

# ENERGÍA RENOVABLE EN LA ANTÁRTICA CHILENA: PROYECCIÓN DE LA INGENIERÍA MILITAR EN LA APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS EN AMBIENTES PRÍSTINOS

*Fecha de recepción:* 27 de diciembre de 2024

*Fecha de aceptación:* 28 de febrero de 2025

CAP. Claudio Toledo Salinas<sup>1</sup>

**Resumen:** *síntesis de la propuesta de diseño preliminar de un Sistema de Gestión Ambiental (SGA), asociado al uso de energías, para la Base Antártica del Ejército, enfocado en mejorar el desempeño ambiental mediante la integración de fuentes de energía renovable no convencionales (ERNC). La investigación consistió en la elaboración de un diagnóstico de la situación actual, junto con la metodología de Ingeniería de Sistemas para finalmente verificar tal diseño mediante una simulación en el software Matlab – Simulink. El trabajo llevado a cabo contribuye al compromiso del Estado de Chile con la sostenibilidad y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), en línea con el Acuerdo de París y la normativa nacional vigente. Finalmente, el modelo propuesto se plantea como una solución aplicable de forma transversal a las unidades de la institución, promoviendo la eficiencia, sostenibilidad y responsabilidad social en el desempeño de las áreas de misión institucional.*

**Palabras clave:** *Antártica, gestión de energía, norma ISO, eficiencia, descarbonización, carbono neutralidad.*

## **RENEWABLE ENERGY IN CHILEAN ANTARCTICA: MILITARY ENGINEERING'S PROJECTION IN THE APPLICATION OF TECHNOLOGIES IN PRISTINE ENVIRONMENTS**

**Abstract:** *summary of the preliminary design proposal for an Environmental Management System (EMS) related to energy use for the Chilean Army's*

---

<sup>1</sup> Oficial de Ejército, Ingeniero Politécnico Militar mención Sistemas de Armas de la Academia Politécnica Militar y Magíster en Docencia en Educación Superior de la Universidad Mayor, Santiago, Chile. Actualmente se desempeña como Jefe del Departamento VI "Mando y Control" de la IV DE. Email: claudio.toledo89@gmail.com.



*Antarctic Base. The focus is on improving environmental performance through the integration of non-conventional renewable energy sources (NCRE). The research included an assessment of the current situation, followed by a Systems Engineering methodology to ultimately validate the design through simulation in Matlab – Simulink software. This work contributes to Chile's commitment to sustainability and greenhouse gas (GHG) emissions reduction, in alignment with the Paris Agreement and current national regulations. Finally, the proposed model is intended as a broadly applicable solution for institutional units, promoting efficiency, sustainability, and social responsibility in the performance of mission-related areas.*

**Key words:** Antarctica, energy management, ISO standards, efficiency, decarbonization, carbon neutrality.

## 1. INTRODUCCIÓN

El desierto más grande del planeta Tierra, la Antártica (ver Figura N° 1), posee una extensión de aproximadamente 14 millones de [km<sup>2</sup>], mayor que toda Europa (aproximadamente 10 millones de [km<sup>2</sup>]), con una humedad media relativa inferior al 10% (debido a temperaturas medias de -10 [°C] en la costa y -60 [°C] al interior, sumado a la falta de fuentes de evaporación significativas en el territorio) y escasas precipitaciones (100 [mm] de nieve, equivalente a apenas 30 [mm] de agua) lo que permite catalogarlo como un desierto polar.<sup>2</sup>

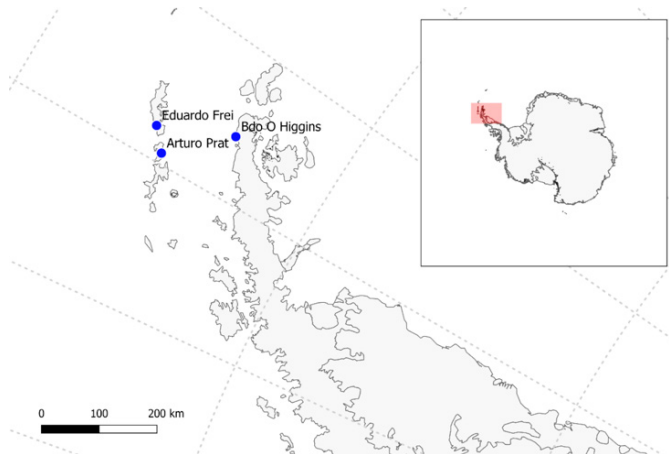


Figura: N°1: Península Antártica.

Fuente: Dirección Meteorológica de Chile (2021).

<sup>2</sup> Una zona es considerada desértica cuando las precipitaciones no superan los 250 [mm] anuales (Valderrama, J.M. 2018)



Este desierto polar, además, es la mayor reserva de agua dulce del mundo; constituye un 70% de esta, donde del total de agua de la tierra, solo el 2,5% es dulce, y además, cerca de 1.200 millones de personas (casi 1/5 de la población mundial) viven en áreas de escasez del recurso hídrico, con estimaciones extraoficiales que indican que el solo derretimiento de esta reserva implicaría un alza del nivel del mar de unos 65 [m], haciendo desaparecer todas las ciudades costeras del globo (Ferrigno *et al.*, 2009).

La Base Antártica del Ejército “Capitán General Bernardo O’Higgins Riquelme” (BAE, ver Figura N° 2) ubicada en la península Antártica, juega un papel crucial, desde donde se hace soberanía y presencia geopolítica, sirve de plataforma para materializar investigación científica, se promueve la conservación y protección del medioambiente, se proyecta un posicionamiento estratégico en política exterior, se salvaguardan los intereses nacionales, y se refuerza el liderazgo de Chile en la región polar.



Figura N° 2: Base Antártica del Ejército.

Fuente: DIVINGE

El territorio antes mencionado se encuentra sometido al Sistema del Tratado Antártico,<sup>3</sup> que restringe la actividad militar y la explotación de recursos, pero que además no admite población permanente, y en síntesis, requiere de condiciones particulares de adaptabilidad, que son solo propias de personal militar y de expediciones científicas equipadas y entrenadas para tales fines (Witker, 2015).

Derivado de lo anterior, la presente propuesta de diseño de Sistema de Gestión Ambiental (SGA) para la BAE se enfoca en integrar energías renovables para reducir

---

3 Serie de normas y acuerdos internacionales que componen el cuerpo legal sobre la Antártica, entre ellos destaca el Protocolo de Madrid de 1991 (y sus 5 anexos) el cual establece principios, procedimientos y obligaciones ambientales para la protección del medioambiente tanto de la Antártica, como de sus ecosistemas dependientes y asociados.



la dependencia de combustibles fósiles y minimizar el impacto ambiental, el cual se observa en la Figura N° 3 “Pérdidas de agua equivalente”, afecta de forma significativa en el área de presencia de la BAE.

Actualmente, las actividades en la base contribuyen irremediablemente a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y presentan desafíos para la gestión del recurso energético en condiciones climáticas adversas. De esta manera, la presente investigación busca implementar un SGA conforme a la norma ISO 14001, complementado con la ISO 50001 para la gestión eficiente de la energía, y la implementación de fuentes de energía renovables no convencionales (ERNC), alineándose con los compromisos de sostenibilidad adquiridos por el Estado de Chile, como el Acuerdo de París y la Ley Marco de Cambio Climático.

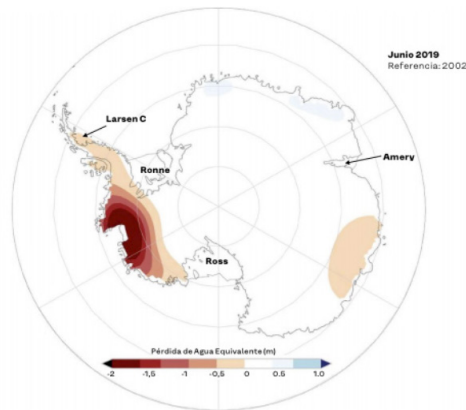


Figura N° 3: Pérdidas de agua equivalente.

Fuente: Dirección Meteorológica de Chile (2021).

Finalmente, la investigación considera el desarrollo de un diagnóstico ambiental, el levantamiento del marco teórico, un análisis comparativo del estado del arte y la definición de los requerimientos para diseñar un sistema eficiente y viable para la BAE. Este diseño preliminar no solo tiene el potencial de mejorar la eficiencia energética de la base, sino también de servir como modelo para otras instalaciones militares o científicas en condiciones extremas, avanzando hacia la carbono neutralidad.

## 2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

### 2.1. Método de investigación

El enfoque metodológico para este diseño preliminar (Ortegón *et al.*, 2005) se basa en el diagnóstico de la situación actual de la BAE, identificando sus principales necesidades y puntos de mejora en la gestión de energía. Para ello, se realizó un análisis del marco



normativo y de las tecnologías disponibles, así como una revisión de casos de éxito en otras bases antárticas internacionales. La recopilación de datos sobre el consumo energético de la base y las condiciones ambientales extremas sirvió como base para identificar las áreas de mejora y formular estrategias sostenibles.

El punto de inicio de la elaboración del diagnóstico consistió en levantar un estudio comparativo con las bases antárticas emblemáticas por su incorporación de conceptos de eficiencia y descarbonización energética. Estas fueron la base alemana (Neumayer III), la base belga (Princess Elisabeth) y la base neozelandesa (Scott Base), donde fundamentalmente se estudiaron los conceptos que se presentan en la Tabla N° 1 “Tabla Comparativa Bases Antárticas Internacionales”, como sigue:

<b>Tabla Comparativa Bases Antárticas Internacionales</b>				
	<b>Fuentes de energía</b>	<b>Eficiencia y gestión de la energía</b>	<b>Innovación tecnológica y sostenibilidad</b>	<b>Almacenamiento de energía</b>
<b>Neumayer -Station III</b>	Combinación energía eólica (turbinas) y generadores diésel	Sistema de gestión de edificios que optimiza calefacción y electricidad	Podría beneficiarse de una mayor integración de otras energías renovables	Sistema de baterías de 300 [kWh]
<b>Princess Elisabeth Antártica</b>	Paneles solares y turbinas eólicas (cero emisiones)	Sistema de gestión de microrredes que gestiona fuentes de ERNC y optimiza almacenamiento y distribución	Integración total de tecnologías renovables y sostenibles	Sistema de almacenamiento de baterías de plomo-ácido <sup>16</sup> de 240 [kWh]
<b>Scott Base</b>	Energía solar y cogeneradores diésel	En proceso de integración de tecnologías más eficientes y un sistema de gestión	Potencial significativo de eficiencia y sostenibilidad según implementación de nuevas tecnologías	Sistema de almacenamiento de baterías con una capacidad de hasta 10 [MWh]

Tabla N° 1: Tabla Comparativa Bases Antárticas Internacionales.

Fuente: DIVINGE

El principal hallazgo del análisis normativo e investigación comparativa fue la determinación que la operación basada únicamente en combustible fósil presenta un importante impacto sobre los ecosistemas locales y sobre todo una significativa huella de carbono.<sup>4</sup>

Luego de haberse identificado los criterios comunes relacionados con las bases antes mencionadas y la necesidad de incorporar energías renovables a la matriz energética, el desarrollo del diseño del SGA se estructuró en cuatro etapas: 1) Definición de los requerimientos del sistema, 2) Diseño conceptual y 3) Diseño preliminar del sistema. Estas

4 Conjunto de emisiones de gases de efecto invernadero producidas, directa o indirectamente, por personas, organizaciones, productos, eventos o regiones geográficas, en términos de CO2 equivalente (Ministerio del Medio Ambiente, 2024).



etapas condujeron al diseño preliminar, donde se definió un modelo matemático y se realizó la simulación del desempeño energético utilizando el Software Matlab Simulink.<sup>5</sup>

## 2.2. Diagnóstico ambiental

El presente diagnóstico ambiental tiene por objeto evaluar las condiciones actuales del uso de energía y los impactos ambientales asociados en la Base Antártica del Ejército “Capitán General Bernardo O’Higgins Riquelme” (BAE). La base se encuentra emplazada en un entorno extremadamente frágil, caracterizado por la presencia de un ecosistema de alta vulnerabilidad, afectado de manera considerable por el calentamiento global y el cambio climático. Actualmente, la única fuente de energía corresponde al diésel (sobrepasando los 200.000 litros al año), utilizado para la generación eléctrica, principalmente para subsistencia, calefacción, agua caliente, iluminación y otras necesidades energéticas esenciales (ver Figura N° 4). Esta dependencia de combustibles fósiles no solo implica una significativa huella de carbono, sino también conlleva una logística compleja, costosa y riesgosa, debido a las dificultades inherentes al transporte y almacenamiento de combustible en la región.

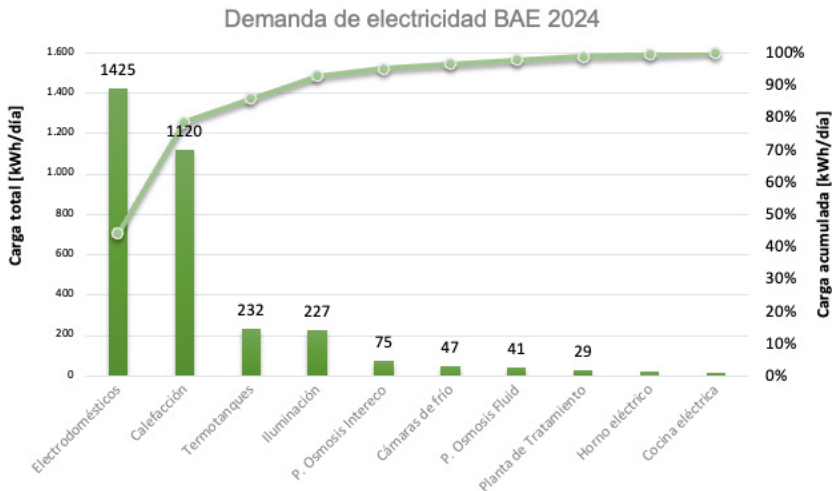


Figura N° 4: Diagrama de Pareto de demanda eléctrica.

Fuente: Elaboración propia (2024).

A la luz de lo expuesto anteriormente, es evidente que el cambio climático está generando efectos visibles en la región antártica, lo cual, sumado a las tendencias ac-

<sup>5</sup> Es un entorno de diagrama de bloques para simulación multidominio y diseño basado en modelos. Ofrece soporte para el diseño en nivel de sistema, simulación, generación de códigos, y las pruebas y verificación continuas de sistemas permitiendo simular sistemas lineales y no lineales.



tuales y considerando el estado del arte, hace imperante la necesidad de minimizar la huella de carbono de la BAE. Por otra parte, se ha observado un aumento progresivo de las temperaturas, lo cual está acelerando el derretimiento de los hielos y elevando el riesgo para la seguridad de las operaciones logísticas. Asimismo, se ha detectado una ineficiencia en la gestión energética, producto de la falta de tecnologías renovables que contribuyan a la optimización del uso de los recursos energéticos, generando un consumo excesivo de diésel y la consiguiente emisión de gases de efecto invernadero.

Con base en lo anterior, se identifica la necesidad de transitar hacia un modelo de gestión energética más sostenible, que contemple la incorporación de ERNC, tales como la energía solar fotovoltaica y la energía eólica, con el propósito de reducir la dependencia de los combustibles fósiles, optimizar el uso de los recursos disponibles y mitigar el impacto ambiental de las operaciones en la base.

Finalmente, se debe indicar que el análisis inicial exploratorio consideró el abanico completo de ERNC, incluyendo la energía mareomotriz y el H<sub>2</sub>, las cuales se definieron fuera del alcance para la presente investigación debido a la inviabilidad de su implementación tanto por razones geográficas locales de la BAE, como por la inmadurez aún de esta última tecnología en Chile.

### **2.3. Definición de requerimientos**

La definición de los requerimientos para el Sistema de Gestión Ambiental (SGA) de la BAE surge del análisis de la necesidad de adaptar el sistema energético actual a las condiciones particulares del entorno antártico, cumpliendo con la normativa ISO 14001 de gestión ambiental y respondiendo a los objetivos de eficiencia y sostenibilidad energética de la ISO 50001.

Institucionalmente, esta necesidad se declara en el documento RESOL. CJE EMGE DLE II (P) N.º 11150/4289/3165 de 23DIC2021, que dispone la implementación de un Sistema de Gestión Ambiental (SGA) conforme a la norma ISO 14001 para la Base Antártica del Ejército, correspondiente para la presente investigación al Requerimiento de Alto Nivel (NASA, 2020). A lo anterior, se suma la integración de un Sistema de Gestión de Energía y la implementación de fuentes de energía renovables, de la mano de las tendencias actuales y futuras por descarbonizar la matriz energética y cumplir con los acuerdos suscritos por el país.

Por otra parte, el análisis de requerimientos comienza por los usuarios y partes interesadas del proyecto, determinándose estos requerimientos a través de la caracterización establecida en Ingeniería de Requerimientos (ISO/IEC/IEEE 29148, 2011). Luego del



análisis de requerimientos desde la perspectiva de los usuarios, se profundiza con un carácter más bien técnico a través de una herramienta denominada Casa de la Calidad (ver Figura N° 5) (QFD, Quality Function Deployment) (Cohen, 1995), a partir de la cual es posible establecer requerimientos funcionales, los cuales poseen una especificación técnica tal que permite describir cómo debe funcionar un sistema y cómo debe ser construido para cumplir con los requerimientos de alto nivel. En este punto se consideran funciones específicas, interfaces, rendimiento y seguridad, entre otros (Young, 2004).

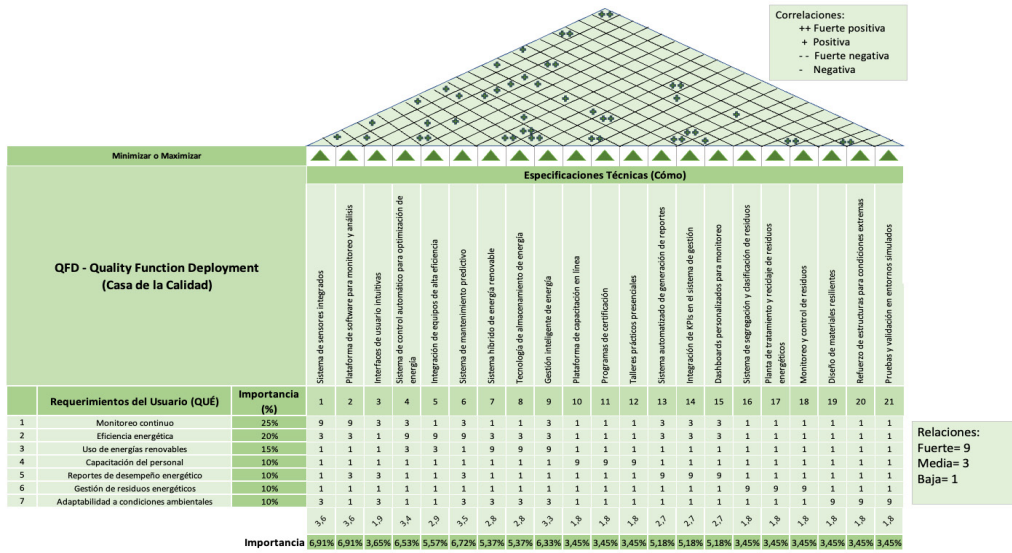


Figura N° 5: QFD-Requerimientos del Sistema.

Fuente: Elaboración propia (2024).

Los requerimientos funcionales corresponden al establecimiento de capacidades del sistema sobre los cuales se construye el diseño que defina un comportamiento con sus respectivas entradas/salidas, tareas, servicios y procesos, en términos de lo establecido por Sommerville (2011). Estos son definidos a continuación:

- Generación de Energía Renovable: incorporación de aerogeneradores y paneles solares fotovoltaicos que complementen la generación de energía de la base, con el objetivo de diversificar la matriz energética y reducir la dependencia del diésel.
- Almacenamiento de Energía: implementación de sistemas de baterías para el almacenamiento de excedentes energéticos, garantizando la disponibilidad de energía durante los periodos de baja generación renovable.
- Monitoreo y Control: establecimiento de un sistema de monitoreo en tiempo real, que permita evaluar el consumo y la producción energética, así como la operatividad de los equipos de ERNC, con el fin de optimizar la gestión energética de la base.



- Reducción de Emisiones: el sistema debe permitir una reducción significativa de las emisiones de CO<sub>2</sub>, contribuyendo al cumplimiento de los compromisos internacionales de mitigación del cambio climático asumidos por Chile.

Por otra parte, en cuanto a los requerimientos no funcionales, pero también considerados en la presente investigación, estos incluyen:

- Adaptabilidad al Entorno: los componentes del sistema deben estar diseñados para soportar las condiciones extremas de la Antártica, incluyendo temperaturas extremadamente bajas, alta humedad y vientos intensos.
- Cumplimiento Normativo: asegurar que el diseño e implementación del SGA cumpla con la normativa internacional ISO 14001, así como con las normativas nacionales aplicables a la gestión ambiental y energética.
- Escalabilidad: el sistema debe tener una arquitectura modular que permita su adaptación o expansibilidad, según los requerimientos futuros de la base o su replicabilidad en otras instalaciones antárticas.

## 2.4. Diseño conceptual

El diseño conceptual del SGA para la BAE contempla un esquema híbrido de generación energética, que integra fuentes de energía renovable con el sistema tradicional basado en generadores diésel (ver Figura N° 6). El objetivo principal es reducir la dependencia de los combustibles fósiles mediante el aprovechamiento de los recursos naturales disponibles en la región, como la radiación solar y el viento. Se suma a lo anterior, todo el cuerpo normativo y políticas de gestión propias de las normas ISO antes mencionadas, sobre las cuales se desarrolla el presente constructo:

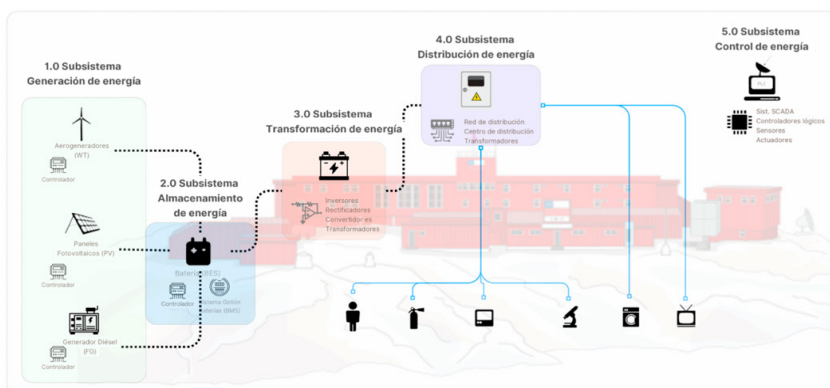


Figura N° 6: Diseño conceptual

Fuente: Elaboración propia (2024).



Este diseño obedeció a un acabado análisis funcional (Buede, 2008), compuesto por la definición de una Arquitectura Funcional, un Diagrama de Bloques de Flujo Funcional (Kossiakoff *et al.*, 2011) y un Modelado Funcional (IDEF0), los cuales una vez realizados permitieron determinar cada uno de los elementos tipo hardware para realizar las tareas de los requerimientos funcionales. Cabe destacar que la determinación de componentes fue en esta etapa la tarea más crítica, donde se elaboraron la Asignación de Requerimientos y la Matriz Funcional/Física (DAU, 2024).

Como es posible evidenciar en la Figura N° 6, el diseño conceptual del SGA incluye los siguientes subsistemas:

- Subsistema de generación de energía (color verde): se propone la instalación de aerogeneradores y paneles solares fotovoltaicos en puntos estratégicos, de acuerdo a un estudio previo de la disponibilidad de recursos energéticos, con el fin de maximizar la eficiencia en la captación y generación de energía.
- Subsistema de almacenamiento de energía (color azul): se prevé la utilización de baterías de ion-litio para el almacenamiento de la energía generada en exceso, de manera que esta pueda ser utilizada durante los períodos en los cuales la generación de energía renovable sea insuficiente.
- Subsistema de transformación de energía (color rojo): un sistema de transformación capaz de canalizar la energía a través de corriente alterna, permitiendo el uso de los recursos con mayor disponibilidad.
- Subsistema de distribución de energía (color violeta): consistente en el proceso de distribución a diferentes puntos de la infraestructura.
- Subsistema de control de energía (color gris): Proceso de supervisión de los demás subsistemas, asegurando la operación eficiente, segura y optimizada. Está compuesto del sistema SCADA, controladores lógicos programables, sensores y actuadores. Sus principales características son la automatización, optimización y monitoreo en tiempo real del estado del sistema.

Continuando con la profundización de la definición del sistema, la siguiente tarea obedece a la definición de los parámetros técnicos de cada uno de los subsistemas antes definidos, los cuales serán posteriormente simulados para verificar su viabilidad en diferentes escenarios climatológicos y también a través de diferentes configuraciones de componentes (cantidad de aerogeneradores, paneles solares y horas de funcionamiento de generador diésel).

De esta manera, para cada uno de los componentes involucrados en la simulación, se determinan los siguientes parámetros técnicos, expuestos en la Tabla N° 2, como sigue:



Parámetros Técnicos de Componentes		
N°	Componente	Parámetro
1	Aerogenerador	Cantidad: 20 f [Hz]: 50 A <sub>r</sub> : 16Π R[m]: 4 P <sub>out</sub> [kW]: 12,83 - 63,7 V [V]: 48DC λ: Vientos útiles para captura de energía (2,5-20) Veloc. [kt]: variable
2	Panel solar fotovoltaico (PSF)	Cantidad: 50 P <sub>out</sub> [kW]: 1,5 - 11,56 V [V]: 24 Radiación Temperatura
3	Generador diésel	V [V]: 400 Corriente [A]: 288
4	Baterías	Capacidad [Ah]: 225 Voltaje nominal [V]: 6 Corriente carga [A]: 11
5	Inversor	VDC: 1960 VAC: 24 f [Hz]: 120 196P [kW]: 700
5	Controlador	V [V]: 24DC I [A]: 20

Tabla N° 2: Parámetros técnicos.

Fuente: Elaboración propia (2024).

## 2.5. Diseño preliminar

Finalmente, el Diseño Preliminar del SGA (ver Figura N° 7), se basa en la selección de componentes tecnológicos con sus particulares parámetros de funcionamiento y en la definición de su configuración física en la base, así como en la modelación del sistema mediante herramientas de simulación computacional. Para ello, se utilizó Matlab Simulink, lo cual permitió evaluar el desempeño de cada uno de los componentes y optimizar la configuración del sistema, en concordancia con los protocolos de validación relacionados (DoD, 2022).

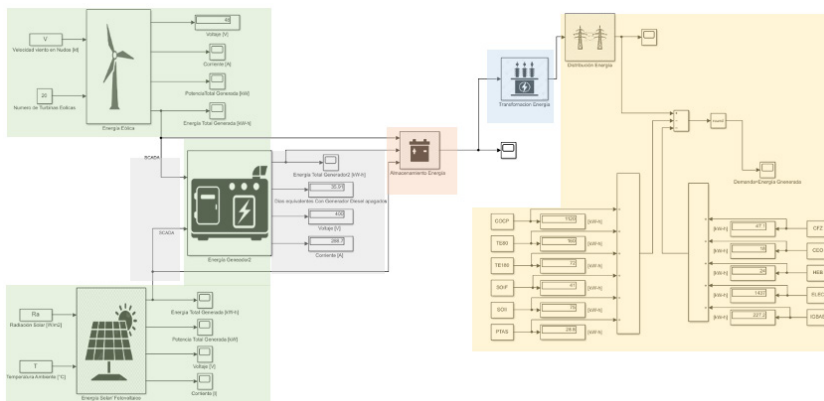


Figura N° 7: Diseño preliminar.

Fuente: Elaboración propia (2024).



La modelación (Urquía y Martín, 2013) del diseño preliminar está compuesta de la siguiente forma (ver Tabla N° 3):






Componentes de la Simulación		
Sistema	Subsistema	Descripción
Sistema de Gestión Ambiental asociado al uso de energías	Generación de energía 	La modelación se basa en el DC definido en el Cap. III, el cual presenta un parámetro final denominado “días ahorrados”, el que consiste en la cantidad de días donde no están encendidos los generadores a diésel. La actual propuesta, para cualquiera de las 3 simulaciones, considera un funcionamiento del generador diésel de 16 horas al día, al cual se le descuenta el ahorro resultante.
	Almacenamiento de energía 	
	Transformación de energía 	
	Distribución de energía 	
	Control de energía 	

Tabla N° 3: Diseño preliminar.

Fuente: Elaboración propia (2024).

Derivado de lo anterior, para cada uno de los subsistemas antes descritos, su modelación obedeció a lo siguiente:

- Aerogeneradores: se prevé la instalación de aerogeneradores con una capacidad nominal de 10 kW cada uno, diseñados para operar de manera eficiente en condiciones de viento de hasta 150 km/h.

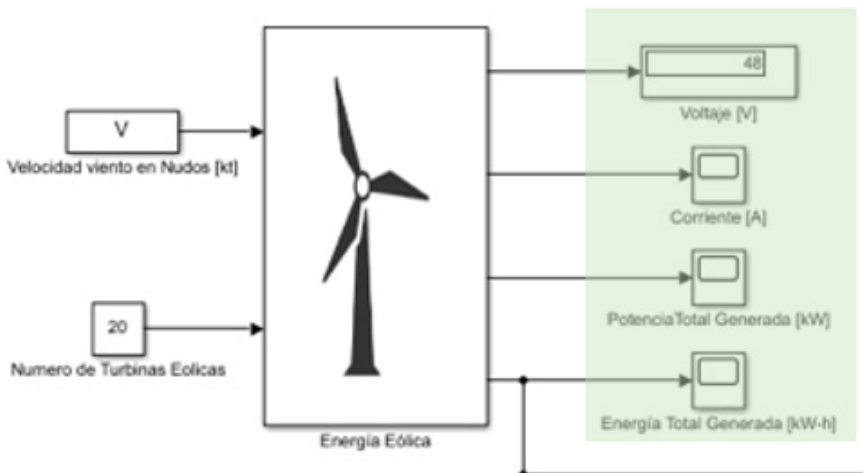


Figura N° 8: Modelación aerogeneradores entrada/salida.

Fuente: Elaboración propia (2024).

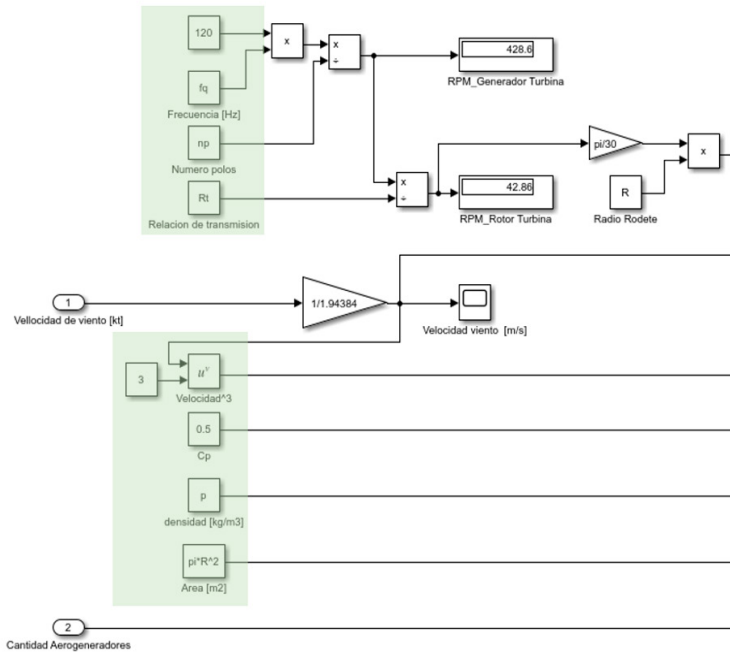


Figura N° 9: Modelación aerogeneradores.

Fuente: Elaboración propia (2024).

- Paneles solares: se contempla la instalación de un conjunto de módulos fotovoltaicos con una capacidad de generación de 20 kW, orientados de manera tal que se maximice la captación solar durante los meses de verano.

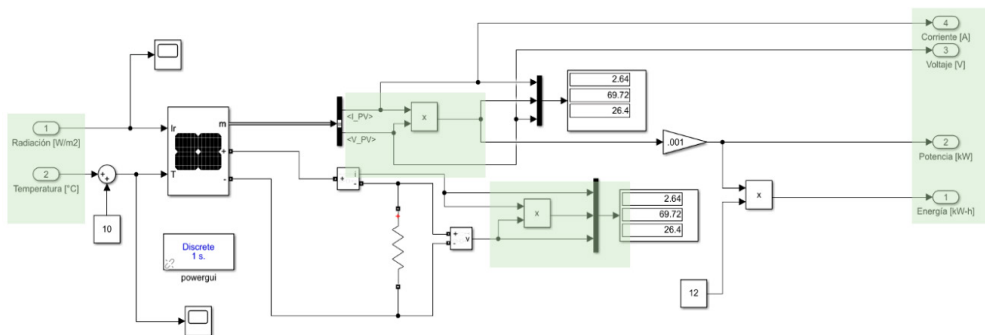


Figura N° 10: Modelación paneles solares.

Fuente: Elaboración propia (2024).

- Baterías de almacenamiento: se utilizarán baterías de ion-litio con una capacidad total de 100 kWh, para garantizar la continuidad del suministro durante la noche y en días nublados.

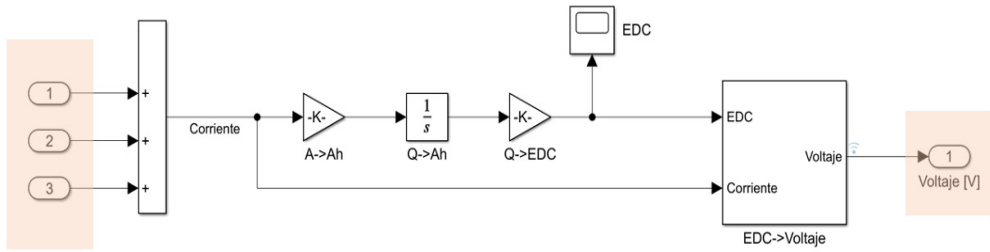


Figura N° 11: Modelación paneles solares.

Fuente: Elaboración propia (2024).

- Generadores diésel de respaldo: se mantendrán dos generadores diésel con capacidad de 50 kW cada uno, los cuales serán utilizados solo en situaciones donde la generación renovable no sea suficiente.

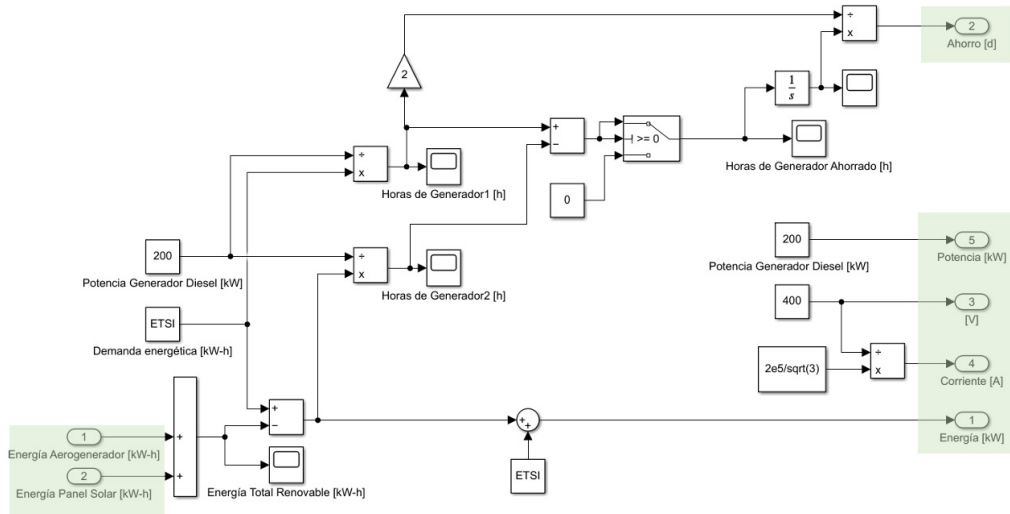


Figura N° 12: Modelación paneles solares.

Fuente: Elaboración propia (2024).

Finalmente, se estableció la integración entre los distintos subsistemas para asegurar la continuidad del suministro y el flujo constante de energía. La ubicación de los componentes fue determinada de manera cuidadosa para minimizar los riesgos asociados a las condiciones ambientales, como la acumulación de nieve y la exposición a fuertes vientos.

## 2.6. Resultados

Lo más destacable de la presente propuesta, confirmada por la simulación antes descrita, es el ahorro de horas de funcionamiento de los motores de generación diésel.



La propuesta parte de la base que un motor, cuya potencia disponible es aproximadamente de 200 [kW], funciona por 8 horas, es decir, produce un total de energía de 1.800 [kWh] (equivalente prácticamente al 50% de la demanda total de energía por parte de la BAE, 3.250 [kWh]), mientras que la otra mitad de la energía necesaria para un día de funcionamiento proviene de fuentes renovables (aerogenerador y PSF) y el otro generador diésel. El parámetro “ahorro relativo” indica la cantidad de horas que el segundo generador no tuvo que operar para alcanzar el 50% restante de energía para el funcionamiento de la infraestructura.

Los resultados obtenidos mediante la simulación del SGA en Matlab Simulink indican que la integración de energías renovables en la BAE permitirá una reducción significativa en el consumo de diésel, alcanzando una disminución del 35% en comparación con los niveles actuales. Esta reducción contribuirá a una disminución considerable de las emisiones de CO<sub>2</sub>, mejorando la eficiencia del sistema energético y alineándose con los compromisos internacionales de Chile en la lucha contra el cambio climático.

Durante los meses de verano, la generación de energía a partir de fuentes renovables será capaz de cubrir hasta el 50% de la demanda energética de la base, mientras que el almacenamiento en baterías garantizará la continuidad del suministro durante las horas de menor producción. En los meses de invierno, cuando la generación solar es limitada, se contará con el respaldo de los generadores diésel para asegurar la estabilidad del sistema.

Por lo tanto, en el peor escenario (no representado por ninguna simulación, pero planteado en el presente párrafo), es decir, en el escenario en que no se genera energía alguna por parte de fuentes renovables, esto ya presenta una disminución significativa de uso de combustible fósil y emisiones contaminantes en relación a la situación actual de la BAE, en que la gestión actual de la matriz energética considera el funcionamiento permanente de generación a motor diésel, es decir un total de 8.760 horas al año, mientras que la propuesta solo indica la generación de la demanda energética para un día a través del funcionamiento de los generadores 16 horas diarias, es decir ya reduce un 33,3% tanto el requerimiento por combustible fósil como los GEI inherentes a esta operación.

## 2.7. Análisis crítico

El análisis crítico del diseño preliminar identificó varios puntos significativos a considerar, como la mejora en la eficiencia energética, la reducción de emisiones y la menor dependencia de combustibles fósiles. Sin embargo, también se reconocieron limitaciones, entre las cuales destacan los costos iniciales de inversión y los desafíos



logísticos para la instalación y mantenimiento de los sistemas de energía renovable en condiciones climáticas adversas. A pesar de estas limitaciones, el diseño preliminar proporciona una base sólida para la futura implementación de un sistema sostenible en la BAE.

Uno de los principales retos es la adaptabilidad del sistema a las condiciones extremas de la Antártica. Las temperaturas extremadamente bajas y los fuertes vientos plantean desafíos tanto para la infraestructura física como para el rendimiento de los componentes electrónicos. A pesar de estos desafíos, se determinó que, con un diseño adecuado y la selección de materiales resistentes, es posible implementar un sistema de energía renovable confiable que funcione eficientemente en este entorno hostil.

### **3. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS**

El diseño preliminar del SGA asociado al uso de energías en la Base Antártica del Ejército ofrece una solución viable para mejorar el desempeño energético de la base y reducir su impacto ambiental. La integración de energías renovables no solo contribuye a la reducción de emisiones de GEI, sino que también proporciona una mayor seguridad energética al disminuir la dependencia del diésel. Este proyecto se alinea con los compromisos internacionales asumidos por Chile en materia de sostenibilidad y representa un avance significativo hacia la carbono neutralidad al 2050.

La implementación de este sistema también tiene un potencial de aplicación transversal en otras bases militares o científicas que operan en condiciones extremas, tanto en la Antártica como en otras regiones remotas. Como próximos pasos, se recomienda realizar una evaluación de costos detallada y un análisis de ciclo de vida para determinar la rentabilidad del sistema a largo plazo. Además, es necesario trabajar en la capacitación del personal encargado de operar y mantener el sistema, garantizando así su correcta utilización y sostenibilidad operativa.

### **REFERENCIAS**

- Buede, D. M. (2008). *The engineering design of systems: Models and methods* (2nd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470413791>
- Cohen, L. (1995). *Quality function deployment: How to make QFD work for you*. Addison-Wesley.
- Defense Acquisition University. (2024). *Systems Engineering Fundamentals*. Defense Acquisition University Press.



Department of Defense. (2024). *Engineering of defense systems guidebook* (Change 2, 7 October 2024). Washington, DC: Department of Defense. <https://www.dau.edu/sites/default/files/2024-10/Eng-Def-Sys-Change2-7October2024-v3.pdf>

Dirección Meteorológica de Chile. (2021). *Climatología de Estaciones Chilenas de la Península Antártica*.

Ferrigno, J. G.; Cook, A.; Mathie, A. M.; Williams, R. S.; Swithinbank, C.; Foley, K. M.; Thomson, J. W. & Sievers, J. (2009). *Coastal-Change and Glaciological Map of the Palmer Land Area, Antarctica: :1947–2009*. Geologic Investigations Series Map I-2600-C. Digital or Visual Products <https://pubs.usgs.gov/imap/i-2600-c/>

International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission/Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2011). ISO/IEC/IEEE 29148:2011 - *Systems and software engineering – Life cycle processes – Requirements engineering*. International Organization for Standardization.

Kossiakoff, A.; Sweet, W. N.; Seymour, S. J. & Biemer, S. M. (2011). *Systems engineering principles and practice* (2nd ed.). Wiley.

NASA. (2020). *NASA systems engineering handbook* (Rev. 2; NASA/SP-2007-6105 Rev2). National Aeronautics and Space Administration.

Ortegón, E.; Pacheco, J. F. & Prieto, A. (2005). *Metodología del marco lógico para la planificación, el seguimiento y la evaluación de proyectos y programas*. CEPAL.

Sommerville, I. (2011). *Software Engineering* (9th ed.). Addison-Wesley.

Urquía Moraleda, A. & Martín Villalba, C. (2013). *Modelado y simulación de eventos discretos*. UNED.

Valderrama, J. M. (2018). *Los desiertos y la desertificación*. Los libros de la catarata.

Witker, I. (2015). Entre una nueva Guerra Fría y el espíritu cooperativo: características centrales del programa antártico ruso. *Pre-bie3*, (2), 43. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7685531.pdf>

Young, R. R. (2004). *The Requirements Engineering Handbook*. Artech House.