Relevancia de la investigación y motivación . . . . .	8
3.2	Situación geopolítica de la Antártida . . . . .	9
3.3	Situación Internacional . . . . .	9
3.4	Política Energética Uruguay y el enfoque Antártico . . . . .	10
3.4.1	Política energética, General . . . . .	10
3.4.2	Política energética en la Antártida Uruguay . . . . .	11
3.5	Uruguay en la Antártida, Tratados . . . . .	11
3.5.1	Uruguay y el Tratado Antártico . . . . .	12
3.5.2	Uruguay y otros vínculos . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Clima Antártico</b>	<b>13</b>
4.1	Características generales de la atmósfera antártica . . . . .	13
4.2	Clasificación Climática . . . . .	15
4.2.1	Región del círculo de bajas presiones circumpolar “ET” . . . . .	16
4.2.2	Región del Plateau continental “EF” . . . . .	20
<b>5</b>	<b>Disponibilidad de los recursos</b>	<b>23</b>
5.1	Radiación solar . . . . .	23
5.1.1	Generalidades del Recurso Solar . . . . .	24

5.1.2	Características específicas del recurso Solar en la Antártida	26
5.2	Recurso Eólico	30
5.2.1	Generalidades del recurso Eólico	30
5.2.2	Características específicas del recurso Eólico en la Antártida	31
5.3	Fuentes de energía marina	34
5.3.1	Mareas y corrientes	35
5.3.2	Gradiente térmico	37
5.3.3	Gradiente salino o Energía azul <sup>1</sup> .	39
5.3.4	Oleaje o Undimotriz.	40
5.4	Geotermia	41
<b>6</b>	<b>Tecnología</b>	<b>44</b>
6.1	Sistemas Solares, Fotovoltaicos y Térmicos	44
6.1.1	Antecedentes	46
6.2	Sistemas Eólicos	53
6.2.1	Enfoque internacional, TCP Wind Task 19 <sup>2</sup>	55
6.2.2	Conceptos, clasificaciones climáticas y de sitios específicos para Energía Eólica	55
6.2.3	Consideraciones especiales de instalación y funcionamiento en condiciones planteadas	63
6.2.4	Antecedentes	64
6.3	Generación de energía con fuentes de energía marina	71
6.3.1	Mareas, Corrientes y rangos de Marea	72
6.3.2	Gradiente térmico	76
6.3.3	Gradiente salino o energía azul	81
6.4	Geotérmica	85
6.4.1	Antecedentes	86
6.5	Hidrógeno	87
6.6	Sistemas implementados hasta el momento	95
<b>7</b>	<b>Planteo del Problema</b>	<b>97</b>
7.1	Identificación del problema:	97
7.2	Análisis de la situación actual:	98
7.3	Caso Base Científica Antártica Artigas	98

<sup>1</sup>También conocida como Salinity Gradient Energy - SGE

<sup>2</sup>Technoloty Collaboration Programme.

7.3.1	Ubicación . . . . .	99
7.3.2	Abastecimiento de energía en la actualidad . . . . .	99
7.3.3	Recursos existentes, caracterización y aspectos vincula- dos a la generación. . . . .	102
7.3.4	Funcionamiento de sistemas renovables existentes en BCAA . . . . .	123
7.4	Viabilidad para BCAA . . . . .	128
<b>8</b>	<b>Viabilidad</b>	<b>135</b>
<b>9</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>137</b>
	<b>Referencias bibliográficas</b>	<b>143</b>
	<b>Glosario</b>	<b>157</b>
	<b>Apéndices</b>	<b>158</b>
Apéndice 1	Tecnología. . . . .	159
Apéndice 2	Origen de datos, Metadatos . . . . .	161
Apéndice 3	Aerogenerador SD12 . . . . .	163

# Capítulo 1

## Introducción

El trabajo de tesis que se presenta, define una serie de relevamientos e identificación de recursos renovables disponibles en latitudes superiores a los 60°. Dichos recursos se estudian y evalúan en un contexto peculiar que tiene como fin, la generación de energía en sus diferentes formas y la utilización de la misma en esas latitudes donde disponer de la misma es un desafío constante. Los costos, restricciones geográficas, logísticas, dificultades climáticas y medioambientales hacen especialmente desafiante la implementación de sistemas renovables.

Asimismo, se estudian las diferentes tecnologías que a la fecha se han mostrado viables en la conversión de esos recursos en energía útil.

Estas tecnologías son evaluadas considerando sus ventajas, desventajas y las restricciones impuestas por factores como el clima y su nivel de madurez para su implementación en estas latitudes específicas.

Se lleva a cabo un análisis de la experiencia y los resultados históricos obtenidos en la implementación de las tecnologías más maduras que han sido probadas. Además, se consideran los desafíos tecnológicos que enfrentan las nuevas formas de generación, como las energías provenientes del mar.

La Energía es un elemento indispensable en toda actividad del ser humano. En latitudes altas esta necesidad se vuelve más intensiva e igualmente indispensable.

En lugares como la Antártida o sus antípodas, el Ártico, ya sea para calentamiento de agua o su pasaje de estado sólido a líquido, calefacción, remoción y tratado de desechos, iluminación y transporte, se requiere de grandes can-

tidades de Energía. En especial, la energía eléctrica es la más utilizada para cubrir estas demandas.

En cualquier caso, las diferentes formas de energía renovable son intermitentes y en algunos casos muy difíciles de predecir como recurso<sup>1</sup>. Esto plantea la interrogante de cuán diverso debe ser el mix energético para soportar la demanda.

Actualmente, las alternativas a tener sistemas autónomos 100 %, son viables, como se refiere en el trabajo[96], de todas maneras únicamente cinco de las más de 90 bases existentes en la Antártida superan el 50 % de su consumo eléctrico a través de renovables: Princess Elisabeth (100 %) Bélgica, Tor (100 %) Noruega, Wasa (100 %) Suecia, Juan Gregor Mendel (74 %) República Checa y Scott (70 %) Nueva Zelanda, y alguna de ellas solo están operativas en verano.

Para concebir un sistema completamente autónomo basado en fuentes de energía renovable, es necesario considerar una variedad de fuentes energéticas que puedan satisfacer la demanda. Además, se requiere un sistema de almacenamiento eficiente que pueda cubrir los períodos en los que los recursos naturales no están disponibles.

Este es uno de los desafíos más grandes de las energías renovables, encontrar un sistema eficiente de almacenamiento.

Un sistema íntegramente renovable como se plantea anteriormente es muy desafiante, se podría aspirar inicialmente en reducir el consumo de combustibles fósiles hasta lograr un sistema donde las fuentes de energía renovables sean integradas a un sistema convencional de generación como podrían ser generadores diesel, los cuales podrían funcionar eventualmente como respaldo prescindiendo así del almacenamiento y sus implicaciones en costo e impacto ambiental.

Este trabajo tiene zonas de incidencia que abarcan las dos áreas específicas y particulares del planeta, las que rodean los polos, el continente antártico y el ártico. Ambas zonas son diferentes en muchos aspectos, pero presentan similitudes en las características desafiantes que las condiciones climáticas plantean. Una de las grandes diferencias es que en la Antártida la población es mucho menor y en muchos casos intermitentes, en el Ártico existe una población permanente a lo largo del año[149]. En ambos casos existen aspectos que condicionan la conversión de energías renovables en energías útiles. Este trabajo se

---

<sup>1</sup>En otros casos se puede predecir con mucha anticipación, como es el caso de las mareas.

focalizará, principalmente, aunque no específicamente, en el territorio Antártico.

En particular, la actividad humana en la Antártida está dada principalmente por actividades científicas que se realizan en bases enclavadas en su mayoría en la zona costera y península Antártida. En la actualidad, casi todas estas bases dependen exclusivamente de la combustión de combustibles fósiles tradicionales para usos energéticos.

La utilización de combustibles convencionales como gasoil, naftas o gas trae aparejado consecuencias ambientales[14] importantes, principalmente la emisión de gases de efecto invernadero, producto de su combustión. También están las potenciales fugas o derrames de estos productos que son de alto nivel contaminante, esto puede suceder en el lugar de utilización de estos productos, así como en el traslado de los mismos que se realiza en un ambiente no convencional que incrementa riesgos. A modo de ejemplo, en la Antártida, los combustibles fósiles tienen un costo agregado muy elevado[149], esto se debe principalmente a la dificultad de acceso y al costo del traslado de los mismos a estos lugares remotos. Algunas bases como Amundsen-Scott<sup>1</sup> reciben el combustible por vía aérea desde la base Mac Murdo<sup>2</sup>, lo que incrementa unas siete veces el costo, tomando como referencia el costo del combustible en Mac Murdo[59].

Estos aspectos son un incentivo para buscar la manera de reducir o eliminar el consumo de este tipo de combustibles y hacen pensar en la conveniencia de la generación de energía eléctrica a partir de energéticos locales como opción, no solo con ventajas logísticas sino también medioambientales.

Si bien hay intentos de suprimir el consumo de combustibles fósiles mediante la implementación de eficiencia energética y sistemas de energías renovables, todavía queda un largo camino a recorrer.

En este trabajo se relevan y analizan recursos, sus características y las restricciones que el ambiente plantea y que dificultan la aplicación de ciertas tecnologías aplicables en otros puntos geográficos. Dichos recursos y sus características, fijan condiciones de diseño que se analizan.

Tanto así, como los recursos, se realiza un minucioso estudio e identificación de tecnologías y su estado del arte para cada uno de los recursos identificados.

---

<sup>1</sup>Situada en el Polo Sur, Latitud: 0°.

<sup>2</sup>Situada en la costa Antártica, a 1353 km en línea recta de la base Amundsen-Scott

Se buscará contestar preguntas tales como:

¿Es viable la utilización de energías renovables en latitudes superiores a los 60°?

¿El estado del arte técnico y científico permite la explotación de los recursos disponibles?

¿Cuáles son las tecnologías que están maduras para afrontar dichas condiciones?

¿Tecnologías maduras para otras zonas, lo están para esta, o viceversa?

¿Son estas energías confiables y predecibles?

¿Qué restricciones presenta la posición geográfica y el clima?

¿Son esos recursos suficientes para cubrir la demanda en cualquier caso?

¿Están disponibles por temporadas o permanentemente?

Se toma como caso de estudio a la Base Científica Antártica Artigas (BCAA) ubicada en la Isla Rey Jorge, en el norte de la Península Antártica, para comprobar la viabilidad de la implementación de dichos recursos y tecnologías analizados previamente en la Base.

## Capítulo 2

# Hipótesis, objetivo del estudio y alcance

### 2.1. Hipótesis

Este estudio plantea como hipótesis, la búsqueda de una reducción considerable del uso de combustibles fósiles en el contexto presentado, utilizando fuentes de energía renovables que permitan tener cierta independencia energética del modelo actual que se basa en una matriz de combustibles fósiles.

El trabajo es realizado haciendo un relevamiento de los recursos disponibles que se presenten con una mayor relevancia de acuerdo al estado del arte de las tecnologías disponibles para su explotación. Se toman en cuenta los datos obtenidos de diferentes fuentes y las experiencias empíricas realizadas hasta la fecha en circunstancias similares que permitan extrapolar resultados.

Todo esto en su conjunto permitirá esbozar un sistema integrado, principalmente por fuentes de energía renovables, cuya configuración entregue energía de manera de cubrir la demanda con ciertos niveles de independencia del actual modelo.

Se busca identificar los recursos y la tecnología adecuada para su mejor explotación de acuerdo a las condiciones locales y realizar el dimensionado de acuerdo a las necesidades y requerimientos, como así también se hará un balance ambiental y económico de la implementación de las tecnologías seleccionadas.

Las restricciones ambientales están dadas principalmente por los compromisos adquiridos en el tratado antártico.

## 2.2. Objetivo general

El objetivo general de la tesis de Maestría es contribuir con el desarrollo de la sostenibilidad, impulsando un modelo de autoabastecimiento energético en el área geográfica específica donde se focaliza este trabajo.

## 2.3. Objetivos específicos

Los objetivos específicos del presente trabajo son los siguientes:

- Identificar los recursos renovables que puedan ser utilizados como fuente de energía primaria en zonas ubicadas por debajo del paralelo 60°.
- Determinar la madurez de la tecnología correspondiente a cada recurso según el estado del arte para ser aplicado en la zona identificada antes.
- Analizar las restricciones, ventajas y desventajas de las condiciones locales.
- Determinar una configuración en la cual BCAA sea autónoma.
- Contribuir a la mejora ambiental mediante la generación de energía.

## 2.4. Alcance

El alcance de este trabajo está destinado al aprovechamiento de recursos energéticos con fines antropocéntricos para las condiciones planteadas. Además, tiene como objetivo definir posibilidades concretas de utilizar los recursos y tecnologías identificadas para cubrir la demanda con un nivel de confianza que permita una desvinculación gradual de la dependencia de los combustibles fósiles. Se analizará el estado del arte de estas tecnologías para su implementación, explotando los recursos identificados.

Se enmarca dentro de los objetivos de desarrollo sostenible planteados en el año 2015 por las Naciones Unidas[153], estos incluyen, en su punto 7[104], el paradigma de tener Energía y no contaminante. Específicamente indica en el punto 7.2) Aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas.

Esta investigación contiene implicaciones que benefician<sup>1</sup> de diversas maneras al paradigma global de contar con energía limpia y renovable.

---

<sup>1</sup>Reducción significativa de emisiones de gases de efecto invernadero. Disminución de la dependencia de combustibles fósiles. Estímulo a la innovación y desarrollo tecnológico. Fomento de la autosuficiencia energética.

# Capítulo 3

## Contexto y análisis

El gran desafío es satisfacer la demanda energética de las actividades humanas de una manera optimizada, confiable, limpia y sobre todo sostenible.

El combustible utilizado actualmente tiene un alto potencial de contaminación en caso de derrames y de seguridad<sup>1</sup>, ya que los hidrocarburos son propensos a la inflamación. El abastecimiento es dificultoso, peligroso y caro.

Suplir gradualmente los combustibles fósiles por fuentes renovables es una buena alternativa, mejora la eficiencia, minimiza costos, reduce emisiones y disminuye riesgos medioambientales. Las condiciones climáticas, restricciones ambientales y el estado del arte de las tecnologías a aplicar son los principales obstáculos que presenta el cambio de matriz energética.

### 3.1. Relevancia de la investigación y motivación

En los últimos 15 años se ha producido un incremento en la participación de las energías renovables en la matriz energética del Uruguay, esto sucede como consecuencia de un cambio en la política energética.

El cambio se logró, y aumentó sustancialmente la energía generada a partir de fuentes renovables, especialmente Eólica y Solar Fotovoltaica.

En la actualidad hay instalados en Uruguay un total de 41 parques Eólicos con una potencia instalada de 1514 *MW*, esto supone un 31 % de la potencia

---

<sup>1</sup>Se registran varios casos de incendio (base Brasileña (La Nación 2012) tuvo problemas con el generador que causó la destrucción total de la estación y la base chilena que en el 2018 (Armada Chilena 2018) tuvo un problema similar.

total instalada, mientras que los parques FV instalados son 19 acumulando una potencia instalada de 229 *MW*, suponiendo un 5 % de la potencia instalada[43].

Estos cambios llevan a una mejora en cuanto al impacto ambiental relacionado con la generación de energía, ya que los nuevos sistemas generan mucho menos gases de efecto invernadero<sup>1</sup> que los tradicionales basados en la quema de hidrocarburos, carbón o gas. Si bien estos avances se han dado exitosamente en el Uruguay continental<sup>2</sup>, el territorio antártico quedó relegado por su posición geográfica y condiciones.

### 3.2. Situación geopolítica de la Antártida

El continente Antártico forma parte del escenario y de la disputa geoestratégica mundial (Financial Times 2018). Esto se entiende por su potencialidad intrínseca de recursos naturales, como pueden ser carbón, hidrocarburos, mineral de hierro, platino, cobre, cromo, níquel, oro y otros minerales[54], agua dulce y otros vinculados a las energías renovables, como, radiación o eólica.

El continente representa adicionalmente una plataforma de proyección de importancia hacia los restantes espacios oceánicos australes del planeta, entiéndase el Atlántico Sur, Pacífico Sur, e Índico Sur.

Por este motivo, estos espacios continentales y oceánicos han sufrido una importante valorización geoestratégica. Este estudio focaliza su atención principalmente en la zona conocida como Península Antártica, que corresponde, a su vez, al acceso territorial principal del continente y contempla solo aspectos científicos.

### 3.3. Situación Internacional

En la Antártida existe un régimen de gobernanza internacional único. En esta región rige lo que se conoce como Tratado Antártico[150] que fue firmado por 12 países en 1959 y entró en vigor en 1961, actualmente tiene 53 integrantes. Por su parte, Uruguay forma parte de este tratado desde 1980<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup>Tendiendo en cuenta la huella de carbono generada durante la construcción, traslado y montaje de los sistemas.

<sup>2</sup>Territorio uruguayo, localizado en Sudamérica y que limita con Brasil y Argentina.

<sup>3</sup>El Tratado designa a la Antártica como una región de paz y cooperación, abordando además las cuestiones relacionadas con los reclamos de soberanía. Establece que: **“en interés de toda la humanidad que la Antártica continúe utilizándose siempre**

Dicho tratado expone en su parte medular que:

- La Antártida se utilizará exclusivamente para fines pacíficos.
- La protección del medio ambiente es uno de los compromisos principales.
- La libertad de investigación científica en la Antártida y la cooperación hacia ese fin.
- Las Partes contratantes acuerdan proceder al intercambio de observaciones de resultados científicos sobre la Antártida, los cuales estarán disponibles libremente.

Este tratado ha sido uno de los acuerdos internacionales más exitosos jamás alcanzados en su tiempo, sin intentar encontrar una solución a las disputas políticas de la época. En cambio, el tratado se propuso establecer un régimen para gestionar los problemas y promover cooperación permanente entre países.

A los 12 Países originales del Tratado se han sumado 36 países adicionales, 28 de los cuales cuentan con investigación científica activa con programas Antárticos. Todas las decisiones entre las partes se toman en reuniones anuales, por consenso, asegurando que todos los países estén completamente alineados sobre cómo gestionar la región. Sin embargo, el Tratado Antártico no estableció todas las medidas para la gestión y gobernanza integral de la región. Hasta la fecha, algunas de las partes del Tratado han negociado varios acuerdos internacionales adicionales independientemente. Estos acuerdos se refieren a la pesca comercial, actividades referentes a recursos minerales y protección ambiental integral. Colectivamente, este conjunto de leyes internacionales que se aplica al continente antártico y al que rodea el Océano Austral se conoce como el Sistema del Tratado Antártico.

## **3.4. Política Energética Uruguay y el enfoque Antártico**

### **3.4.1. Política energética, General**

Desde el año 2008, fecha en que el Poder Ejecutivo aprobó la llamada “Política Energética” [121], el país viene avanzando en un marcado cambio en **exclusivamente para fines pacíficos y que no llegue a ser escenario u objeto de discordia internacional.”**

su matriz energética. Este cambio se basa en cuatro elementos fundamentales:

- **Lineamientos estratégicos**, que definen los grandes ejes conceptuales de la política.
- **Metas** a alcanzar en el corto (5 años), mediano (10 a 15 años) y largo (20 años y más) plazo.
- **Líneas de acción** necesarias para asegurar el cumplimiento de las metas.
- **Análisis de situación** de los temas energéticos en el país, en la región y en el mundo, a efectos de monitorear la evolución del sector en forma permanente.

En el marco de esta política de estado se dan las condiciones para implementar sistemas renovables en la base antártica que puedan poco a poco reducir la dependencia de combustibles fósiles.

### **3.4.2. Política energética en la Antártida Uruguay**

Si bien los mismos lineamientos aplicados en el territorio continental se aplicarían también para el territorio antártico uruguayo, las condiciones cambian drásticamente. Factores como el clima, logística y accesibilidad hacen que el análisis sea totalmente diferente.

En marzo de 2018 se conformó un grupo de trabajo para integrar fuentes de energías renovables al abastecimiento energético de las instalaciones Antárticas, implementando así en la BCAA la política vigente en territorio nacional. El grupo se conformó por representantes del MIEM, ANCAP y UTE. El hecho fue de gran importancia, ya que incorporaba nuevas ideas y gestión en la labor del Programa Nacional en el Área del Tratado Antártico. Esto se orienta a crear un cambio de la matriz energética dependiente hasta el momento en gran porcentaje de combustible fósil. El impacto del cambio de matriz es muy importante en todo sentido, teniendo implicancias ambientales, científicas y económicas principalmente.

## **3.5. Uruguay en la Antártida, Tratados**

La vinculación de Uruguay al territorio Antártico viene dada desde hace ya muchos años, inicialmente, desde antes de la independencia del país, en la época

colonial, cuando Montevideo era un Apostadero Naval y tenía jurisdicción sobre los territorios al Sur, incluyendo la Antártida. En 1968 se crea el Instituto Antártico Uruguayo[70] por un grupo de particulares y en 1975 pasa a depender del Ministerio de Defensa Nacional (MDN). Esto se hace mediante el artículo 103 de la ley 14.416[37], dándole al IAU mayores recursos de los que podría obtener en el medio privado, los objetivos establecidos eran: fomentar, evaluar y efectuar investigaciones y exploraciones científicas, tecnológicas y de Servicios en la Antártida al Sur del Paralelo 60°S.

### 3.5.1. Uruguay y el Tratado Antártico

Uruguay es aceptado como miembro adherente del Tratado Antártico en 1980[150].

En ese momento se deja constancia del interés de nuestro país por la actividad antártica y la voluntad de preservar los derechos que en un futuro pudieren corresponderle, acorde al derecho internacional, sin oponer títulos de soberanía sobre su territorio. En este mismo año, científicos uruguayos comienzan a participar de actividades en las bases de otros países ya instalados en la Antártida. En el año 1985, nuestro país fue aceptado como miembro Consultivo del Tratado Antártico.

### 3.5.2. Uruguay y otros vínculos

En 1987, Uruguay se integra al **Comité Científico de Investigaciones Antárticas** (SCAR)[145].

Desde 1996 la **Comisión para la Conservación de los Recursos Vivos Marinos Antárticos** (CCRVMA)[32].

En 1991: forma parte del **Protocolo al Tratado Antártico sobre Protección del Medio Ambiente**<sup>1</sup>[124] donde se designa a la Antártida como una “reserva natural dedicada a la paz y a la ciencia”.

---

<sup>1</sup>También conocido como el protocolo de Madrid

# Capítulo 4

## Clima Antártico

### 4.1. Características generales de la atmósfera antártica

El aspecto climático presenta dificultades desafiantes para toda actividad humana en las regiones polares. Sus principales características como las bajas temperaturas o vientos fuertes presentan restricciones para las actividades realizadas en esas latitudes que se extienden también al aspecto energético. Conocer el clima y sus características lleva a poder conocer los recursos disponibles con cierto nivel de confianza, su distribución, fortaleza y debilidades. El Clima Antártico juega un papel significativo en el sistema atmosférico global, siendo las características locales las que adquieren relevancia para este trabajo.

En el continente Antártico, la nieve cubre casi en su totalidad al continente, dejando solo el 0.3% [115] de rocas al descubierto y el 2% hielo azules<sup>1</sup> [20]. Esto hace que la superficie cubierta en nieve y hielo afecte la intensidad de la radiación solar reflejada hacia la atmósfera, lo que influye en los patrones de temperatura, albedo y viento principalmente.

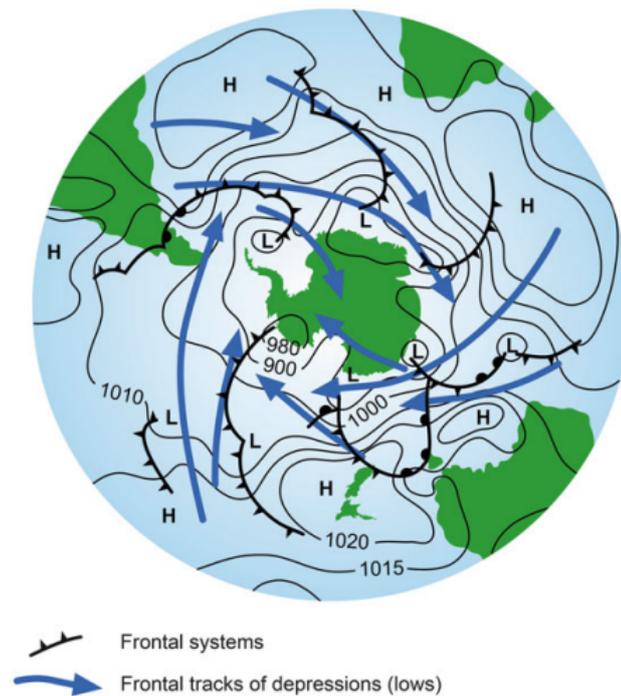
Adicionalmente, el área cubierta de nieve y hielo se duplica durante el año de forma estacional, esto sucede por el congelamiento del mar lindante con la costa.

El mapa de la Figura 4.1 muestra las características generales de la circula-

---

<sup>1</sup>Fenómeno natural, generado por la compresión y cristalización del hielo glaciar. Su tonalidad se debe a la ausencia de burbujas de aire y a la absorción selectiva de la luz. Este fenómeno ofrece valiosa información sobre la historia climática y la composición del hielo en regiones polares.

ción atmosférica alrededor del continente antártico. En las zonas polares, la dirección del viento en superficie es influenciada por la posición de océanos y continentes que pueden bloquear o canalizar el viento, y pueden también causar cambios en los niveles de humedad.



**Figura 4.1:** Descripción general de la circulación de la atmosférica en el continente Antártico[52].

Más allá de estos aspectos generales, es importante distinguir que en la Antártida se distinguen dos grandes zonas climáticas según la Clasificación de Köppen-Geiger<sup>1</sup>. Esta clasificación permite determinar aspectos particulares de las zonas de importancia. Como se verá más adelante, estas regiones difieren en sus características, las cuales deben considerarse en la toma de decisiones al momento de evaluar la instalación de sistemas de generación de energía.

<sup>1</sup>La clasificación climática más frecuentemente usada es la de Wladimir Köppen, presentando su última versión en 1961 por Rudolf Geiger. Un gran número de estudios posteriores adoptaron este formato llamado *Köppen-Geiger map*. Mientras su concepto de clasificación climática es ampliamente aplicado en temas relacionados a la investigación, cambio climático, geografía, hidrología, agricultura, biología y aspectos educacionales. Basado en datos recientes del Climatic Research Unit (CRU) of the University of East Anglia y el Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) at the German Weather Service, se presenta el Köppen-Geiger mapa mundial de clasificación climática válido para los tiempos modernos.

## 4.2. Clasificación Climática

Para una aproximación inicial se puede utilizar la clasificación de Köppen-Geiger[88]. Esta consiste en una categorización climática mundial que identifica cada tipo de clima con una serie de letras que indican el comportamiento de las temperaturas y precipitaciones que caracterizan dicho tipo de clima.

En el mapa de la Figura 4.2 se identifican las zonas que corresponden al presente trabajo. Una corresponde a la clasificación climática categoría “ET” o Clima Polar de Tundra para el caso de la península e islas, con un verano de corta duración con temperaturas sobre 0°C.

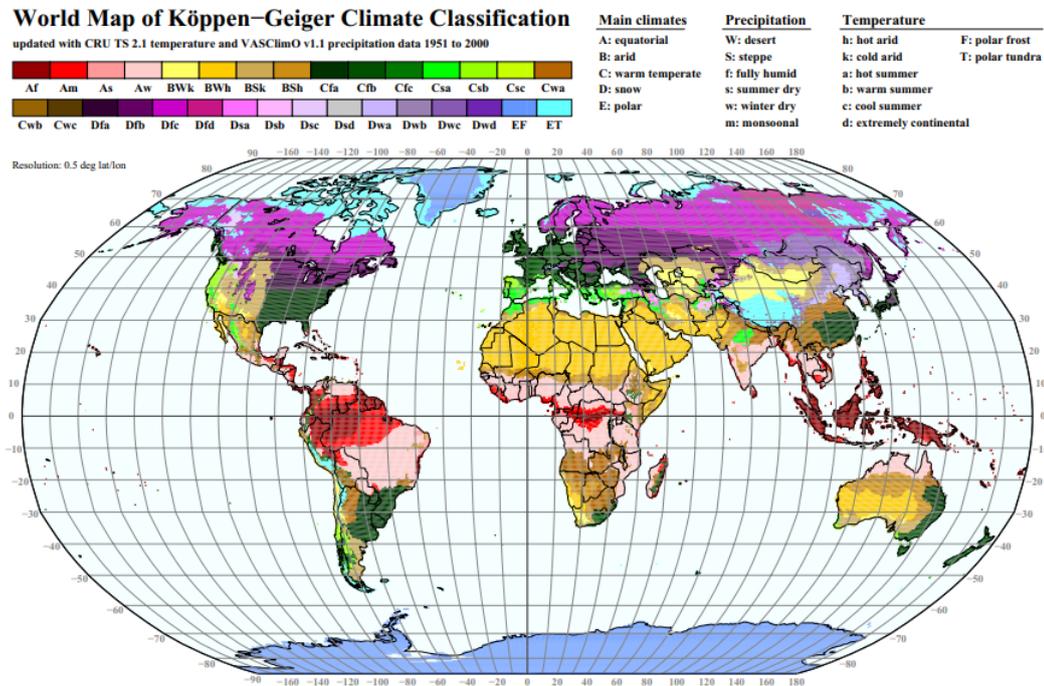
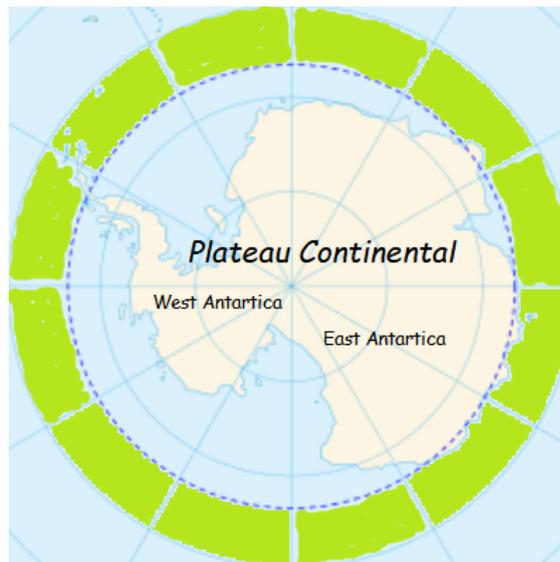


Figura 4.2: Mapa de clasificación climática de Köppen-Geiger[88].

Las tierras libres de glaciares usualmente quedan sin ser cubiertas de hielo o nieve en la época estival. Puede darse excepcionalmente un verano frío donde esto no se cumpla. Para el resto del área que abarca Este y Plateau Antártico, la categoría es la “EF”, Gélido o Glacial.

Este clima se caracteriza por tener casi permanentemente temperaturas por debajo de 0°C, y escasas precipitaciones. Más allá de la caracterización del mapa de Köppen-Geiger, hay aspectos vinculados al comportamiento de la atmósfera que hacen que se deban identificar subregiones que por sus características se identifican con la disponibilidad de uno u otro recurso.

Estas regiones geográficas<sup>1</sup> se distinguen en la Figura 4.3 , siendo el área verde que cubre una región alrededor del paralelo 60°, el círculo de bajas presiones y la parte continental denominado Plateau Antártico<sup>2</sup>.



**Figura 4.3:** Regiones identificadas, Plateau y Círculo de bajas presiones. Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.1. Región del círculo de bajas presiones circumpolar “ET”

Se sitúa justo en el Norte Antártico, entre los 60°S y 65°S<sup>3</sup>, Figura 4.2. A este clima del norte antártico también se lo conoce como Marítimo y se caracteriza por ocupar una zona geográfica mayormente ocupada por el mar, las bajas elevaciones cerca de la costa Antártica, la península e islas del entorno. En esta área se encuentran la mayor cantidad de bases científicas en el continente.

Esta zona se caracteriza por tener sistemas ciclónicos de mesoescala<sup>4</sup> asociados

<sup>1</sup>Representación somera, en realidad el círculo de bajas presiones, como se verá, presenta variaciones en su intensidad estacional y oscilante en cuanto a la latitud.

<sup>2</sup>El Plateau está dividido en Oeste y Este Antártico según algunos autores, en este caso se unifican estas regiones.

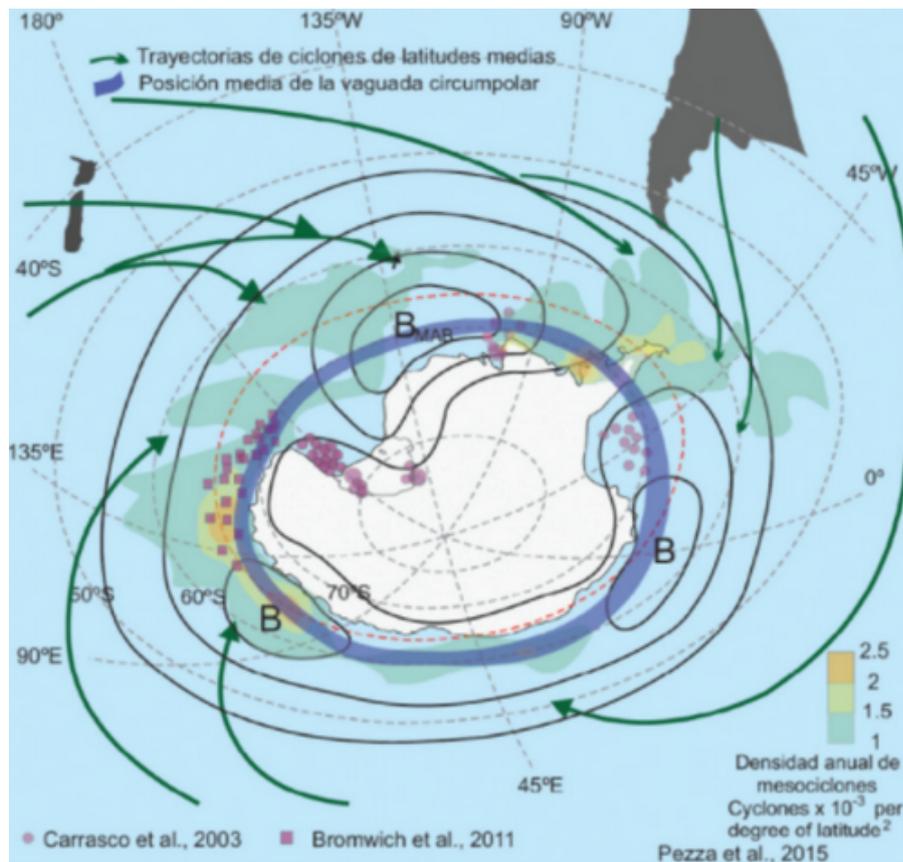
<sup>3</sup>La ubicación puede variar debido a la Oscilación Antártica (AAO), este es un patrón de variabilidad del clima del hemisferio sur que describe el desplazamiento norte-sur del cinturón de bajas presiones. Es decir, describe un traslado de masa atmosférica en dicha dirección entre el polo sur y latitudes medias. La variación en latitud de dicho cinturón afecta los vientos del oeste y su intensidad, así como la nubosidad.

<sup>4</sup>Perturbaciones ciclónicas o centros depresionarios cuyo diámetro en promedio es menor a 500 km.

a sistemas de bajas presiones[24].

Estos sistemas son de alta frecuencia[155] y se desplazan hacia el sureste desde las latitudes medias, llegando al sector costero del continente (flechas verdes, Figura 4.4).

La nubosidad es generalmente abundante y limita la llegada directa de radiación a la superficie. Aunque el potencial solar es mayor durante los meses de verano debido a la prolongación del día, este potencial se ve disminuido por la presencia frecuente de nubes. La proximidad de los Océanos del Sur y baja elevación del terreno, típicamente mantiene un entorno marítimo donde la atmósfera acarrea humedad y aire relativamente cálido a la región. Esta circulación añade un componente de salinidad que es desafiante para el uso de determinados materiales.



**Figura 4.4:** Circulación atmosférica[24] en la región del círculo de bajas presiones circumpolar "ET"

En la Figura 4.4 el círculo azul alrededor del continente representa la región

aproximada<sup>1</sup> donde ocurre la actividad de ciclones, en particular en el sector del océano y península, los círculos y cuadrados violetas también son eventos de este tipo, Carrasco et al. 2003[25], círculos violetas; Bromwich et al. 2011[21], cuadrados violetas; Pezza et al. 2015[117], regiones color verde, amarillo y naranja, Figura 4.4. No obstante, esta no es una condición estática, sino que presenta variabilidades infra e interanual con períodos de mayor y otros de menor intensidad asociada, respectivamente, a una mayor o menor actividad ciclónica en el sector sur-austral del océano Pacífico. ”*Esta variabilidad, que además es posicional<sup>2</sup>, está modulada por mecanismos de variabilidad climática como El Niño, La Niña<sup>3</sup>, Oscilación del Sur (ENSO) y el Modo Anular del Sur (SAM: Southern Annular Mode)[127]*”.

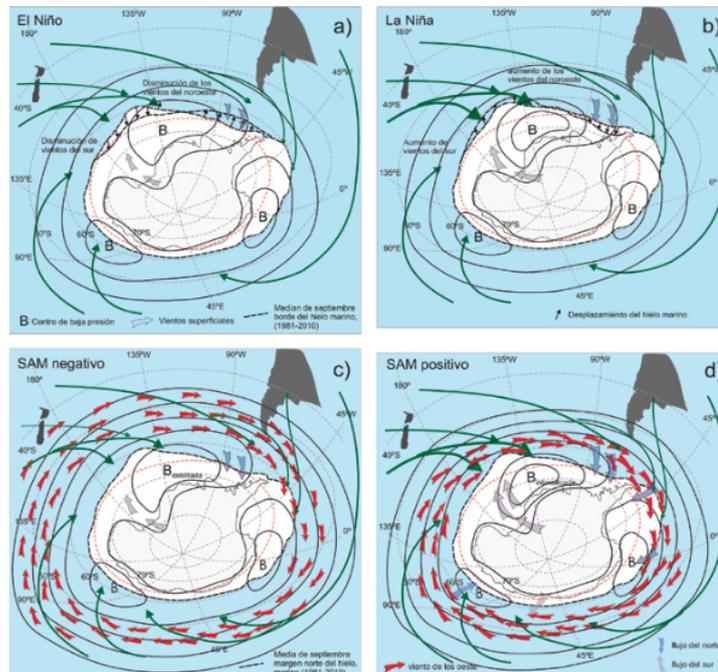
De esta manera, en un evento El Niño se puede esperar una disminución de los vientos del noroeste y sur, por lo tanto, una reducción de frecuencia de la actividad ciclónica, Figura 4.5 a). Mientras que La Niña lo que condiciona un predominio de flujo de componentes del Norte y del Sur, acentuando de esta manera la actividad ciclónica, Figura 4.5 b).

---

<sup>1</sup>Posición media del círculo de bajas presiones durante el período de estudio.

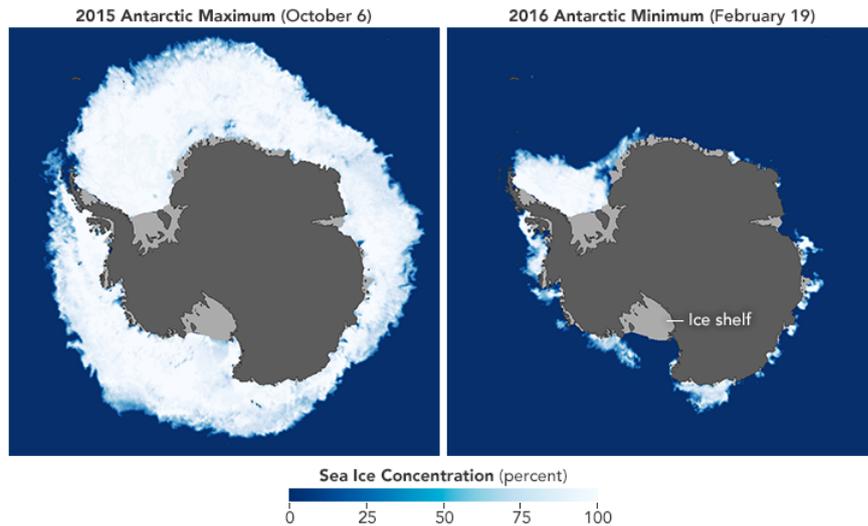
<sup>2</sup>Latitudinal y longitudinalmente

<sup>3</sup>El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) es un fenómeno natural caracterizado por la fluctuación de las temperaturas del océano en la parte central y oriental del Pacífico ecuatorial, asociada a cambios en la atmósfera. Este fenómeno tiene una gran influencia en las condiciones climáticas de diversas partes del mundo.



**Figura 4.5:** Región de interés bajo diferentes condiciones: a) Niño, b) Niña, c)SAM fase Negativa, d)SAM fase Positiva[25] Fuente de Figura:[24]

Adicionalmente, el SAM que está relacionado con el desplazamiento e intensidad de los vientos del oeste, tanto en superficie como en la troposfera media y alta, también influye en la intensidad del círculo de bajas presiones. Presenta su fase negativa, Figura 4.5 c), cuando el cinturón circumpolar de los vientos del oeste está desplazado hacia las latitudes medias y, por ende, los ciclones frontales. En su fase positiva Figura 4.5 d), cuando el cinturón circumpolar de los vientos del oeste está desplazado hacia la Antártica y con ello los ciclones frontales se proyectan hacia la costa del continente, el SAM positivo propicia una intensificación de vientos del noroeste más frecuentes. Estos eventos están fuertemente relacionados con la formación de hielo marino. Referente a esto, la Figura 4.6 muestra máximas y mínimos de hielo en el continente[13].



**Figura 4.6:** El hielo marino antártico alcanza su punto máximo en septiembre u octubre y alcanza su mínimo en febrero. En algunos lugares, el hielo marino se derrite por completo durante el verano. Fuente: NASA[13]

Esta condición periódica de la capa de hielo tiene implicancias en relación con este trabajo, desde varios puntos de vista como el logístico o concerniente a la evaluación para la explotación de ciertos recursos, sobre todo marinos.

#### 4.2.2. Región del Plateau continental “EF”

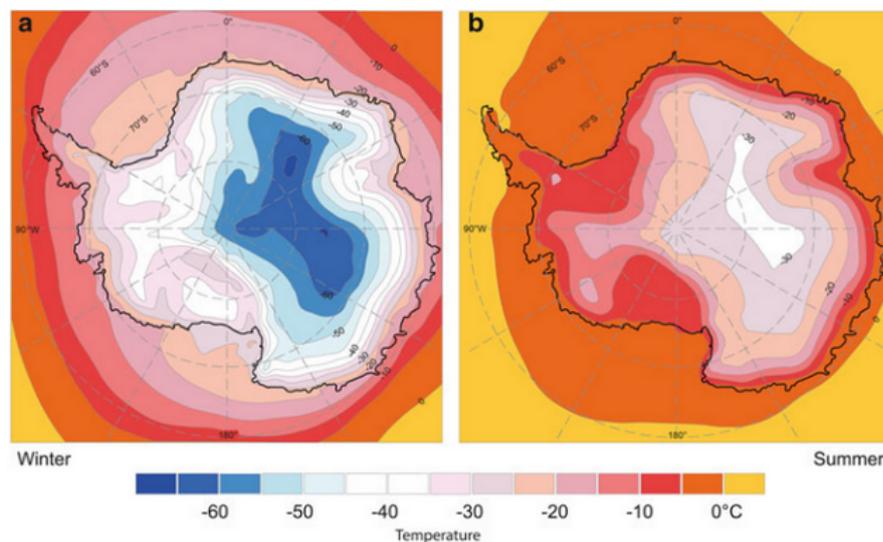
Se ubica justo por debajo del paralelo  $65^{\circ}\text{S}$  y se extiende hasta el Polo Sur, Figura 4.2.

Es la región más extensa y comprende en ella casi todo el continente Antártico, exceptuando el norte de la península. Esta región es típicamente más severa en sus temperaturas extremas y el clima es mucho más seco, con pocas precipitaciones, ya sea en forma de nieve o lluvia. Esto hace que las condiciones de cielo claro sean mucho más frecuentes que en las regiones costeras. Es ventoso y seco en su interior y parte Este, se considera un gran desierto. Esto es resultado de una combinación de situaciones como la posición polar, su topografía y características superficiales.

La mayor parte Este del Plateau Antártico es de más de 3000 metros de elevación sobre el nivel del mar[52], lo que hace de este continente el más alto de todos en promedio. Esto contribuye al frío constante y la baja humedad relativa asociada a las elevadas presiones en el centro del continente. Se caracteriza por la poca presencia de nubosidad, lo que hace que el recurso solar esté

disponible en los meses de verano cuando el sol está sobre el horizonte. Esta influencia de la radiación colabora con períodos diarios de calentamiento de masas de aire que generan los vientos catabáticos<sup>1</sup> o de colina que se verán más adelante. De esta identificación de regiones se deduce que ambas presentan variación en cuanto a los recursos, sus formas y dificultades para su explotación. Esta información es de vital importancia para el diseño de sistemas y uso de materiales.

**Distribución de la temperatura en las regiones.** La temperatura es una variable fundamental a tener en cuenta. La Figura 4.7 deja ver la distribución de temperatura en los meses de verano e invierno.



**Figura 4.7:** Distribución de temperatura media mensual para las estaciones de invierno a) y verano b). El área punteada representa la extensión del hielo marino para cada período, Adaptado de Dudeney 1987[53].

En invierno, una porción significativa de la Plateau tiene una temperatura media mensual de  $-50^{\circ}\text{C}$ , e incluso en verano gran parte de la región está por debajo de  $-30^{\circ}\text{C}$ . Esto se debe a la posición Sur, los efectos de la declinación solar que provoca la ausencia de sol en grandes períodos y la altura del continente en esa región.

Se denota un aumento de las temperaturas hacia los márgenes continentales, coincidentemente con el círculo de bajas presiones, donde en verano las temperaturas pasan los  $0^{\circ}\text{C}$ .

<sup>1</sup>Su nombre cambia dependiendo de dónde se encuentran y cómo están formados, pero algunas de las más conocidas son el Bora en el Adriático, el Mistral en el Mediterráneo, el Santa Ana en California, Bora (o Bura) en Adriático y el Oroshi dentro de Japón.

Consecuentemente, con las temperaturas extremas se verán afectados los recursos y sus formas de transformación.

# Capítulo 5

## Disponibilidad de los recursos

En el presente capítulo se identifican recursos renovables presentes en la zona de interés. Se evalúa y caracteriza el potencial de cada uno de ellos, analizando el estado del arte de las tecnologías que estén en un punto de madurez capaz de extraer energía de ellos, luego se hace un análisis particular para las condiciones planteadas.

### 5.1. Radiación solar

El aprovechamiento del recurso depende fundamentalmente de la irradiación incidente en superficie, que será donde se sitúen los convertidores de energía.

Conociendo información básica de un sitio como latitud y longitud, es posible identificar ciertas características que tendrá el recurso con niveles conocidos de confianza.

Teniendo en cuenta la elevada latitud, se puede estimar que el recurso estará disponible en forma considerable en los meses de verano, siendo en invierno muy escaso o despreciable. Estudios más detallados definirán en qué meses es más conveniente aprovechar este recurso y con qué expectativas.

Los factores más influyentes son las características climáticas locales de las regiones identificadas, principalmente la nubosidad y el albedo. Hay otras magnitudes que se pueden calcular con certeza como la constante solar<sup>1</sup> o los vin-

---

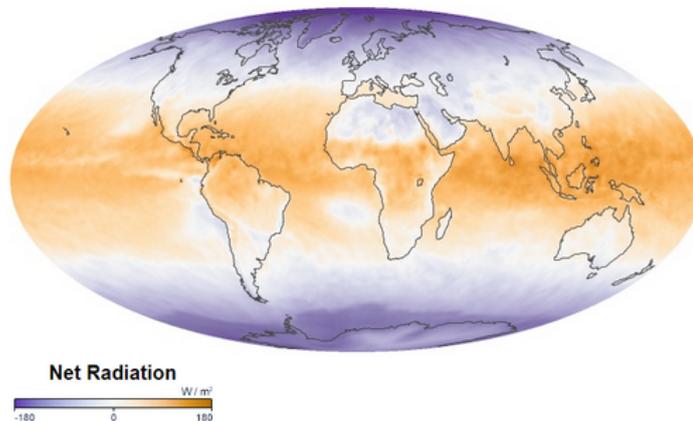
<sup>1</sup>La constante solar no es en rigor constante, depende de una serie de variaciones como la actividad solar y variación estacional, vistas en detalle en[5] (Abal, Alonso-Suárez, y Laguarda 2020, 86).

culados a la geometría solar<sup>1</sup>. Estos factores son fundamentales para conocer el comportamiento del recurso, conociendo lo máximo de ellos se podrá tener una idea del recurso disponible para cada sitio de interés y para cada época del año.

### 5.1.1. Generalidades del Recurso Solar

Refiere a toda la energía que emite el sol y llega al planeta tierra mediante ondas electromagnéticas. La radiación que llega al tope de la atmósfera<sup>2</sup>, es conocida como la constante solar, sin embargo, esta no llega de la misma manera e intensidad a la superficie terrestre, esto se debe a otros componentes como la geometría solar, elementos como la posición relativa entre la Tierra y el Sol a lo largo de su trayectoria, y la nubosidad.

La latitud del observador es importante a la hora de evaluar este recurso. Debido a la declinación solar, la latitud va a determinar la disponibilidad del recurso de acuerdo a la época del año<sup>3</sup>. Cuanto más alta sea la latitud, más extremos serán los Inviernos y Veranos en cuanto a la escasez o abundancia del recurso 5.1.



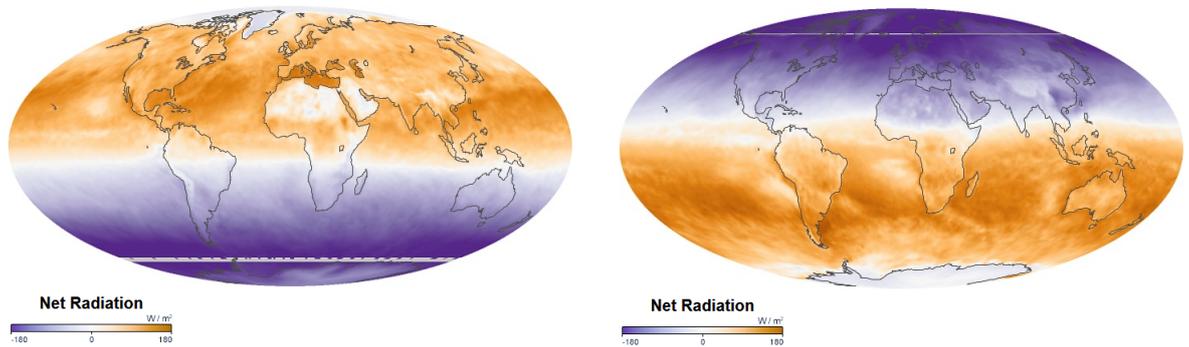
**Figura 5.1:** Mapa de balance radiativo entre la irradiancia solar y la emisión de onda larga en el equinoccio de septiembre 2022 (Fuente: NASA[108])

---

<sup>1</sup>Describe efectos geométricos sobre la radiación solar incidente sobre una superficie asociados al movimiento aparente del Sol.

<sup>2</sup>Abreviada como TOA (Top of the Atmosphere), o constante solar, es el promedio de irradiancia que llega en incidencia normal a la Tierra y a una distancia de 1 UA desde el centro del Sol.

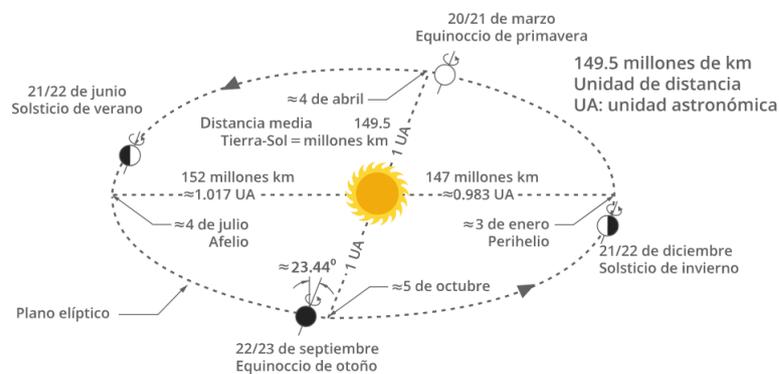
<sup>3</sup>A primer orden.



**Figura 5.2:** Balance radiativo entre la irradiancia solar y la emisión de onda larga, Izq, Junio 2022, Der. diciembre 2021 (Fuente: NASA[108])

### Declinación solar<sup>1</sup>

Este fenómeno afecta la radiación incidente debido a que cambia continuamente, resultando importante para este trabajo, ya que como consecuencia de dicho cambio se producen las estaciones y conociendo su evolución, se puede calcular aspectos importantes para este trabajo mediante la geometría solar<sup>2</sup>[6].



**Figura 5.3:** Movimiento de la tierra alrededor del sol, basado en An Introduction to Solar Radiation, 2, 1983. (Iqbal, 1983)[82].

El recurso es estacional, en los polos hay casi 6 meses de 24 horas de luz solar diaria en verano y lo opuesto ocurre en los meses invernales. La duración

<sup>1</sup>Se define como el ángulo que forma la línea Sol-Tierra y el plano del ecuador celeste (proyección del ecuador terrestre) y tiene una variación anual de  $+23,45^\circ$ , que se da el 22 de junio y lo conocemos como el solsticio de invierno (H.S.) a  $-23,45^\circ$  el 22 de Diciembre, solsticio de verano (H.S.), siendo esta  $0^\circ$  en los equinoccios (22 de Marzo y 23 Septiembre).

<sup>2</sup>Recorridos que hace el sol en el cielo terrestre de forma aparente.

de estos períodos de luz y oscuridad decrecen a medida que el observador se mueve en dirección ecuatorial.

Por esto es relevante calcular la declinación solar ( $\delta$ ) dado el impacto que este factor tiene en el recurso. La ecuación (5.1) más sencilla y comúnmente utilizada es la presentada por Cooper(1969)[33]<sup>1</sup>.

$$\delta = \delta_0 \cdot \sin \left[ 2\pi \frac{(284 + n)}{365} \right], \quad \therefore \quad \delta_0 = 23.45 = 0.409 \text{ rad.} \quad (5.1)$$

### 5.1.2. Características específicas del recurso Solar en la Antártida

#### Recurso en regiones climáticas definidas

Las regiones identificadas en el Capítulo 4 presentan variaciones en el recurso debido, fundamentalmente, a la nubosidad que varía de una a otra región. En el círculo de bajas presiones se tiene una presencia de nubosidad muy importante acompañada de vientos del oeste, nevadas y precipitaciones que varían entre 400 y los 1000 mm anuales. Esto hace que la presencia del recurso en superficie sea difícil de calcular debido al componente estocástico de la nubosidad. Mientras que el clima en la región del Plateau continental está caracterizado por la ausencia de nubes, muy bajas temperaturas y muy escasas nevadas contabilizando precipitaciones de alrededor de 100 mm anuales (Cassano 2013 from Exploring the last continent). Esto hace que, en primera instancia, el recurso esté más tiempo disponible en esta región, aunque al ser la región más al sur, la altura solar nunca será muy considerable, lo que en cierta medida influye en el aprovechamiento del recurso por los efectos geométricos.

A partir de la declinación solar se puede calcular la altura solar máxima y mínima en los solsticios de invierno y verano para el rango entre 60° y 90° de latitud Sur, como se puede ver en la Tabla 5.1.

Latitud	Elevación máxima verano	Elevación mínima invierno
60°	54°	7°
90°	23°	0°

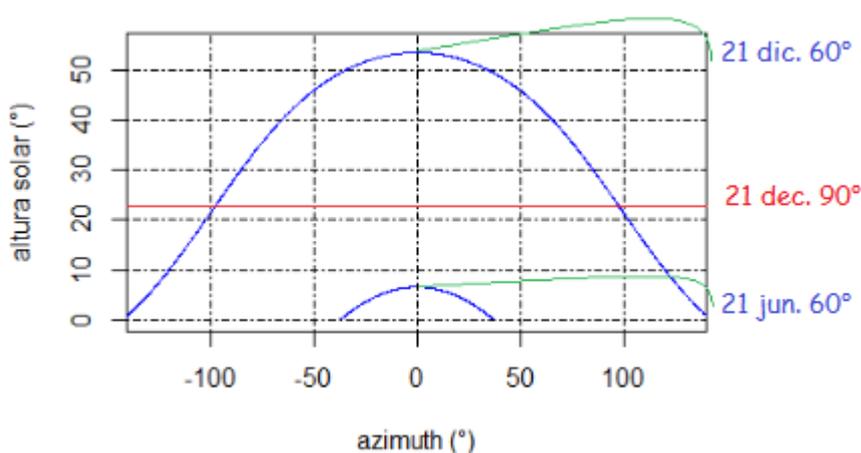
**Tabla 5.1:** Elevaciones máximas y mínimas para el rango de latitud de estudio.

La Figura 5.4 muestra el diagrama solar basado en los datos presentados en

<sup>1</sup>Existen otros autores como Spencer (1971) o Perrin de Brichambaut (1975).

la Tabla 5.1. En este diagrama, se ilustran, la altura solar máxima y mínima para la latitud de  $60^\circ$  (Líneas azules).

Para la latitud de  $90^\circ$  se representa la altura solar máxima (Línea roja) durante el solsticio de verano. Sin embargo, durante el solsticio de invierno en la misma latitud, el indicador queda fuera del rango visible, ya que el sol se encuentra oculto bajo el horizonte.



**Figura 5.4:** Variación de alturas solares para latitudes y fechas de referencia. Elaboración: autor de la tesis.

Los datos expuestos expresan el rango en el que el recurso se va a presentar en el área de estudio de acuerdo a la época del año. A este concepto se le conoce como **tiempo diurno**.

#### Horas de sol<sup>1</sup>

Conocido el comportamiento del movimiento aparente del sol y el tiempo diurno asociado es de orden conocer la realidad del recurso que llega a superficie, una opción es conocer las horas de sol. Conceptualmente se define como irradiancia directa igual o superior a los  $120 \text{ W/m}^2$  que llega a superficie, este concepto nos va a permitir inferir la nubosidad y someramente el recurso disponible.

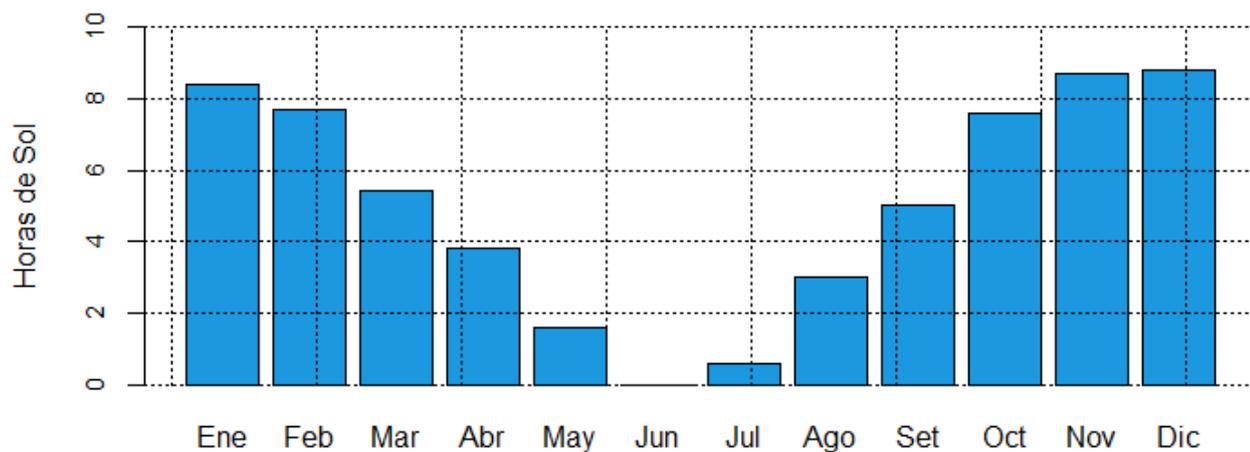
Con una altura solar  $> 0$  y libre de nubosidad se está ante una condición de cielo claro. Este concepto de horas de sol es determinante para el aprovechamiento del recurso.

Como se vio anteriormente, las condiciones de cielo claro son mucho más co-

<sup>1</sup>Según OMM, la duración de la insolación correspondiente a un período determinado se define como la suma de los sub períodos durante los cuales la irradiancia solar directa supera  $120 \text{ W/m}^2$

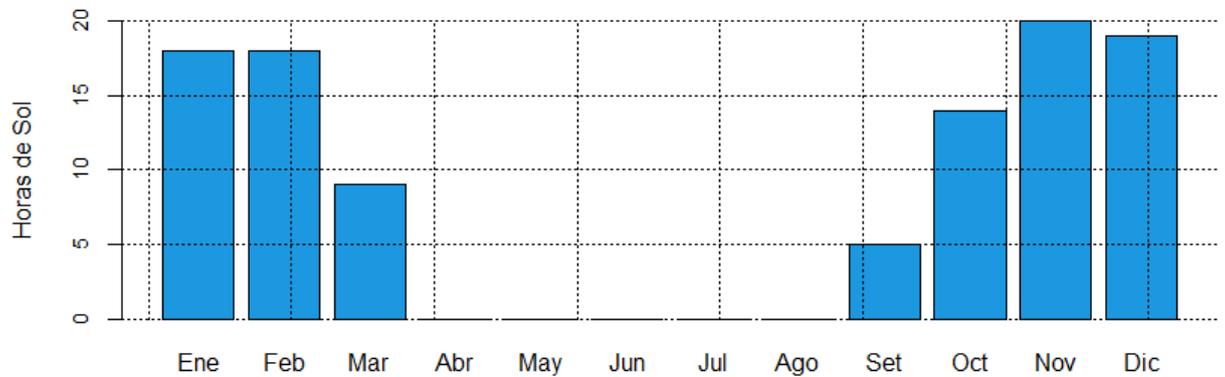
munes en la región continental que en el círculo de bajas presiones.

La figura 5.5 presenta las horas de sol para la base Australiana Mawson en la latitud  $-67,60^\circ$ , una ubicación que se podría definir en la frontera norte del Plateau con una fuerte influencia del círculo de bajas presiones.



**Figura 5.5:** Horas de sol para Latitud:  $-67,60^\circ$ , Longitud:  $62,88^\circ$ , base Mawson. Elaboración: autor de la tesis. Fuente[29].

La distribución de las horas de sol es coherente con la declinación solar, siendo los meses estivales los de más recurso, llegando a un promedio de ocho horas diarias los meses de Noviembre, Diciembre y Enero.

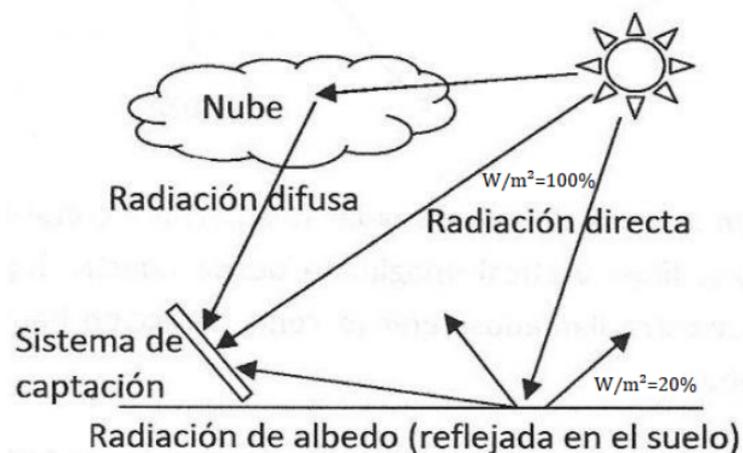


**Figura 5.6:** Horas de sol para el polo Sur, Latitud:  $-90^\circ$ , base Amundsen-Scott. Elaboración: autor de la tesis. Fuente[12].

Sin embargo, la figura 5.6 representa las horas de sol para el polo Sur, donde se marca mucho más la estacionalidad del recurso, siendo los meses de verano los más propicios para su aprovechamiento, mientras que en invierno es inexistente.

### Albedo

La mayor parte de las zonas polares están cubiertas de nieve y hielo, por lo que es necesario tener en cuenta el albedo. Es la proporción de radiación que una superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre ella Figura 5.7.



**Figura 5.7:** Diferentes tipos de radiación.

El albedo varía con el tipo de superficie y el ángulo de incidencia (Tabla

5.2). La estación del año incide en el cambio de tipo de superficie, ej. hielo-roca o nieve-canto rodado, que pueden significar un cambio grande estacional o incluso en poco tiempo en los niveles de albedo. Los más altos niveles son en áreas cubiertas de nieve y hielo. La nieve tiene el más elevado albedo seguido por hielo, roca y el Océano.

Superficie	Albedo ( $\alpha$ )	
Océano	0.02-0.20	Menos reflectivo
Roca	0.10-0.40	+
Hielo azul	0.56-0.7	++
Nieve	0.50-0.959	Más reflectivo

**Tabla 5.2:** Albedo en diferentes tipos de superficie para incidencia normal (Liggett et al. 2015[159].)

## 5.2. Recurso Eólico

### 5.2.1. Generalidades del recurso Eólico

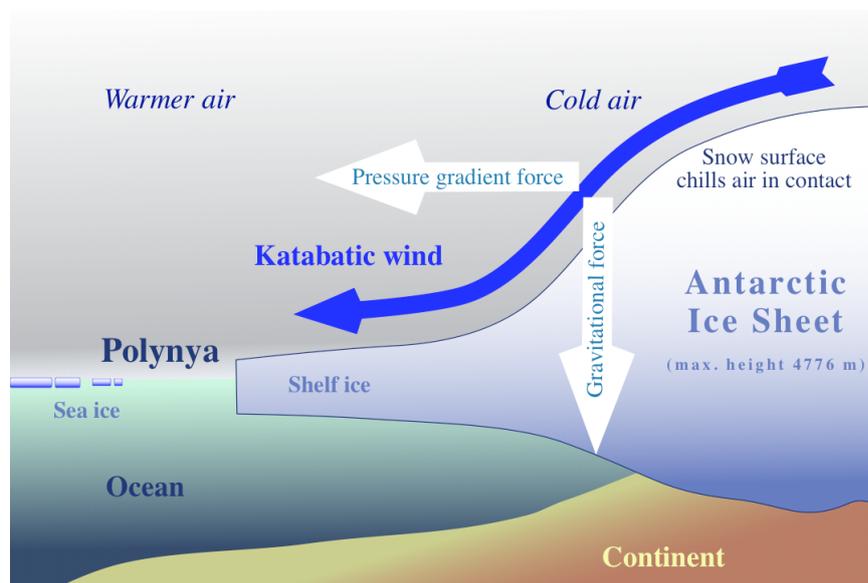
El viento es un tipo de recurso renovable y está disponible libremente en la naturaleza, en esencia es energía cinética contenida en las partículas de aire en movimiento respecto a la superficie de la Tierra. En la formación del viento hay varios factores fundamentales a tener en cuenta. El calentamiento desigual de la superficie del Mar y la Tierra debido a su composición, la rotación de la tierra y declinación solar, entre otros, da lugar a gradientes de temperatura que generan diferencias de presión. Esta combinación de factores hace que las masas de aires se muevan generando así el viento. El viento va a tener características locales de acuerdo a otros factores como son, la rugosidad del terreno o la topografía, que van a generar fenómenos como cambios en la velocidad o la producción de turbulencia. Si bien en ciertas partes del mundo el recurso está caracterizado por zonas que generalmente coincide con los límites de países, en regiones de difícil acceso y poco historial de muestreo, puede ser difícil estimar el recurso de esa forma.

## 5.2.2. Características específicas del recurso Eólico en la Antártida

### Recurso en regiones climáticas definidas

Las diferentes regiones presentan variaciones en el recurso. En primer lugar, justo en el Norte Antártico, entre los  $-60^\circ$  y  $-65^\circ$  de latitud, se encuentra bajo la influencia del círculo de bajas presiones, con alta frecuencia de sistemas ciclónicos, en esta zona los vientos son del Oeste, las tormentas son regulares y habitualmente traen aire húmedo desde latitudes medias. La presencia de grandes glaciares y accidentes geográficos hacen que con frecuencia se generen condiciones locales especiales debido a estos obstáculos que hacen que el nivel de rugosidad sea cambiante. Esto puede llevar a una variación de frecuencias de vientos tanto en dirección como en intensidad si se compara con el viento presente en el mar, donde el nivel de rugosidad es constante.

En la zona del Plateau continental, los vientos que circulan a escala sinóptica son relativamente más calmos. Sin embargo, como se mencionó en la Sección 4.2.2 aquí es donde periódicamente ocurren los vientos catabáticos[99, 160] que da una dimensión temporal y estacional diferente al recurso.

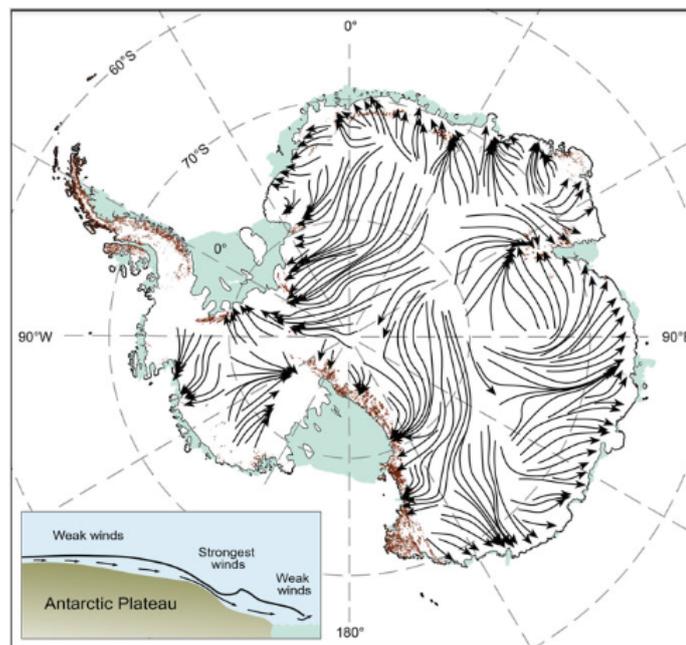


**Figura 5.8:** Esquema de la fisiografía y las fuerzas que crean el viento catabático en el margen de las capas de hielo y los glaciares. Autor: Hannes Grobe<sup>1</sup>.

Los vientos catabáticos se producen en el seno de una atmósfera estable

<sup>1</sup>Perfil del autor en[120].

por dos principales fuerzas que intervienen en el proceso, presión y gravedad (ver Figura 5.8), cuando el aire cercano a la superficie se enfría y se vuelve más denso, esto hace que las masas de aire se desplacen por gravedad ladera abajo. En este punto adquiere gran relevancia la orografía local, ya que el flujo de aire se encamina siguiendo las pendientes, emulando ríos de masas de aire en movimiento. Proporcionan el principal mecanismo de ventilación en las regiones montañosas por la noche cuando los gradientes de presión sinóptica son débiles. A medida que circulan, se hacen más gélidos, aumenta su densidad y velocidad. Este fenómeno está asociado con el ciclo diurno de calentamiento y enfriamiento de las capas atmosféricas inferiores. Es un viento de superficie que suele alcanzar velocidades mayores a los  $27\text{ m/s}$ . Este tipo de viento está influenciado por la geografía local y afectan grandes regiones, principalmente el Plateau y desembocan en zonas costeras Figura 5.9.



**Figura 5.9:** Descripción gráfica de recorrido de vientos catabáticos[160].

### El valor de la medida

Para poder analizar las posibilidades y condiciones para el aprovechamiento del recurso eólico se deben determinar sus características específicas. Para esto es necesario realizar un análisis estadístico de los datos, ya que el recurso presenta una variación aleatoria, la cual es ventajosa conocer. Los valores a medir son, fundamentalmente, la velocidad y dirección del viento como insumos primarios, en segundo orden, la temperatura y la presión atmosférica.

La frecuencia de toma de datos y los intervalos de promedio deben estar en consonancia con el tipo de análisis a que se destinen y en cualquier caso a las posibilidades técnicas en el emplazamiento. Para una evaluación precisa es recomendable tomar muestras de valores de viento con una frecuencia no menor a 0.5 Hz y promedios en intervalos de 10 minutos a una hora. Con respecto a la duración del registro, contar con una duración más extensa contribuirá a reducir la incertidumbre en la estimación del recurso, por tanto, en la potencia disponible. Si los datos no son de un largo período, sería favorable, al menos, tener un año completo, consiguiendo de esta manera, datos durante todas las estaciones, dado que los patrones estacionales de velocidad y dirección del viento son relativamente estacionales.

El muestreo de largos períodos de tiempo como son los climáticos<sup>1</sup>, posibilita caracterizar con precisión las variaciones de diversas escalas, entre las cuales se encuentran las estacionales.

En este contexto se aplica la norma IEC61400-12[75] que especifica procedimientos para medir las características de rendimiento de potencia de una sola turbina eólica y se aplica a la prueba de turbinas eólicas de todos los tipos y tamaños<sup>2</sup>.

Para obtener datos representativos, los sensores de viento deben estar ubicados en lugares expuestos, libre de obstáculos en todas las direcciones, tal como se indica en la Guía 8 de la OMM[106] y la norma IEC61400-12.

La altura de medida estándar es de 10 m. Habitualmente la altura de medida del viento no suele coincidir con la altura del buje del aerogenerador, cuestión necesaria para poder evaluar correctamente la energía potencialmente extraíble. Por otra parte, es posible que el lugar de medida no coincida con el lugar finalmente elegido para la instalación del aerogenerador, debido a cuestiones de accesibilidad, evacuación de la energía suministrada, etc. Por eso, se utilizan modelos de extrapolación espacial del viento<sup>3</sup>. Estos modelos toman las medidas realizadas en un lugar específico a una altura determinada y, utilizando información sobre la topografía y la rugosidad del terreno, extra-

---

<sup>1</sup>Condiciones atmosféricas predominantes durante un período determinado sobre un lugar o una región, la misma OMM ha establecido un periodo de 30 años como base para definir el clima de una región.

<sup>2</sup>Este documento complementariamente define un procedimiento que se utilizará para determinar las características de rendimiento de energía de las turbinas eólicas pequeñas (según se define en IEC 61400-2) cuando se conectan a la red de energía eléctrica o a un banco de baterías.

<sup>3</sup>Incluye la dimensión vertical.

polan los valores a la zona seleccionada para la instalación del dispositivo y a la altura del buje del mismo. Con datos de viento de al menos un año, se obtiene una distribución de probabilidad de la velocidad del viento en el lugar concreto y a partir de esta es posible hacer una evaluación de la energía que se puede extraer de un determinado aerogenerador. Esto se puede realizar por un método analítico o gráfico a partir de la curva de densidad de probabilidad del viento en el lugar y de la curva de potencia característica del aerogenerador. En caso de tener una serie temporal de los valores de velocidad del viento utilizando la curva de funcionamiento del aerogenerador, es posible obtener una serie histórica de la potencia que generaría el equipo, proporcionando, además, información de los arranques y paradas que experimentaría el generador.

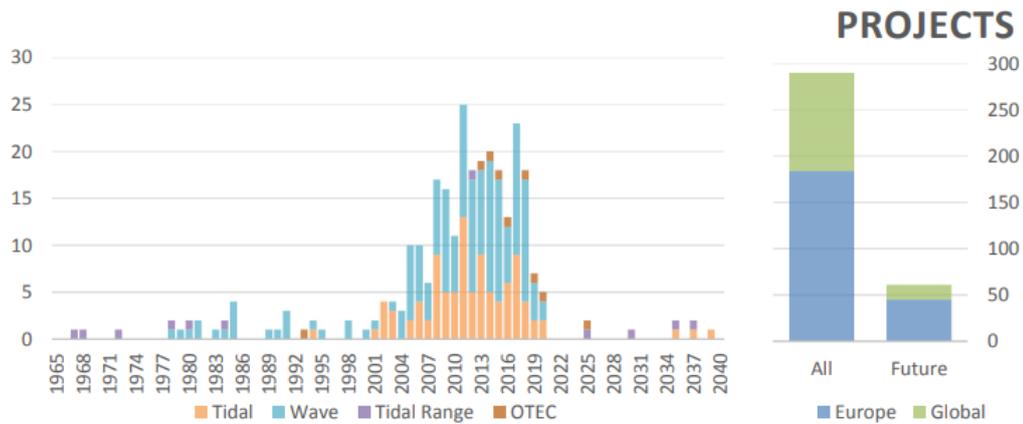
### 5.3. Fuentes de energía marina

Energía marina es el término utilizado para describir todas las formas de energía renovable derivadas del mar. Estas fuentes presentan un gran potencial, son una fuente de energía renovable y limpia cuya tecnología de uso está en proceso de desarrollo. Hay diferentes métodos y sistemas que permiten el aprovechamiento de la energía disponible en el mar:

1. Mareas
2. Corrientes
3. Gradiente térmico
4. Gradiente salino, también conocida como energía Azul
5. Undimotriz

Más allá que el estado del arte no permita la implementación de ciertos sistemas de conversión de energía, es importante tener la dimensión del potencial que representan cada una de ellas para cuando las tecnologías maduren.

En la Figura 5.10, se interpreta estado de desarrollo y madurez de las distintas tecnologías de aprovechamiento de energías del mar y su proyección al 2040, de acuerdo a lo presentado en el reporte "Market study on ocean energy" [87].



**Figura 5.10:** Número de proyectos de la base de datos según período de tiempo (1965-2040) y ubicación. Figura: Reporte "Market study on ocean energy" [paj 12, 87].

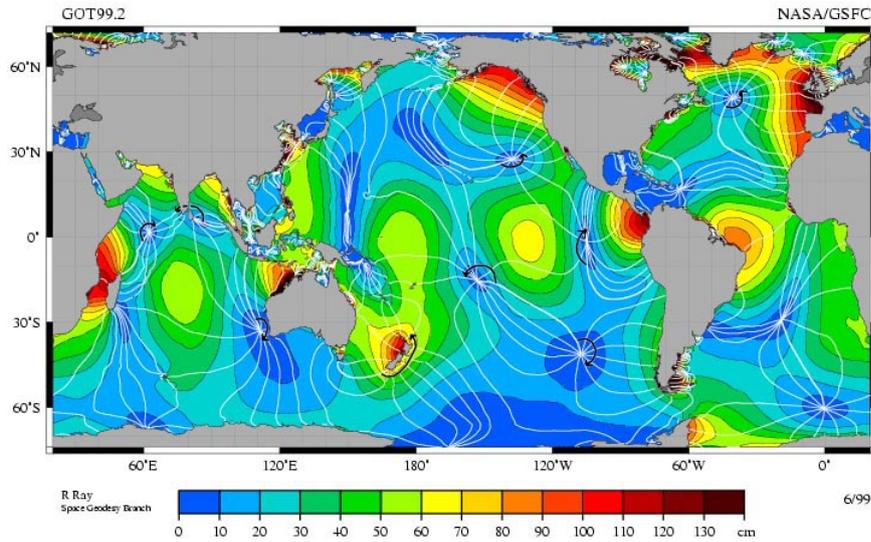
**Recursos provenientes del mar** Se compone de un conjunto de recursos provenientes de los mares y océanos. El mar tiene un gran potencial energético, que se manifiesta principalmente en las olas, las mareas, las corrientes y en la diferencia de temperatura entre la superficie y el fondo marino. Hay un caso en que es necesario la utilización de agua dulce, se trata de la generación por gradiente salino.

En algunos casos como las mareas y corrientes tienen gran capacidad de predicción, lo que da una gran ventaja a la hora de la utilización del recurso. La principal problemática para la utilización de los recursos que a continuación se verán, son el estado de madurez de la tecnología y el medio hostil en el que se encuentra el recurso, principalmente el hielo y los eventos extremos de tiempo severo.

### 5.3.1. Mareas y corrientes

La gran ventaja de este recurso es la predictibilidad y la no estacionalidad, se puede saber con alto grado de exactitud la disponibilidad del recurso con decenas de años de anticipación.

La Figura 5.11 ilustra las cargas de mareas y brinda una idea general del recurso.

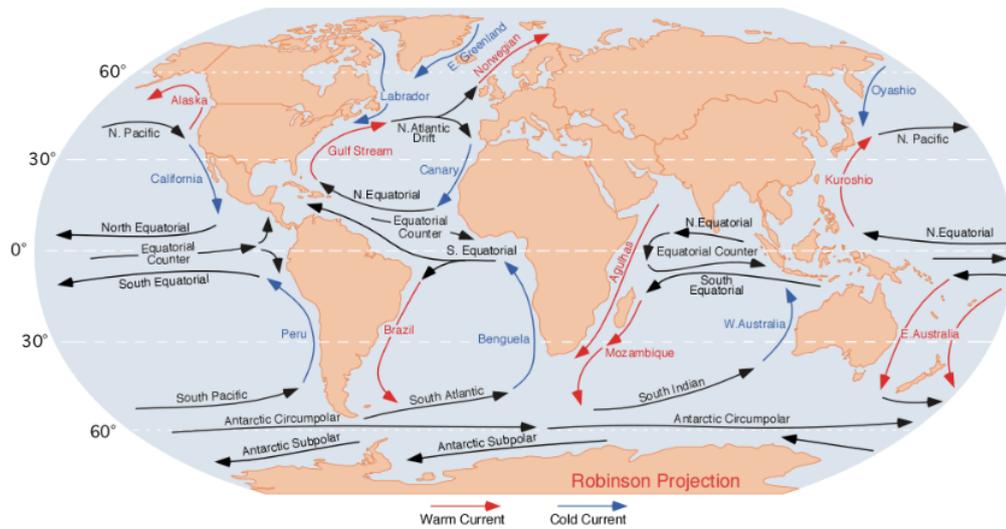


**Figura 5.11:** Carga de marea, desplazamiento vertical (cm), modelo GOT99.2[129]

Es importante comprender que muchos sitios pueden estar altamente influenciados por componentes como archipiélagos que combinados con la batimetría puedan llevar a un comportamiento específico favorable o no del fluido, generando así sitios en los cuales las mareas se ven potenciadas por estos aspectos.

En cuanto a las corrientes, existen dos tipos, las **superficiales** que llegan hasta unos 400 metros de profundidad, y las **profundas** que comprenden desde el límite de los 400 metros en adelante[10]. El estado tecnológico no permite extraer energía de las corrientes profundas, las experiencias que existen son con corrientes superficiales.

La Figura 5.12 presenta un mapamundi representando las corrientes superficiales.

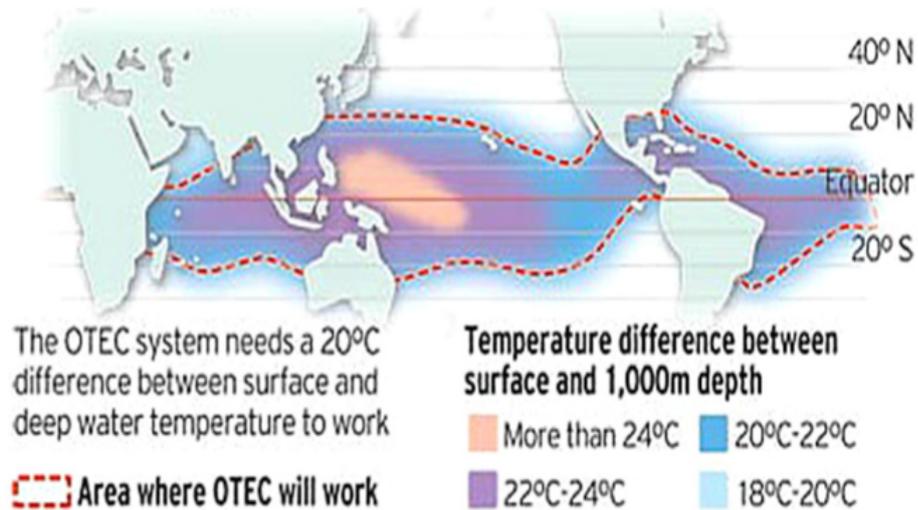


**Figura 5.12:** Principales sistemas de corrientes superficiales[35].

Se distinguen las corrientes Circumpolar y Subpolar Antárticas presentes en la zona de estudio.

### 5.3.2. Gradiente térmico

No se registran experiencias en su utilización en la zona de interés. En una primera aproximación, se destacan dos factores que influyen en la implementación de esta tecnología, primero, el estado de esta tecnología está en fase de desarrollo, segundo, la restricción que presenta este recurso en cuanto al gradiente térmico requerido para que sea viable es de  $20^{\circ}\text{C}$ , lo que limita su implementación a áreas que cumplen con este requerimiento[140]. La Figura 5.13 presenta la distribución del recurso, la referencia del gradiente es entre la superficie y a 1000 metros de profundidad.



**Figura 5.13:** Distribución mundial de temperatura del agua superficial, Fuente: INHABITAT & World Resources Institute[140].

En la Antártida se ha constatado la existencia de actividad geotérmica[23]. Esto propicia lugares atractivos para esta tecnología. Puntualmente, la Isla Decepción<sup>1</sup>, ubicada al norte de la península antártica (ver Figura 5.14), es de origen volcánico y presenta condiciones atractivas para el uso de esta tecnología.



**Figura 5.14:** Ubicación de la isla Decepción, mesoescala[76].

<sup>1</sup>Coordenadas de la Isla Decepción: -62,972829442 -60,6499974

Se trata de un cráter colapsado de un volcán activo en forma de herradura, según se ven en la Figura 5.15. Este cráter está formando un lago abierto al mar donde en poca distancia se presenta un gradiente térmico atractivo. Si bien las aguas del lago llamado "Port Foster" no encuentran gran diferencia térmica con el agua exterior, sí se encuentran pequeños lagos con temperaturas que rondan los 70°C[142], por lo que se podría pensar en puntos calientes de toma de agua readecuando esos sitios.

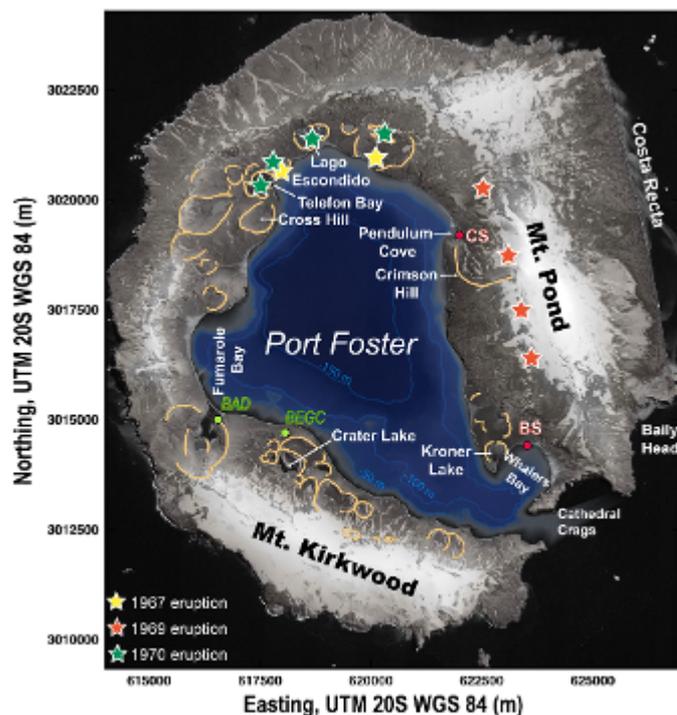


Figura 5.15: Isla Decepción, últimas erupciones en la isla[76].

Este fenómeno térmico singular genera un gradiente térmico, otorgando a la Isla Decepción un potencial importante para la explotación geotérmica.

### 5.3.3. Gradiente salino o Energía azul<sup>1</sup>.

La obtención de energía por gradiente salino, también llamada energía azul, se conoce desde 1954[156], las investigaciones sobre estas técnicas han avanzado lentamente desde aquel entonces. El recurso se basa en la energía disipada cuando dos soluciones con diferente salinidad se mezclan.

En las Figuras 5.16 y 5.17 se muestran esquemáticamente y mediante una foto,

<sup>1</sup>También conocida como Salinity Gradient Energy - SGE

los sitios donde se presentan los dos fluidos donde se alcanza un gradiente aprovechable energéticamente.



**Figura 5.16:** Esquema de confluencia de agua dulce y salada.

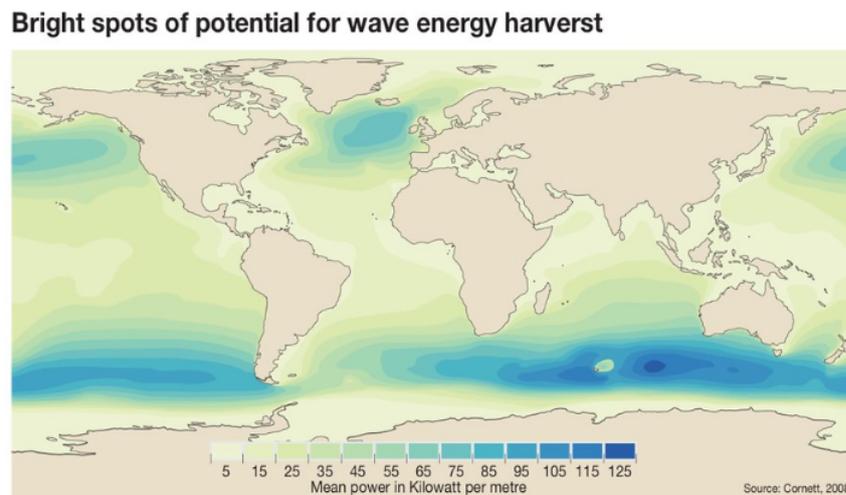


**Figura 5.17:** Desembocadura de río hacia el mar.

Si bien en altas latitudes el gradiente salino está presente en muchos sitios, está el reto del encontrar el recurso en su fase líquida en la zona de estudio.

### 5.3.4. Oleaje o Undimotriz.

El movimiento de las olas es una energía limpia, renovable, y con un gran potencial, ya que los océanos poseen una enorme energía de este tipo. Se estima en 2 TW el potencial técnicamente aprovechable a nivel global (Figura 5.18).



**Figura 5.18:** Recurso Undimotriz a nivel mundial[34].

Este recurso está disponible en sitios como la Antártida, pero la presencia de hielo hacen de su aprovechamiento algo muy dificultoso. En concreto, hay

estudios evaluativos realizados para la zona de estudio como[67], que confirman las dificultades presentadas.

## 5.4. Geotermia

En la Antártida, la geotermia es una fuente de energía potencialmente interesante debido a la actividad volcánica que se produce en la región. Sin embargo, a pesar de que se han identificado varios sistemas geotérmicos asociados con el vulcanismo[143, 158], su explotación está limitada por las condiciones establecidas en el tratado antártico[14] referentes a la necesidad de preservar la naturaleza del continente y mantener las condiciones ambientales.

En la Figura 5.19 se destacan una serie de volcanes, en particular de la zona del oeste Antártico.

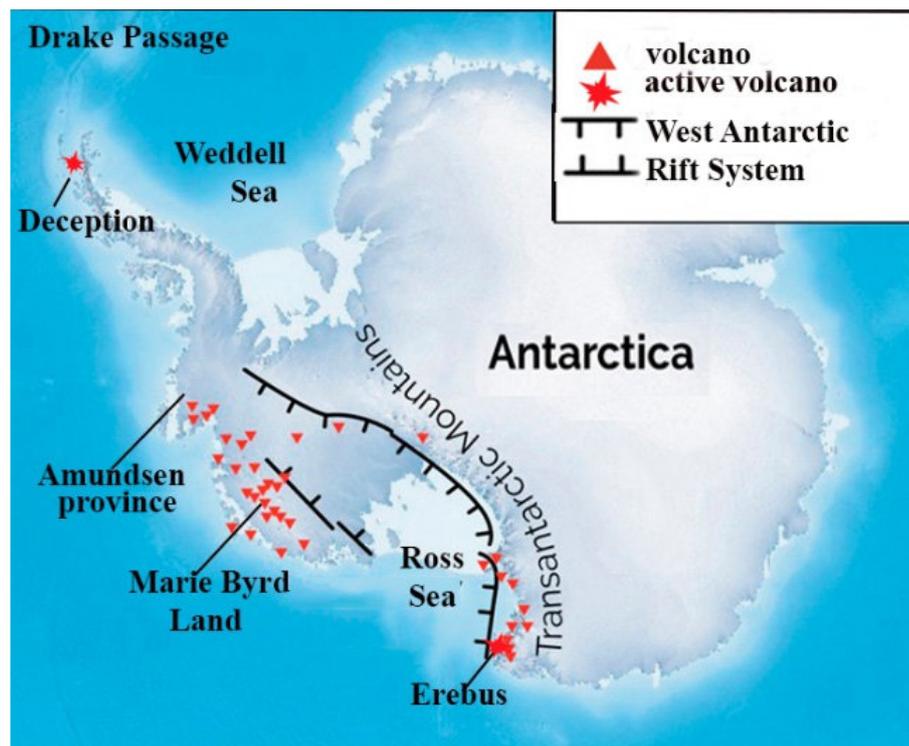
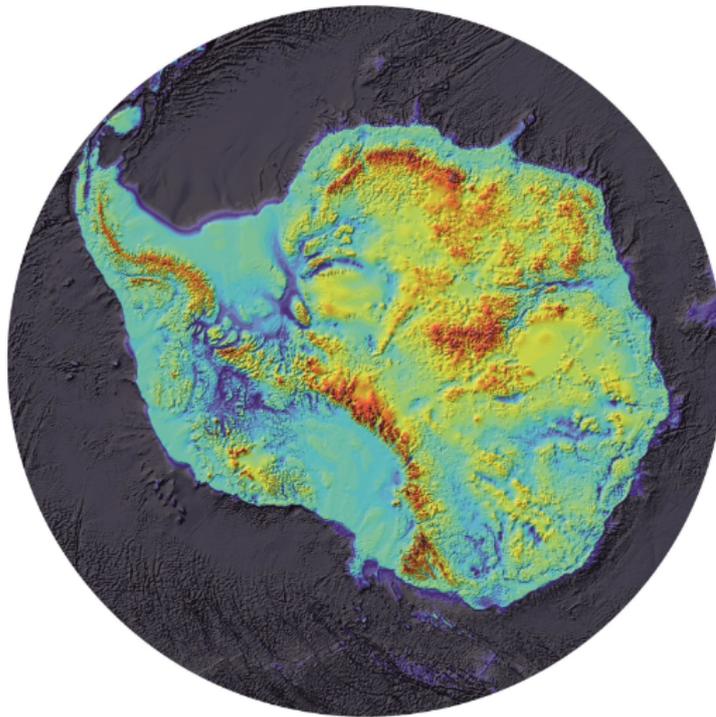


Figura 5.19: Mapa esquemático de volcanes en la Antártida Occidental[143].

De estos volcanes se destacan dos de ellos, considerados **activos**, el volcán Decepción (ver figura 5.15) en la isla del mismo nombre, encontrándose su cráter central a nivel del mar y cubierto de agua, el otro volcán activo es el

Erbus<sup>1</sup>, este es el más activo y el más alto del continente[141]. En total, hasta la fecha, se llevan identificados 138 volcanes en el continente Antártico[158], la mayoría de ellos bajo glaciares.

La identificación de estos volcanes se llevó adelante mediante la implementación del proyecto Bedmap2[58], Figura 5.20 que contribuyó a identificar 91 nuevos volcanes.



**Figura 5.20:** Mapa generado por Bedmap2 mostrando el continente Antártico libre de hielo.

De esta forma se confirma que el recurso está presente, aunque la explotación del mismo esté limitada por otras razones.

Hay que tener presente que también el recurso podría estar presente en muchos más sitios sin la presencia de volcanes.

En los casos puntuales donde hay actividad volcánica se puede pensar en la implementación de sistemas de alta entalpía, apuntando así a la generación de electricidad utilizando las altas temperaturas.

Sería también muy ventajoso utilizar este recurso como acondicionador térmico, en este caso no se precisarían temperaturas tan elevadas como las necesarias para la generación de energía.

<sup>1</sup>Coordenadas:-77.517787, 167.141039 HSNM:3794m

Debe considerarse que la geotermia de baja entalpía adquiere otro valor en estas latitudes, ya que considerando que teniendo por ejemplo una temperatura media anual de  $-10^{\circ}\text{C}$ , si se pudiera contar con aguas termales a  $30^{\circ}\text{C}$ , sería de un impacto energético muy grande bajo estas condiciones.

# Capítulo 6

## Tecnología

En este capítulo se verá cuál es el estado del arte de cada tecnología aplicada a cada uno de los recursos, y se hará un relevamiento de las mismas.

Se evaluará si dicho estado madurez de cada tecnología se adecua a las condiciones del sitio y se analizará si es viable la explotación en cada caso.

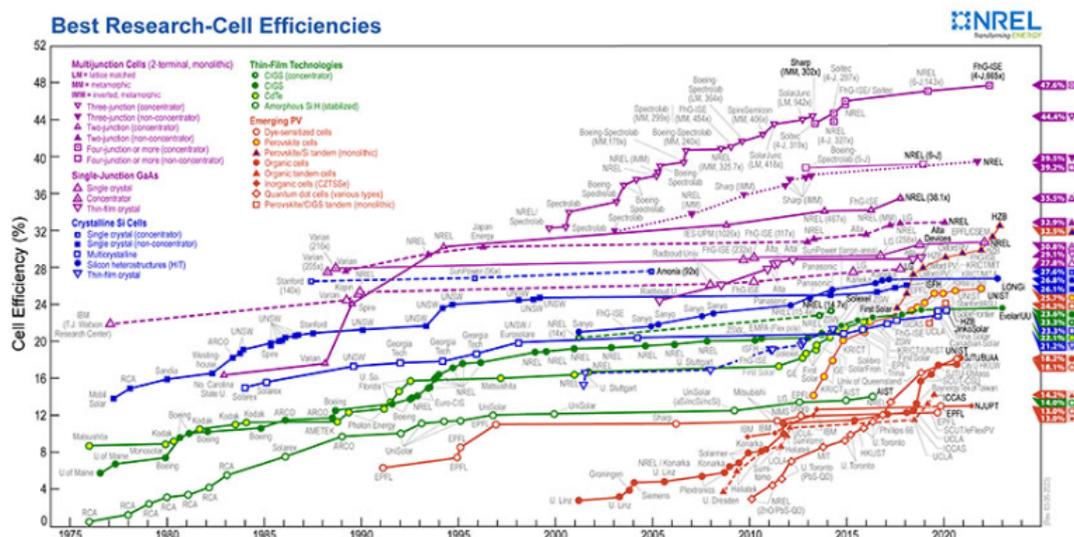
Diversos desafíos se presentan en el uso de renovables, acentuándose más en latitudes altas donde el desafío de las condiciones climáticas se le suman el ya conocido del almacenamiento de energía para su uso en momentos de ausencia de recurso. Para abordar estos desafíos, se han propuesto diversas soluciones, como el uso de baterías de iones de litio, sistemas de almacenamiento térmico y sistemas híbridos de energía renovable.

Para comprender cómo y qué tipo de tecnología es aplicable se torna imprescindible conocer la experiencia pasada y caracterización del sitio, contemplando, evaluar los recursos y sus características, las cuales van a definir los dispositivos a utilizar. Al momento, 29 bases Antárticas cuentan sistemas de energías renovables en sus sistemas energéticos, pero solo una estación permanente y cuatro de verano usan energías renovables para satisfacer más del 50 % de sus necesidades energéticas[96].

### 6.1. Sistemas Solares, Fotovoltaicos y Térmicos

El estado del arte de esta tecnología se presenta maduro, ofreciendo diversas tecnologías de módulos que gradualmente aumentan la eficiencia de conversión de energía.

La Tabla 6.1 presenta los avances para una variedad de tecnologías de celdas solares elaborado por NREL<sup>1</sup>.



**Tabla 6.1:** Gráfico de eficiencia de células de investigación más altas confirmadas para tecnologías fotovoltaicas desde 1976 hasta el presente [16].

La explotación de energía fotovoltaica se ha extendido a las zonas geográficas más diversas en los últimos años, incluyendo el norte de Europa y en bases científicas antárticas.

Los sistemas fotovoltaicos deben soportar duras condiciones ambientales tales como humedad, temperatura, acumulación de nieve e intensos vientos que demandan especial atención al momento del diseño.

Todos estos aspectos han sido superados, incluso la condición de las bajas temperaturas se ve como un aspecto positivo. Los efectos de la temperatura son el resultado de una condición inherente de las celdas solares y sus características eléctricas.

Tienden a producir más energía a medida que baja la temperatura y, a la inversa, la energía generada disminuye a altas temperaturas, siendo este aspecto el que más contribuye a las pérdidas en latitudes medias y ecuatoriales<sup>2</sup>.

Las pérdidas por temperatura representa una fracción considerable en los generadores fotovoltaicos.

<sup>1</sup>National Renewable Energy Laboratory

<sup>2</sup>Teniendo en cuenta condiciones STC: Irradiancia de 1000 W/m<sup>2</sup>; Temperatura de la celda: 25°C; Masa de aire de 1.5.

La Figura 6.1 muestra los diferentes coeficientes de temperatura para las diferentes tecnologías, esto permite estimar como será afectada la generación de acuerdo a la climatología local.

<b>Tipo</b>	<b>Coefficiente de Temperatura %/°C</b>
<b>Monocristalino – Si</b>	-0,4 a -0,5
<b>Policristalino – Si</b>	-0,4 a -0,5
<b>Si amorfo (a-Si)</b>	-0,35 a -0,38
<b>CIGS</b>	-0,32 a -0,36
<b>CdTe</b>	-0,25

**Figura 6.1:** Coeficientes de temperatura según tecnología[86]

Complementariamente, el PR<sup>1</sup> es una de las mejores métricas de rendimiento utilizadas para evaluar el rendimiento de la planta de energía solar. Este indicador se utiliza para evaluar diferentes condiciones climáticas o estacionales.

Es posible demostrar las diferencias de PR entre condiciones STC<sup>2</sup> y diferentes condiciones climáticas[66] implementando la norma IEC 61724-1:2017[1] que establece pautas para definir el rendimiento del sistema fotovoltaico.

Como se vio en el Capítulo 5.1, la otra condición a ser tenida en cuenta es la ausencia y la intermitencia del recurso. La ausencia es completa durante un período aproximado a los seis meses<sup>3</sup>, dependiendo de la latitud, mientras que la intermitencia se debe principalmente a la nubosidad, que al ser un componente estocástico es difícil de predecir.

### 6.1.1. Antecedentes

En la actualidad hay más de 13 bases antárticas que cuentan con sistemas fotovoltaicos. En ocho de ellas, los sistemas se encuentran instalados en estaciones de campaña de verano y cubren parte considerable del consumo. En dos de estos casos, Tor<sup>1</sup> y Wasa cubren un 100% de la demanda. Estas son

<sup>1</sup>Índice de Rendimiento o Performance Ratio

<sup>2</sup>Standard Test Conditions

<sup>3</sup>Seis meses en Latitud -90 y va cambiando a medida que el observador se aproxima a la latitud de -66°, en este punto deja de haber noches de 24 horas.

<sup>1</sup>Coordenadas: -71.8888, -5.1583. Altura 1625 m

estaciones de muy pequeño porte, con escasas necesidades y menos de 5 personas habitando en verano. A continuación se presenta uno de los casos más paradigmáticos.

**Estación Princess Elisabeth Antártica<sup>1</sup> (Bélgica)[149]:-71,949944°, 23,347079°, -Altitud 1397 metros, Distancia de la costa: 220 km:**

Con fines de investigación científica, fue inaugurada en febrero de 2009. La base fue construida como resultado de una colaboración entre el gobierno belga y la Fundación Polar Internacional[8] (IPF)<sup>2</sup>(ver imagen 6.2).



**Figura 6.2:** Vista general de base PEA[paj 8, 57].

Desde el punto de vista energético, la base se destaca por su enfoque en la sostenibilidad y la utilización de fuentes de energía renovable.

Fue diseñada con un enfoque de "base de energía neutra en carbono".

El arreglo general de la base tiene varios puntos a tener en cuenta:

- Se mantiene operativa todo el año.
- Está habitada en los meses de verano desde principios de Noviembre a finales de Febrero con una ocupación de 15 a un máximo de 50 personas, en los meses de invierno la base está deshabitada<sup>3</sup>.
- Es autosustentable energéticamente.

---

<sup>1</sup>PEA

<sup>2</sup>Ambas entidades colaboran estrechamente para operar y mantener la estación, así como para promover la investigación científica en la Antártida.

<sup>3</sup>Es controlada y monitoreada remotamente.

- Cuenta con generadores diesel de respaldo energético, está planeado reemplazarlo por una celda de combustible de hidrógeno.
- Posee banco de baterías
- El diseño de las edificaciones es altamente eficiente térmicamente, el módulo de laboratorio no posee sistema de calefacción, le es suficiente con la temperatura que desprenden los equipos allí instalados. En el módulo de viviendas se climatiza con calefactores de agua.
- Aspectos a mejorar, el transporte desde la costa hasta la base y las expediciones científicas se realiza con vehículos a combustión interna<sup>1</sup> y alcanzar la invernada<sup>2</sup> de forma autónoma.

Las principales fuentes de energía utilizada en la base es la energía **solar** y **eólica**. La energía solar explota el aspecto térmico para generar agua líquida para consumo, calefacción y servicios, como así también explota la variante fotovoltaica para la generación eléctrica.

La energía eólica se utiliza para la generación de energía eléctrica.

El **almacenamiento energético** instalado se integra por baterías de 192Pb-acid OPzV 2v 1140Ah cells, con una capacidad Total de 438 *kWh*.

Se espera una vida útil del banco de baterías de unos 10 años[50].

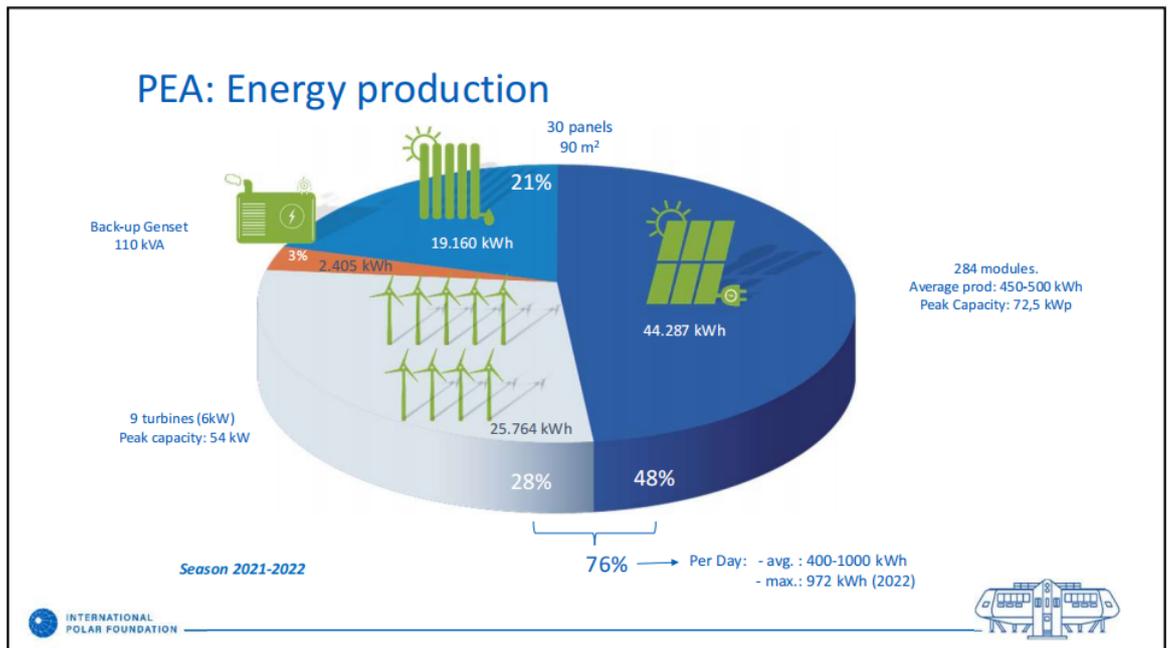
La característica principal que permite ser una estación de **cero emisiones**, es su Micro Smart Grid, un sistema basado en la gestión de Energía de Demanda. La red es de tres fases a 400 V contando con múltiples inversores para la transformación de energía eléctrica DC/AC.

En la Figura 6.4 se ve que el aporte de energía solar fotovoltaica es el más importante cuando la base está operativa, siendo seguida por la eólica y solar térmica, mientras que la potencia brindada por el generador remite a pruebas y mantenimiento.

---

<sup>1</sup>El transporte local se realiza con vehículos eléctricos

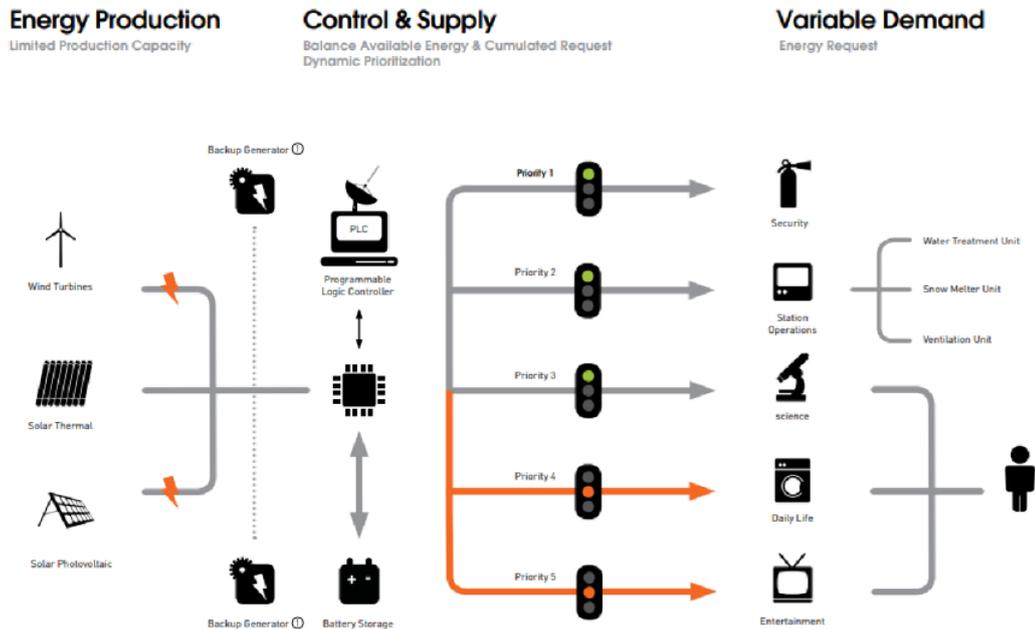
<sup>2</sup>Hacer que la estación sea habitable y operacional todo el año.



**Figura 6.3:** Producción de energía por fuentes en PEA, solo en el período Noviembre-Febrero, cuando la base está habitada [pag 28, 68].

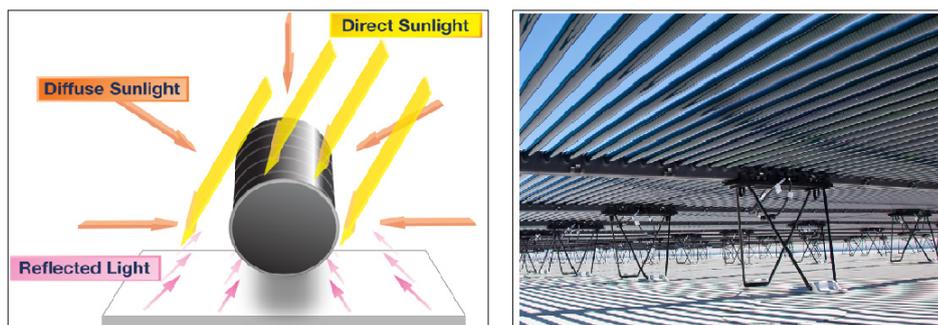
Esta avanzada red energética autónoma fue desarrollada en colaboración con GDF Suez (Laborelec)[144] y Schneider Electric[41].

En la Figura 6.4 se muestra esquemáticamente la estructura de la Smart Grid con los componentes de sus tres principales subsistemas, **Producción de energía, Control y Demanda.**



**Figura 6.4:** Esquema de la Smart Grid de la base Princess Elisabeth[pg 13, 57].

**Solar fotovoltaica** Inicialmente la estación contaba con 12 módulos tubulares (ver Figura 6.7[148]) con el objetivo de minimizar la acumulación de nieve y los posibles problemas ocasionados por las fuerzas del viento. En la práctica este modelo no cumplió las expectativas, las partículas de nieve y el viento provocaron el deterioro de los módulos y se dejaron de utilizar[50].



**Figura 6.5:** Módulos fotovoltaicos presentan un diseño tubular utilizado antiguamente[50, 148].

Actualmente, la base cuenta con 284 módulos fotovoltaicos instalados en varias orientaciones. Muchos de los de ellos están vinculados solidariamente a las estructuras, mientras que otros tienen un sistema de montaje especial, ver Figura 6.7.

Estos módulos son similares a convencionales utilizados en latitudes medias. Inicialmente, se instalaron del tipo policristalinos, siendo monocristalinos los instalados en las últimas temporadas.



**Figura 6.6:** Instalación actual de módulos fotovoltaicos, en estructuras propias y aprovechando paredes de edificación[38].

De los 284 módulos 96 son bifaciales, diseñados para explotar el albedo proveniente de la nieve y el hielo, de esta manera una porción mayor de la energía incidente en superficie, en la Figura 6.7 se muestra el proceso de instalación.



**Figura 6.7:** Instalación de módulos bifaciales, favorece la captación del albedo[50].

## Solar térmica

La base cuenta con 30 paneles solares térmicos de dos modelos, planos negros y tubulares (ver Figura 6.8). Esto permite concentrar el calor del sol y utilizar el agua para diferentes fines como calefacción, servicios y consumo<sup>1</sup>.

El sistema térmico queda fuera de servicio en los meses de invierno cuando la estación está deshabitada.



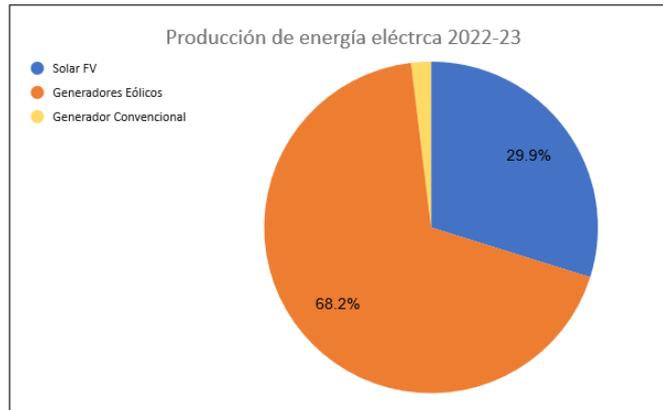
**Figura 6.8:** Instalación de módulos solares térmicos[pg 8, 57].

### **Producción de energía y energía eléctrica por fuente**

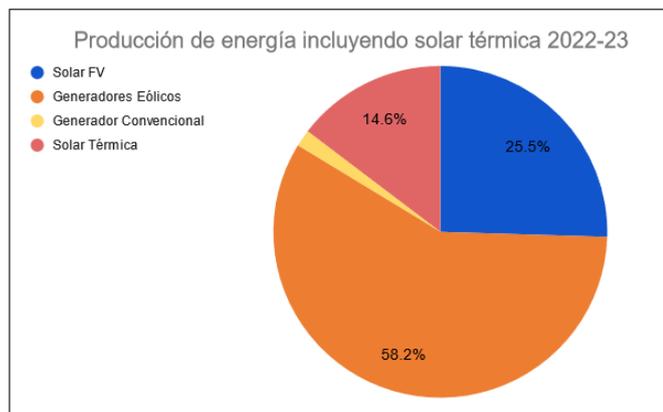
Como resultado de la combinación de estos componentes de generación energética, incluyendo la energía eólica mencionada en la sección 6.2.4.3, y tras analizar los datos disponibles, se obtienen los resultados presentados en las gráficas mostradas en las siguientes figuras. La Figura 6.9, representa la generación de energía eléctrica. La gráfica presentada en la Figura 6.10 muestra la producción de energía, incluyendo la energía solar térmica.

---

<sup>1</sup>Para que el agua sea apta para el consumo humano debe pasar por un proceso de mineralización



**Figura 6.9:** Producción de energía eléctrica por fuente para verano, Noviembre 2022 a Marzo 2023. Datos brindados por[50], elaboración propia.



**Figura 6.10:** Producción de energía por fuente, **incluyendo solar térmica**, para verano, Noviembre 2022 a Marzo 2023. Datos brindados por[50], elaboración propia.

## 6.2. Sistemas Eólicos

Los aerogeneradores son una forma práctica de convertir la energía cinética de las partículas de aire en movimiento en energía mecánica o, aun de más utilidad, en energía eléctrica.

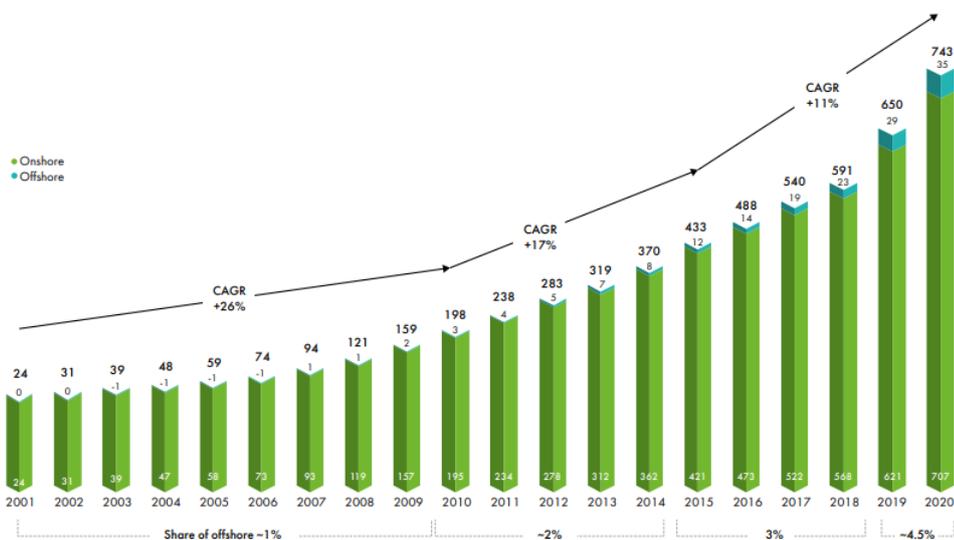
Son clasificados en dos categorías de acuerdo con la dirección de su eje de rotación:

- Turbinas de eje horizontal HAWT<sup>1</sup>, la cual es el tipo más extendido de turbinas eólicas.

<sup>1</sup>Horizontal Axis Wind Turbines

- Turbinas de eje vertical VAWT<sup>1</sup> que aún no han tenido los años de desarrollo que tuvieron los HAWT's.

El aprovechamiento del recurso Eólico, mediante la implementación de aerogeneradores, es una tecnología probada, madura y prometedora, capaz de proveer una porción significativa de los requerimientos energéticos para muchas regiones del mundo. En los últimos años, ha aumentado la potencia instalada como muestra la Figura 6.11.

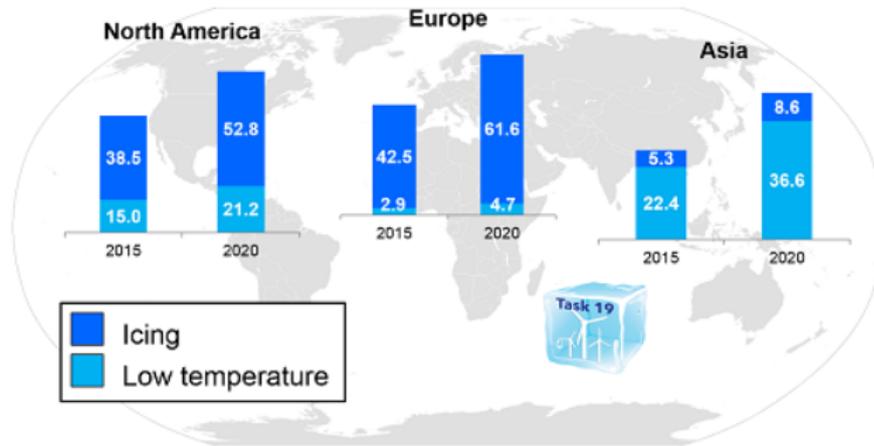


**Figura 6.11:** Evolución de tasa de crecimiento anual de instalaciones de sistemas eólicos, onshore y offshore[36].

De esta manera se ha llegado a un desarrollo de la tecnología donde lentamente van ganando terreno en instalaciones offshore. El desarrollo exitoso de esta tecnología impulsó una rama de la misma a la especialización de la misma en **climas fríos**<sup>2</sup>. La presencia del recurso en **climas fríos** impulsó el desarrollo de la tecnología para estos entornos, así se refleja en la Figura 6.12 donde se muestra la evolución del mercado eólico para **climas fríos**.

<sup>1</sup>Vertical Axis Wind Turbines

<sup>2</sup>Cold Climate (CC), concepto explicado a continuación en sección 6.2.2.



**Figura 6.12:** Mercado de generadores eólicos en el período 2015-2020, GW[30].

### 6.2.1. Enfoque internacional, TCP Wind Task 19<sup>1</sup>

El grupo TCP Wind se conformó por auspicio de la IEA y comenzó a trabajar desde el año 2002. De esta manera se integró el TCP Wind dentro del denominado “Task 19” bajo el nombre de “IEA Wind TCP Recommended Practice 13 2nd Edition: Wind Energy in Cold Climates” [17] que recopila y proporciona información sobre la energía eólica en **climas fríos**.

Este grupo ha permitido a la comunidad internacional investigar, evaluar, identificar y superar los desafíos que las condiciones extremas en altas latitudes plantean para la operativa de aerogeneradores.

Siendo el objetivo del Task 19 mejorar el despliegue a gran escala de la energía eólica en climas fríos de una manera segura y económicamente viable.

Este es el esfuerzo más importante que hay en la actualidad para introducir definitivamente la generación eólica en climas fríos. Los fabricantes toman los resultados de estos trabajos y los utilizan para categorizar sus productos.

Muchos de los conceptos que se utilizan en este trabajo están referidos al TCP Task 19 y son oportunamente referenciados.

### 6.2.2. Conceptos, clasificaciones climáticas y de sitios específicos para Energía Eólica

Para entender las clasificaciones de generadores eólicos es importante integrar estos conceptos.

<sup>1</sup>Technology Collaboration Programme.

## Definición de Cold Climate o Clima Frío (CC)<sup>1</sup>

Este concepto refiere a regiones que experimentan frecuente congelación atmosférica o periodos con temperaturas por debajo de los límites operacionales estándares establecidos en la IEC 61400-1 ed3[74], para aerogeneradores.

Las condiciones de CC tienen dos variantes como son **LTC** y **IC** que se presentan a más adelante. Condiciones CC impactan directamente en la implementación de proyectos, elección de dispositivos, performance productiva, balance económico y seguridad.

### Low Temperature Climate, (LTC)

Describe áreas con períodos de temperatura debajo de los límites operacionales estándar.

Esta clasificación es común en regiones polares, el área que abarca este trabajo, sin embargo, también se pueden ubicar en áreas de gran elevación, en las latitudes medias. La mayoría de las regiones que experimentan temperaturas muy bajas también se encuentran lejos de las costas, o a lo largo de las costas que se congelan durante el invierno, como es el caso de los casquetes polares. LTC conduce a los siguientes efectos en un proyecto de energía eólica:

- Los materiales utilizados en turbinas y componentes pueden verse afectados por las bajas temperaturas.
- La alta densidad del aire conduce a densidades de energía más altas, esto debe considerarse en el control del aerogenerador.
- El trabajo de mantenimiento a bajas temperaturas consume más tiempo y es más peligroso.
- El arranque en frío de una turbina eólica puede ser más difícil a bajas temperaturas.
- Los aceites y lubricantes pueden perder las propiedades que presentan en un clima amigable, como la viscosidad.
- El calentamiento de los componentes para garantizar un buen funcionamiento aumenta el uso de energía interna de los parques eólicos, redu-

---

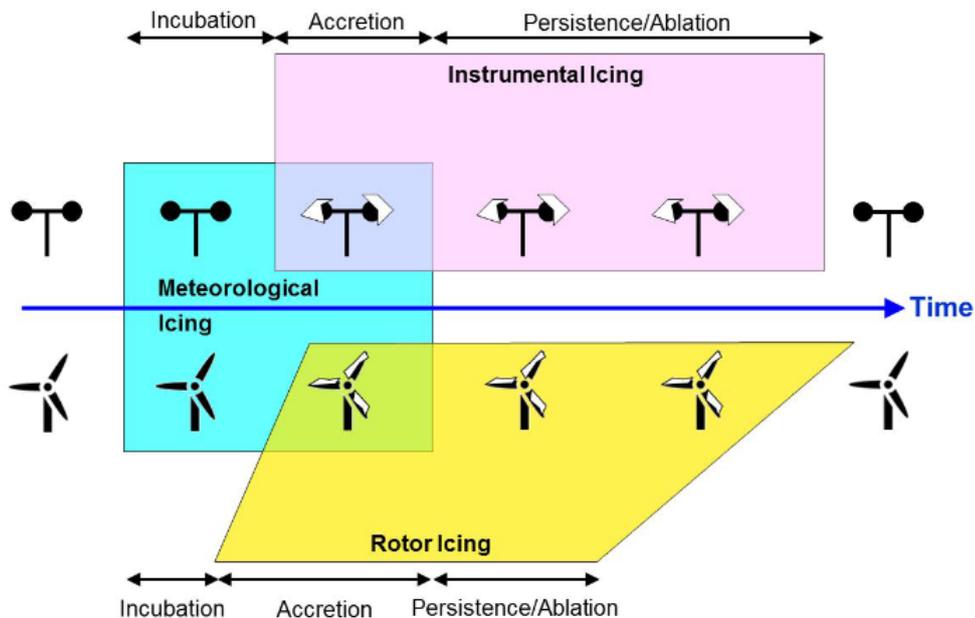
<sup>1</sup>Note que CC abarca los siguientes conceptos LTC e IC, ver Figura 6.14.

ciendo la energía que puede proporcionar a la red, esto dependerá del tipo de sistema de calefacción si lo hubiera.

### Icing Climate (IC)

Describe las regiones con “atmospheric icing” o formación de hielo atmosférico. IC se define como el período de tiempo en que las condiciones atmosféricas están presentes para la acumulación de hielo o nieve en estructuras que están expuestas a la atmósfera.

La Figura 6.13 describe definiciones específicas para las aplicaciones de energía eólica. Como se aprecia, se pueden superponer varias condiciones para un mismo sitio, lo que incrementa la dificultad de implementación.



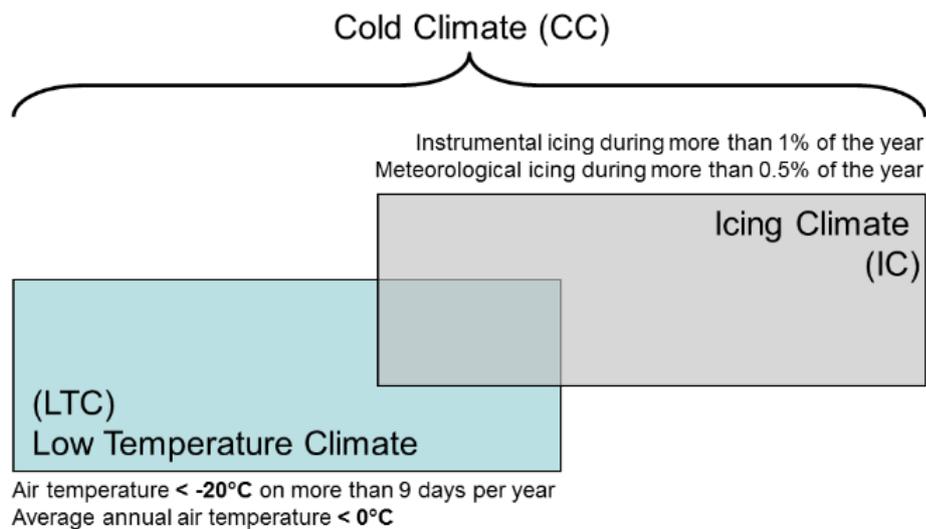
**Figura 6.13:** Definición de IC y sus variantes, meteorological Icing, Instrumental Icing, Rotor Icing, Incubation, Accretion, Persistence, and Ablation[18].

En general, los diferentes tipos de formación de hielo atmosférico que afectan el funcionamiento de turbinas eólicas se encuentran presentes en las nubes de glaseado (hielo o glaseado) y precipitación glaseada (lluvia helada o llovizna, nieve húmeda).

Por lo tanto, los generadores pueden estar, o bien, expuestos solamente a condiciones IC o LTC, o bien se pueden dar **ambas** condiciones simultáneamente. Esta superposición se da de manera tal que se debe tener en cuenta una variedad de elementos para comprender a qué categoría corresponde un sitio. Más

adelante, en este trabajo se describe la categorización que contemplan características climatológicas en períodos de tiempo anuales.

De este modo, un sitio puede cumplir con las condiciones LTC o IC, o ambas, como muestra la Figura 6.14, pero en todos los casos su clasificación es de **Cold Climate**.



**Figura 6.14:** Definición de Cold Climate, Low Temperature Climate y Icing Climate[18].

Se especifica que para que se cumpla con la condición de **CC** deben darse una de estas condiciones:

- Para los sitios **LTC**, deben observarse temperaturas mínimas inferiores a -20°C a largo plazo, preferiblemente **diez o más años de muestreo**, en un promedio de más de nueve días al año<sup>1</sup> o que la temperatura media anual del aire a largo plazo sea inferior a los 0°C.
- Para los sitios **IC** debe cumplirse instrumental icing sea >1 % al año o meteorological icing >0,5 % al año.

Estas condiciones de una u otra forma parecen lógicas que se cumplan en altas latitudes, aunque en cada caso se requieren datos estadísticos que avalen la

<sup>1</sup>El criterio de nueve días se cumple si la temperatura en el sitio permanece por debajo de -20°C durante una hora o más en los días respectivos.

teoría.

### Clasificación de sitios según las condiciones.

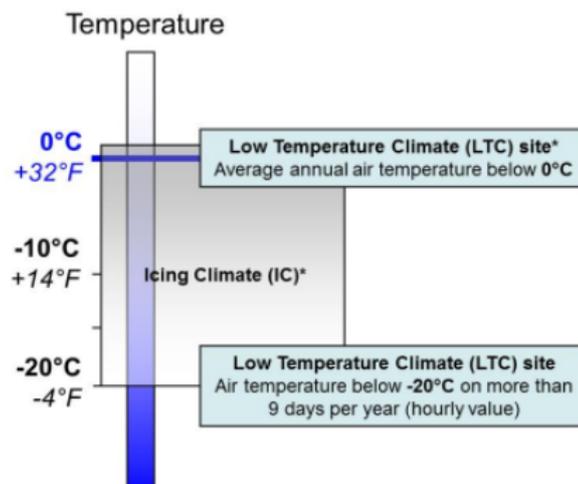
En primera instancia, al desarrollar un proyecto de energía eólica para un sitio potencial de CC es necesario definir si se trata de un sitio de clima LTC, de formación de hielo IC o ambos.

Si el sitio corresponde a la categoría IC, existe una necesidad adicional de definir la clase de hielo de la IEA para este sitio específico.

La Figura 6.15 muestra la posición de los sitios LTC e IC con respecto a la temperatura ambiente.

Las siguientes definiciones se aplican a un sitio LTC:

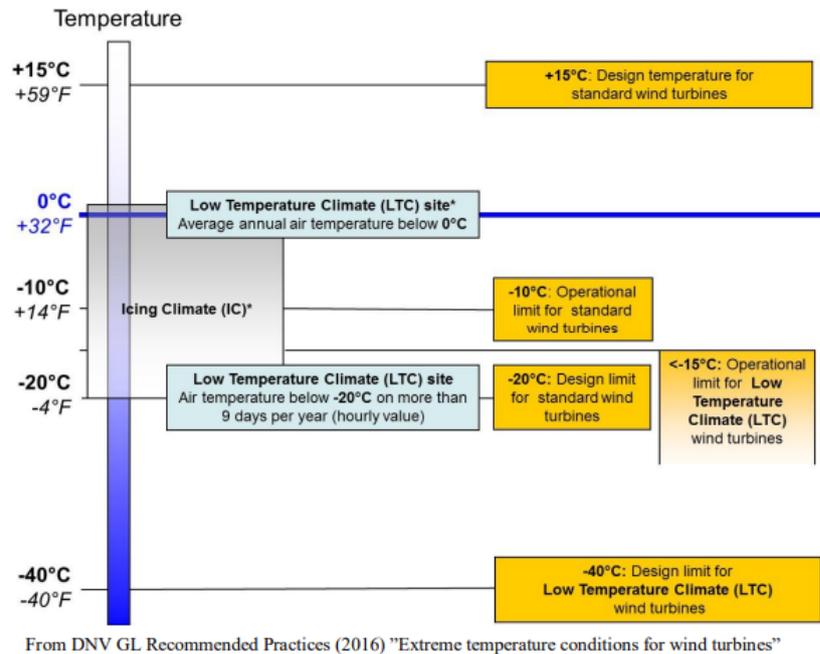
- Si se han observado temperaturas mínimas por debajo de  $-20^{\circ}\text{C}$  durante períodos prolongados mediciones (preferiblemente diez años o más) en un promedio de más de nueve días al año, el sitio se define como un sitio **LTC**. El criterio de los nueve días se cumple si la temperatura en el sitio permanece por debajo de  $-20^{\circ}\text{C}$  durante una hora o más en los días respectivos.
- Si la temperatura media anual del aire a largo plazo del sitio es inferior a  $0^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 6.15:** Definición de LTC e IC en función a la temperatura ambiente[18].

Las bajas temperaturas y la formación de hielo en la atmósfera plantean desafíos adicionales para los generadores eólicos en comparación con las condiciones en los sitios estándar. Por lo tanto, se recomiendan tecnologías especiales

para sitios **CC**. Las recomendaciones incluyen: materiales que puedan soportar bajas temperaturas, sistemas de control y procedimientos adaptados al funcionamiento a baja temperatura y protección contra hielo en las palas del rotor. La Figura 6.16 ilustra cuándo se pueden necesitar adaptaciones de **CC** para turbinas eólicas.



**Figura 6.16:** Condiciones **LTC** y **CC** con respecto a temperatura ambiente y diseño de aerogeneradores[18].

### Clasificación IEA Ice

Esta clasificación fue elaborada específicamente para generación eólica, con la colaboración de diversas instituciones posee tanto el detalle de la clasificación como diversas recomendaciones.[18]

Existe la posibilidad de que un sitio se pueda identificar hasta en dos o tres categorías, dependiendo de si se utiliza como entrada la formación de hielo meteorológico, la formación de hielo instrumental o la pérdida de hielo.

También pueden producirse variaciones en función de la instrumentación utilizada y el período de medición escogido. En caso de que estas variaciones ocurran, se recomienda utilizar la clase más alta de las opciones.

En la Figura 6.17 muestra las clases y los diferentes niveles de condiciones.

IEA ice class	Duration of Meteorological icing [% of year]	Duration of Instrumental icing [% of year]	Production loss [% of AEP]	WIceAtlas icing frequency (public version)
5	>10	>20	>20	Modetate to high
4	5-10	10-30	10-25	Modetate to high
3	3-5	6-15	3-12	Modetate to high
2	0.5-3	1-9	0.5-5	Intermediate
1	0-0.5	<1.5	0-0.5	Low

**Figura 6.17:** Clasificación de IEA para aerogeneradores en CC[19].

Como resultado de este trabajo se cuenta con calificación climática específica para **climas fríos**:

#### **Tecnología para sistemas de energía eólica en climas fríos**

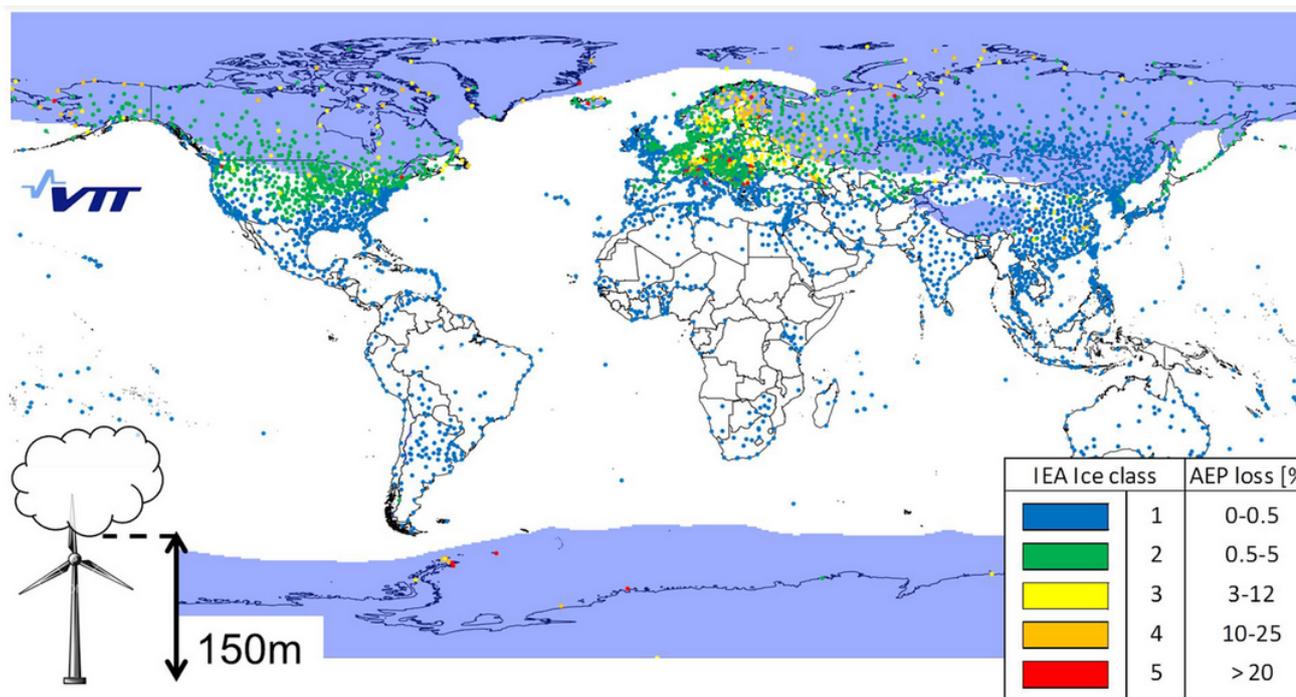
Actualmente, existen fabricantes en el mercado que ofrecen turbinas eólicas para LTC, típicamente se llaman paquetes para Cold Climate. Estos paquetes ofrecen las siguientes modificaciones e ítems, de todas maneras, estas pueden variar de acuerdo al fabricante.

- Materiales y componentes adaptados a bajas temperaturas, utilizando aleaciones especiales, elastómeros en lugar de goma estándar.
- Los procesos de soldadura son completados especialmente con flujos de baja temperatura.
- Lubricantes (aceites y grasas) y fluidos hidráulicos especiales para baja temperatura.
- Sistema de calefacción de componentes, caja de cambios, generador, control de direccionamiento del generador y aspas, convertidores y transformadores.
- Sistemas de enfriamiento operacionales en bajas temperaturas para evitar congelamiento en condensadores y demás sistemas.
- Sistema de control diseñado para bajas temperaturas como recalentamiento de sistemas y subsistemas para arranque en frío y después de caída de conexión a red.
- Sistema apropiado (sensores con sistema de calefacción) de mediciones de parámetros climáticos y de sistemas. También se sugieren sensores que

no están incluidos típicamente por defecto, como pueden ser sensores para control del estado de la estructura son recomendados.

- Barquilla calefaccionada para permitir una razonablemente comfortable área de trabajo durante el mantenimiento.
- Sistema de detección de hielo por seguridad del personal e infraestructura, como desbalance o daño de la turbina, también es posible que se dé "ice throw"<sup>1</sup>.

En el trabajo realizado por VTT<sup>2</sup> que se aprecia en la Figura 6.18 se pueden ver los conceptos inducidos anteriormente, incluye material de interés como "Global Low temperature map", "Global Icing map", "Wind Power Icing Atlas (WiceAtlas)" e "Interannual variation of icing".



**Figura 6.18:** Mapa de Global icing y temperaturas bajas en azul mapa en Pages - Wind Power Icing Atlas – WiceAtlas (vtt.fi)(WTT, n.d.)[162].

Adicionalmente, se trabaja en la norma IEC 61400-15 ed1[73], donde un grupo de trabajo está desarrollando un estándar IEC para la evaluación de recursos eólicos, análisis de rendimiento energético, adecuación del sitio

<sup>1</sup>Desprendimiento de hielo.

<sup>2</sup>Technical Research Centre of Finland Ltd.

y estimación de entrada, donde las instalaciones en **CC** están contempladas. Adicionalmente, se trabajan en las secciones 15-1 y 15-2 de esta norma:

- IEC 61400-15-1 ED1 Sistemas de generación de energía eólica - Parte 15-1: Condiciones de entrada de idoneidad del sitio para plantas de energía eólica.
- IEC 61400-15-2 ED1 Sistemas de generación de energía eólica - Parte 15-2: Marco para la evaluación y presentación de informes del recurso eólico y el rendimiento energético.

### **6.2.3. Consideraciones especiales de instalación y funcionamiento en condiciones planteadas**

El estudio aerodinámico de estos equipos tiene muchos enfoques posibles, dependiendo de la geometría en particular, dimensiones, y en este caso en concreto el peligro de congelamiento y eventos extremos.

Las condiciones para la instalación de generadores no son triviales, sobre todo por las condiciones climáticas descritas anteriormente. Se plantean condiciones extremas de trabajo que requieren una adaptación de la tecnología al medio para así contar con sistemas confiables y robustos.

En particular, la utilización de la energía eólica en áreas de clima frío **CC** está creciendo rápidamente.

El hecho de que países del norte de Europa estén enmarcados dentro de estas condiciones, sumado a la presencia del recurso, impulsan a la comunidad internacional a encontrar soluciones a para adaptar sistemas a estas condiciones.

Los sitios **CC** se están volviendo más atractivos debido a las altas velocidades del viento, la elevada densidad del aire como resultado de las bajas temperaturas y la baja densidad de población.

Sin embargo, las condiciones de **CC** presentan desafíos adicionales para los proyectos de energía eólica como la acumulación de hielo en las palas del rotor e instrumentos, exigiendo soluciones especializadas en materiales, lubricantes y procedimientos de arranque en frío.

La formación de hielo en las palas cambia la aerodinámica, reduce la producción de energía y potencialmente la vida útil de la turbina, lo que podría afectar la eficiencia y la rentabilidad del proyecto. Además, las palas congeladas redundan en pérdida de sustentación, aumentan las emisiones de ruido

y generan lanzamiento de hielo, lo que plantea problemas ambientales y de seguridad para los trabajadores del proyecto y los residentes locales.

Para resolver algunos de los principales desafíos de **CC**, la Agencia Internacional de Energía (IEA) estableció un grupo de trabajo, que se detalla en la sección 6.2.1 IEA Wind Task 19, que ha estado recopilando y coordinando prácticas recomendadas sobre generadores de energía eólica en **CC**.

#### 6.2.4. Antecedentes

Hay un historial de antecedentes con resultados dispares, los cuales se describen a continuación. Esta reseña de experiencias permite tener una visión de los éxitos y fracasos de sistemas instalados y probados empíricamente.

##### 6.2.4.1. Estación Mawson (Australia)[149], localización: -67,6027, 62,8730:

Dos turbinas eólicas de tamaño comercial se pusieron en funcionamiento desde 2002-2003, lo que resultó en ahorros de combustible de alrededor del 30 % por año. Esto constituyó el primer intento serio de cualquier nación de utilizar la generación de energía eólica en la Antártida, a gran escala, para reducir el uso de diesel.

Se pensó como la primera de tres turbinas a ser instaladas, apuntando a proporcionar el 100 % de la energía hasta el 70 % del tiempo.

En este caso, los fabricantes trabajaron en desarrollar la primera turbina y sistema de control para **CC**.

Las turbinas fueron fabricadas por la empresa Enercon[44], modelo E-30[45], con una potencia nominal de 300 *kW*, una altura de 34 *metros* con un diámetro de pala de alrededor de 27 *metros*.

Este dispositivo fue modificado para funcionar en las duras condiciones, destacando las siguientes características:

- Acero de baja temperatura utilizado en todas las secciones de torres, piezas fundidas y componentes estructurales
- La torre, de 34 *metros* de altura, es menos elevada de lo normal debido a los fuertes vientos y las restricciones de la grúa.
- Modificaciones del software de control para reducir la potencia de salida

cuando la velocidad del viento estaba en el rango de  $25 \text{ m/s}$  a  $34 \text{ m/s}$  (una alta proporción de vientos en Mawson son superiores a  $15 \text{ m/s}$ ).

- Accesorio especial de porsche frío en la entrada de la torre para excluir la nieve
- Implementación de sistemas de deshielo se eliminan debido a la atmósfera seca.

Estos aerogeneradores operan en uno de los lugares más ventosos de la tierra, con velocidades de viento de hasta  $252 \text{ km/h}$  ( $70 \text{ m/s}$ ), estos vientos son los que imponen condiciones de diseño. Sin embargo, las velocidades medias anuales son más modestas,  $11,2 \text{ m/s}$ .

En 2006, después de tres años de funcionamiento, la AAP<sup>1</sup> informó de la operación exitosa del parque eólico y que se logró un ahorro anual de combustible del 29 %.

Se estimó que un mayor ajuste fino del sistema de control asociado con las dos turbinas eólicas y la central eléctrica, debería aumentar el ahorro anual de combustible al 45-50 %.

Se evaluó como sistemas extremadamente confiables que funcionaron como se esperaba. Sin embargo, se encontraron aspectos a mejorar en el sistema de control para mejorar el rendimiento general.

Los aerogeneradores funcionan junto con un generador diesel que suministra energía a la estación cuando el viento cae, generalmente durante unas horas al mediodía. Utilizando las turbinas eólicas, el ahorro de combustible llega a ser superior al 50 %, aunque cae alrededor del 10 % en los meses menos ventosos. En este punto, Australia consideró la instalación de turbinas eólicas en las bases de Casey y Davis.

En 2017 se informa que la barquilla y las palas de una turbina se “desprendió” durante la noche y cayó al suelo.

Las condiciones del viento en el momento del incidente no eran mayor a  $70 \text{ km/h}$ , algo que es frecuente. Había un programa de mantenimiento regular para todas las turbinas eólicas. Se informó que la causa del incidente era desconocida.

---

<sup>1</sup>Australian Antarctic Program



**Figura 6.19:** Generadores funcionando con normalidad, Base Mawson[101].

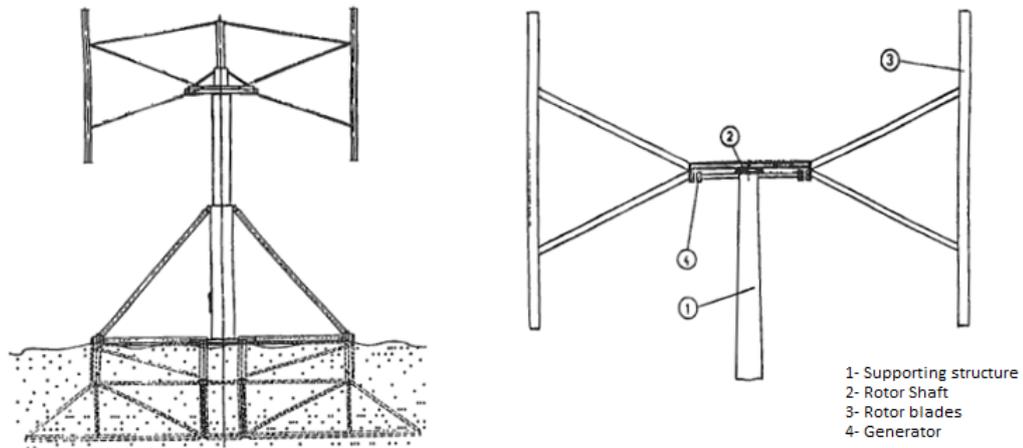


**Figura 6.20:** Generador Enercon E-30 colapsado, 2017[101].

Actualmente, el aerogenerador afectado por la falla se encuentra fuera de servicio, mientras que el restante está operativo y siendo mantenido periódicamente[100].

#### **6.2.4.2. Estación Neumayer (Alemania)[103, 122], localización: -70,676111°, -8,273333°:**

Fue instalada en 1991 un aerogenerador de eje vertical especialmente diseñado para CC, modelo HMW56 (Figura 6.21) con una potencia nominal de 20 *kW*. El generador produce aproximadamente 35.000 *kWh* de energía por año. Esto contribuye alrededor del 6 % a la energía, ahorrando así 12.000 *litros* de combustible anuales.



**Figura 6.21:** Esquema del rotor y del generador completo del modelo HMW-56[123]

#### Datos técnicos específicos para condiciones de CC.

- Velocidad de viento máxima:  $68 \text{ m/s}$
- Mínima temperatura operacional:  $-55^{\circ}\text{C}$
- Tasa de acumulación de nieve: 70 cm al año.

#### Datos técnicos del generador

- Diámetro del rotor: 10 *metros*.
- Área de barrido:  $56 \text{ m}^2$ .
- Número de palas: 3.
- Largo de palas: 6,5 *metros*.
- Ancho de palas: 0,82 *metros*.
- Potencia nominal: 20 *kW*.
- Hub height: 10 *metros* sobre la superficie de la nieve.
- R.P.M. range: 30 - 60.
- Velocidad de arranque:  $7 \text{ m/s}$ .
- Velocidad de corte:  $23 \text{ m/s}$ .

- Velocidad del viento nominal: 14  $m/s$ .
- Peso del Generador: 2,8 *Toneladas*.
- Peso de la torre: 2,5 *Toneladas*.

### Conclusiones

Los resultados del uso de este aerogenerador fueron prometedores. Se pensó en la utilización del uso de generadores a escala mayor a la del HMW-56 con el objetivo de aumentar la eficiencia y generación. En la actualidad no hay registro de nuevas instalaciones eólicas en la base.

#### 6.2.4.3. Estación Princess Elisabeth Antártica (Bélgica)[149], localización: $-71,949944^\circ$ , $23,347079^\circ$ :

PEA<sup>1</sup> se encuentra a una altitud 1397 metros de altura sobre el plateau antártico, a una distancia de la costa: 220  $km^2$ . Durante la temporada 2008-2009 se instalaron nueve generadores eólicos (ver Figura 6.22) de una potencia nominal de 6  $kW$  cada uno, de esta manera la potencia instalada con aerogeneradores de 54  $kW$ .



**Figura 6.22:** Vista del sitio durante mantenimiento de aerogeneradores[pg 9, 57].

<sup>1</sup>Estación Princess Elisabeth Antártica

<sup>2</sup>Respecto a la base artigas, la latitud si la midieramos en el mismo meridiano, sería de 1200  $km$ .

Las primeras temporadas se presentaron algunos desafíos que llevaron a IPF y al fabricante[138]<sup>1</sup> tener que trabajar en conjunto para lograr que los sistemas fueran más confiables, este proceso llevó a la identificación de los siguientes puntos:

Las primeras temporadas se llevó adelante un proceso de adaptación debido a los desafíos que se presentan a continuación:

- El sistema de paso<sup>2</sup> no era adecuado para las condiciones, se ajustó la configuración.
- Los lubricantes no funcionaban bien a temperaturas de -40°C, se cambió por uno resistente a bajas temperaturas.
- Partes de la turbina presentaron grietas, los arreglos fueron realizados por IPF y luego asumidos por el fabricante.
- La electrónica no era compatible con la red de estaciones.
- El mantenimiento anual tuvo que ser adaptado.

Una vez superados estos desafíos, los sistemas se estabilizaron y se volvieron robustos y confiables. Durante los últimos 5 años, no se presentaron problemas mecánicos o eléctricos, las turbinas están produciendo normalmente y se consideran muy fiables.

Los generadores tienen la particularidad que son del tipo "down stream"<sup>3</sup> y sus aspas son rebatibles actuando acorde a la intensidad del viento. De esta manera, el generador se protege ante eventos extremos, disminuyendo el área de contacto con el viento incidente.

**Datos técnicos específicos del modelo SD6[116] para condiciones de CC.**

- Velocidad de viento máxima: ilimitada,  $m/s$ .
- Mínima temperatura operacional: -40°C.

**Datos técnicos del generador SD6[116, 128].**

---

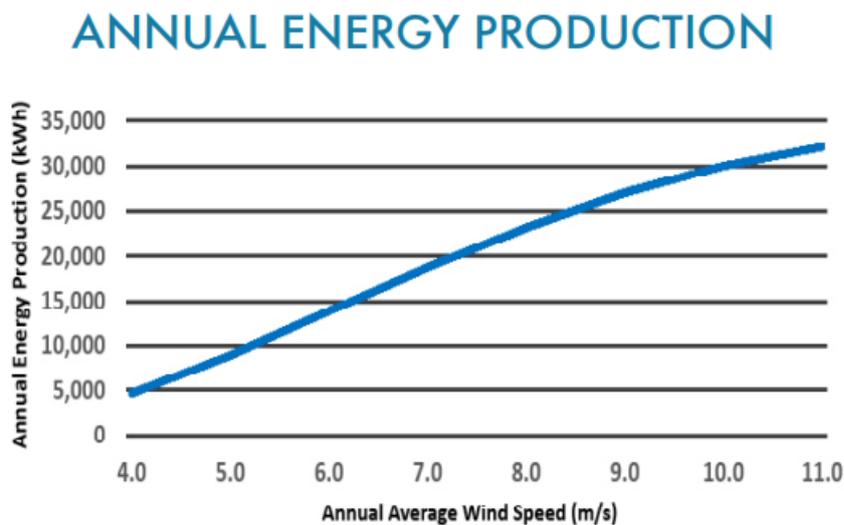
<sup>1</sup>Proveedor de las turbinas fue la empresa SD Wind Energy.

<sup>2</sup>Pitch system.

<sup>3</sup>Corriente abajo

- Generador: de imán permanente de transmisión directa sin escobillas
- Tipo: Downwind, Self Regulating.
- Altura del buje: 9 *metros* sobre la superficie.
- Diámetro del rotor: 5.6 *metros*.
- Número de palas: 3.
- Material de las palas: Fibra de vidrio termoplástica.
- Potencia nominal: 5.2 *kW* a 11 *m/s*<sup>1</sup>, 6 *kW* a partir de los 14 *m/s*.
- Velocidad de arranque: 2,5 *m/s*.
- Velocidad del viento nominal: 11 *m/s*.
- Velocidad de corte: ninguna - operación continua<sup>2</sup>
- Producción anual estimada: 9.000-19.400 *kWh*.
- Peso del aerogenerador sin torre: 500 *kg*.
- Rated R.P.M.: 200.

En adición a los datos especificados anteriormente, el fabricante ofrece un gráfico de producción anual, la cual se puede ver en la Figura 6.23.

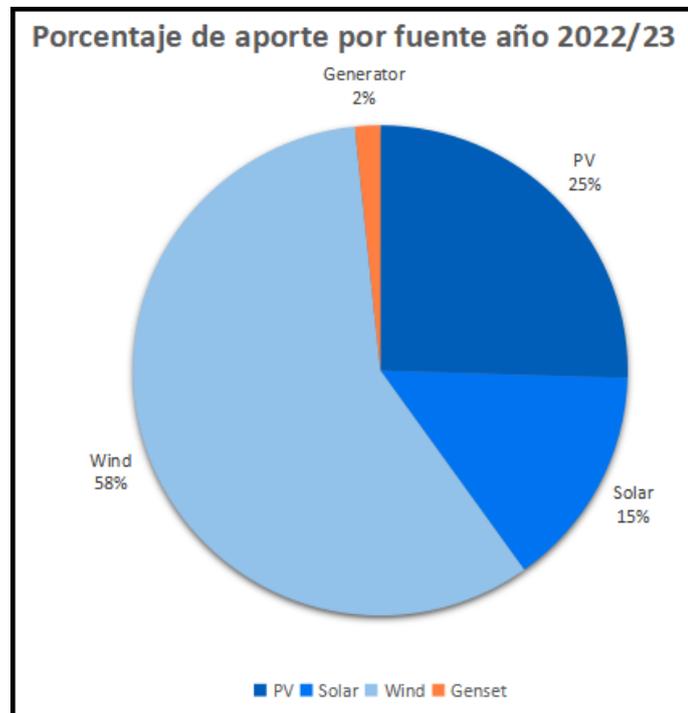


**Figura 6.23:** Producción de energía anual del aerogenerador *SD6*[pg 13, 57].

<sup>1</sup>Rated Power 5,2 *kW* (1 minuto average a 11 *m/s*)

<sup>2</sup>Categoría A según norma UNE-EN 61400-2[4].

En los años 2022 y 2023 el aporte de las diferentes fuentes fue el que se presenta en la Figura 6.24.



**Figura 6.24:** Producción de energía por fuente[50].

El aporte renovable es casi el 100 %, siendo que el aporte de generadores es solo en eventos de prueba, se puede considerar el sistema es autosuficiente. Además de los datos técnicos mencionados anteriormente, es relevante destacar que durante la investigación se estableció una comunicación directa con el fabricante de un nuevo aerogenerador de 12 *kW*. Se obtuvo información adicional sobre este modelo, *SD12*[60], los detalles se encuentran en el Apéndice 3.

### 6.3. Generación de energía con fuentes de energía marina

Actualmente, la energía del océano puede ser extraída de seis fuentes principales utilizando diferentes mecanismos de extracción, en la Tabla 6.2 se pueden observar estos aspectos.

<b>Fuente</b>	<b>Origen</b>	<b>Mecanismo de extracción Ej.</b>
Rango de marea	Marea varía por efectos gravitacionales	Presas de marea con turbinas en lagunas de marea
Corrientes de marea	Baja resultante de la subida y bajada de la marea en las regiones costeras	Turbinas de flujo axial, cruzado, dispositivos alternativos
Corrientes oceánicas	Flujo resultante de viento impulsado y circulación termohalina	Turbinas de flujo axial, cruzado, dispositivos alternativos
Gradiente térmico	Diferencia de temperatura del agua	Ocean thermal energy conversion (OTEC) plants
Gradiente salino	Diferencia de salinidad entre el agua dulce y salada	Electrodialisis inversa y ósmosis por presión retardada
Olas	Energía cinética del viento	Oyster column de agua oscilante, cuerpo oscilante, desbordamiento, etc.

**Tabla 6.2:** Fuentes del recurso, origen y mecanismo de extracción de energía. (Ocean energy sources, Lewis et al. 2011[130]).

Algunas de estas fuentes como las **Mareas**, **Corrientes de marea** y **Corrientes oceánicas** utilizan formas de extracción muy similares.

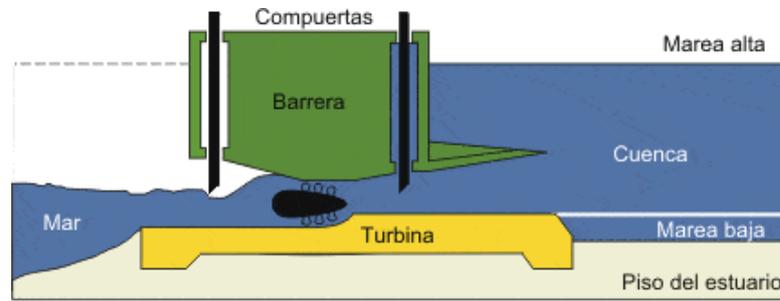
### 6.3.1. Mareas, Corrientes y rangos de Marea

Esta sección abarca los primeros tres ejemplos de la Tabla 6.2, **Rango de marea**, **Corrientes de marea** y **Corrientes oceánicas**.

Si bien hay estudios de corrientes y mareas a nivel global que hacen pensar en la implementación de estos sistemas en altas latitudes[97], las principales restricciones que se presentan son, la dureza de las condiciones meteorológicas que llevan a un replanteo de los materiales a utilizar y capa de hielo y hielos a la deriva que hacen muy difícil su implementación.

**Rango de Marea**, refiere a la generación hidroeléctrica de muy baja presión<sup>1</sup>. Consiste en embalsar el agua en un lago abierto al mar o un estuario cuando la marea asciende, luego cuando la marea desciende turbinarlo controladamente generando de esta forma energía eléctrica, ver Figura 6.25.

<sup>1</sup>Very low head (4 metros)



**Figura 6.25:** Esquema de sistema de rango de marea y su funcionamiento.

Usualmente, para bajas presiones se utilizan turbinas especialmente diseñadas para este propósito. Estas turbinas se conocen como Very Low Head Turbine (VLHT)[125] siendo las más conocidas las que se muestran en la imagen 6.26.

Type	H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	$\eta$ (%)
Overshot wheel	3-6	$\leq 0.2$	75-85
Breastshot wheel	0.5-4	$\leq 0.8$	75-85
Undershot wheel	0.5-1.5	$\leq 1.2$	75-85
Archimedes screw	1.0-6	0.1-5.5	75-85
Hydrostatic Pressure machine	1.0-2.5	1.0-5.0	50-60
Low head Francis	0.75-5.0	1.0-10.0	75-85
Low head Kaplan	1.8-5.0	1.0-25.0	82-92
VLH turbine	1.4-4.5	10.0-30.0	80-91
Vortex turbine <sup>1</sup>	0.5-4	0.5-5.0	40-50
Mariucci turbine <sup>2</sup>	1.0-3	$\leq 6.0$	80-90

**Figura 6.26:** Características de convertidores hidroeléctricos de VLHT[125].

La implementación de este tipo de sistemas es posible en la actualidad. No se tiene experiencia en las condiciones que presenta este estudio.

La principal restricción es la presencia de hielo en superficie durante gran parte del año.

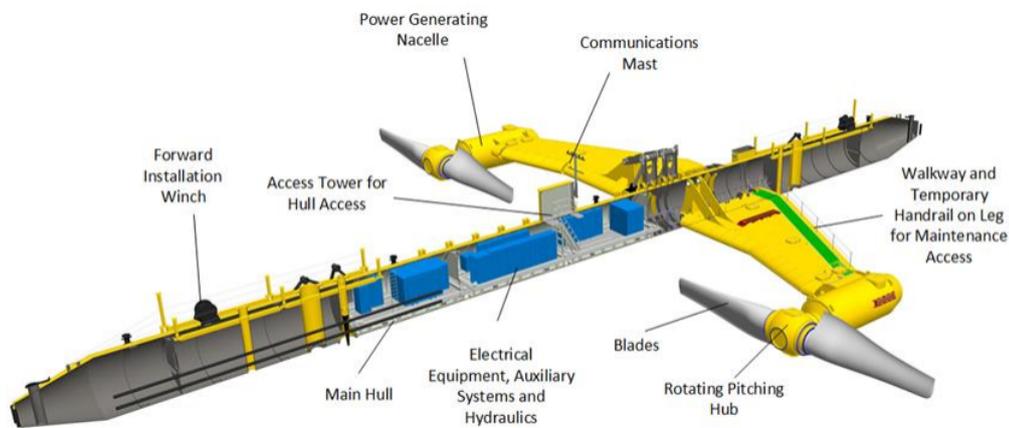
Se podría pensar como un sistema que se utilice por temporadas, cuando el mar está libre de hielos.

En cuanto a los sistemas de **Corrientes de Marea**, en la sección 5.3.1 se presentó en la Figura 5.11 para el recurso generado por el modelo GOT99.2, el cual presenta un potencial interesante en el flanco oriental de la península

antártica.

Para este tipo de corrientes, sistemas como el que se presenta a continuación se podrían adecuar al medio, funcionan con una velocidad de arranque de  $1,5\text{ m/s}$ , nominal de  $2,5\text{ m/s}$  y velocidad de corte de  $4,5\text{ m/s}$ [93], ver Apéndice 1.

El sistema **O2.2**(Figura 6.27) llevado adelante por la European Marine Energy Centre (EMEC) Ltd. está operativo y se espera conexión a la red en el verano nórdico del 2023. Posee una potencia nominal de  $2\text{ MW}$ ; estos equipos son una realidad, pero no están extendidos masivamente.



**Figura 6.27:** Principales sistemas internos del Orbital O2.2[94]

Este dispositivo tiene la ventaja que las partes móviles están varios metros por debajo de la línea de flotación del cuerpo principal, lo que podría hacer posible su implementación en la zona de latitud  $+60^\circ$ . Para esto se debería tener claro la formación de hielo y sus alcances.

Se cuenta con experiencia en el estudio de la viabilidad para la generación de energía con mareas en la base Antártica Mac Murdo[61], en el año 2016. El estudio pretendía proporcionar recomendaciones a USAP<sup>1</sup> y concluir sobre si era posible la instalación de un sistema de energía mareomotriz en este sitio.

Este estudio siguió las recomendaciones de las especificaciones técnicas de la IEC para la evaluación y caracterización de recursos de energía mareomo-

<sup>1</sup>U.S. Antarctic Program

triz siguiendo la norma IEC TS 62600-201:2015<sup>1</sup>[31].

Este trabajo presentaba como objetivos principales, cotejar los datos registrados cerca de la estación McMurdo que son relevantes para las evaluaciones de energía de las mareas y para evaluar la factibilidad de instalar allí un dispositivo.

El estudio consideró una serie de criterios relacionados con las instalaciones de energía mareomotriz, incluida la velocidad de las corrientes oceánicas locales, la batimetría y la composición del fondo marino local, las posibles condiciones de formación de hielo, y el posible impacto de una turbina en el ecosistema local.

Como resultado, se estableció, que con los datos obtenidos correspondientes al recurso, fueron insuficientes para una evaluación energética completa.

Sin embargo, proporciona suficiente evidencia de que puede concluir que la energía de las mareas no es factible para esa región de McMurdo.

Esto se debe a las velocidades de corriente que son menores a los estándares de los dispositivos actuales.

Una turbina mareomotriz tendría dificultades para incluso comenzar a generar energía, y mucho menos producir una cantidad significativa. Las velocidades medidas fueron de 30 cm/s en las inmediaciones de la base.

Los desafíos relacionados con el hielo hacen que un sistema de este tipo no sea recomendable, esto sumado al débil recurso no justificó la inversión y la logística para pensar en instalar un sistema de este tipo.

Esta conclusión no significa que la energía de las mareas no valga la pena en otras regiones de la Antártida; simplemente no es viable para la estación McMurdo.

Como ejemplo, en el mismo trabajo se indica que la base Palmer<sup>2</sup> está ubicada en la península en la costa de la isla de Anvers y puede tener un recurso de marea más prometedor que McMurdo.

Una rápida visión general de Palmer y sus alrededores destaca una serie de pequeñas islas cercanas.

Las corrientes pueden canalizarse entre estas islas, aumentando su velocidad

---

<sup>1</sup>Energía marina: convertidores de corriente undimotriz, mareomotriz y otras corrientes de agua – Parte 201: Evaluación y caracterización de recursos de energía mareomotriz

<sup>2</sup>Coordenadas: -64,77°, -64,05°.

y llegando a valores aceptables. Además, estas islas brindan potenciales sitios de instalación de equipos.

En principio, Palmer puede demostrar tener un mejor potencial energía de mareas que McMurdo. Se necesita una campaña de medición de velocidades de marea y una batimetría para tener las condiciones claras.

Estos datos son indispensables para evaluaciones energéticas completas identificando ubicaciones en particular.

Sin embargo, las mismas preocupaciones de formación de hielo siguen estando para Palmer.

### 6.3.2. Gradiente térmico

El desarrollo comercial de los sistemas OTEC<sup>1</sup> se ha visto limitado por el alto costo de capital, la falta de experiencia operativa y el riesgo técnico de algunos aspectos que han enlentecido su desarrollo.

La mayoría de los componentes necesarios para un sistema OTEC están disponibles en el mercado y no requieren rediseños importantes para ser integrados a estos sistemas.

Esto incluye bombas, calefacción, intercambiadores, generadores, sistemas de control, grúas y amarres.

A escala mayor todavía hay algunas incertidumbres sobre el rendimiento del intercambiador de calor y el comportamiento de la Cold Water Pipe<sup>2</sup>.

Sin embargo, actualmente hay varios trabajos de investigación y proyectos que están siendo llevado a cabo por varios países, siendo los más significativos los llevados adelante por Corea del Sur, Japón, India, Francia, China, Malasia y Estados Unidos.

Un resumen de varios desarrollos internacionales importantes proyectos se detalla en la Figura 6.28.

---

<sup>1</sup>Ocean Thermal Energy Conversion

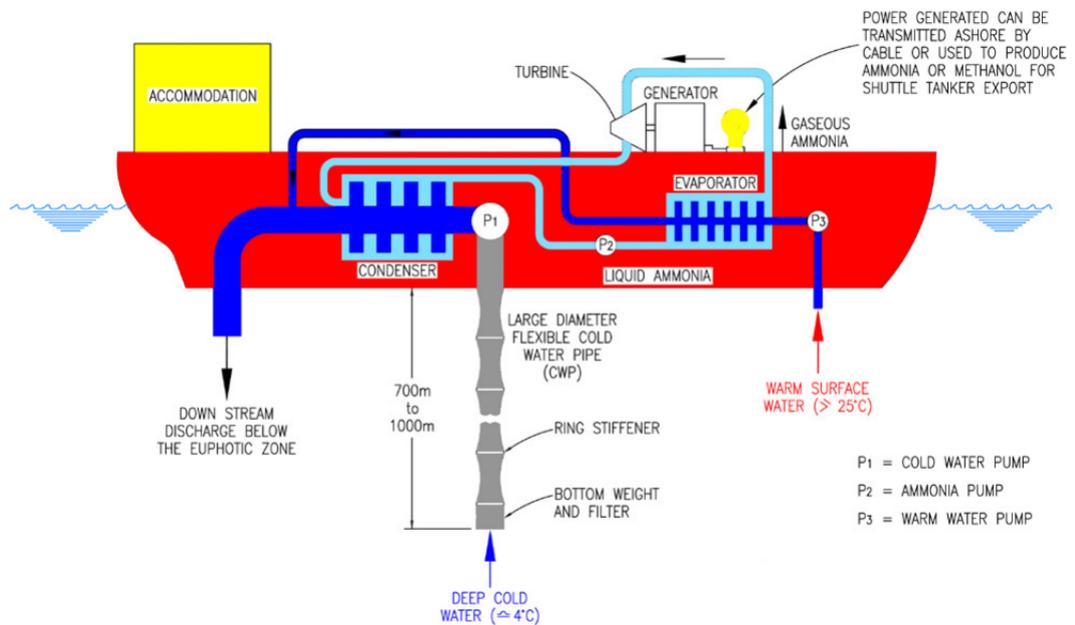
<sup>2</sup>Cold Water Pipe

No.	Agency/company (Country)	Year, Location	Power Rating (kW)	
			Gross	Net
1	Claude (France)	1930, Cuba	22	-
2	Mini OTEC (US)	1979, Hawaii	53	18
3	OTEC-1 (US)	1980, Hawaii	1000	-
4	Toshiba & TEPC (Japan)	1982, Nauru	120	31.5
5	Saga University (Japan)	1984, Saga	75	-
6	NELHA (US) Open Cycle	1992, Hawaii	210	100
7	Saga University (Japan)	1995, Saga	9	-
8	NELHA (US)	1996, Hawaii	50	-
9	NIOT (India)	2000, Tuticorin (incomplete)	1000	-
10	Naval Group (France)	2012 onwards, La Reunion Island	15	
11	KRISO (South Korea)	2012, Goseong	20	
12	Okinawa Prefectural Government (Japan)	2013/2016, Kumejima, Okinawa prefecture, Japan	100	
13	Makai Ocean Engineering, Hawaii USA,	2015, Kona, Hawaii	100	-
14	K-OTEC1000 Barge, (KRISO) South Korea	2019. Floating unit	338 to 1000	

**Figura 6.28:** Proyectos clave de investigación y desarrollo de OTEC hasta 2021[2]

En los últimos cinco años, dos nuevos estándares de ingeniería han sido publicados por la International Electrotechnical Comisión (IEC), el IEC TS 62600-20[72] y Bureau Veritas Guidance Note NI637[28].

En la Figura 6.29 se presenta un sistema OTEC de ciclo cerrado flotante propuesto en el programa de colaboración IEC-OTEC[3].



**Figura 6.29:** Ilustración de un sistema OTEC de ciclo cerrado flotante (copyright M. Brown, OESL[3, pág 7]).

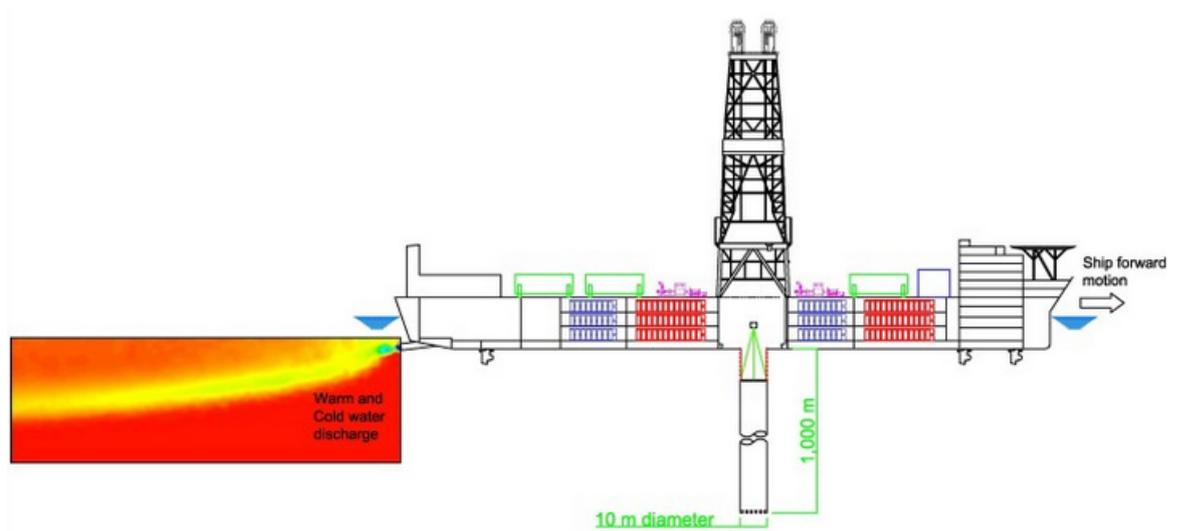
Actualmente, muchos de los yacimientos de petróleo y gas off shore cumplen con las normas aplicables a los sistemas OTEC flotantes y se los ve como una posibilidad de reutilizarlos.

Un proyecto de diseño de la Universidad de Strathclyde en Glasgow estudia la conversión de un barco de perforación petrolera en una planta de generación OTEC.

La instalación de producción propuesta utilizará la producción de electricidad OTEC para sintetizar amoníaco, que se exportará a un camión cisterna dedicado al amoníaco, en una operación similar a la exportación de petróleo desde un FPSO<sup>1</sup>. De esta forma ya estarían resueltos varios problemas como los sistemas de amarre, carga y descarga y la manipulación y almacenamiento y traslado seguro del amoníaco.

Estos proyectos tratan la reconversión de embarcaciones petroleras en generadores utilizando esta tecnología y analizan el potencial para convertir un barco de perforación offshore en una instalación de producción de OTEC, con una potencia nominal de 64 MW[22] presentado en la Figura 6.30.

<sup>1</sup>Floating, Production, Storage and Offloading



OTC-31756-MS 2022 "Conversion of a Redundant Drillship to a Floating OTEC Platform"

**Figura 6.30:** Concepto de plataforma petrolera convertida en sistema OTEC[22].

Hay otros casos como Centro Mexicano de Innovación en Energía del Océano (CEMIE-Océano) que propone una planta OTEC ciclo abierto[27]. En su estudio se pueden encontrar esquemas conceptuales de plantas offshore y onshore.

Las tecnologías propuestas para la fase de generación, generalmente es el ciclo de calor termodinámico Rankine, tecnología ya conocida y madura. Se pueden implementar ciclos abiertos, cerrados e híbridos.

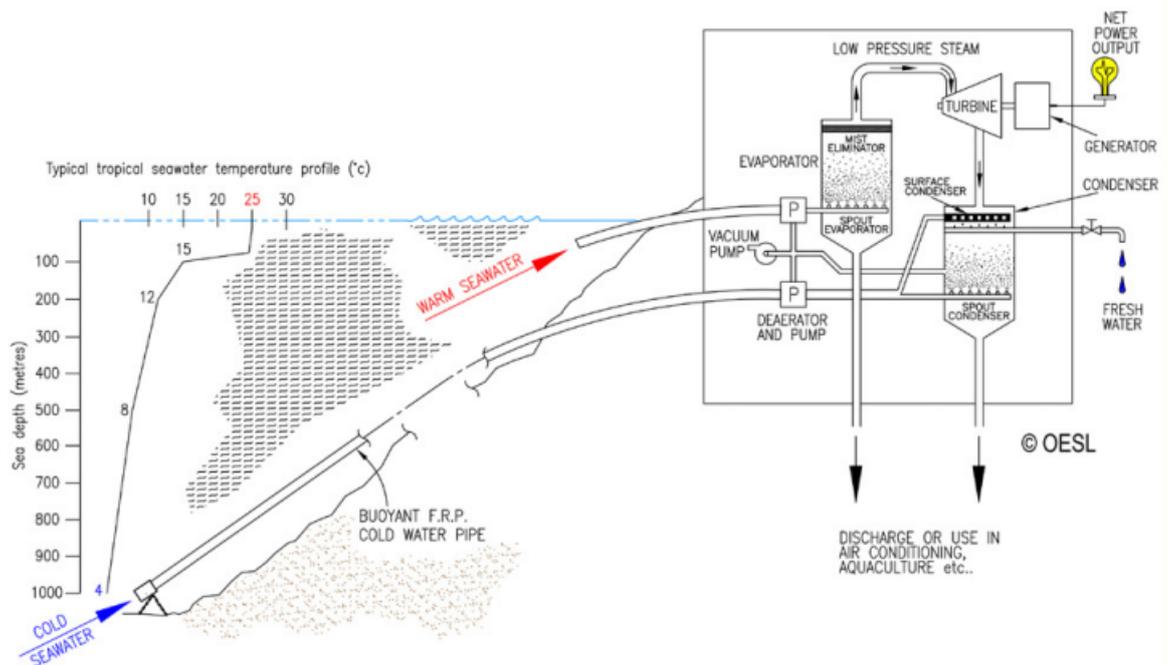
Cualquiera de los ciclos se podría implementar, teniendo cada uno de ellos aspectos positivos y negativos. El cerrado es adecuado para usar como fluido de trabajo el agua salada.

En este punto se debe considerar que, en zonas tropicales, para alcanzar gradiente de al menos 20°C se debe llegar a los 1000 metros de profundidad, implicando esto grandes desafíos técnicos.

En un sitio con las características de la Isla Decepción (ver sección 5.3.2), el gradiente térmico se alcanzaría con ambas tomas, CWP y WWP<sup>1</sup>, en superficie y a poca distancia una de la otra, evitando así la el desafío de la toma de CWP.

<sup>1</sup>Warm Water Pipe

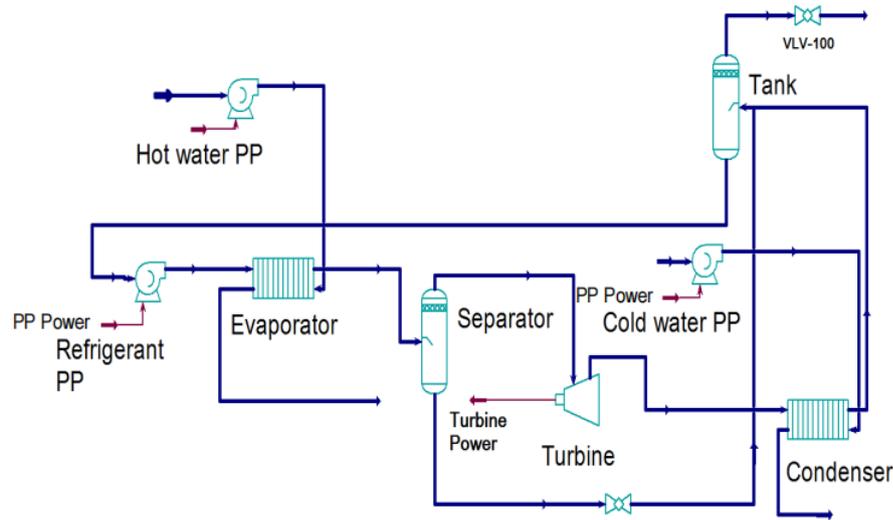
La Figura 6.31 se muestra un sistema OTEC con base en tierra, el que se plantea para la Isla Decepción es con la CWP en superficie o cerca de ella, lo que traería muchos beneficios técnicos y económicos.



**Figura 6.31:** OTEC terrestre de ciclo abierto (OC) que incluye la producción de agua dulce. (Copyright M. Brown, OESL[3, pág 16]).

El OTEC de ciclo cerrado es lo mismo que el ORC (Ciclo de Rankine Orgánico <sup>1</sup>) y, como se muestra en la Figura 6.32, el ciclo se genera a través de turbinas cuando la evaporación y la condensación se repiten al hacer circular el fluido de trabajo.

<sup>1</sup>Es una variedad del ciclo Rankine que utiliza un fluido de trabajo orgánico con un cambio de fase líquido a vapor o punto de ebullición que tiene lugar a temperaturas más bajas que el cambio de fase de agua a vapor



**Figura 6.32:** Conversión de energía térmica oceánica de ciclo cerrado utilizando gas R32[140].

El agua de mar cálida y fría se utilizan como fuente y disipador de calor. El fluido de trabajo es evaporado por el agua de mar cálida, posteriormente pasa a través de la turbina a alta temperatura y presión donde realiza el trabajo mecánico para la generación.

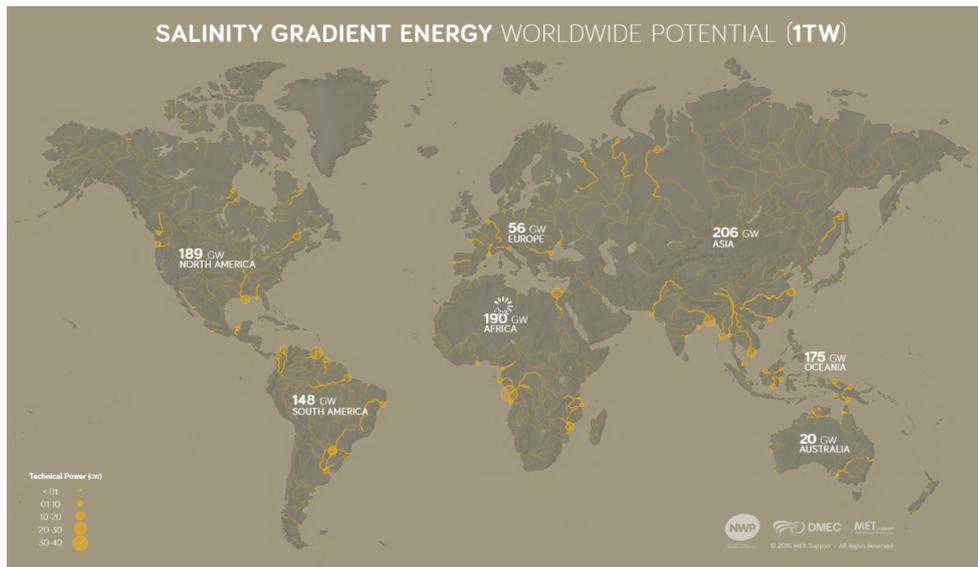
Posteriormente a la descompresión y descenso de temperatura ayudado por el fluido frío refrigerante (agua fría) se produce la condensación del fluido de trabajo.

La implementación de un circuito abierto presentaría la ventaja la desalinización y la obtención como subproducto de agua potable, muy valorada en sitios como la Antártida.

### 6.3.3. Gradiente salino o energía azul

El uso de los gradientes de salinidad para generación eléctrica inició en 1970[47]. Se trata de un proceso natural que no provoca contaminación térmica, no produce dióxido de carbono ni genera ninguna otra emisión contaminante debida a combustión.

Actualmente, la empresa de Países Bajos REDstack realizó un estimado de potencia disponible a nivel global estimando  $1TW$  como se aprecia en la Figura 6.33.



**Figura 6.33:** Potencial mundial de energía azul según REDstak[64].

Este tipo de energía oceánica es la menos avanzada de los resumidos en este trabajo, ya que hay distintos retos técnicos presentes, tales como el uso de membranas e impurezas en agua de mar, o problemas medioambientales relativos a las concentraciones de sal.

Una de las dificultades para el aprovechamiento del gradiente salino es que depende de un complejo proceso de mezcla.

Se han considerado múltiples tecnologías para la extracción de energía de este recurso.

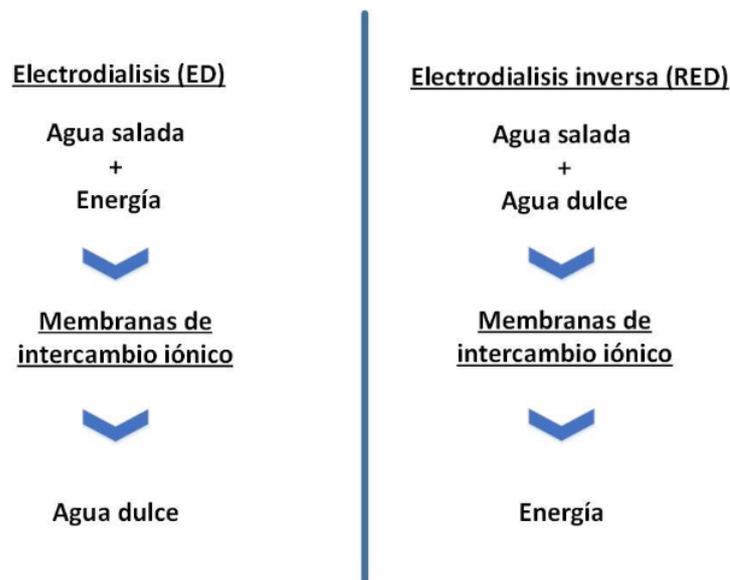
El estado del arte presenta varios métodos para la obtención de energía.

Los procesos mediante los cuales puede obtenerse energía son los siguientes[49]:

- Procesos de intercambio iónico,
- Procesos osmóticos,
- Procesos de mezcla directa,
- Procesos de adsorción y desorción,
- Procesos basados en la diferencia de presión de vapor.

Varios de estos métodos están en constante innovación e investigación y se encuentran en etapas muy tempranas de desarrollo; no obstante, hay **dos** de ellos en etapas más avanzadas que tienen el potencial de ser explotados comercialmente.

Uno de ellos es mediante la **Electrodiálisis Inversa (RED)**<sup>1</sup>. La Figura 6.34 se describen los procesos de Electro Diálisis (ED) donde se obtiene como producto agua dulce y de **Electrodiálisis Inversa**, donde el producto obtenido es **energía eléctrica**[71].



**Figura 6.34:** Diagrama de flujo de Electro Diálisis (Izq.) y Electrodiálisis Inversa (Der.)[69].

La **RED**[69, 83], es un proceso de conversión de energía.

Esta técnica utiliza el transporte de cationes y aniones durante la mezcla controlada de fluidos, generalmente agua, de diferentes niveles de salinidad a través de membranas de intercambio iónico selectivo<sup>2</sup>.

Esto crea un potencial electroquímico que puede ser usado para generar electricidad. El desarrollo de membranas de intercambio iónico y la optimización del rendimiento del sistema son cruciales para la captura de energía utilizando sistemas **RED**.

En 2005 comenzó a funcionar una planta piloto de la empresa RedStack en Afsluitdijk, Países Bajos, con una potencia nominal de 50 *kW*.

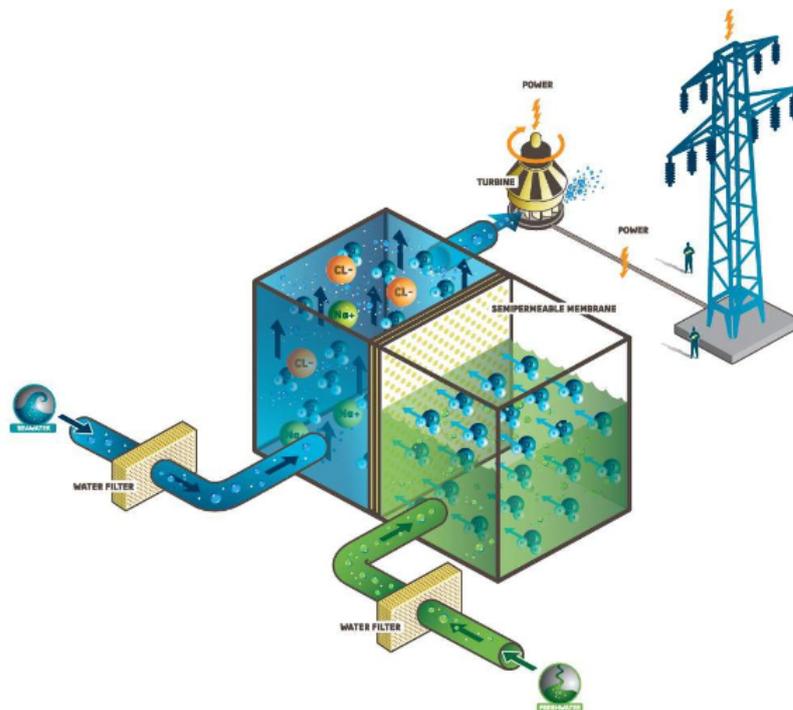
En los últimos tiempos, se ha incrementado considerablemente el interés en la fabricación de membranas de intercambio iónico, así como en comprender los factores que influyen en el rendimiento de la potencia de la **RED**. Sin embar-

<sup>1</sup>Reverse Electro Dialysis. Proceso de intercambio iónico.

<sup>2</sup>Los iones son átomos o grupos de átomos que tienen una carga eléctrica. Los iones con una carga positiva se denominan cationes. Los que tienen carga negativa se denominan aniones.

go, hasta el momento no se han llevado a cabo estudios de caso en la zona de investigación.

Otro método en estado más avanzado de desarrollo es el de **Ósmosis por Presión Retardada (PRO<sup>1</sup>)**[49, 132]. Consiste en poner en contacto dos fluidos con diferentes concentraciones de salinidad, entre los que se coloca una membrana semipermeable que permite el paso del fluido, pero no de las sales. Suponemos la utilización de agua dulce y salada como fluido, el agua dulce fluye a través de la membrana hacia una cámara que contiene el agua salada, incrementando la presión en ella. Esta diferencia puede ser empleada para impulsar una turbina hidráulica y generar así electricidad con esta tecnología ya conocida y madura. La Figura 6.35 muestra esquemáticamente un sistema PRO.



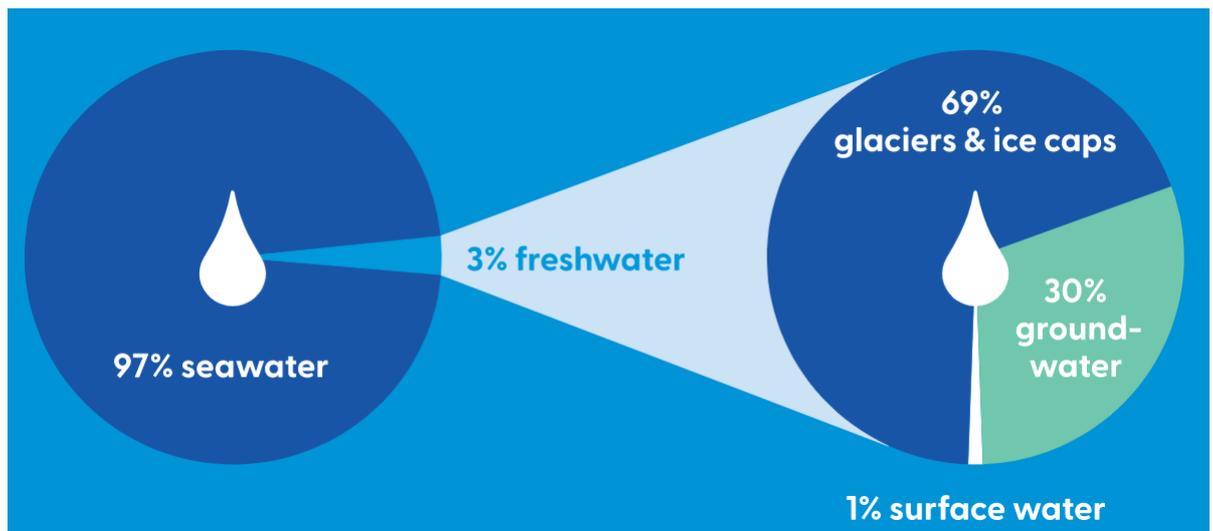
**Figura 6.35:** Esquema de sistema de generación de energía mediante ósmosis por presión retardada[49].

Actualmente, existen plantas que utilizan esta tecnología. Por ejemplo, en 2009, la compañía noruega Statkraft inauguró una planta piloto en Tofte con una capacidad de 10 kW.

<sup>1</sup>Pressure Retarded Osmosis. Proceso osmótico

Sin embargo, la capacidad tecnológica actual no alcanza un nivel de desarrollo óptimo y no hay experiencias de este tipo en la zona de estudio.

De todas maneras, según se aprecia en la Figura 6.36 presentada por la empresa INDESAL[121], muestra una abundancia del recurso en la zona de estudio, ya que se encuentran las reservas más importantes de agua dulce rodeadas de agua salada.



**Figura 6.36:** Alto porcentaje del agua dulce a nivel global está en el área de estudio[121].

Los **desafíos tecnológicos** para mejorar las tecnologías PRO y RED, incluyen la calidad de las membranas, bioincrustaciones y desarrollo de los módulos que contienen membranas, el pretratamiento del agua y la tecnología para producir grandes cantidades de membranas duraderas y accesibles.

Estos desafíos se estudian en proyectos piloto en Noruega y los Países Bajos, así como en proyectos de investigación en Alemania, Italia, Canadá, Japón, Singapur, Corea del Sur y Estados Unidos.

## 6.4. Geotérmica

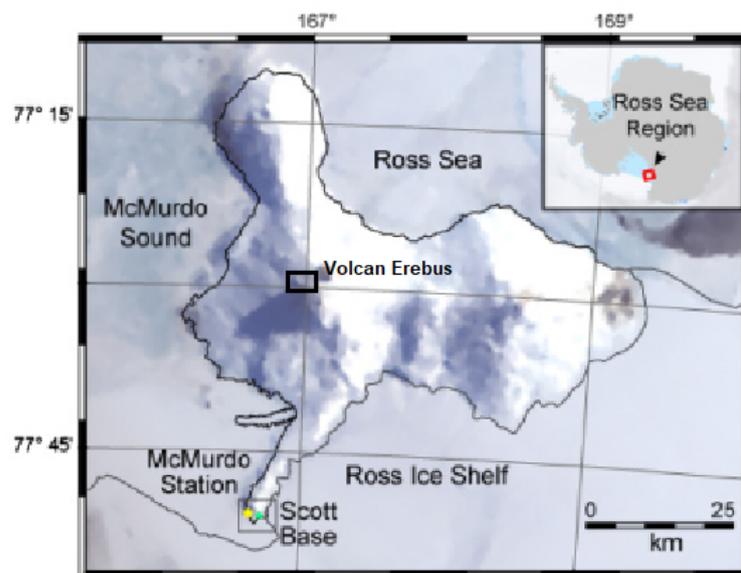
A diferencia de otras partes del mundo, en la Antártida no se han llevado a cabo proyectos de energía geotérmica a gran escala, esto se debe principalmente a las restricciones medioambientales antes mencionadas referentes al tratado antártico.

Sin embargo, algunos estudios han demostrado que hay potencial para la generación de energía geotérmica en la región, especialmente en áreas cercanas a los volcanes activos.

Aunque la explotación de la energía geotérmica en la Antártida plantea numerosos desafíos, como el acceso a las zonas de alta actividad volcánica y la necesidad de mitigar los posibles impactos ambientales, su potencial como fuente de energía limpia y renovable sigue siendo objeto de estudio e investigación.

#### 6.4.1. Antecedentes

No hay antecedentes reportados de instalaciones del tipo geotérmico. No obstante, hay estudios realizados por universidades estadounidenses[11, 55] referentes al emplazamiento de la base McMurdo, la cual está emplazada en la isla de Ross (ver Figura 6.37) donde también está la base Scott de Nueva Zelanda, lo que hace de este sitio el centro más habitado del continente. En esta isla se encuentra el monte Erebus formado por actividad volcánica, el cual se encuentra activo actualmente y fue objetivo del estudio. En estos estudios se evaluaron diferentes aspectos del recurso geotérmico.



**Figura 6.37:** Isla de Ross, ubicación de volcán Erebus y bases McMurdo y Scott. Fuente imagen[98].

Mediante estos estudios se demostró que el área tiene un alto potencial geotérmico, el cual se podría utilizar en sus diferentes modalidades, cambio de fase del agua sólida para el uso doméstico y potable y calefacción para las instalaciones.

En cuanto a la generación de energía eléctrica, según[55] el perfil geotérmico es bueno, sobre todo cerca de la costa, donde el permafrost prácticamente está ausente. Otro aspecto a tener en cuenta es que no se han descubierto depósitos de aguas subterráneas que complementarían el conjunto de necesidades para la generación.

## 6.5. Hidrógeno

El **hidrógeno** es un vector energético<sup>1</sup>, siendo este producido de diversas maneras, en este trabajo se focalizará la atención al producido a partir de fuentes de energía renovable, como la energía solar o eólica.

Es sostenible y no produce emisiones de gases de efecto invernadero durante su producción e implementación, asimismo puede ser utilizado en una variedad de aplicaciones, como la industria, el transporte y la generación de energía eléctrica.

Si bien el hidrógeno todavía está en una etapa de desarrollo y producción a gran escala, madurando ideas como **la economía del hidrógeno**<sup>2</sup>, su potencial para transformar el sector energético y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero es prometedor.

En el contexto de este trabajo, se pueden identificar la utilidad de implementar esta tecnología, ya sea en bases antárticas de régimen anual, como así las que son funcionales solo en los meses de verano.

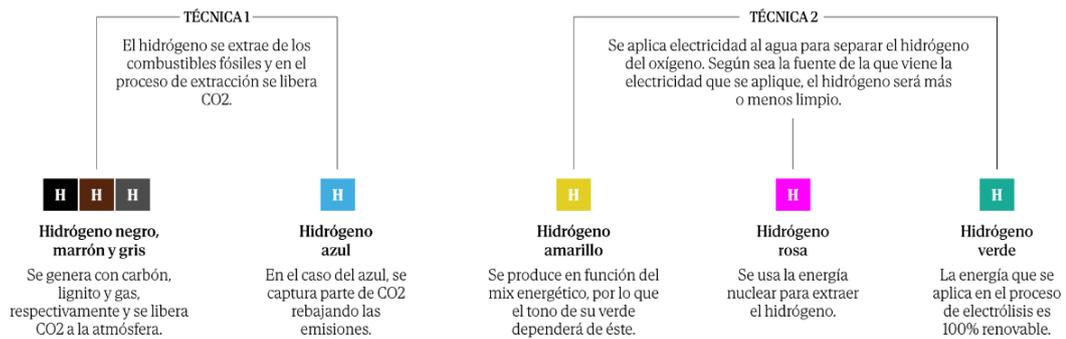
El hidrógeno se presenta como una alternativa interesante para almacenar energía y utilizarla a demanda, siendo una alternativa para al uso de baterías. Estos aspectos lo convierten en una alternativa atractiva.

---

<sup>1</sup>Almacenamiento de energía, de tal manera que ésta pueda liberarse posteriormente de forma controlada.

<sup>2</sup>Concepto que se refiere al conjunto de actividades económicas relacionadas con la producción, distribución y utilización del hidrógeno como fuente de energía. Enfoque fundamental en la transición hacia un sistema energético más sostenible. Implica el desarrollo de tecnologías de producción, así como almacenamiento y transporte. Siendo utilizado en diversos sectores, como el transporte, la generación de energía eléctrica y la calefacción.

El proceso de producción se realiza a través de la electrólisis<sup>3</sup> del agua, donde se separa el hidrógeno y el oxígeno a través de una corriente eléctrica. En la Figura 6.40 se presenta la clasificación del hidrógeno de acuerdo a la fuente(s) energética primaria con la cual se produce.



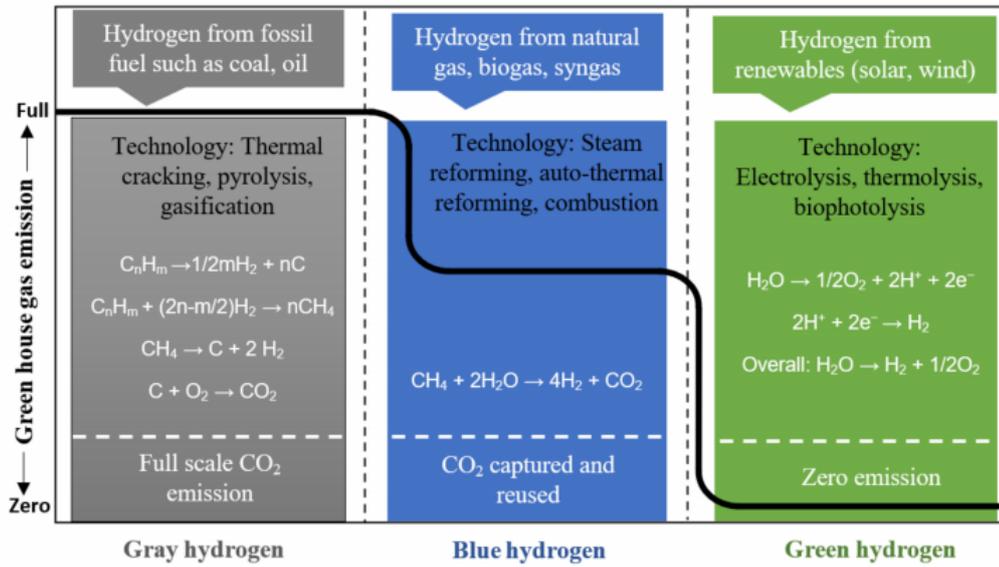
**Figura 6.38:** Clasificación de generación de hidrógeno según fuentes e impacto por emisiones (Ilustración, Elsa Martín Millán[77]).

Los colores se definen a partir del proceso de generación. El hidrógeno gris se produce a partir de combustibles fósiles, como el gas natural, y emite grandes cantidades de gases de efecto invernadero durante su producción.

El hidrógeno azul, por otro lado, se produce a partir de combustibles fósiles, pero utiliza tecnologías de captura y almacenamiento de carbono[90] para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

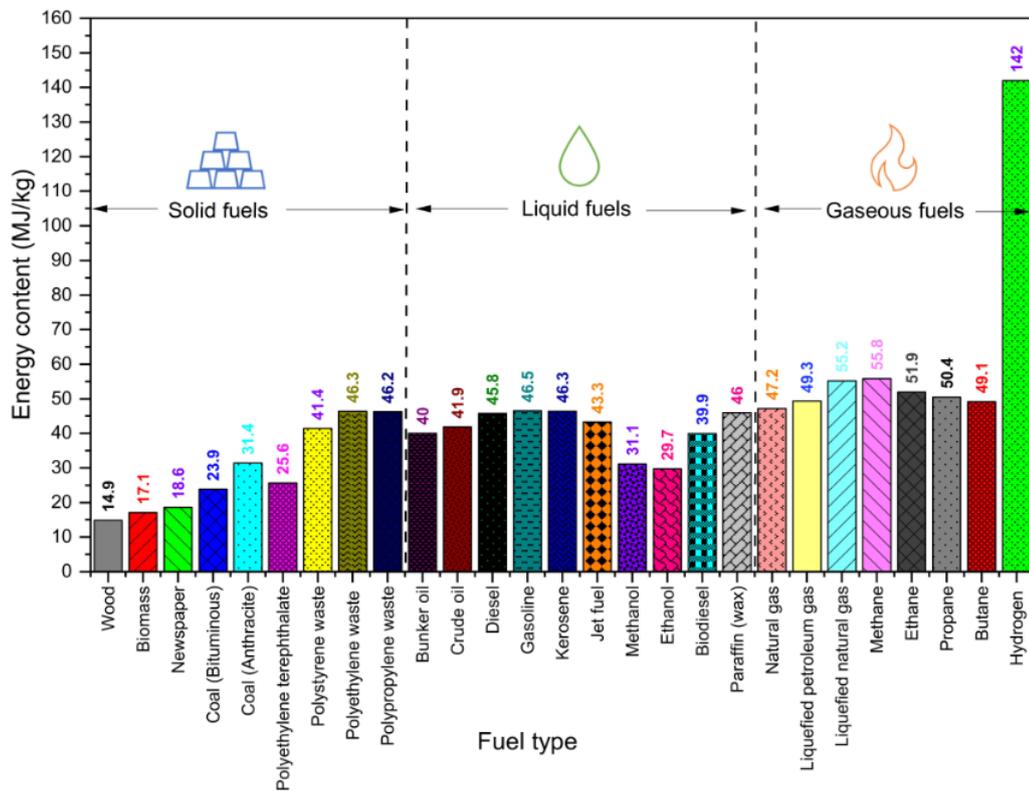
La Figura 6.39 presenta tres categorías clasificándolas en colores considerando la fuente energética a partir de la cual se produce el hidrógeno.

<sup>3</sup>Existen otros procesos como reformado de gas, gasificación de biomasa y fotosíntesis o fotoelectrólisis que no son considerados en este trabajo.



**Figura 6.39:** Categorización del hidrógeno según el energético, proceso de producción e impacto ambiental [paj 5, 135].

En la Figura 6.40 se presentan los diferentes contenidos energéticos de las diferentes fuentes **como combustibles**. El contenido de energía del hidrógeno es de  $142 \text{ MJ/kg}$ , que es más del doble que el del gas natural licuado,  $55,2 \text{ MJ/kg}$ .



**Figura 6.40:** Contenido gravimétrico de energía en diferentes tipos de combustibles[paj 3, 136].

Diferentes combustibles tienen diferentes niveles de densidad de energía, el gráfico muestra la comparación en términos de energía equivalente liberada a través de la combustión. En este caso la representación es gravimétrica (por unidad de masa). La densidad de energía gravimétrica es relevante cuando se compara la eficiencia energética de los combustibles. El combustible de mayor densidad de energía es el hidrógeno, que también es el componente químico más simple que existe.

De todas formas, el hidrógeno tiene sus restricciones debido principalmente a la etapa temprana de desarrollo de la tecnología, entre ellas resaltan:

- Materia prima, el agua, si bien es abundante en la Antártida, puede ser difícil y costoso encontrarla en estado líquido en ciertas áreas, lo que puede presentar una dificultad. Los sitios costeros presentan ventajas, ya que el uso de agua salada para la producción, es posible.
- El uso del agua puede ser restrictivo debido a las bases del tratado

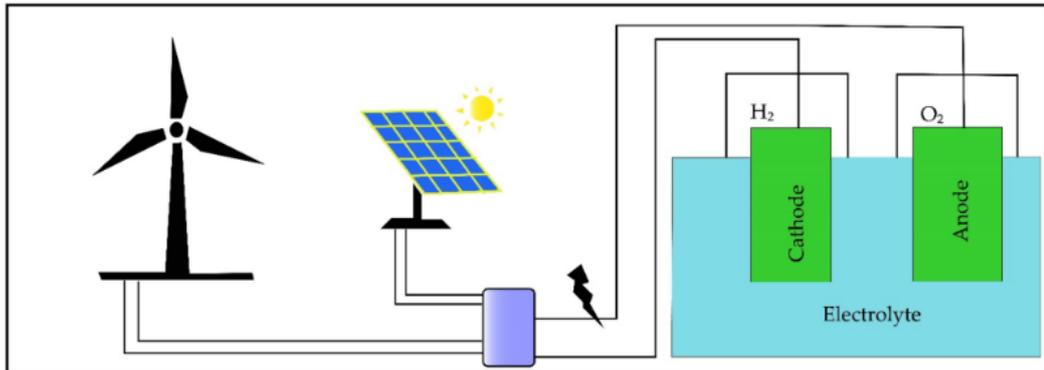
antártico[150], posiblemente se pueda utilizar agua solo bajo ciertas condiciones.

- Costo de producción, actualmente, la producción de hidrógeno a gran escala es costosa en términos económicos.
- Requerimientos energéticos, el proceso de producción requiere una gran cantidad de energía, siendo esto un factor importante a considerar al evaluar la viabilidad y sostenibilidad de la producción. La electrólisis tiene una eficiencia de conversión eléctrica ( $kWh$  a  $kg$  de  $H_2$ ) que va entre un 60 % y 70 %, lo que se traduce en un consumo aproximado de 50 a 60  $kWh$  de energía eléctrica para producir 1 Kg de  $H_2$ [151].
- Dificultades de almacenamiento, es un gas altamente inflamable y difícil de almacenar. Se necesitan sistemas de almacenamiento sofisticados y costosos para mantener el hidrógeno comprimido o licuado en forma líquida.
- La densidad de energía volumétrica es menor a otros combustibles, alrededor de un tercio de combustibles líquidos como el GLP (25,3  $MJ/l$ ) o GNL (21  $MJ/l$ ). Esto es relevante cuando se comparan los modos de transporte, ya que debe existir un espacio de almacenamiento (tanque de combustible) para transportar el combustible que propulsa un vehículo. Cuanto mayor sea la densidad de energía, mayor será la calidad del combustible.
- Infraestructura, se requiere adecuar los sistemas para el uso de hidrógeno, esto tiene un costo inicial alto.
- Baja densidad energética: El hidrógeno tiene una densidad energética relativamente baja en comparación con otros combustibles, lo que significa que se necesita una cantidad significativa de hidrógeno para generar la misma cantidad de energía que otros combustibles. Esto también afecta la eficiencia y el rendimiento de los vehículos impulsados por hidrógeno.
- Se plantean riesgos de seguridad en la etapa de producción, almacenamiento y uso. Se requieren medidas de seguridad adecuadas para garantizar su uso seguro. El hidrógeno es altamente inflamable y explosivo.

## Modelos de sistemas

Un modelo atractivo para el caso presentado en este trabajo es el de la Figura 6.41.

Sistemas de generación que pueden almacenar energía sin la utilización de baterías convencionales.



**Figura 6.41:** Producción de hidrógeno a partir de electrólisis híbrida basada en energía eólica y fotovoltaica[137].

El uso del hidrógeno se determina según los requisitos de las bases, siendo los tres principales:

### ■ Movilidad

Actualmente, existe la tecnología capaz para ser implementada en diferentes conceptos de movilidad<sup>1</sup>, esta versatilidad se presenta como una opción viable[147].

Existen varias características ventajosas que hacen atractiva la implementación del hidrógeno como vector energético, como su **eficiencia**<sup>2</sup>, **bajas emisiones**<sup>3</sup>, **autonomía**<sup>4</sup> y **tiempo de carga**<sup>5</sup>. Mientras que los aspectos negativos que dificultan implementar la tecnología a gran escala pueden ser resueltos debido al reducido tamaño de la infraestruc-

<sup>1</sup>Incluyendo automóviles de pasajeros, vehículos comerciales y en el transporte público.

<sup>2</sup>Los vehículos a hidrógeno son más eficientes en términos de consumo de energía en comparación con los vehículos de combustión interna convencionales. La conversión de hidrógeno en electricidad a través de una celda de combustible es más eficiente que la combustión de combustibles fósiles.

<sup>3</sup>No emiten gases de efecto invernadero ni contaminantes atmosféricos dañinos. El único subproducto de la reacción de la celda de combustible es el agua.

<sup>4</sup>Ofrecen una mayor autonomía en comparación con los vehículos eléctricos con batería.

<sup>5</sup>A diferencia de los vehículos eléctricos que necesitan una carga prolongada, los vehículos a hidrógeno se pueden recargar en cuestión de minutos, similar al tiempo que toma llenar un tanque de diesel.

tura.

#### ■ Climatización

Hay aplicaciones, pero aún se encuentran en desarrollo y no son ampliamente utilizadas en la actualidad. Sin embargo, muestran el potencial para la climatización y la refrigeración en el futuro.

Las **celdas de combustible** pueden generar electricidad y también producen calor como subproducto. Este calor residual puede utilizarse para la climatización, proporcionando calefacción en y agua caliente sanitaria. Este enfoque combina la generación de electricidad y la climatización en un solo sistema eficiente.

Otra posibilidad son las **bombas de calor**, se están investigando sistemas de bombas de calor que utilizan hidrógeno como refrigerante en lugar de los refrigerantes convencionales.

También puede utilizarse como un medio de almacenamiento de energía térmica. En este enfoque, la electricidad generada a partir de fuentes renovables puede utilizarse para producir hidrógeno a través de la electrólisis del agua. Luego, el hidrógeno se almacena y puede utilizarse posteriormente para generar calor cuando sea necesario, lo que permite una mayor flexibilidad en la provisión de climatización en función de la demanda energética.

Hay opciones como las que plantea el proyecto H21C[112] para el programa Hy4Heat[134] del gobierno del Reino Unido. Hy4Heat tiene como objetivo establecer si es técnicamente posible, seguro y conveniente reemplazar el gas natural con hidrógeno en edificios residenciales, comerciales y aparatos que funcionan con gas.

#### ■ Energía eléctrica

Si bien los aspectos vistos anteriormente como la movilidad y la climatización tienen implícito el componente eléctrico, aquí se verán las dos opciones más viables para generar energía eléctrica para su posterior uso. **Celdas de combustible**, convierten el hidrógeno y el oxígeno en electricidad y genera como subproducto, agua. Actualmente, las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC<sup>1</sup>)[133] y

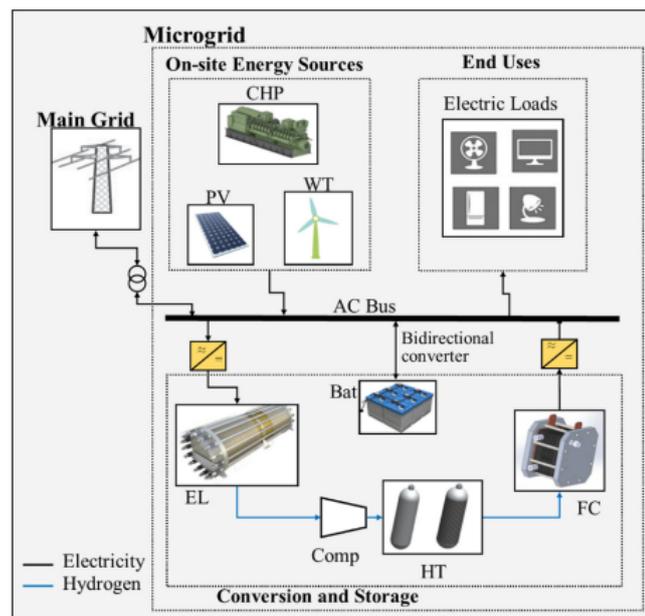
---

<sup>1</sup>Proton exchange membrane fuel cells

las de óxido sólido (SOFC<sup>1</sup>)[15] son las más utilizadas<sup>2</sup>.

**Aplicaciones estacionarias**, refiere a sistemas de respaldo de energía (ESS<sup>3</sup>). Estas aplicaciones pueden proporcionar una mayor flexibilidad y estabilidad al sistema eléctrico, especialmente cuando se integran con fuentes de energía renovable intermitentes. Permiten almacenar generación cuando se presenta el recurso, para su uso posterior.

Investigaciones recientes en esta área[40], presentan un modelo (ver Figura 6.42) para determinar la selección óptima y el despacho de Recursos Energéticos Distribuidos (DER) permitiendo evaluar la viabilidad de la aplicación de hidrógeno como **ESS** en una microrred. Obteniendo resultados favorables considerando los costos ambientales y las perspectivas de mercado, demostrando que la adopción de esta tecnología se convirtió en una buena alternativa, mejorando la gestión energética y reduciendo el costo total anual de la micro-red en un 14,1 %.



**Figura 6.42:** Topología básica de micro-red con H2 como ESS presentada por[40].

<sup>1</sup>Solid oxide fuel cell

<sup>2</sup>Existen también otras tecnologías como "Phosphoric acid fuel cells" (PAFC) o "Molten-carbonate fuel cells" (MCFC).

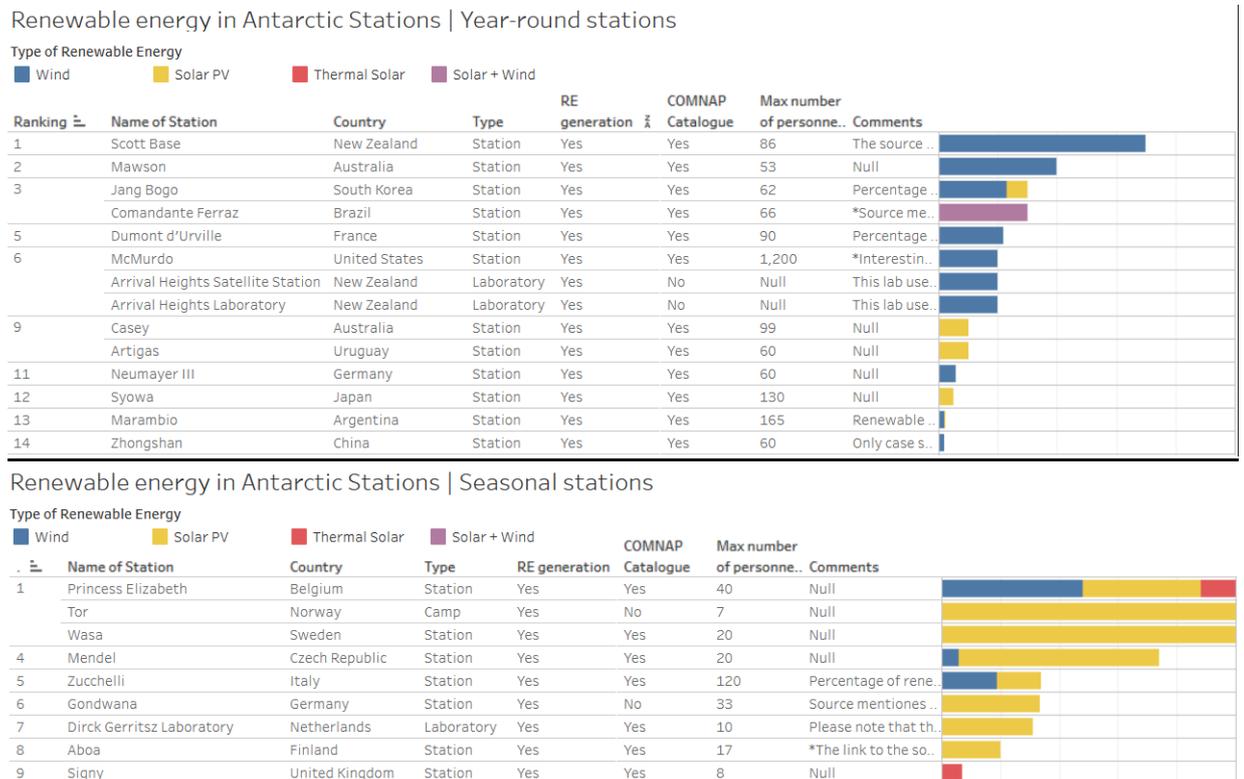
<sup>3</sup>Energy Storage System

## 6.6. Sistemas implementados hasta el momento

Hasta la fecha, se han instalado sistemas de energía renovable en 29 estaciones Antárticas, siendo estos incorporados a sistemas preexistentes.

Sin embargo, solo cinco de las 29 estaciones utilizan energías renovables para atender más del 50% de sus necesidades energéticas[96].

Estos sistemas se componen en su totalidad en sistemas Eólicos y Solar Fotovoltaico, y en muy menor medida Solar Térmico. En la Figura 6.43 se aprecian dos gráficos referentes a las tecnologías instaladas y el porcentaje de consumo que cubren cada una de ellas.



**Figura 6.43:** Porcentaje del consumo total de energía cubierto por fuentes renovables en instalaciones Antárticas[96]. Fuente: Trabajo independiente basado en el artículo "Renewable Energy in Antarctic Stations"; Autores: Juan Jose Lucci, Maria Alegre, Leandro Vigna, Autor del gráfico: Leandro Vigna[95].

A medida que estas tecnologías continúan evolucionando y mejorando, se espera que la implementación de energía renovable siga creciendo y desempeñe un papel cada vez más importante en el suministro de energía a nivel mundial.

Energía renovable en instalaciones de investigación antárticas se muestra en la Figura 6.44 donde se muestra el desglose porcentual de los tipos de energía renovable utilizados en las diferentes estaciones<sup>1</sup>



**Figura 6.44:** Desglose porcentual de los tipos de energía renovable utilizados en todas las estaciones de investigación antárticas[96]. Fuente: Trabajo independiente basado en el artículo “Renewable Energy in Antarctic Stations”; Autores: Juan Jose Lucci, Maria Alegre, Leandro Vigna, Autor del mapa: Leandro Vigna.

Según las entrevistas realizadas, la mayoría de las estaciones tienen planes para continuar con la descarbonización de sus sistemas energéticos en los próximos 10 años

<sup>1</sup>Para acceder a la versión en línea del gráfico, se sugiere visitar la referencia[157].

# Capítulo 7

## Planteo del Problema

### 7.1. Identificación del problema:

Las características que presentan las condiciones que se describen en este trabajo resaltan varios problemas a resolver para lograr objetivo general de contribuir con el desarrollo de la sostenibilidad, impulsando un modelo de autoabastecimiento energético. Dichos desafíos se describen en los siguientes puntos:

- La necesidad de un cambio de la matriz energética actual debido a su impacto medioambiental y riesgos asociados.
- Altos costos de movilidad del combustible asociados a la logística, traslados, mantenimiento de equipos, entre otros.
- Identificación de recursos renovables presentes en el área de estudio y la evaluación de los mismos. Estableciendo el estado del arte de aquellos que sean capaces de extraer energía de los recursos disponibles y en las condiciones planteadas.
- Demostrar que los recursos renovables identificados son capaces<sup>1</sup> de cambiar el paradigma de generación energética para de esta manera reducir total o parcialmente las emisiones de gases de efecto invernadero<sup>2</sup> emitidos por el modelo actual.

---

<sup>1</sup>¿Son suficientes para cubrir la demanda?¿Son confiables y predecibles? ¿Están disponibles por temporadas o permanentemente? ¿El estado del arte permite su explotación? ¿Esa tecnología está adaptada a las condiciones planteadas?

<sup>2</sup>De esta manera ser coherente con el compromiso del tratado antártico referente al cuidado del medio ambiente

- Lograr que la **intermitencia de los recursos renovables** se transformen en energéticos confiables que puedan cubrir la demanda, idealmente en todo momento y a su vez contar con un respaldo seguro en caso de fallas.

## 7.2. Análisis de la situación actual:

Históricamente, las formas de energía primarias utilizadas en los sitios de estudio están vinculadas a combustibles fósiles, específicamente hidrocarburos como el gasoil o la nafta, siendo la utilización de generadores, lo más habitual. Estos sistemas han demostrado dar solución a los requerimientos y ser confiables como sistemas de generación y respaldo.

El impacto económico y medioambiental de mantener este modelo es alto.

Esta tendencia se mantiene actualmente, pero se comienzan a materializar los primeros intentos de incluir energías renovables como fuente primaria. Las que han tenido más éxito son la energía eólica, solar fotovoltaica y en menor medida, solar térmica.

Estas son tecnologías maduras y con un desarrollo específico en los ambientes a los que refiere este trabajo.

Este rumbo de cambio a energías renovables tiende a establecerse de forma definitiva en el territorio Antártico, siendo el caso más emblemático el de la base Belga, Princess Elisabeth Antártica[121] que **combina los recursos Solar Fotovoltaico, Térmico y Eólico** para proveer de energía sus instalaciones. Otros recursos han sido objeto de estudios como Geotermia o Undimotriz, siendo en algunos casos imposibles su implementación por el estado del arte o las características del recurso y en otros casos por restricciones inherentes al tratado antártico.

## 7.3. Caso Base Científica Antártica Artigas

<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>BCAA

### 7.3.1. Ubicación

Se sitúa sobre la bahía de Collins-Maxwell, en la península Fildes de la isla Rey Jorge<sup>1</sup>.

Se trata de la isla más grande del archipiélago Shetland del sur, ubicada a 120 km de la península Antártica, entre el paso Drake al norte y el estrecho de Bransfield al sur, ver Figura 7.1.

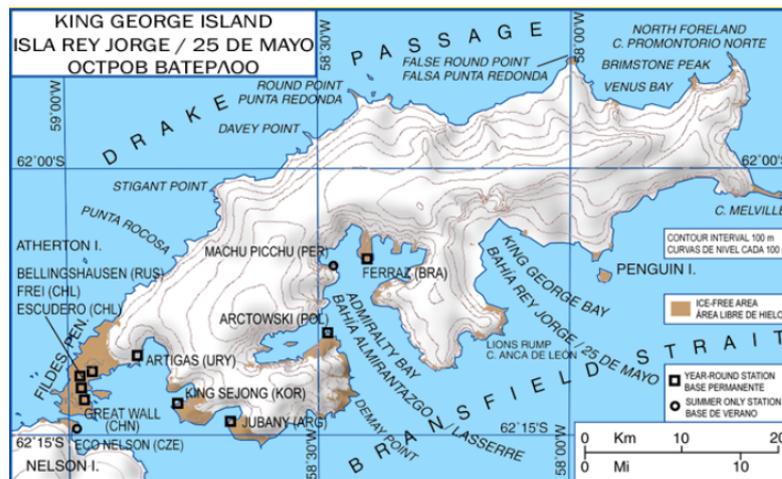


Figura 7.1: Mapa de la isla Rey Jorge y bases antárticas.

La BCAA se encuentra sobre un arco de playa de 1 km de longitud comprendido entre dos puntas rocosas y orientado hacia el sureste.

La base está localizada bajo la influencia del círculo de bajas presiones descrito en el Capítulo 4. El impacto de este fenómeno sobre el recurso solar en esta área es contundente debido a la presencia de nubes durante todo el año.

### 7.3.2. Abastecimiento de energía en la actualidad

En la actualidad la base se abastece con un mix energético que se describen a continuación:

- Generadores a Gas-Oil.
- Sistemas Solares Fotovoltaicos.

<sup>1</sup>Latitud -62,184722°, Longitud -58,903333°.

- Generador Eólico.

Históricamente, los **Generadores a Gas-Oil** han sido la fuente de suministro energético de confianza para atender las necesidades fundamentales de la base.

Actualmente, cuenta con cuatro generadores de una potencia de entre 120 a 131  $kVA$ , bastando con que uno de estos esté en funcionamiento para abastecer la totalidad de la demanda de la base.

La **Energía Solar Fotovoltaica** cuenta con dos sistemas instalados hasta el momento. El primero es un **sistema piloto** instalado en Marzo de 2018, cuenta con una potencia de 1  $kWp$ <sup>1</sup>, siendo montado solidariamente a una pared de una edificación, con un azimut Norte de  $+30^\circ$  y una inclinación de  $90^\circ$  [114], ver Figura 7.2.



**Figura 7.2:** Planta piloto de 1  $kW$ . Foto: autor de la tesis.

El segundo sistema Fotovoltaico es de 6  $kWp$ <sup>2</sup> y fue puesto en marcha en Mayo de 2019. En este caso la instalación está fijada a una estructura de hormigón perteneciente a una edificación preexistente, la inclinación de los módulos es de  $45^\circ$  y un azimut de  $+17^\circ$ .

<sup>1</sup>Cuatro módulos fotovoltaicos de 310  $Wp$ , sumando una potencia 1,24  $kWp$  instalados

<sup>2</sup>Veinticuatro módulos fotovoltaicos de 270  $Wp$ , sumando una potencia 6,48  $kWp$  instalados.



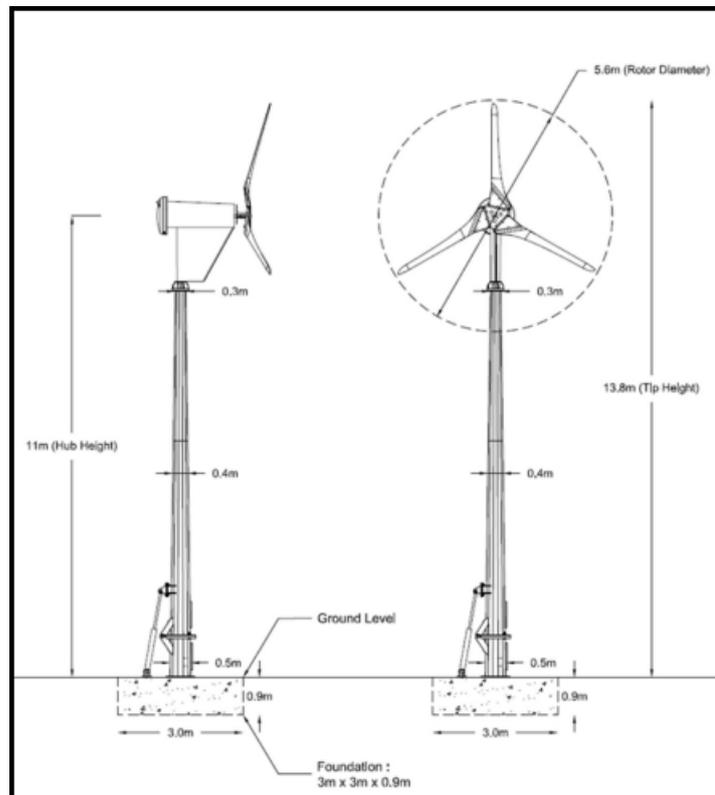
**Figura 7.3:** Vista de instalación, frente de módulos. Foto: autor de la tesis.



**Figura 7.4:** Vista trasera de anclaje de módulos. Foto: autor de la tesis.

### Energía Eólica

Entre Noviembre y Diciembre del 2021 se instaló el primer aerogenerador en la base, tiene un origen y potencia similar a los instalados en la PEA[89], ver Figura 7.5.



**Figura 7.5:** Parte de las especificaciones del generador Eólico SD6[161].

De esta manera, BCAA ha iniciado su transición hacia las energías renova-

bles, contando con una potencia instalada total de 13  $kW$  de potencia nominal. En todo caso, todavía depende principalmente de fuentes de energía no renovables para satisfacer sus necesidades energéticas<sup>1</sup>.

### **7.3.3. Recursos existentes, caracterización y aspectos vinculados a la generación.**

Como consecuencia del análisis desarrollado en los capítulos anteriores, se aprecia que existen dos recursos de alta relevancia para la generación energética, estos son, el recurso **solar** y **eólico**.

La relevancia de estos recursos se encuentra intrínsecamente ligada a la conjunción del estado de madurez tecnológica, la experiencia adquirida en su aplicación y la disponibilidad del recurso en el emplazamiento considerado. Seguidamente, se presentan las características de ambos recursos en la zona de estudio.

#### **7.3.3.1. Recurso Solar en BCAA**

Contar con una serie extensa de datos de medición de radiación solar, idealmente abarcando varios años, es esencial para comprender las variaciones a lo largo del tiempo y obtener información precisa sobre el potencial energético del sitio. En este caso se cuenta con dos años completos de datos, la disponibilidad de una serie más larga sería sumamente beneficiosa.

Una serie de datos más amplia permitiría identificar patrones estacionales, diurnos y anómalos con mayor confianza, fortaleciendo la base de información para la toma de decisiones informadas en el diseño y operación de sistemas. Además, una serie de datos extensa mejora la precisión de los modelos de predicción y proporciona una evaluación más sólida de la viabilidad técnica y económica de proyectos solares a largo plazo.

#### **■ Caracterización del Recurso Solar**

La caracterización del recurso solar adquiere una relevancia singular debido a las condiciones poco favorables de esta región. Este proceso resulta

---

<sup>1</sup>Demanda de la base se puede ver en Figura 7.22.

fundamental en la concepción y perfeccionamiento de sistemas de generación de energía solar.

De acuerdo a la información presentada en el Capítulo 4 referente al Clima Antártico, se espera que el sistema de bajas presiones tenga un impacto significativo que va más allá de los efectos típicos asociados únicamente a la ubicación geográfica.

A continuación, se delinean los aspectos primordiales de la caracterización del recurso solar en la BCAA.

#### ■ **Recurso disponible anualmente en BCAA**

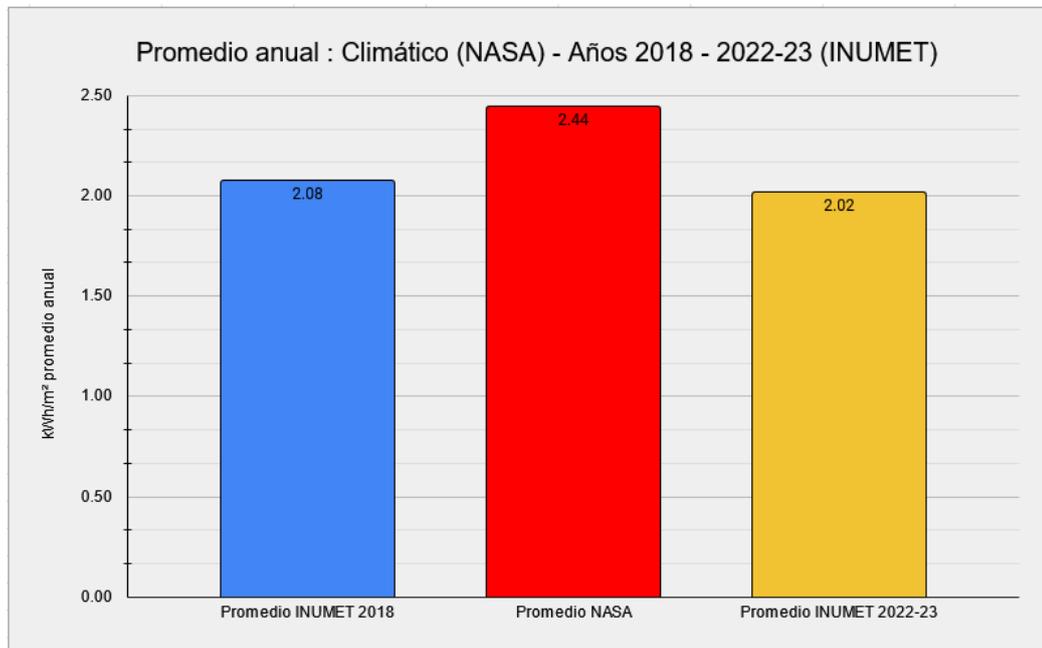
La realización de los cálculos para los promedios anuales acumulados produce los resultados presentados en la Figura 7.6. Para la comparación se utilizan datos de climatología NASA [63] y los años 2018 y 2022<sup>1</sup> medidos localmente.

El resultado plantea una diferencia porcentual de 17,40% y 15,07% entre los años 2022 y 2018 respecto a los datos NASA, lo cual es relevante, esto se puede deber a dos causas fundamentales. Que los dos años de muestreo fueran efectivamente por debajo de la climatología<sup>2</sup> o que los datos de los modelos globales sobreestiman el recurso real, esto resalta la importancia de tener una medida climatológica local.

---

<sup>1</sup>Datos 2018 completo, 2022 y 2023 de Junio 2022 a Mayo 2023. Fuente: INUMET [81]

<sup>2</sup>Despreciando errores de medida.



**Figura 7.6:** Promedios diarios anuales para radiación global en plano horizontal (GHI) acumulados para BCAA, Fuentes:NASA e INUMET[63, 81]Gráfica por: autor de la tesis.

Estos datos permiten tener una idea general del recurso disponible de GHI en base anual, adicionalmente se verá más adelante, que se puede ser específico con la utilización de estos datos.

- **Comparación del recurso en diferentes latitudes**

La estrategia empleada para llevar a cabo la evaluación del recurso involucra la comparación con otras áreas geográficas que ofrecen un marco de referencia pertinente para este estudio.

Para realizar la comparación se usan datos climatológicos cuya fuente es NASA[109]. La metodología de adquisición de datos se describe en[110], utilizando diferentes fuentes como MERRA, GEOS 5.12.4, GEWEX SRB R4-IP, CERES SYN1deg o FLASHFlux 4.

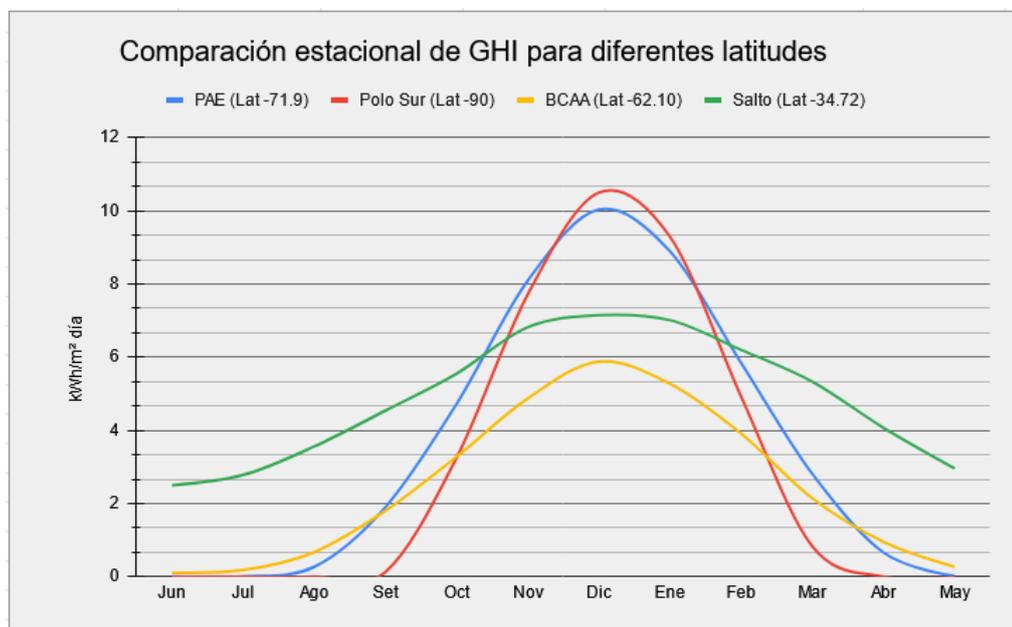
Los datos comparados son para los sitios que varían en un rango de latitud importante, se muestran en la Tabla 7.7.

NOMBRE DEL SITIO	Latitud	Longitud
Polo Sur	-90	0
Princess Elisabeth Antartica	-71,95	23,35
BCAA	-62,10	-58,54
Salto	-34,71	-55,69

**Figura 7.7:** Georeferenciación de sitios evaluados mediante adquisición de datos NASA[63] Gráfica por: autor de la tesis.

En la Figura 7.8 se presenta el comportamiento **estacional** del recurso en los cuatro sitios presentados anteriormente.

Se evidencia que en el sitio de interés, la disponibilidad del recurso es la más escasa, incluso en comparación con latitudes más elevadas. Esto es fundamentalmente debido a la alta presencia de nubosidad en el sitio. Por lo tanto, estas condiciones climáticas hacen que el recurso no sea lineal con respecto a la latitud.

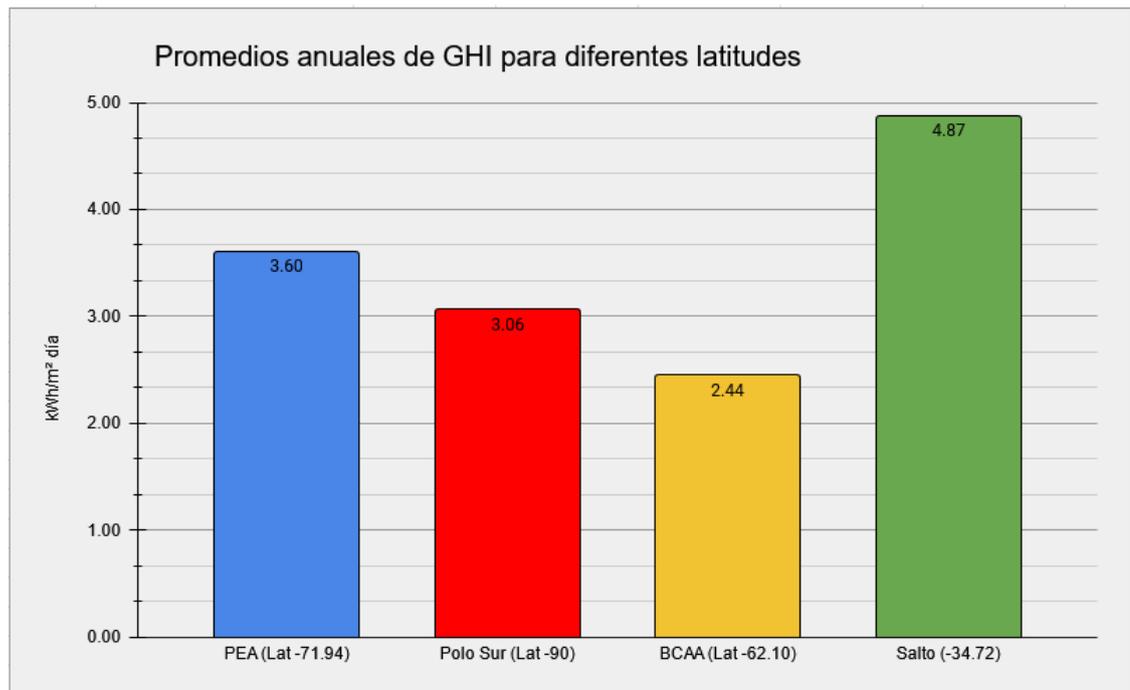


**Figura 7.8:** Comparación de GHI estacional para diferentes latitudes, Fuente:NASA[63]Gráfica por: autor de la tesis.

Otro aspecto es la distribución del recurso, como se vio en el Capítulo 4, este muestra sus máximos valores en los meses que van de Noviembre a Enero, esto es consistente con la ubicación de los sitios, el hemisferio Sur.

- **Promedios anuales comparativos diferentes latitudes**

La Figura 7.9 presenta los **promedios diarios anuales**<sup>1</sup>, destacándose que a pesar de estar en una latitud en apariencia más favorable, el valor mínimo correspondiente a BCAA en comparación con el Polo Sur y PEA. Esto resulta coherente con lo visto en el Capítulo Clima 4 donde se trató someramente el recurso.



**Figura 7.9:** Promedios anuales de GHI para diferentes latitudes, Fuente:NASA[63]. Gráfica por: autor de la tesis.

En la comparativa se incluye la ciudad de Salto, en Uruguay, este sitio presenta el mejor recurso de los presentados.

Esto se da por encontrarse en una latitud comparativamente más baja y cielos claros, a su vez el recurso tendrá una distribución anual más suavizada.

<sup>1</sup>La incidencia de GHI total anual dividida por la cantidad de días del año

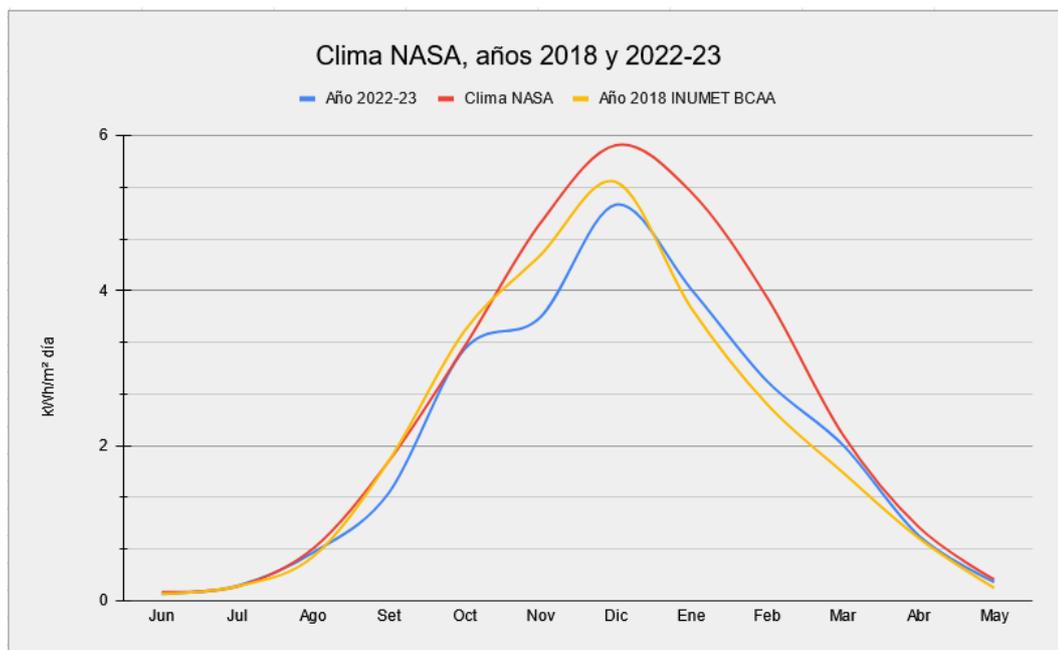
### ■ Variabilidad estacional del recurso

El sitio experimenta extremos de luz solar a lo largo del año, es esencial analizar la variabilidad en términos estacionales. Esto incluye la duración del día y la noche durante las estaciones y cómo influye en la cantidad de radiación solar recibida.

A continuación se presenta la distribución anual del recurso para BCAA.

La Figura 7.10 compara la climatología NASA con los años 2018 y 2022-2023[81]<sup>1</sup> medidos localmente.

En esta comparación se aprecia la distribución estacional del recurso, donde los valores máximos comprenden los meses de Noviembre a Enero, esto es consistente con la ubicación de los sitios, el hemisferio Sur, como se vio en el Capítulo 4, referente al Clima Antártico.



**Figura 7.10:** Promedios anuales de GHI para BCAA, Fuente:NASA (Climático) e INUMET (Períodos anuales)[63, 81]. Gráfica por: autor de la tesis.

### ■ Características generales del recurso

A continuación se presentan varias características relevantes del recurso, las cuales son esenciales para la toma de decisiones al momento de la

<sup>1</sup>Datos de años completos, Fuente: INUMET

implementación de proyectos fotovoltaicos, y constituyen un punto de partida clave para aprovechar al máximo el potencial de la energía solar.

### **Duración del día**

El día varía ampliamente debido a la alta latitud y lo que esto representa en la geometría solar.

El día más corto del año, con 5:04 *horas*, se da durante el solsticio de invierno, el 21 de Junio. Siendo el día más largo el 21 de Diciembre, con un día de 19:52 horas.

### **Altura solar**

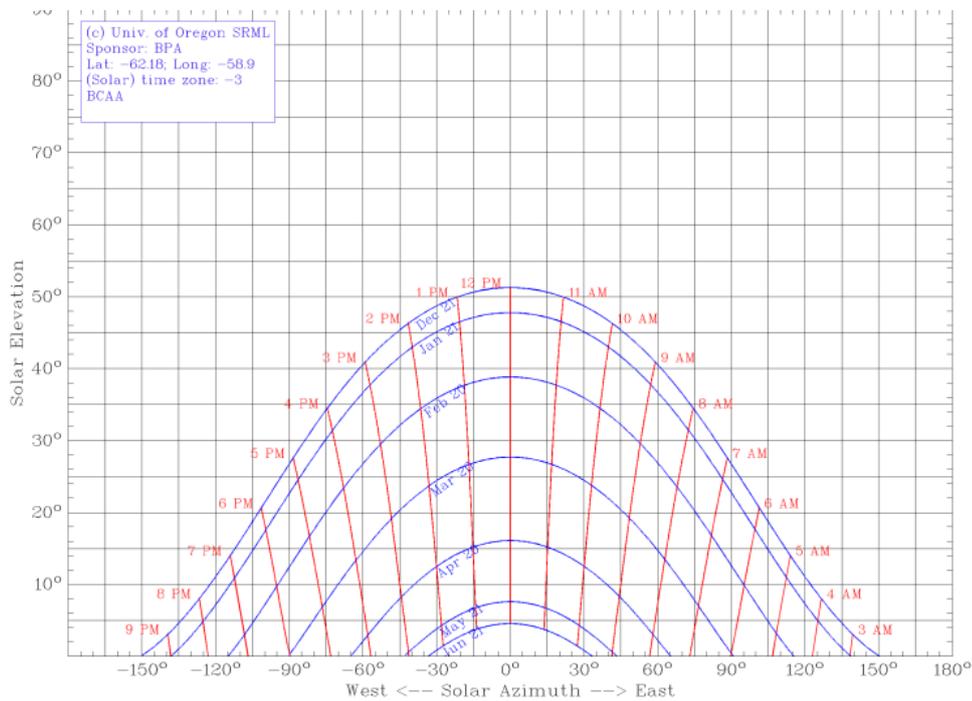
Este parámetro también experimenta una significativa variación debido a los mismos factores geométricos. Alcanza su punto más bajo el 21 de Junio, registrando un ángulo de  $4,55^\circ$  respecto al horizonte. Por otro lado, alcanza su punto más alto el 21 de Diciembre, con un ángulo de  $51,26^\circ$ .

### **Azimut**

Comúnmente en condiciones de un horizonte despejado, sin obstáculos, el criterio utilizado para la orientación de instalaciones solares es  $0^\circ$ , Norte<sup>1</sup>. Hay excepciones en las cuales los requerimientos de los sistemas hacen que el azimut más conveniente no sea Norte. Los parámetros antes establecidos (Altura Solar y Azimut) se pueden apreciar en la Figura 7.11.

---

<sup>1</sup>Como se verá más adelante, no es el caso de las instalaciones Fotovoltaicas en BCAA



**Figura 7.11:** Diagrama solar para BCAA. Fuente: Universidad de Oregon[39].

### Albedo

Como se vio en 5.1.2, está presente en las zonas polares debido a la acumulación de nieve y hielo, representando un aspecto importante en la generación fotovoltaica<sup>1</sup> y térmica.

Para la BCAA es particularmente diferente a las zonas del Plateau Antártico, ya que en verano los períodos libres de nieve pueden ser largos, coincidentemente con la porción del año cuando el recurso es más abundante.

En este período del año, se da la condición en la que el tipo de superficie cambia de ser altamente reflectante a ser poco reflectivo en un lapso muy corto de tiempo. El día puede comenzar con la superficie cubierta de nieve y en un período muy corto de tiempo queda expuesto el canto rodado<sup>2</sup>. Esto representa un cambio singular, ya que se pasa de un albedo de 0,9 a uno de 0,2 en un período de tiempo muy reducido.

### Atenuación por efectos de la atmósfera[7]

La presencia de nubosidad incide en la reducción del albedo, dando como

<sup>1</sup>Sobre todo en módulos bifaciales

<sup>2</sup>Superficie dominante en BCAA

resultado una disminución en este factor.

Considerando estos elementos, BCAA se caracteriza por tener una influencia relativamente baja en la presencia del recurso solar. Esto se debe esencialmente a estos tres factores, **altos períodos de cielo cubierto, cambio del albedo de la superficie en períodos cuando el recurso es más favorable y la alta latitud.**

### **Inclinación óptima:**

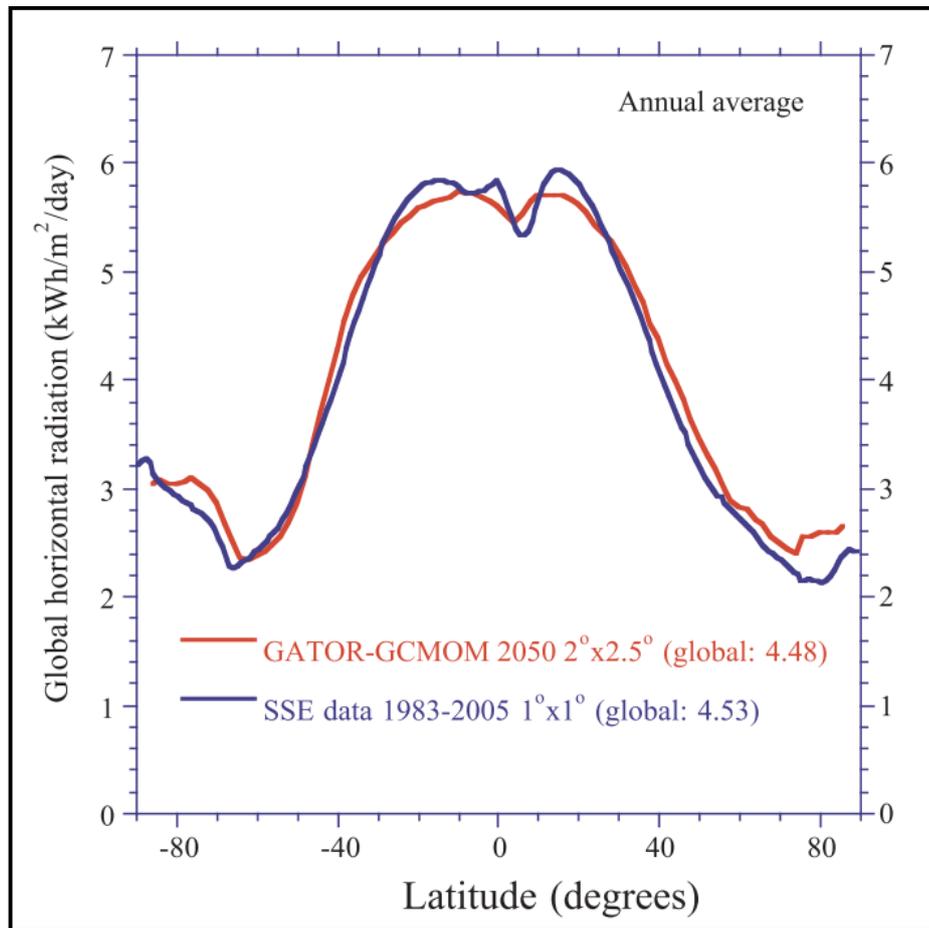
Evaluar la inclinación óptima para la instalación de dispositivos tomando en cuenta el ángulo de incidencia de la radiación solar a lo largo del año es crucial para un buen diseño.

Producto de a la declinación solar y la latitud del sitio, su influencia en la región polar es relevante. En el caso de BCAA, no hay períodos totales de oscuridad, pero sí períodos con muy baja altitud solar.

Según Mark Z. Jacobson & Vijaysinh Jadhav[85], se recomienda el seguimiento horizontal de 1 eje para todos los casos, **excepto en las latitudes más altas**, donde la inclinación óptima es suficiente.

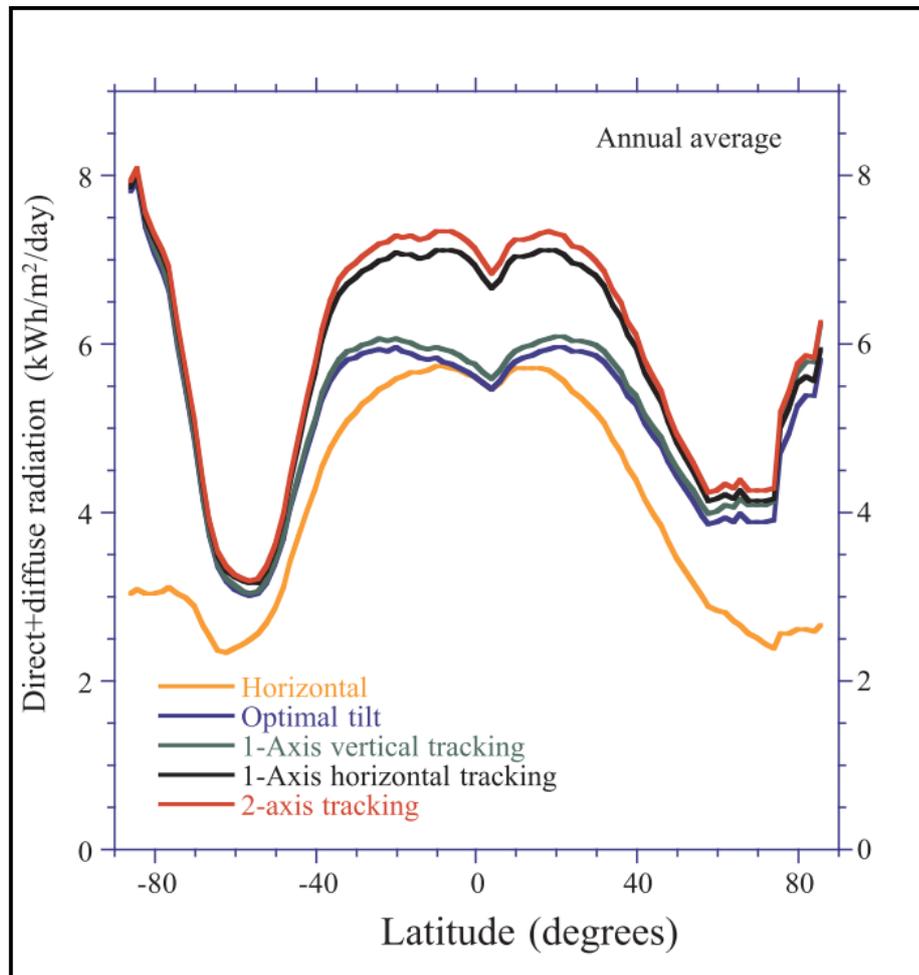
Establece que el seguimiento de módulos fotovoltaicos ofrecen poco beneficio sobre la inclinación óptima por encima de los 75°N y **60°S**.

De ese estudio, se muestra en la Figura 7.12 un gráfico que describe las características de la radiación incidente horizontalmente en superficie donde resalta la baja presencia del recurso sobre la latitud -60°.



**Figura 7.12:** Comparación de las predicciones del modelo GATOR-GCMOM[84] de resolución  $2^\circ \times 2.5^\circ$  promediadas zonal y anualmente para el año 2050 con las estimaciones satelitales de resolución  $1^\circ \times 1^\circ$  de la NASA Surface Meteorology and Solar Energy (SSE)[111] de 1983-2005 (NASA, 2018) de la irradiancia solar directa más difusa global que incide sobre un módulo en plano horizontal[85] Gráfica por:[85].

Según se ilustra en la Figura 7.13, se observa una disminución en la eficacia del seguimiento de uno y dos ejes a medida que se incrementa la latitud. En el rango, desde  $45^\circ$  hasta  $90^\circ$ , no se aprecian diferencias significativas. Esto sugiere que en toda la zona de estudio, la opción más conveniente es utilizar módulos fijos con la inclinación óptima.



**Figura 7.13:** Promedios anuales de radiación solar directa más difusa en módulos inclinados de manera óptima o seguimiento. La radiación global horizontal es la curva coloreada en amarillo. Las demás curvas son el producto de la radiación horizontal, diferentes sistemas de seguimiento y el ángulo óptimo. Gráfica por:[85].

Es importante comprender como una inclinación óptima no tiene el mismo impacto para diferentes latitudes. Como ejemplo se puede tomar Salto<sup>1</sup>, y otra como la Base Artigas<sup>2</sup>.

Estas dos latitudes, tienen una diferencia porcentual 68,3% para Salto y una de 76,7% en la Base Artigas. De este análisis se desprende que para toda la zona de estudio es conveniente la utilización de módulos fijos con inclinación óptima y no con sistemas de seguimiento. **La inclinación óptima** dependerá de los objetivos de rendimiento que se evalúen. Para la ubicación geográfica de BCAA se pueden **analizar dos opciones**.

<sup>1</sup>Latitud: -34,72°

<sup>2</sup>Latitud: -62,18°

Una es estableciendo una inclinación de los dispositivos para **aprovechar el recurso todo el año**.

### **Relación entre el ángulo de inclinación y la latitud.**

La configuración espacial óptima de los módulos con el fin de maximizar el rendimiento energético anual, el ángulo de azimut óptimo depende del hemisferio en el que se encuentre el caso de estudio. Para este caso, el hemisferio Sur, la orientación hacia el Norte es la óptima.

Una vez definido el azimut óptimo, se define el ángulo de inclinación óptimo.

A continuación, se presentan modelos orientativos para el cálculo de inclinación óptima. Según se desprende del trabajo de [65], teniendo en cuenta diferentes investigaciones, se puede determinar este ángulo para una latitud conocida. Para considerar los diferentes enfoques existentes en la literatura, se han analizado las siguientes metodologías (M1-M4) para obtener aproximaciones fiables sobre el ángulo de inclinación óptimo para la instalación de módulos fotovoltaicos:

Según [131], considerando que el ángulo óptimo de inclinación es igual a la latitud ( $|\phi|$ ) de la ubicación del sistema fotovoltaico, con el fin de validar la confiabilidad de la ecuación (7.1), se demostró que el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos es casi el mismo (98.5 %) que el obtenido con el ángulo óptimo estimado para un rango de latitudes desde  $0^\circ$  hasta  $85^\circ$  en el hemisferio Norte<sup>1</sup>.

$$\beta_{\text{opt}} = |\phi| \quad (7.1)$$

Otros estudios [62] afirman que el ángulo óptimo es el que se obtiene restando  $10^\circ$  a la latitud, ecuación (7.2)<sup>2</sup>.

$$\beta_{\text{opt}} = |\phi| - 10 \quad (7.2)$$

En la ecuación (7.3), se introducen constantes para aumentar la precisión en la relación entre la latitud y el ángulo de inclinación óptimo. De esta

---

<sup>1</sup>Se asume como hipótesis que puede funcionar de la misma manera para el hemisferio Sur

<sup>2</sup>Se sugiere utilizar esta ecuación para latitudes que van desde  $36^\circ$  hasta  $46^\circ$

manera,[62] afirmó que el ángulo de inclinación óptimo es el resultado de multiplicar 0.69 por la latitud y luego sumar  $3.7^{\circ}$ <sup>1</sup>.

$$\beta_{\text{opt}} = 3.7^{\circ} + 0.69 \cdot |\phi| \quad (7.3)$$

La ecuación (7.4) se presenta una variante de la relación entre  $\beta_{\text{opt}}$  y  $|\phi|$  con un desplazamiento y un factor multiplicativo. Donde la acumulación de polvo<sup>2</sup> en las superficies de los paneles puede reducirse aumentando  $10^{\circ}$ , siendo las pérdidas inferiores al 1% para desviaciones del ángulo de inclinación óptimo cercanas a  $10^{\circ}$ [91].

$$\beta_{\text{opt}} = 3.7^{\circ} + 0.69 \cdot (|\phi| + 10) \quad (7.4)$$

Utilizando las expresiones anteriormente descritas, se obtiene que el ángulo óptimo varía entre los límites de  $46,60^{\circ}$  y  $62,18^{\circ}$ , con un rango de movilidad de  $15,58^{\circ}$ .

- Método 1, ecuación (7.1)= $62,18^{\circ}$ .
- Método 2, ecuación (7.2)= $52,18^{\circ}$ .
- Método 3, ecuación (7.3)= $46,60^{\circ}$ .
- Método 4, ecuación (7.4)= $56,60^{\circ}$ .

**Otra opción**, es maximizar el recurso en los meses de verano, esto permite optimizar la generación cuando el recurso es más abundante y BCAA presenta más actividad, estos meses comprenden de Noviembre a Febrero.

En este caso se aconseja estudios sugirieron un valor fijo para variar el ángulo de inclinación anual óptimo entre  $+15^{\circ}$ [42] o  $+20^{\circ}$ [164], con el objetivo de maximizar la producción fotovoltaica en verano.

---

<sup>1</sup>Este método también es propuesto por el IDAE[80].

<sup>2</sup>Nieve en el caso presentado.

Contemplando estos estudios, el ángulo óptimo para la generación los meses de verano en BCAA variaría entre un mínimo de  $61,60^\circ$  y un máximo de  $82,18^\circ$ .

En conclusión, el sitio donde se encuentra BCAA cuenta con una distribución del recurso que es la esperada debido a la latitud en que se encuentra; sin embargo, debido a las condiciones meteorológicas locales y en especial al alto grado de nubosidad que se mantiene todo el año, es uno de los peores sitios en el mundo para la generación fotovoltaica.

### 7.3.3.2. Recurso Eólico en BCAA

Como se vio con el recurso solar, contar con una serie extensa de datos de dirección y velocidad del viento e idealmente abarcando varios años, es esencial para comprender las características relevantes del recurso, como pueden ser, velocidad y dirección media<sup>1</sup> o eventos extremos y períodos de retorno.

Parámetros que van a influenciar en las condiciones de diseño y estimación de energía generada.

En este caso se cuenta con varios conjuntos de datos que se verán a continuación.

#### ■ Caracterización del Recurso Eólico

Es altamente relevante conocer las características del recurso debido a que en primera instancia, por lo presentado en el Capítulo 4 las condiciones para la implementación de este tipo de sistemas sería favorable.

Este análisis expondrá los beneficios del sitio y las restricciones que se puedan presentar debido a las condiciones locales.

A continuación, se delinearán los aspectos más importantes de la caracterización del recurso Eólico para BCAA.

Las características más importantes a evaluar son, la **velocidad media del viento**, que va a definir la cantidad de energía que un aerogenerador puede generar<sup>2</sup>, la **distribución de velocidades**, la comprensión de la

---

<sup>1</sup>Ya que el viento es una magnitud vectorial y que en energía eólica solo se consideran las componentes en el plano horizontal, paralelo a la superficie terrestre.

<sup>2</sup>Una velocidad adecuada es esencial para una eficiencia óptima, ya que un viento constante y más rápido impulsa la producción energética.

**variabilidad estacional** en términos de velocidad y **dirección**<sup>1</sup>. Estos parámetros son esenciales para diseño y operación de parques eólicos.

■ **Recurso disponible anualmente**

Seguidamente, se presentan parámetros obtenidos de diferentes fuentes para evaluar el recurso disponible y determinar sus características.

Al igual que con el recurso solar, para hacer una evaluación inicial del recurso eólico se realiza una comparación donde se usan datos climatológicos usando como fuente los datos disponibles en NASA, cuya metodología se describe en[110] utilizando como insumos diferentes fuentes como MERRA, GEOS 5.12.4, GEWEX SRB R4-IP, CERES SYN1deg o FLASHFlux 4[109].

Los datos comparados son para los sitios que se muestran en la Figura 7.14.

NOMBRE DEL SITIO	Latitud	Longitud
Polo Sur	-90	0
Princess Elisabeth Antartica	-71,95	23,35
BCAA	-62,10	-58,54
Rosario	-34,22	-57,34

**Figura 7.14:** Georeferenciación de sitios evaluados mediante adquisición de datos NASA[63, 81] Gráfica por: autor de la tesis.

Estos datos se obtuvieron de la misma fuente con la finalidad de que sean comparativos con las siguientes características:

- Título: "NASA/POWER CERES/MERRA2 Native Resolution Climatology Climatologies",
- Versión: "v2.4.4",
- Nombre: "POWER Climatology API",
- Altura del muestreo sobre la superficie: 10 metros,
- Período de muestreo: Enero 2001 a diciembre de 2020,

<sup>1</sup>Teniendo en cuenta que el viento se trata de una magnitud vectorial.

→ Unidad de velocidad del viento:  $m/s$ ,

→ Unidad de dirección del viento: grados sexagesimales, °.

#### ■ Velocidad media del viento

Comparativamente con otros sitios de alta latitud, como muestra la Figura 7.15, BCAA tiene una media anual de velocidad del viento favorable a la generación eólica. Siendo esto lógico con la las componentes climáticos del sitio, como se viera en el Capítulo 4.

Comparando las medias con las de la localidad de Rosario<sup>1</sup>, donde se encuentra operativo el "Parque Eólico Rosario" desde 2015, se infiere que el promedio resulta prometedor.

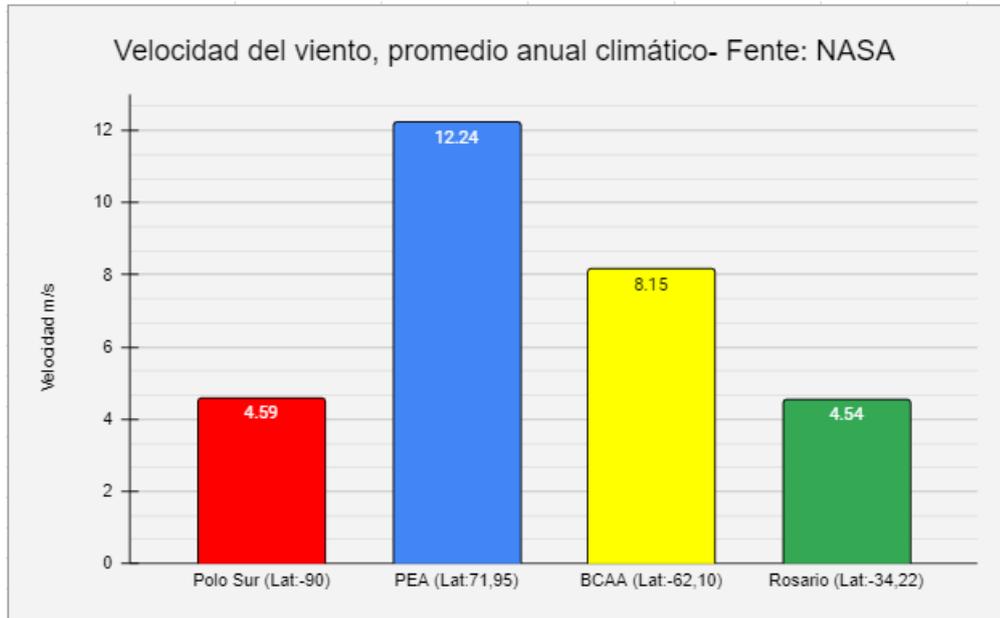
La componente negativa de este aspecto son los eventos extremos<sup>2</sup> y la proximidad del mar con la componente corrosiva que esto representa por su salinidad. Por otro lado, el promedio de PEA es el mejor de los presentados, probablemente producto de la influencia de los vientos catabáticos y en menor medida el círculo de bajas presiones. En cuando al promedio de los otros dos sitios, Polo Sur y Rosario, los promedios son muy similares.

Para Rosario, el valor es esperable según el mapa eólico del Uruguay[46], para el Polo Sur, esto se debe a su ubicación, la baja insolación solar, la topografía plana y la cercanía al polo geográfico, lo que reduce el efecto del movimiento de Coriolis en comparación con otras regiones de la Tierra[56].

---

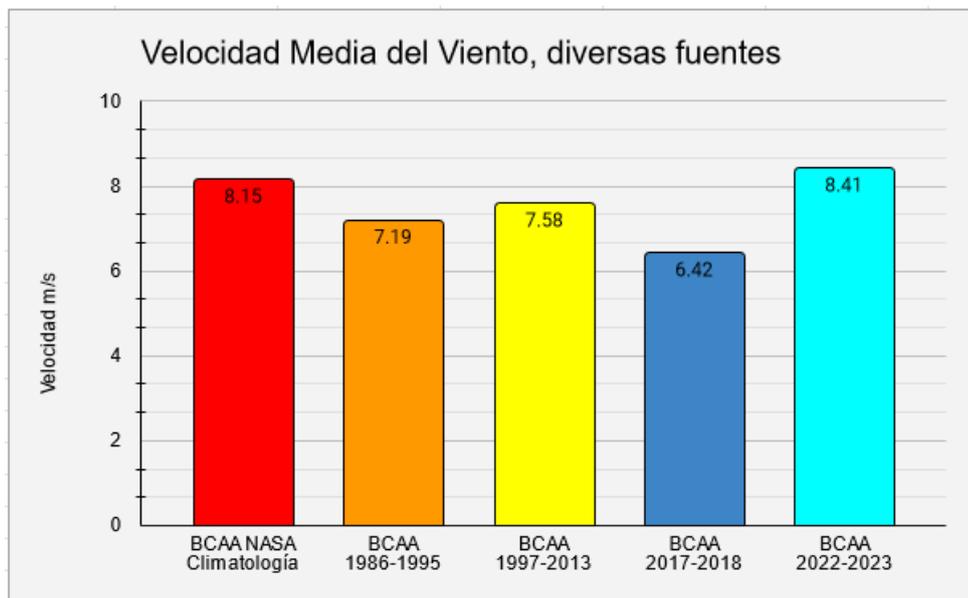
<sup>1</sup>Situada en el Uruguay continental (-34,22, -57,34)

<sup>2</sup>Se tiene registro de observadores meteorológicos que registraron vientos de 52,98  $m/s$ , el día 22/08/2017[81]



**Figura 7.15:** Promedios anuales de velocidad media del viento a 10 metros para Polo Sur, PEA, BCAA y parque Eólico Rosario, Uruguay[118]. Fuente:NASA[63] Gráfica por: autor de la tesis.

En la Figura 7.16, se muestran los promedios anuales de BCAA procedentes de diversas fuentes y períodos de datos específicos. Los detalles sobre el período de tiempo y las fuentes específicas se encuentran detallados en el Apéndice 2.

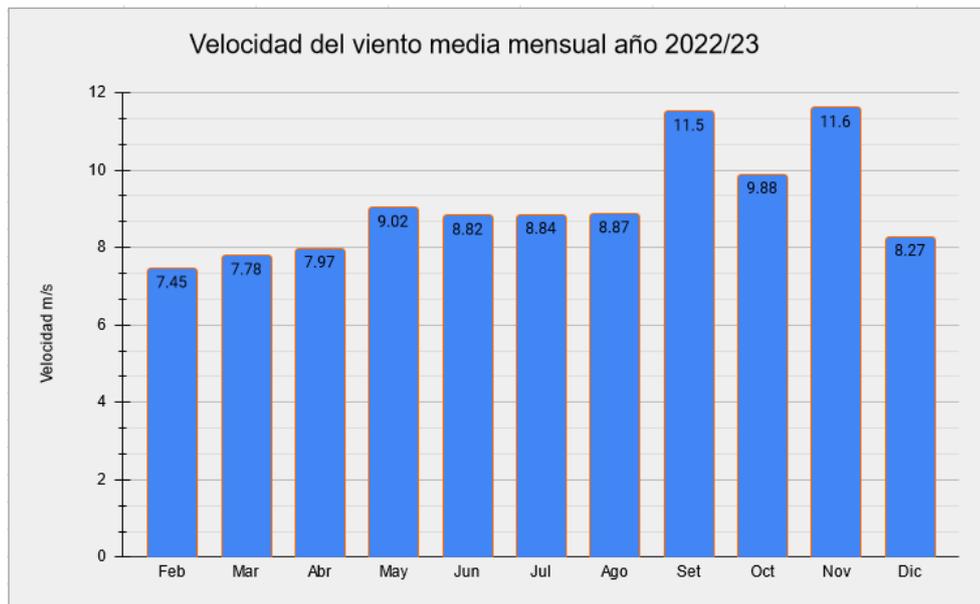


**Figura 7.16:** Promedios anuales, Climatológico-NASA períodos anuales INUMET. Fuente:NASA[81] Gráfica por: autor de la tesis.

### ■ Velocidad media del viento distribución estacional

Para establecer la distribución del recurso estacionalmente se analizan los promedios mensuales<sup>1</sup> utilizando datos adquiridos localmente mediante la estación meteorológica de INUMET (Ver Apéndice 2), los datos comenzaron a generarse en Marzo del año 2022[81]<sup>2</sup>.

La distribución estacional se muestra en la Figura 7.17 donde se aprecia una dispersión moderada a lo largo del año, a diferencia de lo que ocurre con el recurso solar. Esto favorece la generación en el contexto de ocupación anual de la base.



**Figura 7.17:** Promedios de velocidad media mensual del viento para BCAA a partir de un año de datos, Fuente: INUMET[81]Gráfica por: autor de la tesis.

A partir de los datos obtenidos localmente se obtuvieron los siguientes datos relevantes:

### ■ Velocidad máxima

Se registró un valor de 36,52  $m/s$  en el período anual 2022-2023<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Se generaron promedios mensuales a partir de promedios 10 minutales.

<sup>2</sup>Se decide trabajar con estos datos por tenerse un conocimiento cabal de la metadata de la estación meteorológica y ser datos adquiridos in-situ

<sup>3</sup>Medida obtenida en un conjunto de datos que comprende del 22/08/2022 AL 21/08/2023 se consultan datos de intensidad de vientos máximos 10 minutal. La medida se dio el 05/05/2023, 21:00, UTC:-3 Como se vio anteriormente, se tiene registros de velocidades máximas mucho mayores, 52,98  $m/s$

Es importante conocer los eventos extremos y los períodos de retorno, ya que se debe tener en cuenta este factor para la elección del aerogenerador. Siendo la velocidad máxima tomada como velocidad de referencia, que no es más que el valor extremo, con un periodo de retorno de 50 años de la velocidad media en 10 minutos, y la intensidad de turbulencia para valor medio de la velocidad superior a  $15 \text{ m/s}$ .

Es claro que en este caso no se tienen registro de los últimos 50 años por lo que sería coherente pensar en que se pueden dar registros mayores a los recogidos en el período de un año.

- **Promedio anual de velocidad de viento:**  $8,41 \text{ m/s}$ [81], sobre un total de datos horarios (8244 sobre 8760) que comprenden un año (Software utilizados MCH y R[107, 126], del 22 Ago 2022 al 21 de Ago 2023).

- **Períodos con una velocidad de viento inferior a  $2,5 \text{ m/s}$ <sup>1</sup>:** Suman 22 días al año, unas 530 *horas*, resultando esto el 6,1 % del muestreo anual<sup>2</sup>.

- **Dirección del viento**

La dirección del viento y el nivel de rugosidad del entorno influyen en la ubicación de los aerogeneradores para aprovechar al máximo los patrones de viento predominantes, determinar las direcciones del viento más frecuentes es ventajoso para diversos aspectos del diseño y cálculos de generación.

Como se aprecia en la Figura 7.19 la dirección del viento predominante es Oeste Noroeste<sup>3</sup> debido a la circulación atmosférica predominante vinculada al cinturón de bajas presiones visto en el Capítulo 4.

- **Densidad de probabilidad de la Velocidad**

Siendo que la velocidad del viento es una variable estocástica. Los histogramas de frecuencia son a menudo presentados mediante funciones estadísticas estándar y representan claro como se comporta el recurso.

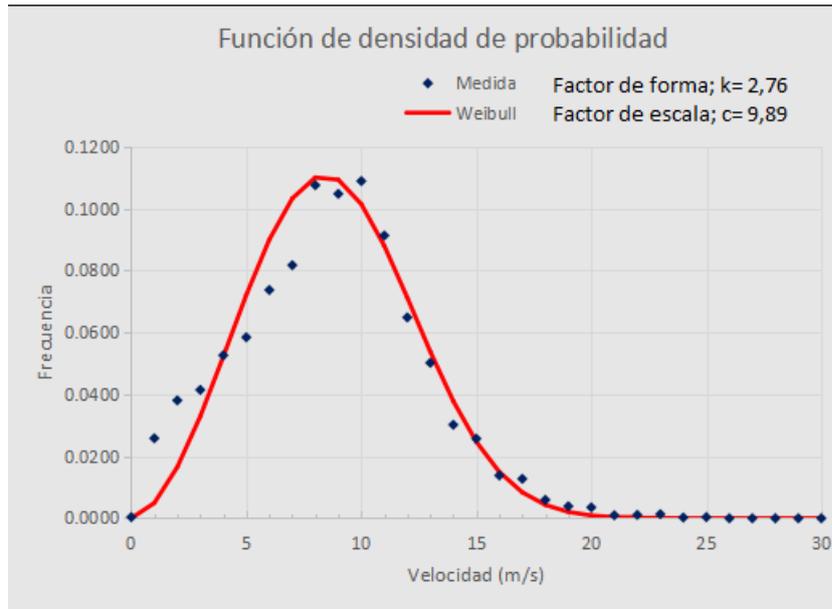
---

<sup>1</sup>Se toma este valor, ya que es el estipulado como velocidad de arranque del aerogenerador.

<sup>2</sup>Datos que comprenden del 22/08/2022 al 21/08/2023, promedios horarios conformados por un muestreo cada diez minutos. Se obtuvo este valor de una serie de 8760 datos, de los cuales 8244 fueron utilizables.

<sup>3</sup>ONO

Esta variable proporciona información sobre la distribución de las velocidades del viento para BCAA durante el período de tiempo de estudio<sup>1</sup>. En la Figura 7.18 se presenta la densidad de probabilidad de la velocidad media del viento[26].



**Figura 7.18:** Gráfico Weibull, densidad de probabilidad de viento. Gráfica por: autor de la tesis.

La función de densidad de probabilidad que se utiliza es la presentada en la ecuación (7.5)

$$p(V) = \frac{k}{c} \left( \frac{V}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \quad (7.5)$$

Donde:

$k$  = factor de forma.

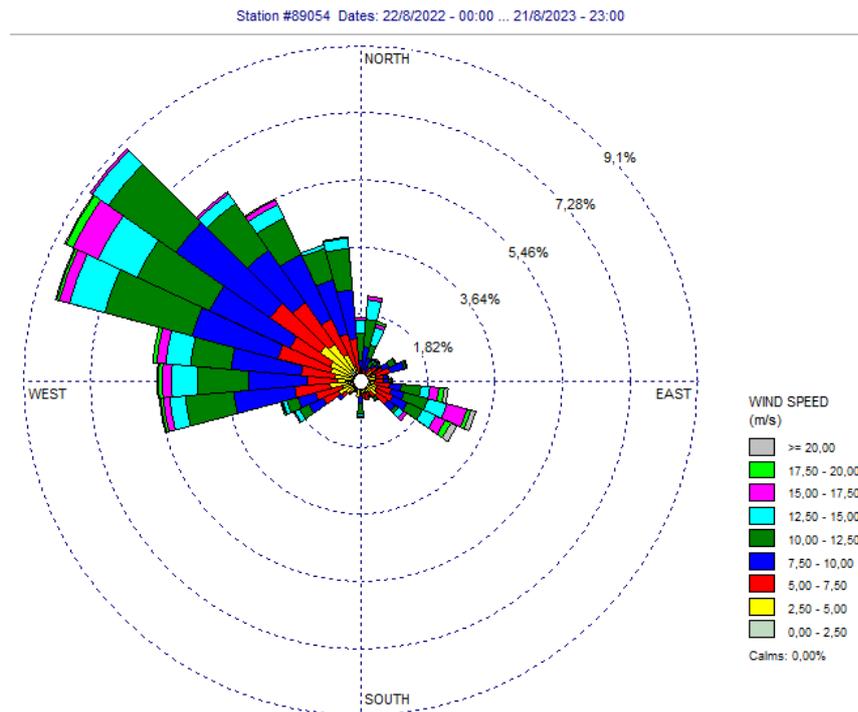
$c$  = factor de escala.

En este caso, se realizó un ajuste por mínimos cuadrados. El ajuste minimizó la diferencia entre los valores predichos y los datos observados. Este método permite determinar los parámetros  $k$  y  $c$  que mejor se ajustan a los datos, proporcionando una representación de la distribución del

<sup>1</sup>En este caso se utilizan los datos 2022-2023 anuales brindados por INUMET.

viento en la ubicación estudiada.

- **Rosa de los vientos.** Conociendo la **velocidad, dirección del viento y la frecuencia de probabilidades** se puede elaborar la rosa de los vientos como se presenta en la Figura 7.19. En la rosa se representan las velocidades medias



**Figura 7.19:** Rosa de velocidades medias, dirección y frecuencia, con datos de un año INUMET 2022-2023 e intensidad de viento. Gráfica por: autor de la tesis., elaborada con WRPLOT[51], Nota: La rosa de los vientos indica la dirección desde la cual sopla el viento.

La dirección más persistente del viento viene de la dirección ONO, lo que es lógico con lo visto sobre el cinturón de bajas presiones en el Capítulo 4. Con los datos presentados anteriormente es posible identificar la tecnología de aerogeneradores apropiada y optimizar su disposición en el sitio como también estimar la producción.

Además, esta información es vital para garantizar operaciones seguras al evitar cargas excesivas o condiciones de viento adversas que puedan afectar negativamente la durabilidad del equipo.

Con los datos obtenidos<sup>1</sup> se definen que aerogeneradores son compati-

<sup>1</sup>Velocidad máxima 52,98 m/s

bles con el sitio. Según se muestra en la Figura 7.20, referente la norma 61400-2, los aerogeneradores óptimos deben ser Clase A.

Tabla 1 – Parámetros básicos para las clases de aerogeneradores pequeños

Clase de AP		I	II	III	IV	S
$V_{ref}$	(m/s)	50	42,5	37,5	30	Valores a especificar por el proyectista
$V_{ave}$	(m/s)	10	8,5	7,5	6	
$I_{15}$ (Nota 2)	(-)	0,18	0,18	0,18	0,18	
$\alpha$	(-)	2	2	2	2	
NOTA						
1) Los valores se aplican a la altura del buje, y						
2) $I_{15}$ es el valor característico adimensional de la intensidad de la turbulencia para 15 m/s, donde 0,18 es el valor mínimo que debe utilizarse, y el anexo M trata de la intensidad de la turbulencia;						
3) $\alpha$ es el parámetro adimensional de la pendiente a utilizar en la ecuación (7).						

Figura 7.20: Clases de aerogeneradores definidos por la norma UNE-EN 61400-2[4].

### 7.3.4. Funcionamiento de sistemas renovables existentes en BCAA

La evaluación de funcionamiento de sistemas existentes y los cálculos realizados se analizan a continuación.

#### Generador Solar Fotovoltaico

Para analizar el rendimiento de sistemas fotovoltaicos se evalúan los siguientes indicadores de rendimiento, **Factor de Rendimiento (PR)**<sup>1</sup> y **Factor de Planta** y se comparan con estándares esperados para sistemas de este tipo.

#### Factor de Rendimiento (PR):

Esta métrica se utiliza comúnmente en la industria fotovoltaica para evaluar la eficiencia de un sistema solar fotovoltaico. Representa la relación entre la **energía eléctrica generada** por el sistema fotovoltaico y la **energía solar incidente** en el sistema.

Compara la producción real de energía con la producción teórica máxima, considerando las condiciones de irradiación solar y la orientación del

<sup>1</sup>También conocido como Performance Ratio

sistema.

Un PR alto indica un sistema eficiente, mientras que un PR bajo puede señalar problemas de rendimiento[pg 47-48, 9].

A continuación se presenta la expresión genérica para el cálculo del PR en la Ecuación (7.6):

$$\text{Performance Ratio (PR)} = \frac{\text{Energía Real}}{\text{Energía Ideal}} \quad (7.6)$$

Esta magnitud indica el porcentaje de energía que está realmente disponible para exportar a la red una vez descontadas las pérdidas y el consumo propio de la instalación. Es importante tener en cuenta que el PR, es independiente de la ubicación geográfica, y del tipo de planta, por lo que es útil para evaluar el rendimiento de la planta comparando dos plantas similares, aunque estén ubicadas en sitios diferentes.

Para tener un cálculo certero se aplica la norma **UNE IEC 61724**[1, 78, 146], estándar europeo donde se describen las recomendaciones generales para el análisis del comportamiento eléctrico de los sistemas fotovoltaicos, tanto conectados a la red como autónomos.

De esta norma se desprende la siguiente Ecuación (7.7):

$$PR = \frac{E_{AC}}{Ha(\alpha, \beta) \cdot 365 \cdot A_{GFV} \cdot \eta} \quad (7.7)$$

**Donde:**

- $E_{AC}$ : Energía generada en  $kWh$  inyectada a la red<sup>1</sup>.
- $Ha(\alpha, \beta)$ : Irradiación anual incidente en el plano del generador medida en  $kWh/m^2$ , siendo  $\alpha$  el azimut del generador<sup>2</sup> y  $\beta$  su ángulo de inclinación sobre la horizontal<sup>3</sup>.
- $A_{GFV}$ : Área del generador Fotovoltaico,  $m^2$ .
- $\eta$ : Eficiencia del generador fotovoltaico.

---

<sup>1</sup>Promedio de los años 2020, 2021 y 2022, Fuente:[154]

<sup>2</sup>El azimut del generador es de  $+17^\circ$ .

<sup>3</sup>El ángulo del generador respecto a la horizontal es de  $45^\circ$ .

Esta ecuación proporciona una medida del rendimiento del sistema, considerando la cantidad de energía eléctrica generada ( $E_{AC}$ ) en relación con la energía solar incidente en el generador ( $Ha(\alpha, \beta)$ ), el área del generador ( $A_{GFV}$ ) y la eficiencia del generador ( $\eta$ ). Introduciendo los valores correspondientes en la Ecuación:

$$PR = \frac{4656,4 \text{ kWh}}{(2,73 \text{ kWh/m}^2 (17^\circ, 45^\circ) \cdot 365) \cdot 39,28 \text{ m}^2 \cdot 16,5\%} = 72,1\%$$

Valor obtener un valor correspondiente a  $Ha(\alpha, \beta)$ , se utilizó el período de Octubre del 2022 a Octubre del 2023. Para ese año se tiene un valor de GHI de  $1,98 \text{ kWh/m}^2$ , obteniéndose un valor GTI de  $2,73 \text{ kWh/m}^2$ <sup>1</sup>.

En este caso se obtiene 72,1% para el promedio de los años 2020, 2021 y 2022, mientras que individualmente se obtienen, 78,6%, 68,5% y 69,2% respectivamente. Estos valores se encuentran promedialmente dentro de los valores esperados para Uruguay, 65% y 80%.

#### **Factor de Planta (PF):**

El Factor de Planta<sup>2</sup>, es una métrica utilizada para evaluar el rendimiento de sistemas de generación de energía, como aerogeneradores o centrales eléctricas en general.

El Factor de Planta se define como la relación entre la energía generada por una planta fotovoltaica[113, 152]durante un período de tiempo y la que hubiera producido durante ese período de tiempo si hubiese funcionado continuamente a potencia nominal<sup>3</sup>.

En la Tabla 7.1 se muestran diferentes Factores de Planta para diversos sistemas de generación energética.

De este modo, se esperan valores típicos de FP de entre 10% y 30%.

---

<sup>1</sup>Para los cálculos, se utilizó el modelo de trasposición Ruiz Árias, se consideró un valor de Albedo de 0,35 de forma arbitraria. Sin embargo, comportamiento del Albedo es objeto de estudio debido a las significativas variaciones que presenta a lo largo del día, especialmente durante el verano, cuando el recurso solar es más abundante en la zona.

<sup>2</sup>También llamado Factor de Capacidad

<sup>3</sup>Generalmente el FP se calcula para un período de un año (8760 horas), contemplando datos faltantes

<b>Tecnología</b>	<b>Factor de Capacidad</b>
Eólica	10 – 40 %
Fotovoltaica	10 – 30 %
Hidroeléctrica	50 – 60 %
Nuclear	60 – 98 %
Termoeléctrica carbón	70 – 90 %
Ciclo Combinado	60 – 70 %

**Tabla 7.1:** Factor de Capacidad para diferentes sistemas. Fuente:[152].

Un estudio técnico del 2016[119], presenta para el territorio uruguayo continental un promedio de Factor de Planta del 17%, lo que se puede tomar como referencia.

Para realizar el cálculo de Factor de Planta se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Factor de Planta (FP)} = \frac{\text{Energía Generada Sistema (kWh)}}{\text{Energía Teórica Máxima Sistema (kWh)}} \quad (7.8)$$

A continuación se presenta el resultado basado de la ecuación (7.8), al introducir los valores conocidos, obteniéndose el valor del FP<sup>1</sup>.

$$\text{Factor de Planta (FP)} = \frac{4656,4 \text{ kWh}}{6,48 \text{ kW} \cdot 8760} = 8,2 \%$$

El Factor de Planta resultante se muestra bajo, lo que hace sentido con lo esperado, según lo visto en el capítulo referente al clima.

La nubosidad afecta en gran medida la generación, siendo este un punto crucial en la utilización del recurso.

### **Generador Eólico:**

Del mismo modo que en el sistema Fotovoltaico, para el Factor de Capacidad del generador Eólico, se puede ver en la tabla en la Figura 7.20 que los valores típicos para plantas eólicas oscilan entre el 10% y el 40%.

### **Factor de Planta (FP)<sup>2</sup>:**

<sup>1</sup>Promedio de los años 2020, 2021 y 2022. Fuente: UTE[154]

<sup>2</sup>También llamado Factor de Capacidad

El FC se calcula como la relación entre la energía real generada por el sistema durante un **período de tiempo** y la energía que podría haber generado si funcionara a su capacidad máxima durante ese mismo período temporal.

En el caso de los aerogeneradores[163], se relaciona con la generación de energía eólica en comparación con la capacidad máxima teórica basada en la velocidad del viento.

Se analiza el cálculo utilizando la ecuación (7.9) que se presenta a continuación:

$$FC = \frac{\text{Energía generada}}{\text{Energía teórica máxima}} \cdot 100 \% \quad (7.9)$$

Insertando los valores correspondientes obtenemos lo siguiente:

$$FC = \frac{24032 \text{ kWh}}{8760 \text{ hs} \cdot 6 \text{ kW}} \cdot 100 \% = 45 \%$$

Este resultado se presenta fuera del rango superior visto anteriormente en la Tabla 7.1. Para evaluar más en detalle, se presenta la Tabla 7.2 donde se muestra una calificación más precisa de los factores de capacidad agrupados en seis rangos.

Factor de capacidad (CF)	Calificación
<b>Menos de 0,2</b>	Inaceptable
<b>0,2-0,25</b>	Aceptable
<b>0,25-0,30</b>	Bueno
<b>0,3-0,4</b>	Muy bueno
<b>0,4-0,5</b>	Excelente
<b>Mayor de 0,5</b>	Extraordinario

**Tabla 7.2:** Calificación de Factores de Capacidad para generación eólica Fuente:[102].

El Factor de Capacidad se ajusta a la calificación de Excelente, siendo esto coherente debido a la descripción climática y la ubicación geográfica de BCAA descritos en el Capítulo 4. Este resultado hace que esta tecnología resulte atractiva.

## 7.4. Viabilidad para BCAA

Proceso de evaluación de viabilidad se realiza mediante una **auditoría energética**, detallándose los datos más relevantes de los sistemas.

El objetivo principal es identificar como están conformadas en el momento actual, las cargas y la generación, para así identificar oportunidades de mejora en el sentido que se le da a este trabajo.

De esta manera se elabora una hipótesis de la posible solución, la cual involucra la implementación de energías renovables.

### **Auditoría Energética**

Tiene como objetivo analizar y evaluar el consumo de energía para identificar oportunidades de mejora.

En este caso apuntan a identificar acciones que pueden hacer que el sistema pueda integrar energías renovables identificadas en este trabajo.

### **Relevamiento de consumos históricos:**

Si bien la BCAA comenzó sus actividades en diciembre de 1984, no se tiene un registro del consumo detallado hasta tiempos más recientes.

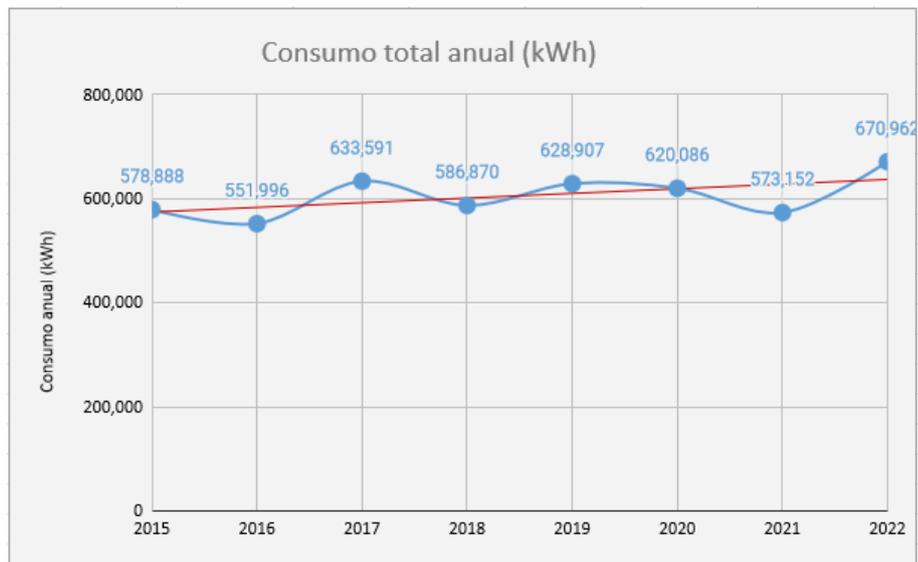
Actualmente, se cuenta con un registro detallado desde el año 2015, en la Figura 7.21 se presentan los períodos anuales de consumo correspondientes al total<sup>1</sup> de la base.

Los registros de **consumo anual** son importantes para identificar diferentes aspectos.

- Establecimiento de una línea base para tener una visión general del consumo de energía a lo largo de un año, sirviendo como punto de comparación y análisis.
- Planificación largo plazo al proporcionar una visión general de las tendencias de consumo y ayudar en la proyección de necesidades energéticas futuras.

---

<sup>1</sup>Incluye acondicionamiento térmico, iluminación y servicios, **no incluye transporte.**



**Figura 7.21:** Consumo anual BCAA período 2015-2022. Nota: fuente UTE[154]Gráfica por: autor de la tesis.

Interpretando la Figura 7.21 se puede establecer un sesgo de consumo estable. Ciertas variaciones se pueden adjudicar a mejoras de sistemas de calefacción, instalación de nuevos sistemas que incrementan el consumo, variación de personal o baja de operaciones por COVID19.

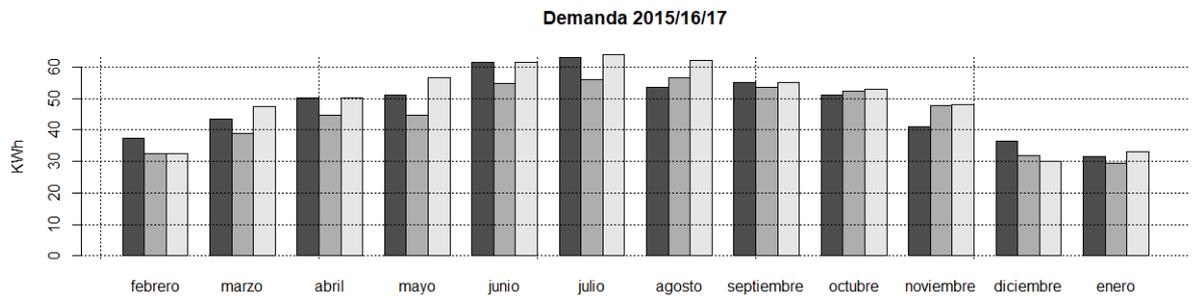
A pesar de estas variaciones, se puede identificar un consumo estable en los últimos años.

De esta manera se tienen elementos para hacer una proyección de consumo en caso de integrar nuevos equipos, implementar mejoras en la eficiencia o integrar nuevas fuentes de energía que aporten al sistema.

Para analizar más en profundidad el consumo e identificar patrones estacionales se analizan **valores mensuales de consumo** con los datos que se disponen. Estos datos permiten identificar variantes que se dan asociadas los diferentes períodos del año. Esto se puede deber a una variedad de aspectos como la actividad de la base, cantidad de personas, también se pueden identificar problemas o anomalías de funcionamiento en algún equipo o sistema.

En la Figura 7.22 se visualiza que los consumos no tienen una gran variación mensual en los años evaluados<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Se tienen datos de carácter mensual para los años 2015, 2016 y 2017



**Figura 7.22: Demanda mensual** de tres años consecutivos. Nota: fuente UTE. Gráfica por: autor de la tesis.

Esta estabilidad en el consumo podría deberse a diversos factores. De manera intuitiva, se podría pensar que en los meses de verano la demanda disminuiría con una mayor diferencia porcentual, debido a que se reduce el consumo en calefacción; sin embargo, no resulta de esa manera. También se podría pensar que en invierno la demanda debería bajar dado que la dotación<sup>1</sup> es habitualmente de 8 personas y en verano puede llegar a más de 50 los consumos de acondicionado térmico deben permanecer estables. De cualquier forma, este debe ser objeto de estudio para implementar mejoras futuras.

### Aportes Renovables

En los últimos años, la base antártica ha incorporado fuentes de energía renovable, como la eólica y solar.

Estos son sistemas pilotos que permiten evaluar su rendimiento y proyectar una expansión del parque renovable par cubrir una mayor parte de las necesidades energéticas. Eventualmente, esta expansión se puede hacer de manera robusta y segura con la experiencia generada.

### Generación Fotovoltaica

Como se vio anteriormente, la base cuenta con dos generadores pilotos entregando energía a la red local.

El **Piloto 1** cuenta con una potencia instalada de 1,23 kWp, con una genera-

<sup>1</sup>Personal que opera la Base Artigas durante el invierno.

ción anual promedio de 594,2  $kWh$ <sup>1</sup>.

El **Piloto II** tiene una potencia instalada de 6,489  $kWp$ , aportando un total anual (en promedio) de generación de 4656,4  $kWh$ <sup>2</sup>.

En última instancia, el aporte solar fotovoltaico al sistema es de una potencia instalada total de 7,729  $kWp$ .

Aportando un promedio de 5250,6  $kWh$  al año.

### Generación Eólica:

La potencia Eólica está compuesta por un único generador de 6  $kWp$ .

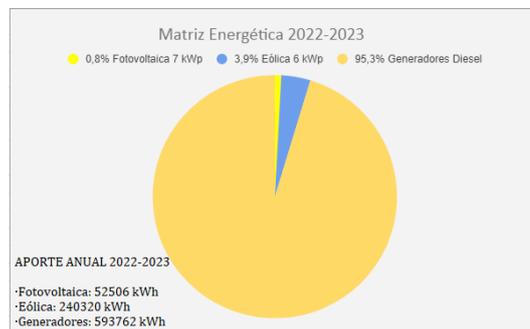
El generador aporta un total anual de 24032  $kWh$ <sup>3</sup>

### Generación convencional, Generadores Diesel:

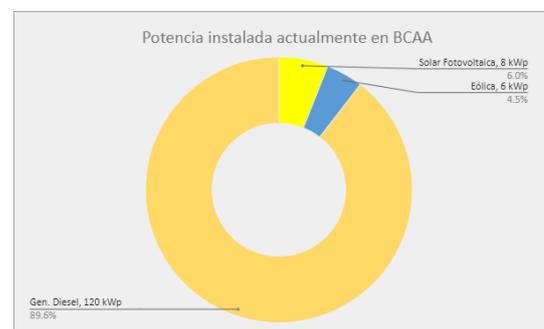
En la base se cuenta con tres generadores diesel de una potencia nominal de 120  $kVA$ . Estos generadores no funcionan en paralelo, sino que cada uno es suficiente para cubrir las necesidades energéticas de la base. Se hace una rotación del uso para su mantenimiento.

El último dato de generación anual que se posee es de 575247  $kWh$  para el año 2022[154].

**Composición de la Matriz Energética Actual:** A la luz de la información previamente expuesta, se presenta en la Figura 7.23, la configuración actual de la matriz energética. En este contexto, se está ante un escenario de cobertura renovable del 4,6%.



**Figura 7.23:** Matriz energética actual, año 2023 en BCAA. Nota: fuente UTE. Gráfica por: autor de la tesis.



**Figura 7.24:** Potencia instalada actualmente, año 2023 en BCAA. Gráfica por: autor de la tesis.

<sup>1</sup>Promedio de los años 2019, 2020, 2021 y 2022. Fuente: UTE

<sup>2</sup>Promedio de los años 2020, 2021 y 2022. Fuente: UTE.

<sup>3</sup>Datos de un año completo, 2022. Fuente: UTE.

En la Figura 7.24, se observa la potencia instalada, destacando la Solar Fotovoltaica, que, a pesar de ser mayor en capacidad que la Eólica, contribuye significativamente menos. Este fenómeno era esperado debido a la limitada disponibilidad de recurso solar en la región en particular.

Sin embargo, la energía Eólica supera considerablemente en generación a la Fotovoltaica, lo cual se atribuye a la alta calidad del recurso eólico presente en la misma área. Estos aspectos resaltan la importancia de considerar no solo la capacidad instalada, sino también la calidad y disponibilidad de los recursos al evaluar la eficacia de las fuentes primarias, aspecto fundamental para la toma de decisiones.

#### **Identificación de las soluciones potenciales:**

Según el relevamiento realizado en este trabajo, se identifican dos tecnologías que se encuentran en condiciones de ser implementadas con un alto nivel de confianza basándose en las experiencias expuestas en este trabajo.

Las tecnologías que se identificaron y confirmaron como factibles para este caso, refieren a las vinculadas a los recursos **Solar** y **Eólico**. Aun así, se evidencia, de acuerdo a lo investigado, que el recurso solar es escaso y requeriría una potencia instalada desproporcionada para obtener resultados relevantes.

El recurso eólico, sin embargo, presenta un potencial muy interesante, con posibilidades de aplicación del parque aumentando generación.

Por lo expuesto, una solución es aumentar la potencia instalada del parque eólico para así reducir el consumo de combustibles fósiles.

Con los datos disponibles se puede definir el aporte renovable que se desee y conformar un diseño que permita cumplir con esos objetivos.

Adicionalmente, hay que pensar en un rediseño de la red para conseguir la integración deseada, esto seguramente también implique un ámbito en los equipos de generación que actualmente se encuentran en BCAA.

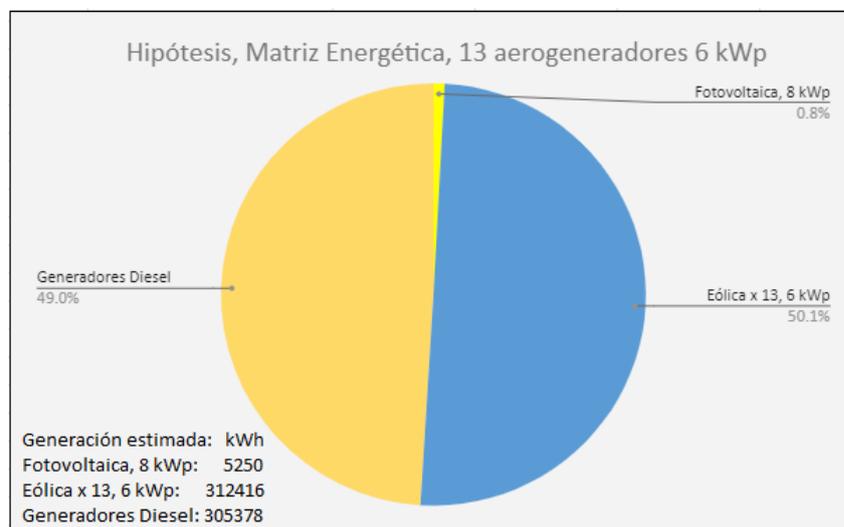
Esto sucede porque al aumentar la potencia renovable, el aporte convencional será menor y para hacer más eficiente el sistema se necesitarán generadores de menor potencia.

Por lo analizado, se presenta viable la posibilidad de implementar energías renovables en BCAA, específicamente la energía eólica.

#### **Estimación Estratégica para una Cobertura Renovable del 50%.**

Considerando la escasez del recurso solar y la falta de correlación entre la potencia instalada y la generación obtenida en la práctica, se determina no aumentar la capacidad fotovoltaica existente. En cambio, se enfocó en el recurso eólico; los aerogeneradores recientemente instalados en la Base Artigas presentan condiciones óptimas para la generación energética, respaldadas por un Factor de Planta catalogado de excelente con base en evidencia empírica. Para realizar esta estimación, se utilizó un enfoque estratégico basado en datos históricos de consumo y patrones de viento. Este análisis consideró la velocidad del viento, las especificaciones técnicas de los aerogeneradores y los patrones de consumo actuales. De esta forma, se determinó la cantidad óptima de energía eólica a instalar, como así también el número de aerogeneradores y potencia nominal de los mismos.

En primer lugar, se propone la hipótesis de incorporar 12 aerogeneradores adicionales, de características idénticas a los ya existentes, como el *SD6*, con una potencia nominal de 6 *kWp* cada uno. Esta adición llevaría la matriz energética renovable en capacidad instalada al 50,9%, como muestra la Figura 7.25. Sumando de esta manera una potencia instalada en renovables de 86 *kWp*<sup>1</sup>.



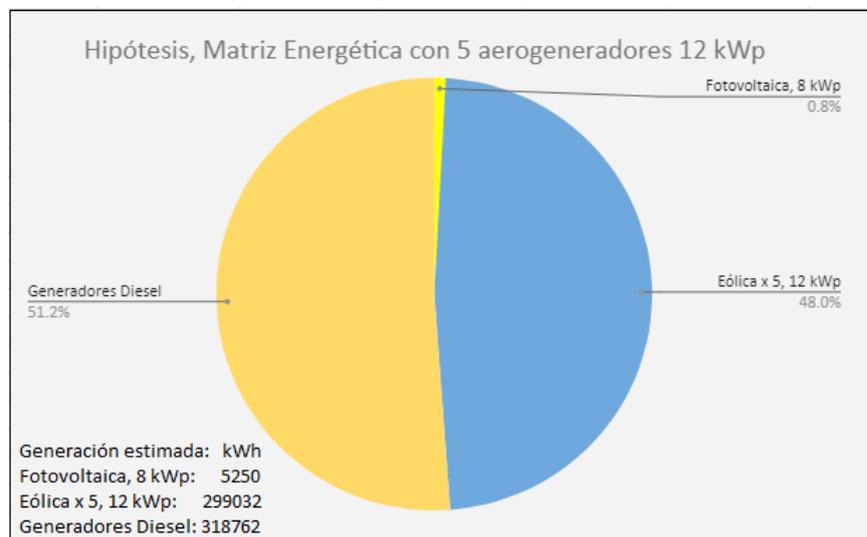
**Figura 7.25:** Hipótesis agregando 13 aerogeneradores de 6 *kWp* de potencia. Gráfica por: autor de la tesis.

En segundo lugar, la Figura 7.26, presenta como quedaría conformada la matriz energética con la instalación de 5 aerogeneradores *SD12*, con una po-

<sup>1</sup>Conformada por, Eólica: 78 *kWp*, Solar: 8 *kWp*

tencia nominal de 12  $kWp$ , de esta manera, la matriz energética renovable alcanzaría el 48,8%, aumentando la potencia instalada en renovables en 74  $kWp$ <sup>1</sup>.

El hecho de que la potencia instalada disminuya, en este caso, se debe a la mayor eficiencia por  $kWp$  instalado de los aerogeneradores *SD12*, aprovechando un mejor recurso debido a mayor altura<sup>2</sup>. En este caso, se sabe que la velocidad media del viento a 10 *metros* es de 8,41  $m/s$  por lo que una estimación a 15, y 20, *metros* que son las posibilidades de torre que presenta el fabricante, serían de 10,3  $m/s$ <sup>3</sup> a 10 *metros* y 11,3  $m/s$  a 20 *metros*.



**Figura 7.26:** Hipótesis agregando 5 aerogeneradores de 12  $kWp$  de potencia. Gráfica por: autor de la tesis.

Si bien esta es una aproximación somera, se comprende que no es trivial la elección la torre debido a que de esta depende la captación del recurso. En este caso se deben considerar varias cosas, sobre todo considerando que es un sistema que si bien es similar al instalado anteriormente, no es igual. Se deben tomar en cuenta problemas logísticos y de maquinaria necesaria en sitio para mover componentes, para hacerse una idea de un aspecto a considerar es el peso del generador en sí, mientras el *SD6* pesa unos 500  $kg$ , el *SD12* pesa cerca de 1500  $kg$ .

<sup>1</sup>Conformada por, Eólica: 66  $kWp$ , Solar: 8  $kWp$

<sup>2</sup>Para un análisis profundo, se deben considerar factores de pérdidas

<sup>3</sup>Sobre la base de esta velocidad, se realizó la estimación presentada en la Figura 7.26

# Capítulo 8

## Viabilidad

Según el **Estado del Arte** relevado y los conceptos planteados, la implementación de energías renovables en latitudes superiores a los  $60^\circ$  es **técnicamente viable**. Este progreso se debe a los avances tecnológicos de los últimos años, como se ha demostrado en este estudio. Estos adelantos están impulsados por el creciente interés global en reducir emisiones y adoptar fuentes de energía renovable y sostenible.

Sin embargo, los recursos varían tanto cualitativa como cuantitativamente en las diversas ubicaciones geográficas analizadas en este estudio. Por ende, se necesita una descripción detallada de los recursos en la zona de interés.

Los casos de estudio presentados en este trabajo han demostrado ser **ejemplos de éxito**. Entre estos casos, se destaca la tecnología **solar fotovoltaica y térmica**<sup>1</sup>. Además, se ha observado la implementación de sistemas **eólicos**, siendo estos últimos los más exitosos. Se presentaron casos de éxito con aerogeneradores de pequeña y gran escala, con dispositivos que van desde potencias menores a  $1\text{ kW}$  hasta generadores con potencias cercanas a  $1\text{ MW}$ , EWT y Lewis M.[92, 105].

Ambos recursos han sido explotados con éxito mediante una variedad de sistemas que garantizan su implementación confiable. Los sistemas eólicos son los más comunes y contribuyen significativamente a la generación de energía. Un aspecto fundamental para entender la expansión de la energía eólica es la consistencia del recurso; el recurso eólico presenta una distribución anual casi

---

<sup>1</sup>La Base Belga Princess Elisabeth Antártica es un ejemplo exitoso de implementación de esta tecnología para el acondicionamiento térmico.

constante, lo que lo convierte en una opción atractiva. En contraste, el recurso solar está presente de forma estacional.

Aspectos adicionales para la implementación incluyen la infraestructura necesaria, implica una red eléctrica adecuada para la integración de energías renovables y sistemas de almacenamiento.

La optimización del uso de energía es esencial, así como el desarrollo tecnológico para mejorar la eficiencia y la integración de fuentes de energía. Las políticas públicas y el marco regulatorio deben impulsar el cambio hacia una matriz energética sostenible, siguiendo el ejemplo del Uruguay continental.

# Capítulo 9

## Conclusiones

En el presente capítulo se mencionan las conclusiones generales y particulares de los temas tratados en esta tesis.

A través del presente trabajo, se espera contribuir al aumento del uso de energías renovables en latitudes superiores a los 60°, de manera segura, robusta y respetuosa con el ambiente.

La necesidad de reducir el costo de abastecimiento como las emisiones de gases de efecto invernadero y disminuir la dependencia de los combustibles fósiles ha llevado a una creciente atención hacia las fuentes de energía renovable en esta región remota y desafiante. Este estudio se centra en evaluar la **viabilidad** de las tecnologías de energías renovables en este contexto particular, considerando las condiciones climáticas extremas y las limitaciones logísticas. Además, se busca la reducción del costo de abastecimiento como un componente clave para hacer sostenibles las soluciones energéticas en esta área.

Al entender las complejidades y desafíos que presenta el área de estudio, este trabajo busca establecer una base para el desarrollo futuro de sistemas energéticos sostenibles en esta región.

Se abordó el paradigma de la sostenibilidad a través del desarrollo de un modelo de abastecimiento energético en la región planteada. La investigación se enfocó en la identificación de recursos renovables y en la evaluación de tecnologías correspondientes a cada recurso. Este análisis permitió comprender las posibilidades y limitaciones de las condiciones locales, recursos y tecnologías asociadas.

Se logró establecer una configuración concreta para que BCAA alcance ciertos niveles de autonomía energética, considerando criterios técnicos y estratégicos.

Además, al adoptar fuentes de energía renovable, se contribuye significativamente a la reducción de la dependencia de combustibles fósiles, promoviendo así un entorno más limpio y sostenible.

Este estudio se alinea con los objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas, específicamente en el punto 7[104], que aboga por una energía asequible y no contaminante.

La implementación de tecnologías energéticas más limpias representa un paso fundamental hacia un futuro sostenible para la región, cumpliendo así con las metas establecidas por la comunidad internacional.

Se analizó la clasificación climática proporcionada por Köppen-Geiger que ofrece una aproximación para entender el clima de la región Antártica. Identificándose regiones y sus diferentes características climáticas.

Más allá de esta clasificación, existen aspectos relacionados con el comportamiento atmosférico que hacen necesario identificar subregiones basadas en sus características que llevan a variaciones en la disponibilidad de recursos.

Se logra comprender el comportamiento de los recursos ligados al clima y su disposición, analizando el motivo de su presencia en cada ubicación geográfica y discerniendo su variación temporal, identificando variaciones estacionales.

La relevancia de esta investigación se destaca en un contexto donde Uruguay ha experimentado un aumento significativo en la participación de las energías renovables en su matriz energética, impulsado por cambios en su **Política Energética**.

Este incremento se ha dado principalmente en las fuentes **Eólica** y **Solar Fotovoltaica**. Al mismo tiempo, la situación geopolítica de la Antártida se presenta como un escenario estratégico debido a sus recursos naturales.

A nivel internacional, la Antártida opera bajo un **régimen de gobernanza única**, el **Tratado Antártico**, al cual Uruguay se unió en el año 1980. Esta conexión histórica y política con la Antártida posiciona a Uruguay en el contexto geopolítico, influyendo en sus decisiones y enfoques energéticos.

La investigación se sitúa en esta coyuntura, examinando tanto los avances energéticos en Uruguay como las oportunidades y desafíos energéticos en la Antártida, donde los recursos naturales y la cooperación internacional juegan un papel crucial. Estos aspectos subrayan la importancia de este estudio y su relevancia para el desarrollo sostenible en ambas regiones.

Se llevó a cabo un **relevamiento de los recursos** disponibles en la región.

El **Recurso Solar** exhibe variaciones significativas en su disponibilidad.

La presencia de nubosidad, especialmente en áreas influenciadas por el **círculo de bajas presiones**, hace que el recurso solar no sea atractivo en estas zonas. No obstante, la relativa claridad del cielo en el **Plateau Continental** sugiere que en esta área, a pesar de su latitud elevada, es más razonable considerar su explotación.

Comparativamente, se estableció que sobre los 60° y 65° de latitud Sur, el recurso es el más débil del área de estudio, estableciéndose diferencias considerables con latitudes más altas donde el recurso es porcentualmente mayor, estos resultados se presentan en la Tabla comparativa 9.1<sup>1</sup>.

Sitio	Latitud	kWh/m <sup>2</sup> día	Porcentaje
Salto	-34,72	4,87	100 %
PEA	-71,94	3,60	73,92 %
Polo Sur	-90	3,06	62,83 %
BCAA	-62,10	2,44	50,10 %

**Tabla 9.1:** Radiación Solar, promedio diario anual kWh/m<sup>2</sup>, y sus porcentajes en diferentes ubicaciones. Fuente: NASA. Tabla por: autor de la tesis.

En el caso del recurso solar, se identificó un carácter marcado de estacionalidad del recurso, acentuándose más a medida que la latitud aumenta, analizándose también las alturas solares máximas para cada caso e inclinaciones óptimas de dispositivos Solares.

En cuanto al **Recurso Eólico**, varía según las zonas, hay factores como la geografía local y diversos fenómenos atmosféricos que influyen en su comportamiento. En las regiones cercanas al círculo de bajas presiones, los vientos predominantes del Oeste y la presencia de obstáculos naturales, como glaciares, generan variaciones locales significativas.

En el Plateau continental, los vientos catabáticos añaden una dimensión temporal especial al recurso. Estos vientos se originan por fuerzas de presión y gravedad, siguiendo las pendientes del terreno y alcanzando velocidades superiores a los 27 m/s. Este fenómeno está vinculado al ciclo diario de calentamiento y enfriamiento de las capas atmosféricas, y tiene un papel crucial en la ventilación de las regiones montañosas durante las noches con gradientes de presión débiles.

En orden de entender y dimensionar la variación del recurso, se presenta la

<sup>1</sup>Se toma el recurso de Salto, Uruguay, como el estándar de referencia, 100 %.

Tabla comparativa 9.2<sup>1</sup> donde se aprecian diferencias en el recurso.

Sitio	Latitud (°)	Promedio de Viento ( <i>m/s</i> )	Porcentaje
Polo Sur	-90	4,59	38 %
PEA	-71,95	12,24	100 %
BCAA	-62,10	8,15	67 %
Rosario	-34,22	4,54	37 %

**Tabla 9.2:** Radiación Solar, promedio diario anual, *m/s*, y sus porcentajes en diferentes ubicaciones. Fuente: NASA. Tabla por: autor de la tesis.

A pesar de la complejidad del recurso eólico, esta comprensión de sus características específicas es esencial para un diseño adecuado y la implementación eficiente de proyectos de energía eólica en esta región. Considerando tanto las condiciones locales como los fenómenos atmosféricos particulares, se pueden desarrollar estrategias sostenibles para aprovechar este recurso.

La exploración de **otros recursos** como de las **fuentes de energía marina**, revelan un vasto potencial energético derivado de los océanos. Las tecnologías emergentes, aunque en un estado de desarrollo incipiente, ofrecen diversas formas de aprovechar este recurso, desde las mareas y corrientes, olas, gradiente térmico y salino.

Estos recursos, aunque ricos en potencial, están rodeados por un entorno hostil, caracterizado por el hielo y los eventos extremos de clima severo. Además, la tecnología para aprovechar completamente estas fuentes de energía aún está en **proceso de desarrollo y maduración**.

A pesar de los obstáculos actuales, es importante reconocer el potencial de estas fuentes de energía que pueden ser de utilidad en el futuro. A medida que la tecnología madure, estas fuentes de energía podrían contribuir significativamente.

El **Recurso Geotérmico** en la Antártida muestra cierto potencial energético debido a la actividad volcánica presente en determinados sitios, aunque las restricciones del Tratado Antártico limitan su explotación para preservar el medio ambiente. A pesar de los desafíos regulatorios, podría ser viable en zonas, pudiéndose implementar en sistemas de calefacción con temperaturas moderadamente cálidas.

Se exploró el estado actual de la tecnología aplicada a los recursos energéticos

---

<sup>1</sup>Se toma el recurso de Princess Elisabeth Antartica (PEA), como el estándar de referencia, 100 %.

identificados, evaluando su madurez y viabilidad para cada caso específico. Se han identificado diversas soluciones para abordar los desafíos que se presentan. Para determinar qué tecnología es aplicable, se consideró la experiencia previa, se caracterizaron los sitios y se evaluaron las características de los recursos. Se concluyó que las tecnologías más adecuadas para el área de estudio son la energía **Solar Fotovoltaica** con módulos planos y la **Energía Eólica** con una variedad de dispositivos.

Ambas tecnologías son idóneas debido a su desarrollo y estado de madurez. A pesar de esto, un número limitado de bases antárticas incorporan sistemas de energías renovables de este tipo en sus infraestructuras.

La combinación de estas dos tecnologías ofrece un modelo efectivo para la incorporación de sistemas renovables en latitudes altas, demostrando su viabilidad en condiciones extremas.

En última instancia, este estudio proporciona información para facilitar una transición sólida hacia un futuro sostenible, con el objetivo de alcanzar la independencia energética en regiones de latitudes altas.

En cuanto a los otros recursos identificados, solo el **Geotérmico** es factible de acuerdo al estado del arte de la tecnología, si bien es una tecnología madura, se precisaría una evolución en las regulaciones para su implementación.

La situación actual revela una tendencia positiva hacia la adopción de energías renovables en la región. Tecnologías maduras como la **Eólica** y **Solar Fotovoltaica y Térmica** están siendo implementadas con éxito, marcando el comienzo de un cambio de paradigma.

En este trabajo se analizó, en particular, el caso de la Base Científica Antártica Artigas, obteniéndose información sobre los patrones de consumo, identificándose oportunidades.

Se ha concluido que la **Energía Eólica** emerge como una alternativa sólida y prometedora. Los resultados revelan un Factor de Capacidad del 45 %, catalogado como excelente para esta tecnología. Además, la distribución anual del recurso se ajusta al patrón de consumo de la Base Artigas.

La selección del tipo y clase de aerogenerador es confiable, respaldada por años de experiencia en el entorno Antártico[50] proporcionan evidencia cuantitativa sólida del potencial eólico, reforzando la viabilidad de integrar la energía eólica en el sistema energético.

En este contexto, se plantearon dos hipótesis, estableciendo una integración

de energía Eólica de aproximadamente el 50% en la matriz energética. Estos resultados se pueden obtener mediante la integración de 12 aerogeneradores iguales al existente o 5 aerogeneradores de mayor potencia.

Por otro lado, se descarta la posibilidad de integrar más potencia fotovoltaica, ya que el recurso se presenta pobre y el Factor de Planta solo alcanza 8,2%. Adicionalmente, se obtuvieron valores normales de PR y se comprobó que es conveniente la implementación de módulos fijos en toda el área de estudio.

En última instancia, el recurso Eólico se presenta como una fuente confiable y estable, su expansión y optimización se revelan como pasos lógicos para alcanzar los objetivos de sostenibilidad energética. Esto no solo implica aumentar la capacidad del parque Eólico, sino también repensar la infraestructura y redes eléctricas para integrar eficazmente esta tecnología, lo que seguramente implicará la adopción de estrategias más eficientes para realizar una gestión eficiente de la demanda.

El análisis proporciona una hoja de ruta para avanzar hacia un futuro energético más sostenible, destacando el potencial de la energía eólica como una solución práctica y efectiva que demanda acciones concretas para hacer realidad un cambio significativo hacia un entorno antártico más limpio y ecológicamente responsable.

De esta manera, se establece que la implementación de sistemas renovables en el área de estudio es **viable** y, en algunos casos, un recurso más favorable que otro. Esto subraya la necesidad imperante de realizar análisis detallados de los recursos para fundamentar las decisiones en este ámbito.

# Referencias bibliográficas

- [1] “(EX)UNE-EN-IEC-61724-1=2022”. En: *Asociación Española de Normalización* (2022). URL: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0068724>.
- [2] (OES) IOES. “White paper Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC.” En: (2021), págs. 12-13.
- [3] (OES) IOES. “White paper Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC.” En: (2021).
- [4] 61400-2 UE. *Aerogeneradores pequeños*. 2015. URL: [www.aenor.es](http://www.aenor.es).
- [5] Abal G, Alonso-Suárez R y Laguarda A. *Radiación Solar Notas del curso Fundamentos del Recurso Solar*, págs. 51-68. URL: <http://les.edu.uy/>.
- [6] Abal G, Alonso-Suárez R y Laguarda A. *Radiación Solar Notas del curso Fundamentos del Recurso Solar*, págs. 17-25. URL: <http://les.edu.uy/>.
- [7] Abal G, Alonso-Suárez R y Laguarda A. *Radiación Solar Notas del curso Fundamentos del Recurso Solar*. URL: <http://les.edu.uy/>.
- [8] *About the Polar Foundation*. <http://www.polarfoundation.org/about>. Polar Foundation, 2023.
- [9] Aguiar M. “Diseño de un sistema de Microgeneración”. 2022. URL: <https://utec.edu.uy/es/investigacion/unidad-tecnologica/unidad-tecnologica-de-energias-renovables/>.
- [10] Alvaro G y Cabodevilla E. *Obtención de energía a partir de las corrientes marinas*. 2017. URL: <https://oa.upm.es/49272/>.

- [11] Alvine J. *Policy and Science of Geothermal Heat Use at McMurdo Station, Antarctica. Part of the: Environmental Indicators and Impact Assessment Commons, Environmental Monitoring Commons*. 2010. URL: <https://digitalcommons.unl.edu/envstudtheses>.
- [12] *Amundsen-Scott (South Pole) climate guide*. 2023. URL: <https://www.weather2travel.com/antarctica/amundsen-scott-south-pole/climate/#sunshine>.
- [13] *Antarctic Sea Ice*. 2023. URL: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/SeaIce/page4.php>.
- [14] Antárticos RVM. “Protocolo al Tratado Antártico Sobre Protección del Medio Ambiente”. En: (1959). URL: [https://documents.ats.aq/recatt/att006\\_s.pdf](https://documents.ats.aq/recatt/att006_s.pdf).
- [15] Badwal SPS et al. *Review of Progress in High Temperature Solid Oxide Fuel Cells*. 2014, págs. 23-37. URL: [www.austceram.com/ACS-Journal](http://www.austceram.com/ACS-Journal).
- [16] *Best Research-Cell Efficiency Chart*. 2023. URL: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.
- [17] Bredesen RE et al. *EXPERT GROUP STUDY ON RECOMMENDED PRACTICES 13. WIND ENERGY PROJECTS IN COLD CLIMATES 2. EDITION 2017 Photo: A wind farm consisting of Bonus 600 kW wind turbines with electrothermal anti-icing systems installed on Olos fjell, Finland*. 2017. URL: [www.ieawind.org](http://www.ieawind.org).
- [18] Bredesen RE et al. *EXPERT GROUP STUDY ON RECOMMENDED PRACTICES 13. WIND ENERGY PROJECTS IN COLD CLIMATES 2. EDITION 2017 Photo: A wind farm consisting of Bonus 600 kW wind turbines with electrothermal anti-icing systems installed on Olos fjell, Finland*. 2017, págs. 12-15. URL: [www.ieawind.org](http://www.ieawind.org).
- [19] Bredesen RE et al. *EXPERT GROUP STUDY ON RECOMMENDED PRACTICES 13. WIND ENERGY PROJECTS IN COLD CLIMATES 2. EDITION 2017 Photo: A wind farm consisting of Bonus 600 kW wind turbines with electrothermal anti-icing systems installed on Olos fjell, Finland*. 2017, págs. 16-17. URL: [www.ieawind.org](http://www.ieawind.org).

- [20] Broeke M van den et al. “Identification of Atlantic ablation areas using a regional atmospheric climate model”. En: *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 111 (18 sep. de 2006). ISSN: 01480227. DOI: [10.1029/2006JD007127](https://doi.org/10.1029/2006JD007127).
- [21] Bromwich DH et al. “Climatological aspects of cyclogenesis near Adélie Land Antarctica”. En: *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 63.5 (2011), págs. 921-938.
- [22] *Conversion of a Redundant Drillship to a Floating OTEC Platform*. Vol. Day 2 Tue, May 03, 2022. OTC Offshore Technology Conference. D021S019R006. Mayo de 2022. DOI: [10.4043/31756-MS](https://doi.org/10.4043/31756-MS). eprint: <https://onepetro.org/OTCONF/proceedings-pdf/22OTC/2-22OTC/D021S019R006/2678614/otc-31756-ms.pdf>. URL: <https://doi.org/10.4043/31756-MS>.
- [23] Burton-Johnson A, Dziadek R y Martin C. “Review article: Geothermal heat flow in Antarctica: Current and future directions”. En: *Cryosphere* 14 (11 nov. de 2020), págs. 3843-3873. ISSN: 19940424. DOI: [10.5194/tc-14-3843-2020](https://doi.org/10.5194/tc-14-3843-2020).
- [24] Carrasco J. “La Baja del Mar de Amundsen, su variabilidad ejemplo de conexión hemisférica”. En: *Bach* 40 (dic. de 2021), págs. 22-24.
- [25] Carrasco JF, Bromwich DH y Monaghan AJ. “Distribution and characteristics of mesoscale cyclones in the Antarctic: Ross Sea eastward to the Weddell Sea”. En: *Monthly Weather Review* 131.2 (2003), págs. 289-301.
- [26] Cataldo J. *ENERGÍA EÓLICA Notas del curso Capítulo 3-Meteorología*. 2018.
- [27] CEMIE O. “Planta OTEC de 50 MWe ciclo abierto. Caso de aplicación: El Diamante, B.C.S.” En: (2019). URL: <https://cemieoceano.mx/downloads/concurso-mesastrabajo/Mesa%20de%20trabajo-GTermico.pdf>.
- [28] *Classification and Certification of Ocean Thermal Energy Converter (OTEC)-Tentative Rules*. 2018. URL: <http://www.veristar.com>.
- [29] *Climate statistics for Australian locations*. 2007. URL: <http://www.bom.gov.au/climate/cdo/about/definitions/other.shtml#meansunshine>.
- [30] *Cold Climate market 2015-2020, GW*. 2022. URL: <https://iea-wind.org/task19/t19-work-plan-and-objectives/>.

- [31] Commission IE y 114 IECTC. *Marine energy : wave, tidal and other water current converters. Part 201, Tidal energy resource assessment and characterization*, pág. 46. ISBN: 9782832225912.
- [32] *Convención sobre la conservación de los recursos vivos marinos antárticos CONVENCIÓN SOBRE LA CONSERVACIÓN DE LOS RECURSOS VIVOS MARINOS ANTÁRTICOS*. 1980.
- [33] Cooper P. “The absorption of radiation in solar stills” . En: *Solar energy* 12.3 (1969), págs. 333-346.
- [34] Cornett A y Cornett AM. *A Global Wave Energy Resource Assessment Optimization of Breakwater Reconstruction at Mont Louis, Québec View project OPTIMIZATION OF ROCK BERMS FOR PIPELINE STABILIZATION SUBJECT TO INTENSE HYDRODYNAMIC FORCING View project A GLOBAL WAVE ENERGY RESOURCE ASSESSMENT*. 2008. URL: <https://www.researchgate.net/publication/259623644>.
- [35] *Corrientes oceánicas [Internet]*. 2020. URL: <https://www.oceanografialitoral.com/>.
- [36] Council GWE. “Global wind report 2021”. En: *Global Wind Energy Council: Brussels, Belgium* (2021), pág. 51.
- [37] *Decreto Ley N° 14416*. URL: <https://www.impo.com.uy/bases/decretos-ley/14416-1975>.
- [38] “Design of a 100 % renewable energy based Belgian Polar Station in Antartica”. En: (2023). URL: <https://www.3e.eu/about-us>.
- [39] *Diagrama solar, Universidad de Oregon*. <http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.php>. Acceso en línea: [14 Agosto 2023].
- [40] Diaz IU, Queiróz Lamas W de y Lotero RC. “Development of an optimization model for the feasibility analysis of hydrogen application as energy storage system in microgrids”. En: *International Journal of Hydrogen Energy* (mayo de 2023). ISSN: 03603199. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2023.01.128](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.128).
- [41] Electric S. *Schneider Electric*. url<https://www.se.com/ww/en/>. Schneider Electric, 2023.

- [42] Elminir HK et al. “Optimum solar flat-plate collector slope: Case study for Helwan, Egypt”. En: *Energy Conversion and Management* 47.5 (2006), págs. 624-637. ISSN: 0196-8904. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.05.015>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890405001342>.
- [43] *EN URUGUAY RENOVABLES ENERGÍAS*. 2022, págs. 51-168. URL: [www.uruguayxxi.gub.uy](http://www.uruguayxxi.gub.uy).
- [44] *ENERCON WEB*. 2023. URL: <https://www.enercon.de/home/>.
- [45] *ENERCON WEB E30*. 2023. URL: <https://es.wind-turbine-models.com/turbines/376-enercon-e-30#datasheet>.
- [46] *Energía Eólica en Uruguay*. Nombre de la Organización. Año de Acceso. URL: <http://www.energi aeolica.gub.uy/index.php?page=uruguay-15m>.
- [47] *Energía por Gradientes Salinos [Internet]*. 2018. URL: <https://cemioceano.mx/energia-gradientes-salinos.html>.
- [48] ENERGY SW. *Planning Support Pack Introduction Product specifications Noise report Aviation Siting Siting Multiple Turbines Ornithological Concerns Bats and Wildlife Shadow Flicker Telecommunications Technical drawings*. 2023. URL: [www.sd-windenergy.com](http://www.sd-windenergy.com).
- [49] Enríquez C et al. *PERSPECTIVAS SOBRE EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LOS GRADIENTES SALINOS EN LAS COSTAS MEXICANAS*.
- [50] *Entrevista sobre el uso de la energía en la Base Princess Elisabeth [videollamada]*. Videollamada. Consultado el 23 de mayo de 2023. Montevideo, Uruguay y Brusells, Belgium, mayo de 2023.
- [51] Environmental L. *Nombre del software WRplot*. WRPLOT View is a fully operational wind rose program for your meteorological data. It provides visual wind rose plots, frequency analysis, and plots for several meteorological data formats. A wind rose depicts the frequency of occurrence of winds in each of the specified wind direction sectors and wind speed classes for a given location and time period. 2018 Version 8.0.2. URL: [URL:http://webLakes.com](http://webLakes.com).
- [52] “Exploring the last continent. An Introduction to Antarctica”. En: *Meteorologische Zeitschrift* (jun. de 2015), págs. 93-95. DOI: [10.1007/978-3-319-18947-5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-18947-5).

- [53] “Exploring the last continent. An Introduction to Antarctica”. En: *Me-teorologische Zeitschrift* (jun. de 2015), págs. 104-105. DOI: [10.1007/978-3-319-18947-5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-18947-5).
- [54] Ferrari Ariel H. y Auza FJ. “La evolución del escenario Antártida y los procesos de liderazgo en el sector Índice de contenidos”. En: (2017), págs. 51-68.
- [55] Foley N et al. “Mapping geothermal heat flux using permafrost thickness constrained by airborne electromagnetic surveys on the western coast of Ross Island, Antarctica”. En: *Exploration Geophysics* 51.1 (2020), págs. 84-93.
- [56] Forbes JM et al. *Dynamics of the lower thermosphere over South Pole from meteor radar wind measurements*. 1999.
- [57] Foundation IP. *The First Zero Emission Polar Research Station*. 2011, pág. 13.
- [58] Fretwell P et al. “Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica”. En: *The Cryosphere* 7.1 (2013), págs. 375-393. DOI: [10.5194/tc-7-375-2013](https://doi.org/10.5194/tc-7-375-2013). URL: <https://tc.copernicus.org/articles/7/375/2013/>.
- [59] Frye JA. *PERFORMANCE-OBJECTIVE DESIGN OF A WIND-DIESEL HYBRID ENERGY SYSTEM FOR SCOTT BASE, ANTARCTICA*. 2006.
- [60] Gabriel Guiogu Griot. *Contact Form Submission*. Comunicación personal por correo electrónico. Correo electrónico con la empresa SD WIND ENERGY., Fecha: 25/10/2023. 2023.
- [61] Gagnon I y Wosnik M. “Tidal Energy Resource Assessment for McMurdo Station, Antarctica”. En: (2016). DOI: [10.13140/RG.2.2.27884.97920](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27884.97920). URL: <https://www.researchgate.net/publication/312605620>.
- [62] Gharakhani Siraki A y Pillay P. “Study of optimum tilt angles for solar panels in different latitudes for urban applications”. En: *Solar Energy* 86.6 (2012), págs. 1920-1928. ISSN: 0038-092X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.02.030>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X12000953>.

- [63] *Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX) Surface Radiation Budget (SRB)*. URL: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. Accedido el 20 de julio de 2023. NASA Langley Research Center.
- [64] *Global potential Blue Energy*. 2023. URL: <https://redstack.nl/>.
- [65] González-González E et al. “Evaluating the standards for solar PV installations in the Iberian Peninsula: Analysis of tilt angles and determination of solar climate zones”. En: *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 49 (feb. de 2022). ISSN: 22131388. DOI: [10.1016/j.seta.2021.101684](https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101684).
- [66] Gopi A et al. “Comparison of normal and weather corrected performance ratio of photovoltaic solar plants in hot and cold climates”. En: *Energy for Sustainable Development* 65 (2021), págs. 53-62. ISSN: 0973-0826. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.09.005>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082621001113>.
- [67] Hauser RA, Solari S y Teixeira L. *IAHR AIIH XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA SANTAGO, CHILE, AGOSTO 2014 CARACTERIZACIÓN DEL OLEJE, NIVEL DEL MAR Y VIENTO EN LA BASE CIENTÍFICA ANTÁRTICA ARTIGAS DE URUGUAY*.
- [68] Herinckx N y Lichtervelde AD. *Princess Elisabeth Antarctica A Zero-Emission Station dedicated to scientific research*. 2023.
- [69] Hernández JIH et al. *Optimization of a reverse electro dialysis device*. 2020. URL: <https://cemioceano.mx/congresos/PDF/Optimization%20of%20a%20reverse%20electrodialysis%20device.pdf>.
- [70] *Historia antártica de Uruguay – Instituto Antartico Uruguayo*. URL: [http://www.iau.gub.uy/?page\\_id=1043&lang=es](http://www.iau.gub.uy/?page_id=1043&lang=es).
- [71] Hong JG et al. “Potential ion exchange membranes and system performance in reverse electro dialysis for power generation: A review”. En: *Journal of Membrane Science* 486 (2015), págs. 71-88. ISSN: 0376-7388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.02.039>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037673881500160X>.

- [72] Iec. *IEC TS 62600-20 TECHNICAL SPECIFICATION Marine energy-Wave, tidal, and other water current converters-Part 20: Design and analysis of an Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) plant-General guidance INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION*. 2019. ISBN: 978-2-8322-6915-2.
- [73] Iec. *INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION web home*. 2023. URL: [www.iec.ch](http://www.iec.ch).
- [74] Iec. *Wind turbines-Part 1: Design requirements including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher*. 2005. URL: [www.iec.ch](http://www.iec.ch).
- [75] *IEC 61400-12*. 2022. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/68499>.
- [76] IGEO (Instituto de Geociencias) - UCM (Universidad Complutense de Madrid). *Isla Decepción (Antártida): una historia de volcanes, balleneros y turistas en bañador*. Accedido en: 2023-10-31. 2023. URL: <https://igeo.ucm-csic.es/isla-decepcion-antartida-una-historia-de-volcanes-balleneros-y-turistas-en-banador/>.
- [77] *ILUSTRADORA H2*. 2023. URL: <https://www.linkedin.com/in/elsa-martin-millan/>.
- [78] INGENIERIA I. *Estimación de la Energía Generada por un Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red*. URL: [chrome - extension : // efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj / https : // web . ujaen . es / investiga / solar / documentacion\\_pv\\_in\\_bloom / Seminarios % 20PV % 20in % 20Bloom . % 20Estimacion % 20de % 20la % 20energia % 20generada . pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://web.ujaen.es/investiga/solar/documentacion_pv_in_bloom/Seminarios%20PV%20in%20Bloom.%20Estimacion%20de%20la%20energia%20generada.pdf).
- [79] *Instituto Geográfico Militar de Uruguay*. <https://igm.gub.uy/>. Consultado el 10 de octubre de 2023.
- [80] *Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)*. Consultado el 9 de septiembre de 2023. URL: <https://www.idae.es/>.
- [81] Instituto Uruguayo de Meteorología. *Solicitud de información meteorológica*. 2023. URL: [%5Curl % 7Bhttps : // www . inumet . gub . uy / institucional / transparencia / solicitud-informacion-meteorologica % 7D](https://www.inumet.gub.uy/institucional/transparencia/solicitud-informacion-meteorologica%7D).
- [82] Iqbal M. *An Introduction To Solar Radiation*. eBook ISBN: 9780323151818. Academic Press, 1983.

- [83] Israel HHJ et al. "Diseño y desarrollo de una plataforma experimental para obtención de energía mediante gradiente salino".
- [84] Jacobson MZ. *History of, Processes in, and Numerical Techniques in GATOR-GCMOM*. 2012. URL: <http://www.stanford.edu/group/efmh/jacobson/GATOR/index.html>.
- [85] Jacobson MZ y Jadhav V. "World estimates of PV optimal tilt angles and ratios of sunlight incident upon tilted and tracked PV panels relative to horizontal panels". En: *Solar Energy* 169 (jul. de 2018), págs. 55-66. ISSN: 0038092X. DOI: [10.1016/j.solener.2018.04.030](https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.030).
- [86] Kandeal A et al. "Photovoltaics performance improvement using different cooling methodologies: A state-of-art review". En: *Journal of Cleaner Production* 273 (2020), pág. 122772.
- [87] Körperschaft C, WavEC ORK y Fischerei EKGMA und. *Market study on ocean energy final report*. Vol. 1. 2018. ISBN: 9789279878794. URL: <https://www.wavec.org/contents/reports/publication-market-study-on-ocean-energy-4188.pdf>.
- [88] Kottek M et al. "World map of the Köppen-Geiger climate classification updated". En: *Meteorologische Zeitschrift* 15 (3 jun. de 2006), págs. 259-263. ISSN: 09412948. DOI: [10.1127/0941-2948/2006/0130](https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130).
- [89] Laboratory NRE. *NREL Turbine Models: SD6 5.2kW 5.5*. 2023. URL: [https://nrel.github.io/turbine-models/SD6\\_5.2kW\\_5.5.html](https://nrel.github.io/turbine-models/SD6_5.2kW_5.5.html) (visitado 30-06-2023).
- [90] Lackner KS. "A guide to CO2 sequestration". En: *Science* 300.5626 (2003), págs. 1677-1678.
- [91] Lamigueiro OP. *ENERGÍA SOLAR Fotovoltaica*. 2023. URL: <https://github.com/oscarperpinan/esf>.
- [92] Lewis M. "Wind turbines are headed to Antarctica – here's how that works". En: *Web site* (abr. de 2023), págs. 1-1. URL: <https://electrek.co/2023/04/14/wind-turbines-antarctica/>.
- [93] Licensing MS, Team O y Murray J. *Orbital Marine Power Orbital O2.2 Tidal Turbine EMEC Berth 6, Fall of Warness, Eday, Orkney Project Information Document*. 2021.

- [94] Licensing MS, Team O y Murray J. *Orbital Marine Power Orbital O2.2 Tidal Turbine EMEC Berth 6, Fall of Warness, Eday, Orkney Project Information Document*. 2021, pág. 6.
- [95] LINKEDIN LV. *Profil*. URL: <https://www.linkedin.com/in/leandrovigna/>.
- [96] Lucci JJ, Alegre M y Vigna L. “Renewables in Antarctica: an assessment of progress to decarbonize the energy matrix of research facilities”. En: *Antarctic Science* 34.5 (2022), págs. 374-388. DOI: [10.1017/S095410202200030X](https://doi.org/10.1017/S095410202200030X).
- [97] Lyard FH et al. “FES2014 global ocean tide atlas: design and performance”. En: *Ocean Science* 17.3 (2021), págs. 615-649.
- [98] Mahlon Kennicutt AGK y Montagna PA. *Temporal and spatial patterns of anthropogenic disturbance at McMurdo Station, Antarctica*. 2010, pág. 3.
- [99] Mansilla MM. *.<sup>El</sup> clima en el Continente Antártico. De las temperaturas, a los vientos Catabáticos y su incidencia en el clima global*”. URL: [http://repositorioantartica.umag.cl/bitstream/handle/20.500.11894/979/Mimica%20Mansilla%20M.\\_El%20clima%20en%20el%20Continente%20Ant%20a%20rtico.%20De%20las%20temperaturas%20a%20los%20vientos%20Catab%20aticos%20y%20su%20incidencia%20en%20el%20clima%20global\\_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorioantartica.umag.cl/bitstream/handle/20.500.11894/979/Mimica%20Mansilla%20M._El%20clima%20en%20el%20Continente%20Ant%20a%20rtico.%20De%20las%20temperaturas%20a%20los%20vientos%20Catab%20aticos%20y%20su%20incidencia%20en%20el%20clima%20global_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- [100] MAWSON<sub>E</sub>NERCON. 2023. URL: <https://www.antarctica.gov.au/antarctic-operations/stations/amenities-and-operations/renewable-energy/wind-power/>.
- [101] MAWSON<sub>f</sub>otos. 2023. URL: <https://www.antarctica.gov.au/news/2017/antarctic-research-station-wind-turbine-collapse/>.
- [102] Mayordomo CM. “Análisis de la capacidad de las energías renovables para cubrir la demanda eléctrica en España considerando su intermitencia.” En: (2017). URL: <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/26099>.
- [103] Mckenzie C et al. *Syndicate Report Postgraduate Certificate of Antarctic Studies Windmills in Antarctica*. 2009, págs. 10-11.
- [104] Moran M. *Energía*. Desarrollo Sostenible, 2020. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>.

- [105] *MORE ENERGY LESS COMPLEXITY DW54 900kW DSP-DIRECTWIND Service Program*. 2023. URL: [www.ewtdirecwind.com](http://www.ewtdirecwind.com).
- [106] Mundial OM. “Guía de Instrumentos y Métodos de Observación (OMM-N° 8)”. En: (2018).
- [107] Mundial OM. *Meteorología, Climatología y Hidrología ( MCH ) es un sistema de manejo de base de datos (DBMS)*. 2023. URL: <http://hydromch.com/>.
- [108] NASA. *Net Radiation*. URL: [https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/CERES\\_NETFLUX.M](https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/CERES_NETFLUX.M).
- [109] *NASA Langley Atmospheric Science Data Center*. <https://power.larc.nasa.gov/docs/methodology/data/sources/>. Acceso en línea: [02 Agosto 2023].
- [110] *NASA Langley Atmospheric Science Data Center*. <https://power.larc.nasa.gov/docs/methodology/>. Acceso en línea: [02 Agosto 2023].
- [111] NASA Surface Meteorology and Solar Energy (SSE) Group. *NASA Surface Meteorology and Solar Energy (SSE) Data*. Accedido el Fecha de acceso. 2023. URL: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>.
- [112] Northern Gas Networks. *H21 Leeds City Gate Report*. 2020. URL: <https://www.h21.green/wp-content/uploads/2019/01/H21-Leeds-City-Gate-Report.pdf> (visitado 20-04-2021).
- [113] Oroño D et al. *Desarrollo de un Mapa de Factores de Planta PV*. 2016. URL: [http://les.edu.uy/report/informe\\_tecnico\\_FSE\\_10691.pdf](http://les.edu.uy/report/informe_tecnico_FSE_10691.pdf).
- [114] Oroño ID, Giacosa ID y Sierra IQW. *Energía Solar Fotovoltaica en la Antártida*. 2019.
- [115] Owens I y Zawar-Reza P. “Weather and Climate: Antarctica’s Role in the Global Atmospheric System”. En: *Exploring the Last Continent: An Introduction to Antarctica* (2015), págs. 91-114.
- [116] “pamphlet<sub>s</sub>d6”. En: (2023). URL: [https://sd-windenergy.com/files/9315/6051/8111/SD6\\_Product\\_Leaflet.pdf](https://sd-windenergy.com/files/9315/6051/8111/SD6_Product_Leaflet.pdf).
- [117] Parish TR, Cassano JJ y Seefeldt MW. “Characteristics of the Ross Ice Shelf air stream as depicted in Antarctic Mesoscale Prediction System simulations”. En: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 111.D12 (2006).

- [118] *Parque Eólico Rosario*. [https://ventusenergia.com/proyectos/eolico/PE\\_Rosario.php](https://ventusenergia.com/proyectos/eolico/PE_Rosario.php). Acceso en línea: [10 Agosto 2023].
- [119] Perspectivas EY et al. *Ingeniería solar fotovoltaica: Aspectos tecnológicos, técnicos y perspectivas de desarrollo en Uruguay*. 2016. URL: [http://les.edu.uy/report/informe\\_tecnico\\_FSE\\_10691.pdf](http://les.edu.uy/report/informe_tecnico_FSE_10691.pdf).
- [120] Polar AWI for y Research M. *Profil*. URL: <https://www.arcus.org/researchers/37990/display>.
- [121] *Política Energética 2005-2030*.
- [122] “Proceedings of the Ninth SCALOP Symposium 2000: Operational Experience with Wind Power Technology at Neumayer Station”. En: (2000), págs. 89-97.
- [123] “Proceedings of the Ninth SCALOP Symposium 2000: Operational Experience with Wind Power Technology at Neumayer Station”. En: (2000), pág. 91.
- [124] *Protocolo al Tratado Antártico sobre Protección del Medio Ambiente, Preámbulo*. 1991. URL: [https://documents.ats.aq/recatt/att006\\_s.pdf](https://documents.ats.aq/recatt/att006_s.pdf).
- [125] Quaranta E et al. “The Very Low Head Turbine for hydropower generation in existing hydraulic infrastructures: State of the art and future challenges”. En: *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 51 (jun. de 2022). ISSN: 22131388. DOI: [10.1016/j.seta.2021.101924](https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101924).
- [126] R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. 2023. URL: <https://www.R-project.org/>.
- [127] Raphael MN et al. “The Amundsen sea low: variability, change, and impact on Antarctic climate”. En: *Bulletin of the American Meteorological Society* 97.1 (2016), págs. 111-121.
- [128] Rattin ghe r K van. “Princess Elisabeth Research Station at Antarctica Renewable Energy Systems design, simulation and optimization”. En: (2023).
- [129] Ray RD. *A Global Ocean Tide Model From TOPEX/POSEIDON Altimetry: GOT99.2*. 1999.

- [130] *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation IPCC*. 2012. URL: <https://www.ipcc.ch/report/renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation/>.
- [131] “Research of BIPV optimal tilted angle, use of latitude concept for south orientated plans”. En: *Renewable Energy* 34.6 (2009), págs. 1644-1650. ISSN: 0960-1481. DOI: [10.1016/j.renene.2008.10.025](https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.10.025).
- [132] Rincón S. *Energía de gradiente salino una solución ecológica*. Facultad de Minas — Universidad Nacional de Colombia, abr. de 2016. URL: <https://minas.medellin.unal.edu.co/noticias/facultad/606-energia-de-gradiente-salino-una-solucion-ecologica> (visitado 21-02-2023).
- [133] Rozo SM et al. “Celdas de combustible”. En: *Scientia et Technica Año XIII* 37 (2007). ISSN: 0122-1701.
- [134] Ryan N, Roberts S, Morris N et al. “Hy4Heat Domestic Hydrogen Purge Procedures-Work Package 4”. En: (2021).
- [135] Sarker AK et al. “Prospect of Green Hydrogen Generation from Hybrid Renewable Energy Sources: A Review”. En: *Energies* 16 (3 feb. de 2023). ISSN: 19961073. DOI: [10.3390/en16031556](https://doi.org/10.3390/en16031556).
- [136] Sarker AK et al. “Prospect of Green Hydrogen Generation from Hybrid Renewable Energy Sources: A Review”. En: *Energies* 16 (3 feb. de 2023), pág. 3. ISSN: 19961073. DOI: [10.3390/en16031556](https://doi.org/10.3390/en16031556).
- [137] Sarker AK et al. “Prospect of Green Hydrogen Generation from Hybrid Renewable Energy Sources: A Review”. En: *Energies* 16 (3 feb. de 2023), pág. 3. ISSN: 19961073. DOI: [10.3390/en16031556](https://doi.org/10.3390/en16031556).
- [138] SD Wind Turbines. *SD Wind Turbines*. URL: <http://www.sdwindturbines.com/>. SD Wind Turbines, 2023.
- [139] SD12 SWE. *REBRANDED FROM P35-2*. 2023. URL: [www.sd-windenergy.com](http://www.sd-windenergy.com).
- [140] Seungtaek L et al. “Simulation data of regional economic analysis of OTEC for applicable area”. En: *Processes* 8 (9 sep. de 2020). ISSN: 22279717. DOI: [10.3390/pr8091107](https://doi.org/10.3390/pr8091107).
- [141] Sims K et al. “Chapter 7.2 Mount Erebus”. En: *Geological Society, London, Memoirs* 55 (abr. de 2021), págs. M55-2019. DOI: [10.1144/M55-2019-8](https://doi.org/10.1144/M55-2019-8).

- [142] Smellie JL et al. *BAS GEOMAP Series SHEETS 6-A AND 6-B Geology and geomorphology of Deception Island MAPSATS SCALE 1:25 000 GEOLOGICAL MAP COMPILED*. 2002, pág. 50.
- [143] Solovyov V y Bakhmutov V. *FLUID SOURCES AND DEEP STRUCTURE OF SEPARATE ACTIVE VOLCANOES OF THE WEST ANTARCTIC RIFT SYSTEM Magnetic proxies of palaeoclimatic changes in the loess-palaeosol sequences of Ukraine View project Geomagnetic field and climate variations View project*. 2020. URL: <https://www.researchgate.net/publication/341625656>.
- [144] Suez LG. *Laborelec GDF Suez*. url<https://www.laborelec.com/>. Laborelec - GDF Suez, 2023.
- [145] Summerhayes CP. *A history of SCAR, 2004-2010*. Scientific Committee on Antarctic Research, 2011. ISBN: 9780948277269.
- [146] Technology SAS. *Coeficiente de rendimiento - Factor de calidad de la instalación fotovoltaica*. URL: [chrome - extension : / / efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj / https : / / files . sma . de / downloads / Perfratio-TI-es-11.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://files.sma.de/downloads/Perfratio-TI-es-11.pdf).
- [147] Teng T et al. “A comprehensive review of energy management optimization strategies for fuel cell passenger vehicle”. En: *International Journal of Hydrogen Energy* 45.39 (2020). The 7th International Conference on Energy, Engineering and Environmental Engineering, págs. 20293-20303. ISSN: 0360-3199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.202>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319920300057>.
- [148] *The Ideal Solution for Large Rooftops Light Weight and Simple Installation Means Fast Projects and Low Cost*. 2011. URL: [www.solyndra.com](http://www.solyndra.com).
- [149] Tin T et al. “Energy efficiency and renewable energy under extreme conditions: Case studies from Antarctica”. En: *Renewable Energy* 35 (8), págs. 1715-1723. ISSN: 09601481. DOI: [10.1016/j.renene.2009.10.020](https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.10.020).
- [150] *Tratado Antártico*. Washington, USA., dic. de 1959.
- [151] Troncoso F. “Claves del Hidrógeno Verdere”. En: *REVISTA INDUAMBIENTE Ed. N°171 / Jul-Ago 2021* (2021), págs. 28-31.
- [152] Tutores FCM y Sánchez ILBJMD. *Análisis del Performance Ratio en Instalaciones Fotovoltáicas*. 2022.

- [153] Unidas N. *Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible*. Desarrollo Sostenible, 2018. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>.
- [154] UTE - Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas. *UTE - Quiénes Somos*. UTE - Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas. Año de acceso. URL: <https://www.ute.com.uy/institucional/ute/quienes-somos>.
- [155] Vasallo F. *SÍNTESIS DE METEOROLOGÍA ANTÁRTICA Volumen I. Meteorología Antártica*. 2017. URL: <http://hdl.handle.net/20.500.11765/9106>.
- [156] Veerman J et al. “Electrical power from sea and river water by reverse electro dialysis: a first step from the laboratory to a real power plant”. En: *Environmental science & technology* 44.23 (2010), págs. 9207-9212.
- [157] Vigna L. *Antarctic Research Stations Renewable Energy*. URL: <https://public.flourish.studio/visualisation/5888942/>.
- [158] Vries MVWD, Bingham RG y Hein AS. *A new volcanic province: An inventory of subglacial volcanoes in West Antarctica*. Vol. 461. Geological Society of London, 2018, págs. 231-248. DOI: [10.1144/SP461.7](https://doi.org/10.1144/SP461.7).
- [159] Walton DW, Kennicutt MC y Summerhayes CP. “Antarctic Scientific Collaboration”. En: *Exploring the Last Continent*. Springer, 2015, págs. 97-98.
- [160] Walton DW, Kennicutt MC y Summerhayes CP. “Antarctic Scientific Collaboration”. En: *Exploring the Last Continent*. Springer, 2015, págs. 106-108.
- [161] Wind K. *KW6 WIND TURBINE PLANNING SUPPORT DOCUMENT*. Jul. de 2013.
- [162] *Wind Power Icing Atlas (WIceAtlas) & icing map of the world*. 2015.
- [163] Wiser R y Bolinger M. *2017 Wind Technologies Market Report*. 2017. URL: <http://www.osti.gov>.
- [164] Yellott J. “Utilization of Sun and Sky Radiation for Heating and Cooling of Buildings”. En: *ASHRAE Journal* (dic. de 1973). URL: <https://www.osti.gov/biblio/5043741>.

# APÉNDICES



aumenta la velocidad de rotación del rotor a un generador de inducción de velocidad variable dentro de las góndolas.

Cuando la potencia se acerca a la nominal, el sistema de paso comienza a variar la pala ángulo de paso para mantener una salida estable a la potencia nominal.

La salida de frecuencia variable de 690 V de cada generador, donde cada circuito pasa a través de su propio convertidor del lado del generador. Ambos convertidores de generador alimentan un bus de CC común y en un único convertidor del lado de la red que convierte la CC en 50 Hz 690 Vac.

El convertidor de red se alimenta a través del tablero de distribución de 690 V y al transformador principal de 690/11000 V.

La disposición del convertidor se muestra a continuación en la figura

## Apéndice 2

### Origen de datos, Metadatos

- **Velocidad máxima de viento, medidos localmente, Fuente:[81]:**

Medida obtenida muestreo que comprende del 22/08/2022 al 21/08/2023. Se consultaron datos de intensidad de vientos máximos 10 minutal” de la Estación Meteorológica Automática de INUMET[81]. Para manejar los datos se utilizó el programa Meteorological, Climatological and Hydrological[107]. La medida se registró el 05/05/2023, 21:00, UTC:-3. Se tiene registros de velocidades máximas mucho mayores, el día 22/08/2017 se dio una medida de  $52,98m/s$ , informado por el observador de INUMET[81].
- **Velocidad media del viento anual, medidos localmente, Fuente: INUMET[81]:**

Para calcular este valor, se utilizan los datos 10 minutales de un año que van del 18/08/2022 al 18/08/2023 utilizándose el software[107] e implementándose los filtros correspondientes.
- **Metadato de la Estación Meteorológica Automática, Fuente:INUMET[81]:**
  - Puesta en marcha, 01/03/2022.
  - Coordenadas Geográficas: Latitud: -62.18399 Longitud: -58.90516[79].
  - Altura de la base de la estación automática, 17 metros[79].
  - Altura del Anemómetro, 10 *metros*.
  - Cota Barométrica, 1 *metro*.
  - Sensores instalados 2.1.

Sensores instalados Febrero 2022			
<i>Sensor</i>	<i>Marca</i>	<i>Modelo</i>	<i>n/s</i>
Anemómetro	Vaisala	WMT703	T0750486
Pluviómetro	OTT	PLUVIO2L	PL2L-452306
Termómetro	Vaisala	HMP155	T0740919
Barómetro	Vaisala	PTB330	T0720204
Tiempo presente	Vaisala	PWD22	T0410806
Sensor instalado 08/04/ 2022			
Piranómetro	Hukseflux	SR30-M2-D1	14041

**Figura 2.1:** Sensores instalados en Estación Meteorológica BCAA[81].

- Dato del anemómetro utilizado:
  - Marca: Vaisala.
  - Modelo: WMT703, con sistema de calefacción.
  - Calibración de fábrica.
  - Número de serie, T0750486, el 27/09/2022 se cambió por un sensor de la misma marca y modelo, N°T0720232.

## Apéndice 3

# Aerogenerador SD12

Este aerogenerador, al igual que el SD6, tiene la particularidad de ser del tipo "down stream"<sup>1</sup>, con aspas rebatibles actuando acorde la intensidad del viento.

De esta manera, el generador se protege ante eventos extremos, disminuyendo el área de contacto con el viento incidente.

**Datos técnicos específicos del modelo SD12[48, 139] para condiciones de CC.**

- Velocidad de viento máxima: ilimitada,  $m/s$ .
- Mínima temperatura operacional:  $-40^{\circ}C$ .

**Datos técnicos del generador SD12[48, 128].**

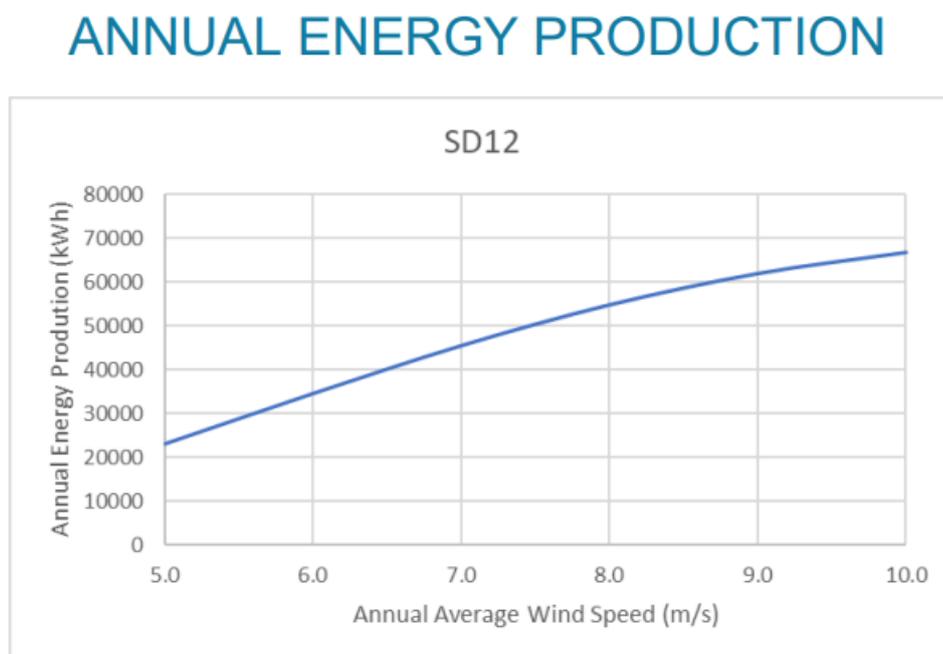
- Generador: de imán permanente de transmisión directa sin escobillas
- Tipo: Downwind, Self Regulating.
- Altura del buje: 15 o 20 *metros* sobre la superficie.
- Diámetro del rotor: 8,5 *metros*.
- Número de palas: 3.
- Material de las palas: Fibra de vidrio termoplástica.
- Potencia nominal: 12 *kW* a 11  $m/s$ .

---

<sup>1</sup>Corriente abajo

- Velocidad de arranque: 3,5  $m/s$ .
- Velocidad del viento nominal: 11  $m/s$ .
- Velocidad de corte: ninguna - operación continua<sup>1</sup>
- Producción anual estimada: 55.000 y 60.000  $kWh$ .
- Peso del aerogenerador sin torre: 1450  $kg$ .
- Viento de sobrevivencia 54  $m/s$ .

En adición a los datos especificados anteriormente, el fabricante ofrece un gráfico de producción anual, la cual se puede ver en la Figura 3.1.



**Figura 3.1:** Producción de energía anual del aerogenerador SD12[139].

<sup>1</sup>Categoría A según norma UNE-EN 61400-2[4].