



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE GUAYAQUIL**

**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**DISEÑO DE UN SISTEMA HÍBRIDO CON GRUPO ELECTRÓGENO Y BANCO DE  
BATERIAS PARA ALIMENTAR GRÚA RTG REDUCIENDO EL CONSUMO  
COMBUSTIBLE**

Trabajo titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero Eléctrico

**AUTOR: JHOSETH ALEXANDER MAGALLANES PONGUILLO**

**TUTOR: ING. JULIO SILVA BECHERAN**

Guayaquil – Ecuador

2025

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

Yo, Jhoseth Alexander Magallanes Ponguillo con documento de identificación N° 0929016426. Soy el autor y responsable del presente trabajo de titulación; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 6 de marzo del año 2025

Atentamente,



---

Jhoseth Alexander Magallanes Ponguillo  
0929016426

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Jhoseth Alexander Magallanes Ponguillo con documento de identificación 0929016426, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy el autor del Proyecto técnico: "Diseño de un sistema híbrido con grupo electrógeno y banco de baterías para alimentar grúa RTG reduciendo el consumo combustible", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en forma digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 6 de marzo del año 2025

Atentamente,



Jhoseth Alexander Magallanes Ponguillo

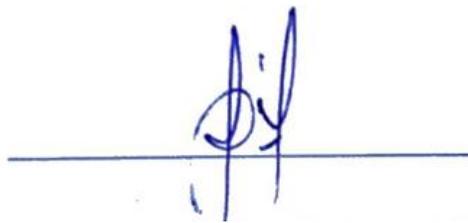
0929016426

**CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Julio Manuel Silva Bechern con documento de identificación 0959623422, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro bajo mi tutoría fue desarrollado el proyecto técnico: " Diseño de un sistema híbrido con grupo electrógeno y banco de baterías para alimentar grúa RTG reduciendo el consumo combustible" realizado por Jhoseth Alexander Magallanes Ponguillo con documento de identificación 0929016426, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 6 de marzo del año 2025

Atentamente



Ing. Julio Manuel Silva Becherán, MSc.

0959623422

## DEDICATORIAS

*Dedicado a mi esposa Allison que es de los pilares fundamentales en mi vida, que siempre me ha apoyado y me ha dado el empuje para cumplir lo que me he propuesto, dedicado a mi hija Luciana que desde que nació se ha vuelto mi inspiración y motivación para lograr mis metas.*

*Dedicado a mi madre Isabel por estar siempre para mí, por darme siempre su amor incondicional y apoyo moral en las decisiones y situaciones que he pasado, al esposo de mi madre, Don Carlos por ser un padre para mí y apoyarme siempre que lo he necesitado.*

*Dedicado a mi padre Geovanny ya que me enseñó a no rendirme y cumplir las metas propuestas.*

## AGRADECIMIENTOS

*Agradezco a Dios, por darme la salud, la paciencia y sabiduría para lograr los objetivos.*

*Agradezco al Terminal Portuario de Guayaquil por haber permitido realizar este proyecto de tesis en sus instalaciones, a mi jefe el Ing. Daniel Side por su gran apertura y darme el tiempo de poder realizar el proyecto, a mis compañeros de trabajo por compartir sus conocimientos y experiencias en el área de eléctrica y electrónica.*

*Al Ing. Roberto Vivero por compartir sus conocimientos y enseñanzas desde el primer día en el terminal portuario, por su amistad y gran apoyo.*

*A mis amigos Ingenieros Anthony Salvatierra, Antonio Rodríguez, Nangel Criollo y Agustín Rivera por darme su apoyo incondicional en la carrera.*

## RESUMEN

Este proyecto busca evidenciar la factibilidad y los beneficios de un sistema híbrido entre un grupo electrógeno y un banco de baterías en las grúas RTG (Rubber-Tyred Gantry Cranes), que ha buscado transformar la forma en que se suministra energía a estos equipos portuarios. A través de esta integración, el banco de baterías desempeñará un papel clave al sustituir la fuente principal de energía, lo que implica una reducción significativa de la dependencia del grupo electrógeno para la operación continua de las grúas.

Para el diseño del sistema se empleará un grupo electrógeno, el cual tendrá la función de cargar el banco de baterías en un tiempo preestablecido. El proceso de control y supervisión de este sistema de carga será gestionado a través de un sistema ESS, el cual se encargará de coordinar y optimizar las operaciones, asegurando que el generador funcione de manera eficiente y se cumpla con el tiempo necesario para cargar y descargar completamente las baterías. Este enfoque permitirá una integración precisa entre el generador y las baterías, facilitando una operación automatizada, segura y confiable, lo que a su vez garantizará la máxima eficiencia en el uso de la energía almacenada.

*Palabras clave: Grupo electrógeno, banco de baterías, eficiencia, ESS.*

## ABSTRACT

This project seeks to demonstrate the feasibility and benefits of a hybrid system between a genset and a battery bank on RTG (Rubber-Tyred Gantry Cranes), which seeks to transform the way power is supplied to this port equipment. Through this integration, the battery bank will play a key role in replacing the main power source, which means a significant reduction in the dependence on the generator set for the continuous operation of the cranes.

For the design of the system a genset will be used, which will have the function of charging the battery bank in a preset time. The control and supervision process of this charging system will be managed through a ESS system, which will coordinate and optimize operations, ensuring that the generator operates efficiently and meets the time required to fully charge and discharge the batteries. This approach will allow precise integration between the generator and the batteries, facilitating an automated, safe and reliable operation, which in turn will ensure maximum efficiency in the use of the stored energy.

*Keywords: Generator set, battery bank, efficiency. ESS.*

## PREFACIO

El presente proyecto de tesis nace por la creciente dependencia de fuentes de energía más limpias y eficientes en las infraestructuras portuarias que ha llevado a la necesidad de desarrollar nuevas alternativas que faciliten una utilización óptima de los recursos energéticos disponibles.

Partiendo de esta iniciativa, se tomó en cuenta un sistema que fue desarrollada acorde iba evolucionando la tecnología a nivel mundial por empresas como Konecranes, otras empresas tales como ZPMC (china), Kalmar (Finlandia) y Mitsui Engineering & Shipbuilding (Japón), donde se han reducido el tamaño de baterías, se han mejorado las características y almacenando mayor cantidad de energía, este sistema híbrido produce una energía más limpia donde consiste el uso de un grupo electrógeno y un banco de baterías [1].

Este proyecto se basa en la utilización de un banco de baterías como fuente principal y de un grupo electrógeno que serviría para cargar el banco de baterías o en caso de emergencia si llega a tener algún problema el banco de baterías, el principio del sistema híbrido permitirá reducir el uso continuo del motor diésel, disminuir el consumo de combustible, mitigar las liberaciones de gases de efecto invernadero y los gastos operativos.

Garantizará la eficiencia en la operación del generador y las baterías, adaptando los tiempos de carga y descarga de manera inteligente por su sistema ESS. Este trabajo no solo busca mejorar los procesos operativos, sino también demostrar cómo las tecnologías híbridas pueden desempeñar un papel crucial en la transición hacia un modelo más verde y sostenible para la industria portuaria.

## ÍNDICE

<b>CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE .....</b>	<b>I</b>
<b>TITULACIÓN.....</b>	<b>I</b>
<b>CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE .....</b>	<b>II</b>
<b>TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA .....</b>	<b>II</b>
<b>CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....</b>	<b>III</b>
<b>DEDICATORIAS .....</b>	<b>IV</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>V</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>VI</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VII</b>
<b>PREFACIO.....</b>	<b>VIII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>XIII</b>
<b>ÍNDICE DE TABLA.....</b>	<b>XV</b>
<b>GLOSARIO.....</b>	<b>XVI</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. PROBLEMA .....	1
1.2. JUSTIFICACIÓN .....	2
1.3. OBJETIVOS .....	3

1.3.1. Objetivo General:.....	3
1.3.2. Objetivos Específicos: .....	3
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>4</b>
2.1.1. Grúa RTG .....	4
2.1.2. Movimiento hoist (elevación).....	5
2.1.3. Movimiento trolley (Traslación del carro) .....	5
2.1.4. Movimiento gantry (traslación del pórtico o grúa).....	6
2.1.5. Spreader .....	7
2.1.6. Sistema híbrido .....	7
2.1.7. Batería.....	8
2.1.7.1. Baterías de iones de litio NMC.....	9
2.1.7.2. Partes que componen la batería NMC/grafito .....	10
2.1.7.3. Ventajas y desventajas de la batería NMC .....	10
2.1.8. C-rate .....	11
2.1.9. Sistema de almacenamiento de energía con baterías ESS.....	12
2.1.9.1. Componentes principales: .....	12
2.1.10. Grupo electrógeno .....	13
2.1.11. Motor diésel.....	13
2.1.12. Motor eléctrico .....	14
2.1.13. Generador Eléctrico.....	15
2.1.14. Gases de efecto invernadero .....	16
2.1.15. Combustible.....	17
2.1.16. Variador de frecuencia.....	18
2.1.17. Convertidor de entrada .....	18
2.1.18. Bus DC .....	19
2.1.19. Inversor de salida.....	20
2.1.20. Filtro LCL.....	21
2.1.21. Unidad de Front End Activo (AFE) .....	23
2.1.22. Módulo diodos.....	23

## **CAPÍTULO III..... 25**

### **3.1. DESCRIPCIÓN Y CONDICIÓN ACTUAL DE OPERACIÓN DE LA GRÚA RTG CON MOTOR DIESEL ..... 25**

- 3.1.1. Análisis de consumo de combustible ..... 29
  - 3.1.1.1. Emisión de CO<sub>2</sub> sistema actual ..... 31
- 3.1.2. Análisis de mantenimiento motor diésel ..... 32
- 3.1.3. Costos totales de consumo de combustible y mantenimiento motor diésel ..... 33

## **CAPÍTULO IV ..... 35**

### **4.1. METODOLOGÍA DEL DISEÑO DE UN SISTEMA HÍBRIDO CON GRUPO ELECTRÓGENO ..... 35**

- 4.1.1. Dimensionamiento de banco de baterías ..... 35
  - 4.1.1.1. Cálculo del consumo total de potencia de la grúa ..... 35
  - 4.1.1.2. Motores eléctricos ..... 35
  - 4.1.1.3. Muestra de consumo de potencia en los motores principales ..... 37
  - 4.1.1.4. Variadores de frecuencia (inverter) ..... 38
  - 4.1.1.5. Sistema de alumbrado ..... 38
  - 4.1.1.6. Sistema de climatización ..... 39
  - 4.1.1.7. Consumo total de potencia de la grúa ..... 40
- 4.1.2. Sistema de almacenamiento de energía ..... 41
  - 4.1.2.1. Características del sistema de baterías Corvus Energy ..... 42
  - 4.1.2.2. Selección de baterías ..... 43
- 4.1.3. Capacidad calculada del banco de baterías del sistema ESS ..... 44
- 4.1.4. Selección de elementos de protección, de rectificación y de inversor ..... 45
  - 4.1.4.1. Unidad AFE ..... 46
  - 4.1.4.2. Fusibles AC / DC ..... 47
  - 4.1.4.3. Circuito de precarga ..... 47
  - 4.1.4.4. Filtro LCL ..... 48
  - 4.1.4.5. Inversor para sistemas auxiliares ..... 49
  - 4.1.4.6. Módulos de diodos ..... 50
- 4.1.5. Cálculo de rendimiento del banco de batería ..... 50

4.1.5.1. Potencia utilizable del banco de baterías .....	50
4.1.5.2. Tiempo de descargar usando a la energía regenerativa de las pruebas realizadas. ....	51
4.1.5.3. Tiempo de carga del banco de baterías.....	51
4.1.6. Reducción de horas trabajadas del motor y consumo de combustible con el sistema híbrido. .....	53
4.1.6.1. Horas trabajadas del motor con el sistema híbrido.....	53
4.1.6.2. Consumo de combustible con el sistema híbrido .....	54
4.1.6.3. Emisión de CO <sub>2</sub> con el sistema híbrido .....	54
4.1.6.4. Comparativa entre el sistema con motor diésel y sistema híbrido .....	55
4.1.7. Mantenimiento motor diésel con la aplicación del sistema Híbrido .....	56
4.1.7.1. Frecuencia de mantenimiento motor diésel con sistema híbrido.....	56
4.1.7.2. Comparativa entre el sistema con motor diésel y sistema híbrido .....	57
4.1.8. Tiempo de recuperación de la inversión (ROI).....	58
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>59</b>
<b>5.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>59</b>
5.1.1. Recopilar información sobre sistemas híbridos en maquinaria y la carga de la grúa para evaluar su rendimiento y fiabilidad.....	59
5.1.2. Calcular la capacidad del banco de baterías y los componentes del circuito para asegurar el funcionamiento adecuado de la grúa.....	59
5.1.3. Elaborar los planos eléctricos en AutoCAD. ....	60
<b>5.2. DESCRIPCIÓN DE LA GRÚA RTG CON SISTEMA HÍBRIDO .....</b>	<b>60</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>64</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>66</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>67</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>70</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1: GRÚA RTG DEL TERMINAL PORTUARIO DE GUAYAQUIL.....</b>	<b>4</b>
<b>FIGURA 2: REPRESENTACIÓN DE MOVIMIENTO HOIST .....</b>	<b>5</b>
<b>FIGURA 3: REPRESENTACIÓN DE MOVIMIENTO TROLLEY .....</b>	<b>6</b>
<b>FIGURA 4: REPRESENTACIÓN DE MOVIMIENTO GANTRY .....</b>	<b>6</b>
<b>FIGURA 5: SPREADER ELÉCTRICO MARCA ZPMC.....</b>	<b>7</b>
<b>FIGURA 6: PARTES DE UN SISTEMA HÍBRIDO .....</b>	<b>8</b>
<b>FIGURA 7: BATERÍA DE IONES DE LITIO NMC / GRAFITO .....</b>	<b>8</b>
<b>FIGURA 8: PREVISIÓN DE DEMANDA DE BATERÍAS DE IONES DE LITIO.....</b>	<b>9</b>
<b>FIGURA 9: MEDICIÓN DE TIEMPO CARGA/DESCARGA Y CORRIENTE EN FUNCIÓN DE VALORES C- RATE .....</b>	<b>11</b>
<b>FIGURA 10: SISTEMA ORCA ESS DE CORVUS ENERGY .....</b>	<b>12</b>
<b>FIGURA 11: GRUPO ELECTRÓGENO CUMMINS.....</b>	<b>13</b>
<b>FIGURA 12: MOTOR DIÉSEL MARCA CUMMINS .....</b>	<b>14</b>
<b>FIGURA 13: PARTES DE UN MOTOR ELÉCTRICO .....</b>	<b>15</b>
<b>FIGURA 14: GENERADOR ELÉCTRICO MARCA STARFROST .....</b>	<b>16</b>
<b>FIGURA 15: CLASIFICACIÓN DE LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO .....</b>	<b>16</b>
<b>FIGURA 16: DERIVADOS DE PETRÓLEO .....</b>	<b>17</b>
<b>FIGURA 17: VARIADOR DE FRECUENCIA SIEMENS .....</b>	<b>18</b>
<b>FIGURA 18: DIAGRAMA DE LA ENTRADA DE UN VARIADOR DE FRECUENCIA .....</b>	<b>19</b>
<b>FIGURA 19: DIAGRAMA DEL BUS DC DE UN VARIADOR DE FRECUENCIA .....</b>	<b>20</b>
<b>FIGURA 20: DIAGRAMA DE LA SALIDA DE UN VARIADOR DE FRECUENCIA .....</b>	<b>21</b>
<b>FIGURA 21: DIAGRAMA DE UN CIRCUITO DE FILTRO LCL VACON.....</b>	<b>22</b>
<b>FIGURA 22: CONFIGURACIÓN TÍPICA DE UNA UNIDAD ACTIVE FRONT END.....</b>	<b>23</b>

<b>FIGURA 23: MÓDULO DE DIODOS SKEE 600F12.....</b>	<b>24</b>
<b>FIGURA 24: DIAGRAMA UNIFILAR DE GRÚA RTG, SALIDA DE VOLTAJE DESDE EL GRUPO ELECTRÓGENO. ....</b>	<b>27</b>
<b>FIGURA 25: DIAGRAMA UNIFILAR DE GRÚA RTG, BUS DC A LOS INVERSORES.....</b>	<b>28</b>
<b>FIGURA 26: COMPARACIÓN DE GASTOS EN COMBUSTIBLE Y MANTENIMIENTO MOTOR DIÉSEL EN CADA RTG.....</b>	<b>34</b>
<b>FIGURA 27: DETALLES DE UNA BATERÍA IONES DE LITIO NMC / GRAFITO .....</b>	<b>44</b>
<b>FIGURA 28: ELEMENTOS QUE COMPONEN EL CIRCUITO DE PRECARGA DE LA UNIDAD AFE. ....</b>	<b>48</b>
<b>FIGURA 29: REPRESENTACIÓN DE UNIDAD AFE CON EL FILTRO LCL Y SU CIRCUITO DE PRECARGA .....</b>	<b>49</b>
<b>FIGURA 30: DIAGRAMA UNIFILAR CON EL NUEVO SISTEMA HÍBRIDO. ....</b>	<b>62</b>
<b>FIGURA 31: DIAGRAMA UNIFILAR, INGRESO DEL BUS DC A LOS INVERTER.....</b>	<b>63</b>

## ÍNDICE DE TABLA

<b>TABLA 1: VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS BATERÍAS DE IONES DE LITIO NMC.....</b>	<b>10</b>
<b>TABLA 2: CONSUMO DE COMBUSTIBLE DE GRÚAS RTG DE DICIEMBRE 2024 .....</b>	<b>29</b>
<b>TABLA 3: GASTO Y CONSUMO DE COMBUSTIBLE DE GRÚAS RTG DE DICIEMBRE 2024 .....</b>	<b>30</b>
<b>TABLA 4: LISTADO DE INSUMOS Y RECURSOS UTILIZADOS EN MANTENIMIENTO MOTOR DIÉSEL .....</b>	<b>32</b>
<b>TABLA 5: COSTOS TOTALES DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y MANTENIMIENTO MOTOR DIÉSEL. ...</b>	<b>33</b>
<b>TABLA 6: MOTORES ELÉCTRICOS DISPONIBLES EN LA GRÚA .....</b>	<b>36</b>
<b>TABLA 7: RESUMEN DE PRUEBAS REALIZADAS EN MOTORES PRINCIPALES .....</b>	<b>37</b>
<b>TABLA 8: DESCRIPCIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE INVERTER UTILIZADOS EN LA GRÚA .....</b>	<b>38</b>
<b>TABLA 9: NÚMERO DE LÁMPARAS INSTALADAS EN LA GRÚA .....</b>	<b>39</b>
<b>TABLA 10: CONSUMO EN KWH DE LA GRÚA.....</b>	<b>40</b>
<b>TABLA 11: ESPECIFICACIONES DE RENDIMIENTO Y DEL SISTEMA DE BATERÍAS .....</b>	<b>42</b>
<b>TABLA 12: ESPECIFICACIONES DE SEGURIDAD Y GENERALES DE LAS BATERÍAS.....</b>	<b>42</b>
<b>TABLA 13: DETALLES DE UNA BATERÍA IONES DE LITIO NMC / GRAFITO.....</b>	<b>43</b>
<b>TABLA 14: TABLA DE FUSIBLES DE PROTECCIÓN EN VOLTAJE AC Y DC.....</b>	<b>47</b>
<b>TABLA 15: COMPONENTES DEL CIRCUITO DE PRECARGA DE LA UNIDAD AFE.....</b>	<b>47</b>
<b>TABLA 16: COMPARATIVA DE LOS SISTEMAS CON MOTOR DIÉSEL Y SISTEMA HÍBRIDO.....</b>	<b>55</b>
<b>TABLA 17: COMPARATIVA DE FRECUENCIA DE MANTENIMIENTO MOTOR ENTRE SISTEMA ACTUAL Y SISTEMA HÍBRIDO.....</b>	<b>57</b>
<b>TABLA 18: LISTA DE PRECIOS DE LOS COMPONENTES ELECTRÓNICOS A USAR EN EL SISTEMA HÍBRIDO .....</b>	<b>70</b>

## GLOSARIO

**Litiación:** Este término hace referencia al proceso donde los iones de litio (Li) se insertan en el material de un electrodo, comúnmente en el ánodo (grafito) durante la carga de la batería [2].

**Des-litiación:** Este término hace referencia al proceso contrario de litiación donde los iones de litio (Li) se extraen del material de un electrodo, durante la carga de la batería [2].

**BMS:** Battery Management System, es un sistema de gestión de baterías.

**ESS:** Energy Storage System, es un sistema de almacenamiento de energía.

**PMS:** Power Management System, es un sistema de gestión de energía.

**SoC:** State of Charge por sus siglas en inglés, indica el estado de carga presente de la batería en relación con su capacidad total. Se expresa en porcentaje (%) [3].

**SoH:** State of Health por sus siglas en inglés, es el estado de salud de la batería, mide la degradación de la batería con el tiempo y compara su capacidad actual con su capacidad original cuando era nueva. También se expresa en porcentaje (%) [3].

**RTG:** Rubber Tyred Gantry crane por sus siglas en inglés, grúa pórtico sobre neumáticos de caucho.

**Bus DC:** Bus de Corriente Continua.

**SCES:** Supercapacitor Energy Storage por sus siglas en inglés, almacenamiento de energía mediante supercapacitores.

**AFE:** Active Front End por sus siglas en inglés, es una unidad de Front End Activo.

**AVR:** Automatic Voltage Regulator, es un Regulador Automático de Voltaje.

## CAPÍTULO I

### 1. INTRODUCCIÓN

#### 1.1. PROBLEMA

Las primeras grúas en terminales portuarios aparecieron gracias a los avances en el perfeccionamiento de las máquinas de elevación y la ampliación de sus aplicaciones. En 1860, se diseñó la primera grúa accionada por una máquina de vapor, y solo veinte años después comenzaron a comercializarse las primeras grúas eléctricas, que utilizaban fuentes de energía de media y alta tensión y motores de combustión interna. Gran parte del crédito por estos desarrollos se les otorga a los mecánicos rusos, quienes fueron pioneros en este campo [4], [5].

El Terminal Portuario de Guayaquil utiliza diferentes tipos de grúas como las STS (Ship to Shore), RTG (Rubber Tyred Gantry) y RS (Reach Stacker), estas dos últimas utilizan como fuente de energía principal motores diésel lo cual implica el uso de combustibles derivados de petróleo como es el diésel, al poner en funcionamiento el motor de combustión interna (MCI) utiliza gran cantidad de diésel, aceites lubricantes y elementos adicionales. Las grúas móviles RTG poseen un tanque de almacenamiento de diésel con una capacidad de 560 galones, consumiendo aproximadamente 2950 galones mensuales equivalente a un gasto de \$8500, adicional al cambio de aceite y demás elementos por el mantenimiento del MCI asciende los \$1000 siendo estos valores multiplicado por 7 grúas de este tipo que posee el terminal. Sin mencionar la emisión de gases de efecto invernadero.

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad como a lo largo de la historia se ha ido adoptando la implementación de nuevas tecnologías en los terminales portuarios, para disminuir las emisiones y mitigar los efectos negativos de las operaciones portuarias sobre la calidad del aire. Paralelamente, los propietarios y operadores de buques están aumentando la cantidad de embarcaciones eléctricas e híbridas en sus flotas. La razón principal para implementar un sistema híbrido que combine un grupo electrógeno y un banco de baterías radica en diversos factores que mejoran la eficiencia, la fiabilidad y la sostenibilidad energética [6], [7].

Este sistema reduciría los costos operativos al disminuir el consumo de combustible, ya que las baterías podrían suplir la demanda de energía que cubre actualmente el grupo electrógeno. Este enfoque reduciría también las emisiones, la huella de carbono y el ruido al minimizar el tiempo de operación del generador y optimizar su uso, contribuyendo a un ambiente más limpio. La flexibilidad y escalabilidad del sistema permite ajustarlo según las necesidades energéticas, y por último reduciría los costos y frecuencia de mantenimiento al disminuir el desgaste del motor diésel [7].

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. Objetivo General:**

Diseñar un sistema híbrido que combine un grupo electrógeno y un banco de baterías para suministrar energía a una grúa RTG, optimizando el consumo de combustible.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos:**

- Recopilar información sobre sistemas híbridos aplicados en diferentes equipos/maquinarias e información de la carga que tiene la grúa para evaluar el rendimiento y fiabilidad del sistema.
- Realizar el cálculo para dimensionar la capacidad del banco de baterías y de elementos a usarse en el circuito para cubrir la demanda de la grúa y su correcto funcionamiento.
- Realizar el diseño de planos eléctricos en AutoCAD.

## CAPÍTULO II

### 2.1. MARCO TEÓRICO

#### 2.1.1. Grúa RTG

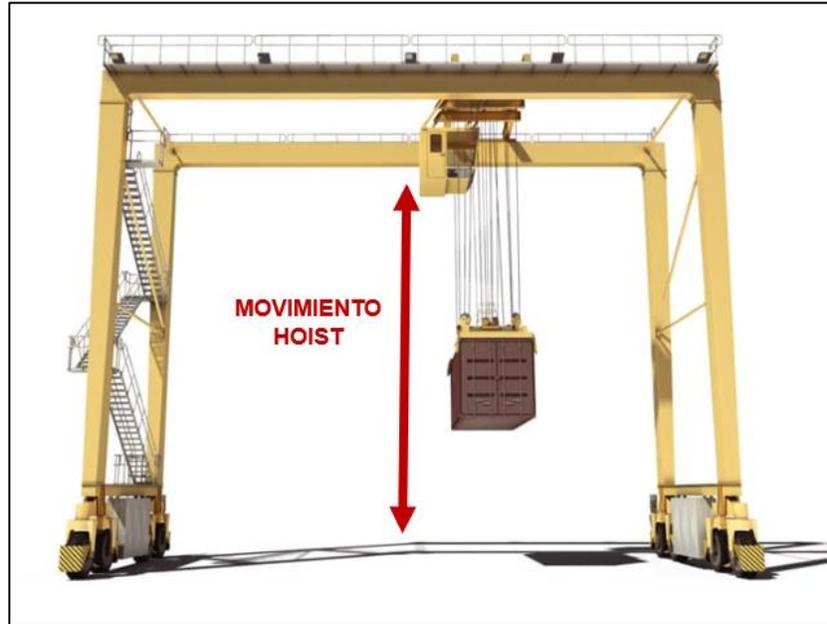
Una grúa RTG, conocida por sus siglas en inglés como “Rubber Tyred Gantry crane”, es un tipo de maquinaria móvil ampliamente utilizada en puertos y terminales de contenedores para llevar a cabo tareas de manejo y apilamiento de contenedores de carga. A diferencia de las grúas que operan sobre rieles, este modelo se distingue por estar equipado con neumáticos de caucho, lo que le confiere una gran versatilidad y libertad de movimiento dentro del área de trabajo. Gracias a esta característica, las grúas RTG pueden desplazarse con facilidad por diferentes secciones del terminal, adaptándose de manera eficiente a las necesidades de operación y permitiendo una mayor optimización en la logística de los contenedores [8].



*Figura 1: Grúa RTG del Terminal Portuario de Guayaquil.*

### 2.1.2. Movimiento hoist (elevación)

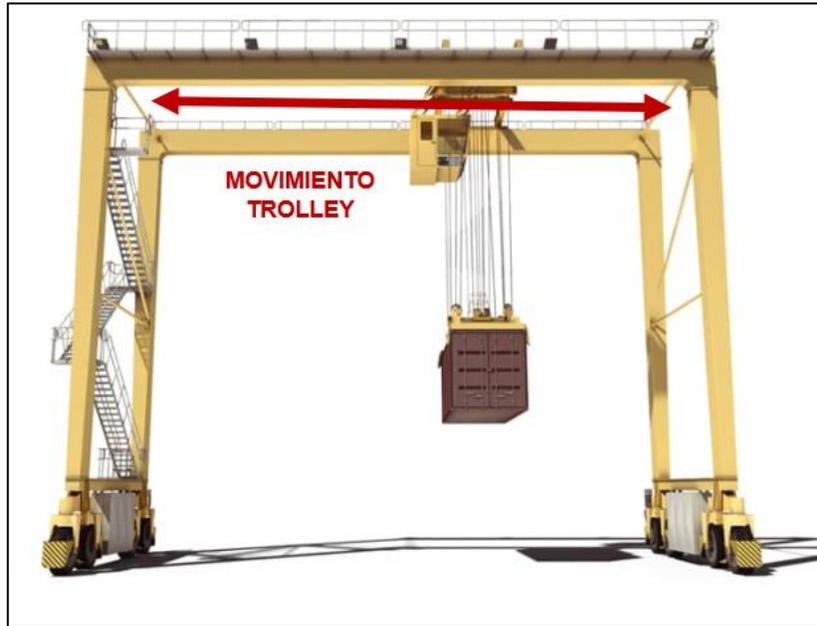
El hoist realiza el movimiento en forma vertical de izaje de la carga, se realiza con un motor de elevación que acciona un tambor o polipasto y permite subir o bajar la carga de manera precisa y segura [9].



*Figura 2: Representación de movimiento hoist [10].*

### 2.1.3. Movimiento trolley (Traslación del carro)

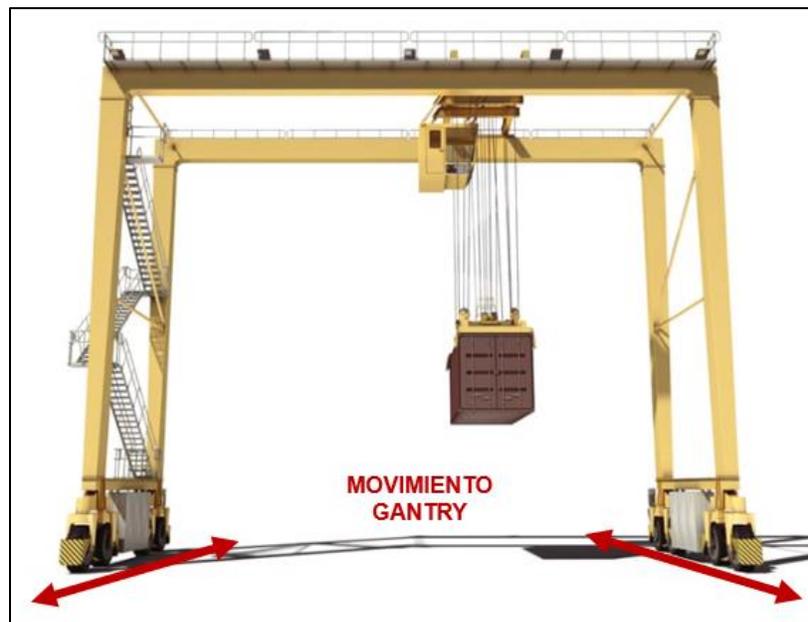
El trolley realiza el movimiento horizontal de la cabina o carro a lo largo del puente de la grúa, se usa para posicionar la carga dentro del rango de trabajo de la grúa, funciona con 4 motores eléctricos en cada esquina y ruedas que se desplazan sobre rieles [9].



*Figura 3: Representación de movimiento trolley [10].*

#### 2.1.4. Movimiento gantry (traslación del pórtico o grúa)

El gantry realiza el movimiento horizontal de la estructura de la grúa sobre rieles o neumáticos, este desplazamiento permite cubrir un área amplia de trabajo y se acciona con 4 motores eléctricos en cada esquina de la grúa [9].



*Figura 4: Representación de movimiento gantry [10].*

### 2.1.5. Spreader

Es un equipo utilizado para elevar y manejar contenedores de envío. Generalmente, se acopla a una grúa y está diseñado para fijarse de manera segura en las esquinas del contenedor, facilitando su levantamiento y traslado. Existen distintos modelos de spreaders para contenedores, con diversas configuraciones, como versiones semiautomáticas y electrohidráulicas, que permiten adaptarse a diferentes tamaños y tipos de contenedores [11].



*Figura 5: Spreader eléctrico marca ZPMC [12].*

### 2.1.6. Sistema híbrido

Se trata de la integración de dos o más tecnologías destinadas a la generación de energía, las cuales funcionan de manera conjunta para ofrecer una solución energética que se caracteriza por ser más eficiente, confiable y sostenible. Esta combinación permite aprovechar las fortalezas de cada tecnología involucrada, optimizando el rendimiento del sistema global y reduciendo tanto los costos operativos como el impacto ambiental. Además, al complementarse entre sí, estas tecnologías mejoran la estabilidad y continuidad del suministro energético, lo que las hace una alternativa perfecta para satisfacer diversas necesidades de consumo con mayor responsabilidad y eficacia [13].



*Figura 6: Partes de un sistema Híbrido [14].*

### 2.1.7. Batería

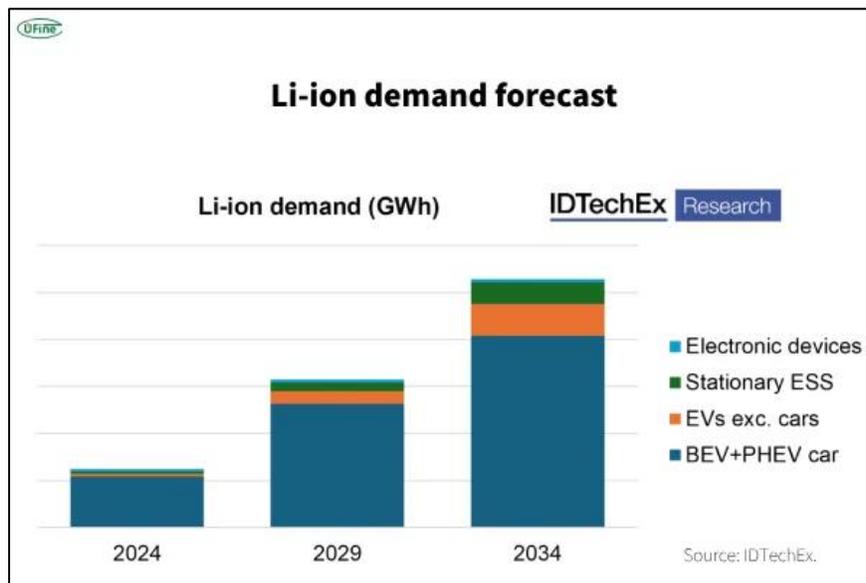
Una batería es un dispositivo diseñado para almacenar energía en forma química y transformarla en energía eléctrica, lo que la convierte en una fuente portátil y reutilizable de electricidad. Su capacidad para brindar energía de manera eficiente y versátil la hace indispensable en una extensa gama de aplicaciones, que van desde su uso cotidiano en dispositivos electrónicos como teléfonos móviles y relojes, hasta su implementación en entornos industriales, donde alimenta maquinaria y sistemas más complejos. Este papel esencial en diversas áreas subraya la importancia de las baterías como una solución práctica y adaptable a las demandas energéticas actuales [15].



*Figura 7: Batería de Iones de litio NMC / grafito [16].*

### 2.1.7.1. Baterías de iones de litio NMC.

Las baterías de iones de litio NMC, compuesta de níquel, manganeso y cobalto, es una fuente de energía duradera y confiable con alta densidad energética. Su uso es común en vehículos eléctricos y dispositivos electrónicos debido a su eficiencia y rendimiento. Este tipo de baterías son generalmente usadas para sistemas de almacenamiento de energía y dispositivos móviles [17].



**Figura 8: Previsión de demanda de baterías de Iones de Litio [17].**

La alta capacidad de almacenamiento de energía en las baterías de litio NMC se debe a la combinación de níquel, cobalto y manganeso. El níquel aporta una mayor energía específica, aunque con menor estabilidad. El manganeso mejora la estabilidad térmica, reduciendo el riesgo de sobrecalentamiento. Por su parte, el cobalto ayuda a prevenir la corrosión del cátodo, pero su alto costo e impacto ambiental han llevado a los fabricantes a buscar formas de reducir su uso en estas baterías [17].

La vida útil de estas baterías oscila entre los 2000 y 2500 ciclos. Si se toman consideraciones como el sistema de gestión y operación, el rango de carga/descarga y máximo/mínimo, su vida útil puede prolongarse hasta los 3000-3500 ciclos. Luego de esto la batería comienza a degradarse.

### 2.1.7.2. Partes que componen la batería NMC/grafito

Las baterías de están conformadas en 3 partes importantes tales como el ánodo, el cátodo y el electrolito [17].

- **El cátodo** está compuesto de níquel, manganeso y cobalto, estos 3 elementos químicos se usan en distintas concentraciones.
- **El ánodo** al igual que todas las baterías de litio está fabricado de grafito, la cual permite almacenar y liberar iones de litio mientras la batería está siendo utilizada.
- **El electrolito** de las baterías está compuesto por iones de litio disueltos en un líquido, cuya composición varía según el tipo de batería. Las sales de litio más utilizadas en los electrolitos incluyen el hexafluorofosfato de litio (LiPF<sub>6</sub>) y el LiTFSI, los cuales se disuelven en solventes orgánicos como el carbonato de etileno (EC), el carbonato de dimetilo (DMC) y el carbonato de dietilo (DEC).

### 2.1.7.3. Ventajas y desventajas de la batería NMC

Al igual que otros tipos de baterías, estas también cuenta con sus pros y contras, en la *Tabla 1* se detallan:

**Tabla 1: Ventajas y desventajas de las baterías de Iones de Litio NMC [17].**

Ventajas	Desventajas
Fuente de energía confiable	Costoso en comparación con otras baterías de litio
Alta energía específica	Cuestiones éticas relacionadas con la minería de cobalto
Se recarga rápidamente	Exposición continua a altas temperaturas podría causar daños
Ciclos largos de carga y descarga	La creciente demanda de baterías de litio NMC es difícil de

	cubrir
Alta eficiencia energética	Preocupaciones ambientales por el uso de materias primas insostenibles

---

### 2.1.8. C-rate

La tasa C es un parámetro muy importante en las baterías de Litio, ya que esta unidad nos permite medir la velocidad de descarga y carga de una batería, está relacionada con la velocidad de litación o des-litación del material del electrodo, donde C simboliza la capacidad de una batería, usualmente expresada en amperios hora (Ah), lo que refleja la cantidad de material activo disponible en la batería para la descarga.

Se la puede encontrar con otro termino que es multiplicador de descarga o carga. Para ser más específico este parámetro nos muestra la relación entre la velocidad de descarga y carga de una batería de Litio y la capacidad de esta [18], [19].

La fórmula de la relación es:

$$C = \frac{\text{Corriente de } \frac{\text{descarga}}{\text{carga}}}{\text{Capacidad nominal}}$$

Nota: Fórmula para obtener la capacidad de la batería con el parámetro C-rate.

Measurement of charge/discharge time and available current based on C rate values						
0.1C	0.2C	0.5C	1C	2C	5C	10C
10h	5h	2h	1h	30min	12min	6min
0.1x	0.2x	0.5x	Standard	2x	5x	10x

Calculations made to aid in the example,  
C-rate may vary depending on actual conditions of use and SoH.

**Figura 9: Medición de tiempo carga/descarga y corriente en función de valores C-rate [18].**

### 2.1.9. Sistema de almacenamiento de energía con baterías ESS

Un sistema de almacenamiento de energía con baterías, conocido como ESS, es una tecnología que permite almacenar energía en baterías para usarla posteriormente según las necesidades.

Este tipo de sistema es fundamental en aplicaciones donde se requiere gestionar la energía de manera eficiente, especialmente en redes eléctricas, energías renovables, e incluso en sistemas híbridos como los aplicados en maquinarias o grúas [20].

#### 2.1.9.1. Componentes principales:

- **Baterías:** Generalmente de litio-ion, aunque también pueden ser de otros tipos, como plomo-ácido o baterías de flujo.
- **Inversores:** Convierte la energía almacenada en corriente continua (DC) a corriente alterna (AC) para su uso.
- **Sistema de gestión de baterías (BMS):** Es un sistema de gestión y protección que alarga la vida útil de las baterías de litio, este sistema inteligente es el encargado de la gestión y control avanzado del sistema de almacenamiento de las baterías. Este es considerado el cerebro de módulo de las baterías ya que desempeña un papel fundamental en aspecto como la seguridad, el rendimiento, la eficiencia de la carga y la durabilidad de este [21].
- **Sistema de control y comunicación:** Permite la integración del ESS con otros sistemas eléctricos o de monitoreo remoto.



*Figura 10: Sistema Orca ESS de Corvus Energy [22].*

### 2.1.10. Grupo electrógeno

Es un dispositivo diseñado para transformar energía mecánica en energía eléctrica, utilizando la combinación de un motor diésel y un generador eléctrico. Este sistema resulta indispensable en situaciones donde no se dispone de acceso a una red eléctrica convencional, proporcionando una fuente autónoma de electricidad. Además, es ampliamente empleado como respaldo en casos de interrupciones del suministro eléctrico, asegurando la continuidad de operaciones críticas. Su versatilidad y confiabilidad lo convierten en una solución efectiva tanto para entornos domésticos como industriales, así como para lugares remotos o emergencias donde la disponibilidad de energía es fundamental [23].



*Figura 11: Grupo electrógeno Cummins [24].*

### 2.1.11. Motor diésel

Un motor diésel es una clase de motor de combustión interna que funciona bajo el principio de encendido por compresión, permitiéndole convertir la energía química del combustible en energía mecánica aprovechable. Este tipo de motor destaca por su alta eficiencia y durabilidad, características que lo han convertido en una opción fundamental en una variedad de aplicaciones, especialmente en el sector del transporte y en el uso de maquinaria pesada. Sin embargo, a pesar de sus ventajas, los

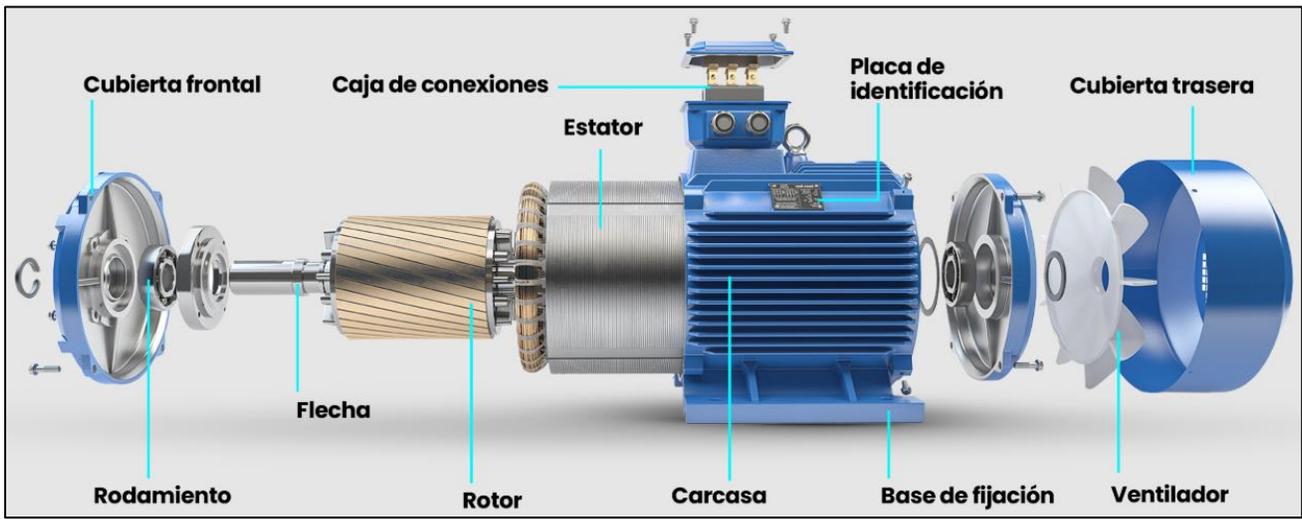
motores diésel enfrentan ciertos desafíos, como las emisiones contaminantes asociadas a su funcionamiento y los costos iniciales relativamente elevados. Aun así, su capacidad para manejar cargas significativas y ofrecer un rendimiento confiable a largo plazo sigue siendo crucial en muchas industrias [25].



*Figura 12: Motor Diésel marca Cummins [26].*

### **2.1.12. Motor eléctrico**

Un motor eléctrico es un dispositivo cuya función principal es transformar la energía eléctrica en energía mecánica mediante un proceso basado en los principios del electromagnetismo. Su diseño aprovecha la interacción entre campos magnéticos para generar movimiento, que puede ser rotacional o lineal, dependiendo de la aplicación. Este mecanismo se fundamenta en las leyes del electromagnetismo, las cuales permiten convertir la energía eléctrica entrante en fuerza mecánica de manera eficiente. Los motores eléctricos son esenciales en una amplia variedad de aplicaciones, ya que proporcionan un movimiento preciso y confiable en sistemas industriales, equipos domésticos y vehículos eléctricos, entre otros [27].



*Figura 13: Partes de un motor eléctrico [28].*

### 2.1.13. Generador Eléctrico

Un generador eléctrico es un equipo diseñado para transformar la energía mecánica en energía eléctrica, basándose en el principio fundamental de la inducción electromagnética. Este proceso permite que el movimiento mecánico, proveniente de fuentes como motores, turbinas o incluso manivelas, se convierta en electricidad utilizable. Gracias a su versatilidad, los generadores tienen un extenso abanico de usos que abarcan desde la generación de electricidad a gran escala en plantas eléctricas hasta el suministro de electricidad en equipos portátiles, ideales para situaciones de emergencia o entornos donde el acceso a la red eléctrica es limitado o inexistente [29].



*Figura 14: Generador eléctrico marca Starfrost [30].*

#### 2.1.14. Gases de efecto invernadero

Son sustancias en estado gaseoso que tienen la capacidad de captar y retener una porción de la radiación infrarroja emitida por el planeta tras recibir y almacenar la energía de la radiación solar. En términos simples, estos gases desempeñan un papel similar al de una capa envolvente en la atmósfera, atrapando el calor y evitando que se disperse por completo hacia el espacio exterior. Este proceso, aunque natural, se intensifica debido a la acumulación de estos gases, lo que provoca un aumento de la temperatura global al mantener una mayor cantidad de calor en el interior de la atmósfera terrestre, contribuyendo así al fenómeno del calentamiento global [31].



*Figura 15: Clasificación de los gases de efecto invernadero [32].*

### 2.1.15. Combustible

Los derivados del petróleo son productos obtenidos a partir de la refinación de este recurso natural, y generalmente se clasifican como combustibles fósiles debido a su origen geológico y composición. Entre los más comunes se encuentran la gasolina, el diésel, el combustible para aviones (conocido como jet fuel), el combustible búnker utilizado en grandes embarcaciones y el gasóleo empleado para sistemas de calefacción. Además de los combustibles, el petróleo también es la base para la producción de diversos tipos de lubricantes esenciales para el funcionamiento de maquinarias y vehículos. Desde el inicio de la era de la industrialización, estos productos han sido fundamentales para el desarrollo económico y tecnológico. Por otra parte, los aceites minerales, como los aceites blancos medicinales, destacan por su alto nivel de refinamiento, que elimina impurezas hasta obtener compuestos casi exclusivamente por hidrocarburos saturados, principalmente alquenos y ciclo alcanos, lo que los hace ideales para aplicaciones específicas en las que se requiere una pureza elevada [33].



*Figura 16: Derivados de petróleo [34].*

### 2.1.16. Variador de frecuencia

Es un dispositivo industrial diseñado para controlar la velocidad de los motores eléctricos ajustando la energía que estos reciben, de tal forma que se ajuste a los requerimientos específicos de la aplicación. Su principal función es optimizar el consumo de electricidad al regular tanto la frecuencia como la tensión que llega al motor, permitiendo así un funcionamiento más eficiente. Este ajuste dinámico puede reducir significativamente el consumo energético del motor, con ahorros que oscilan entre un 20 % y un 70 %, dependiendo de las condiciones de operación. Instalado entre la fuente de alimentación y el motor, el variador actúa como un intermediario que modifica la energía procedente de la red eléctrica antes de enviarla al motor. De este modo, garantiza que el motor opere de forma precisa y eficiente, adaptándose a los requerimientos específicos del proceso al que esté vinculado [35].

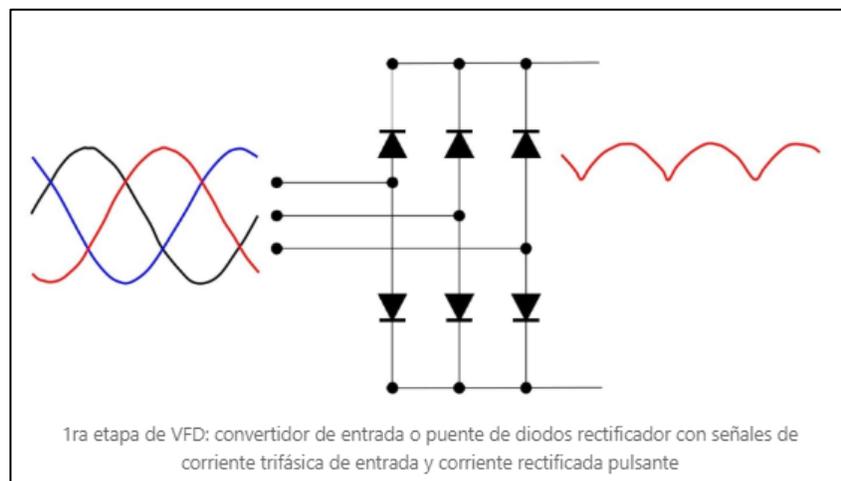


*Figura 17: Variador de frecuencia Siemens [36].*

### 2.1.17. Convertidor de entrada

El convertidor de entrada es la primera etapa del circuito electrónico en un variador de frecuencia, cuya función principal es recibir la energía eléctrica proveniente de una fuente de alimentación en

corriente alterna (CA o AC) trifásica. Este componente está compuesto por diodos de alta potencia conectados en paralelo, los cuales permiten el flujo de corriente en una sola dirección, actuando como rectificadores. A través de este proceso, el convertidor transforma la señal de corriente AC en una señal de corriente DC, que se convierte en la entrada para las siguientes etapas del variador de frecuencia. Como resultado de esta conversión, la salida del convertidor presenta un voltaje pulsante de corriente continua, que posteriormente será estabilizado y procesado para cumplir con los requerimientos del sistema [35].

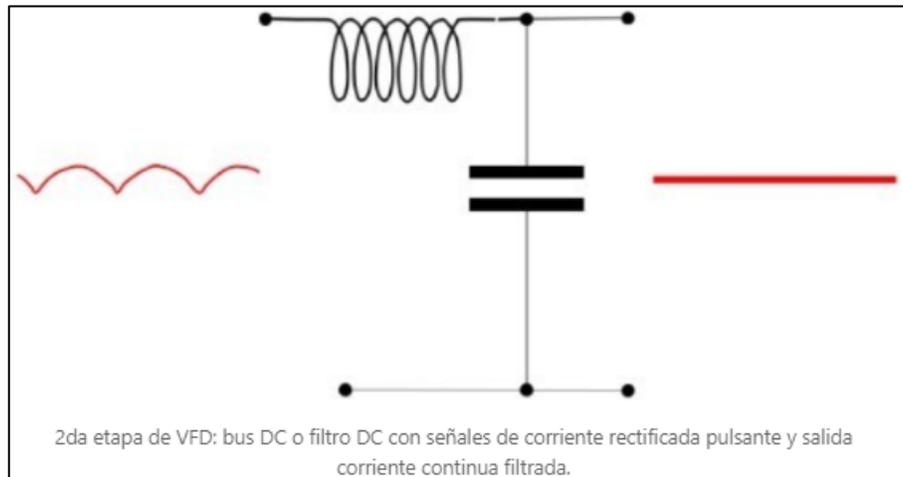


**Figura 18: Diagrama de la entrada de un variador de frecuencia [35].**

### 2.1.18. Bus DC

El bus de corriente continua es un sistema compuesto por dispositivos electrónicos, conocido como filtro CC, que incluye una combinación de condensadores y/o inductores. Su función principal es suavizar o filtrar las fluctuaciones en la corriente proveniente del convertidor de entrada, logrando mantener un voltaje constante y una corriente continua estable y limpia, adecuada para alimentar el inversor en la etapa de salida. Este sistema se divide en dos componentes clave: los condensadores y los inductores. Los condensadores son responsables de estabilizar el voltaje pulsante que se genera a la salida del rectificador de diodos, asegurando que este se mantenga

uniforme. Por otro lado, el inductor tiene la tarea de prevenir picos de corriente, especialmente cuando el condensador se encuentra descargado, manteniendo así un flujo de corriente constante y nivelado en todo momento. Este proceso es esencial para garantizar que la corriente procesada en el bus pueda ser utilizada en la siguiente etapa del sistema, donde se generará una señal eléctrica de frecuencia variable, adecuada para las necesidades específicas de la aplicación [35].

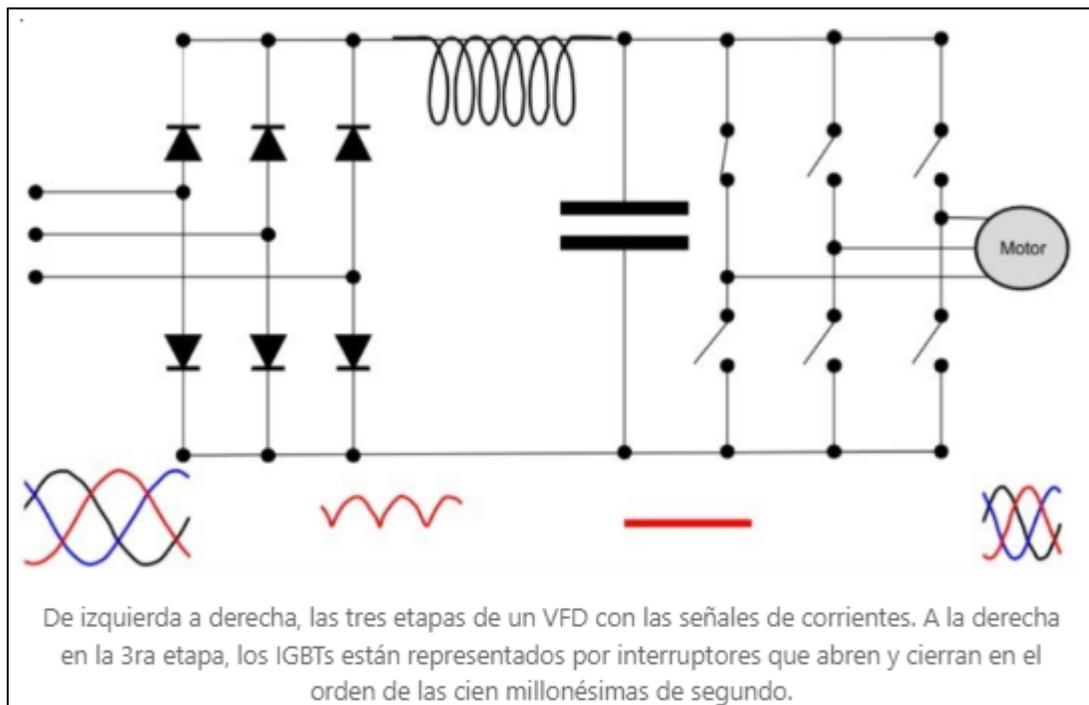


**Figura 19: Diagrama del bus DC de un variador de frecuencia [35].**

### 2.1.19. Inversor de salida

El inversor de salida representa la etapa final en el circuito electrónico de un variador de frecuencia y tiene como función transformar la corriente continua estabilizada y filtrada de la etapa previa en corriente alterna con frecuencia y voltaje variables en la salida. Este procedimiento se realiza a través de un conjunto de dispositivos de conmutación rápida de estado sólido denominados transistores bipolares de puerta aislada (IGBT, por su acrónimo en inglés). Los IGBT trabajan en pares, abriéndose y cerrándose de manera controlada para dirigir la corriente a través de diferentes rutas, generando así una señal de corriente alterna compuesta por trenes de pulsos. A diferencia de la corriente alterna estándar, esta señal tiene una frecuencia ajustable, determinada por la velocidad de conmutación de los IGBT [35].

Además de variar la frecuencia, el inversor de salida permite regular la tensión mediante la modulación del ancho de los pulsos (PWM, por sus siglas en inglés), una técnica que ajusta tanto la amplitud como la duración de los pulsos de corriente. Esto no solo posibilita el control de la velocidad del motor, sino también del torque mecánico en su eje. En aplicaciones específicas, el PWM permite variar el torque de manera proporcional a la velocidad, como en cargas de torque variable, o mantener el torque constante independientemente de la velocidad, ideal para cargas que requieren fuerza uniforme. Gracias a esta capacidad de ajuste preciso en frecuencia y tensión, el inversor de salida asegura que la máquina o carga mecánica opere a una velocidad óptima, logrando altos niveles de eficiencia y precisión [35].

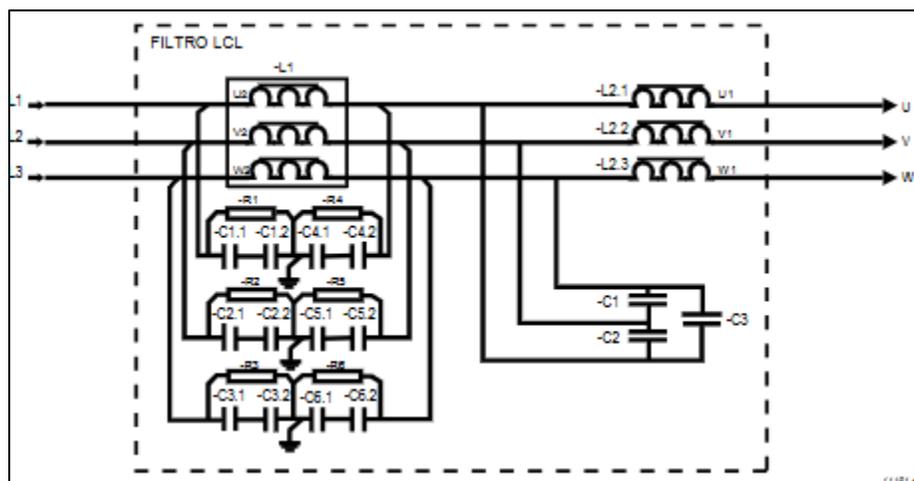


**Figura 20: Diagrama de la salida de un variador de frecuencia [35].**

### 2.1.20. Filtro LCL

Es un dispositivo eléctrico diseñado para reducir las armónicas de alta frecuencia generadas por los inversores de potencia al convertir corriente continua (DC) en corriente alterna (AC). Este tipo

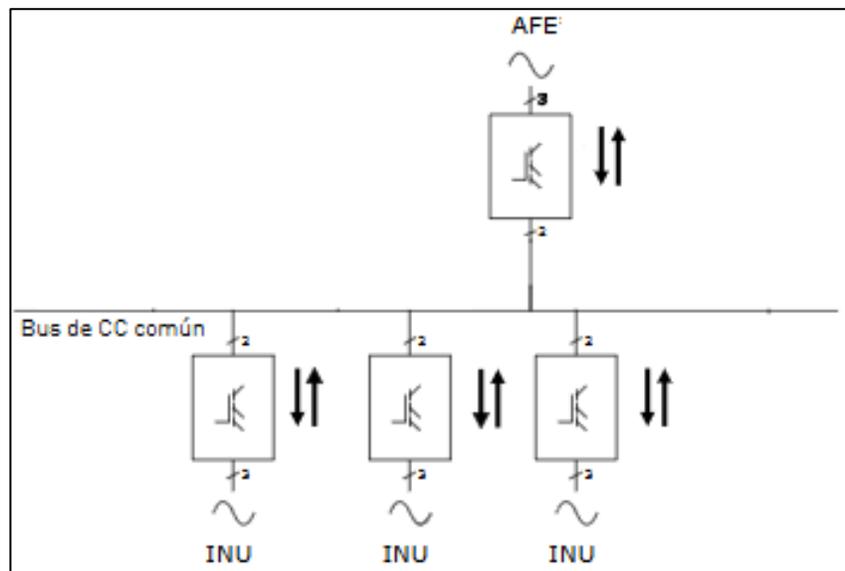
de filtro es ampliamente utilizado en sistemas de conversión de energía, como inversores conectados a la red, sistemas híbridos con almacenamiento de energía y aplicaciones industriales donde se requiere minimizar las distorsiones armónicas para mejorar la calidad de la energía. Su estructura se compone de tres inductancias (L1 y L2 por fase) separadas por un condensador (C), formando un circuito resonante que atenúa eficazmente las frecuencias no deseadas antes de que la corriente sea entregada a la carga o a la red eléctrica. En sistemas donde la fuente de energía proviene de un generador diésel, como en el caso de grúas RTG híbridas, el filtro LCL es fundamental para evitar que los armónicos generados por el inversor afecten el rendimiento del generador y otros equipos eléctricos conectados, lo que podría provocar sobrecalentamiento, pérdidas energéticas e interferencias electromagnéticas. Su uso garantiza una mayor eficiencia en la conversión de energía, protege los componentes eléctricos y cumple con las normativas de calidad de energía, como el estándar IEEE 519, que regula los límites de distorsión armónica en sistemas eléctricos. El diseño de un filtro LCL debe considerar varios factores, como la frecuencia de conmutación del inversor, la impedancia de la red y la capacidad del generador diésel, para evitar problemas de resonancia y garantizar una operación estable y segura del sistema [37].



*Figura 21: Diagrama de un circuito de filtro LCL Vacon [38].*

### 2.1.21. Unidad de Front End Activo (AFE)

Active Front End por sus siglas en inglés se emplea para gestionar la transferencia de energía entre la fuente de CA y el circuito intermedio de CC. La unidad Active Front End posee una funcionalidad bidireccional, lo que implica que, al transferir energía desde la entrada de CA al circuito intermedio de CC, rectifica tanto la corriente alterna como la tensión. Por otro lado, cuando la energía fluye desde el circuito intermedio de CC hacia la entrada de CA, la unidad Active Front End convierte la corriente continua y la tensión en alterna [38].



*Figura 22: Configuración típica de una unidad Active Front End [38].*

### 2.1.22. Módulo diodos

Los módulos de diodos destacan por su capacidad para soportar ciclos eléctricos y térmicos exigentes, lo que les otorga una alta confiabilidad y una prolongada vida útil en condiciones de operación intensivas. Estos módulos están diseñados en un formato estándar de la industria, lo que facilita su integración en equipos ya existentes. En particular, los módulos de diodos SKKE600F12 se emplean en una amplia variedad de aplicaciones de potencia, incluyendo unidades de control y potencia, reguladores de energía,

sistemas de control de motores de corriente continua, arrancadores suaves para motores de corriente alterna, convertidores, controladores de procesos industriales como altos hornos y procesos químicos, así como en equipos de soldadura y rectificadores para convertidores de corriente alterna [39].



*Figura 23: Módulo de diodos SKEE 600F12 [40].*

## CAPÍTULO III

### 3.1. DESCRIPCIÓN Y CONDICIÓN ACTUAL DE OPERACIÓN DE LA GRÚA RTG CON MOTOR DIESEL

En las grúas RTG, la fuente de energía es proporcionada por un grupo electrógeno compuesto por un motor diésel de 447 kW y un generador de 445 kVA/356kW, el cual produce un voltaje de 440 VAC. El generador posee una tarjeta AVR que es la responsable de estabilizar el voltaje de salida, ya que la carga en la grúa RTG varía constantemente dependiendo de los movimientos como el hoist, trolley o gantry, los cuales pueden aumentar o disminuir la demanda de energía.

La salida del voltaje es dirigida hacia un reactor de línea trifásico con una capacidad de 340 kW y un rango de operación de 380-480V  $\pm 10\%$ . Este componente cumple una función clave en el sistema eléctrico, ya que permite reducir los armónicos generados por las cargas no lineales, limitar los picos de corriente que pueden dañar los equipos y mejorar la calidad de la energía, lo que contribuye a un desempeño más eficiente y estable de la grúa [41].

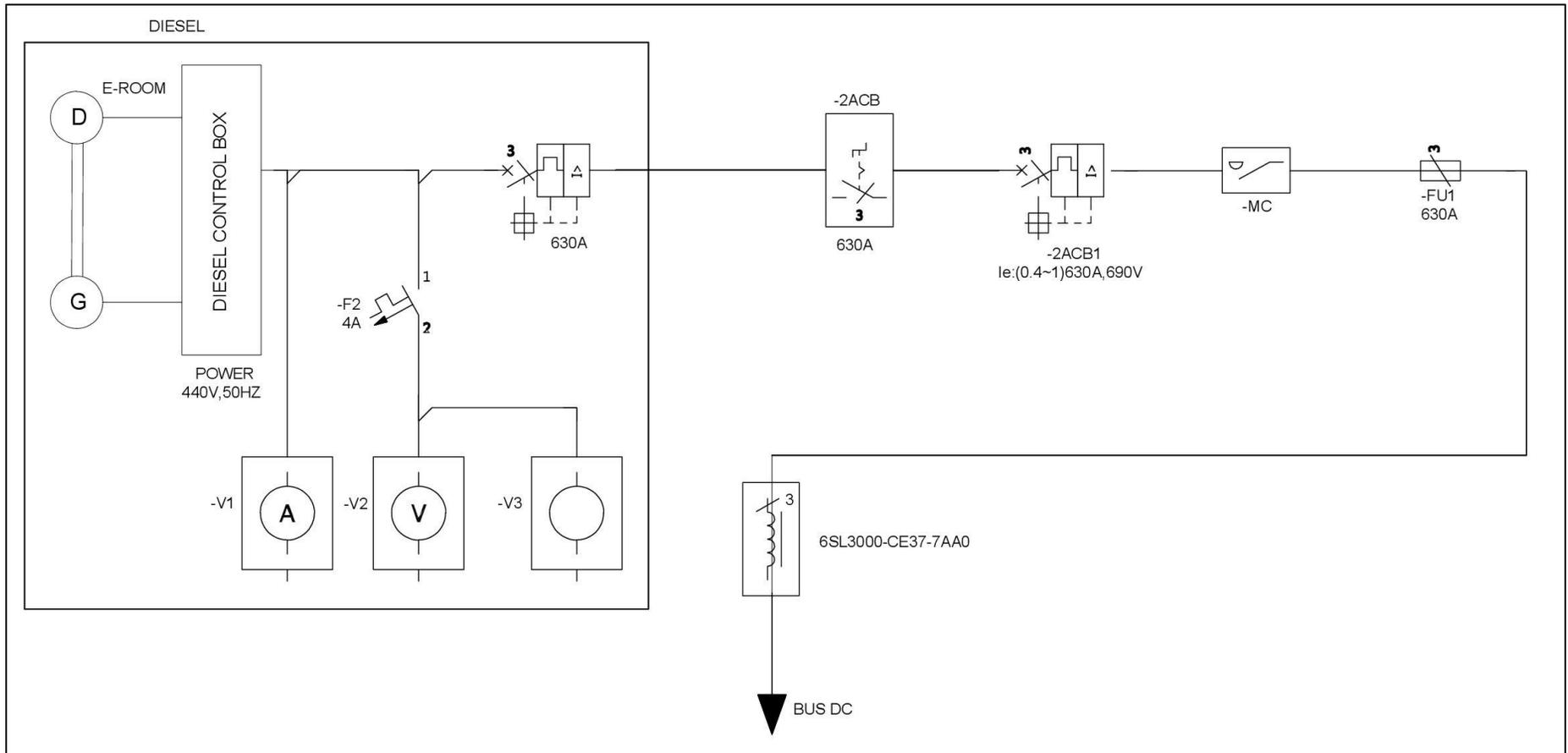
Después de esta etapa, el voltaje AC de 440V es dirigido a un Basic Line Module (BLM), un dispositivo cuya función principal consiste en transformar de corriente alterna (AC) a corriente continua (DC). Gracias a esta conversión, se genera un bus DC (corriente continua) común, con un voltaje aproximado de 620 VDC, que sirve como fuente principal de energía para el sistema de accionamiento de los movimientos principales de la grúa. El uso del bus de CC contribuye a la optimización del espacio y reducción de costos, ya que permite una mejor gestión energética dentro del sistema.

El bus de 620 VDC alimenta directamente a seis inversores encargados de suministrar energía a los motores principales de la grúa. Estos inversores se distribuyen de la siguiente manera: uno para el sistema de hoist (que se encarga del levantamiento de la carga), uno para el trolley (que controla el movimiento horizontal de la cabina sobre la estructura de la grúa) y cuatro para el gantry

(responsables del desplazamiento de la grúa sobre sus neumáticos a lo largo del bloque). Gracias a esta configuración, se logra una operación coordinada y eficiente de todos los sistemas de movimiento de la grúa.

Además, en paralelo al bus de CC, se encuentran conectados tres módulos de resistencias de frenado, cuyo propósito es absorber y disipar la energía excedente generada durante el frenado de los motores eléctricos principalmente del hoist. Esto es crucial para evitar sobretensiones que puedan dañar los componentes electrónicos y mecánicos del sistema. Al disipar esta energía de manera controlada, las resistencias de frenado aseguran una operación más estable y prolongan la vida útil de los equipos, reduciendo la necesidad de mantenimiento correctivo y mejorando la seguridad operativa de la grúa.

En la **Figura 24 y 25** se muestra el diagrama unifilar se puede observar lo antes descrito.



**Figura 24: Diagrama unifilar de grúa RTG, salida de voltaje desde el grupo electrógeno.**

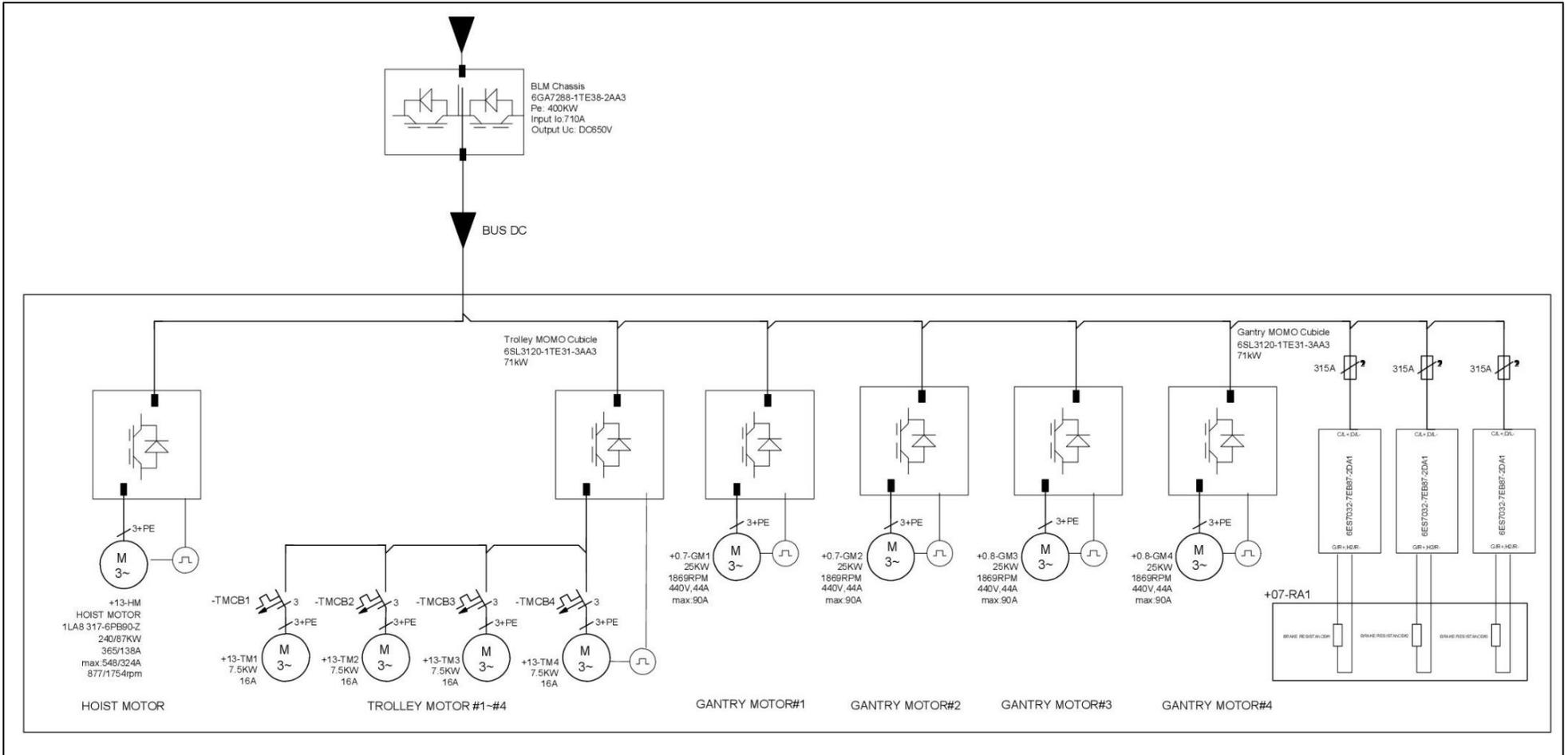


Figura 25: Diagrama unifilar de grúa RTG, Bus DC a los inversores.

### 3.1.1. Análisis de consumo de combustible

El consumo de diésel en las grúas RTG varía dependiendo de la cantidad de contenedores movidos en una hora o día, por lo regular las grúas pueden llegar a mover hasta 30 contenedores/hora.

A continuación, en las *Tabla 2-3* se detallan las horas trabajadas de las 7 grúas disponibles de este tipo en el mes de diciembre del 2024 con un costo de \$2.89 el diésel premium industrial [42], se encuentran las horas trabajadas de las grúas, el consumo de combustibles, contenedores movidos, etc.

*Tabla 2: Consumo de combustible de grúas RTG de diciembre 2024*

Equipo	Horas mes	Motor diésel (RH)	Horas de mantenimiento al mes	Horas de trabajo en operación de motor diésel	Contenedores mes(unidades)	Consumo motor diésel [Gal]
RTG 1	744	726	24	702	6776	2580
RTG 2	744	688	24	664	6607	2094
RTG 3	744	724	24	700	5263	2424
RTG 4	744	717	24	693	6903	2742
RTG 5	744	740	24	716	6812	2747
RTG 6	744	720	24	696	5867	2454
RTG 7	744	729	24	705	6893	2988

Nota: Datos tomados desde indicadores de productividad y mantenimiento de la terminal portuaria

**Tabla 3: Gasto y consumo de combustible de grúas RTG de diciembre 2024**

<b>Equipo</b>	<b>Consumo motor principal [Lt]</b>	<b>Gasto Real [\$]</b>	<b>Consumo combustible por contenedor [Gal]</b>	<b>Consumo combustible por contenedor [Lt]</b>	<b>Contenedor promedio hora</b>
RTG 1	9766	\$ 7456.20	0.38	1.44	9
RTG 2	7927	\$ 6046.66	0.32	1.20	9
RTG 3	9176	\$ 7005.36	0.36	1.35	9
RTG 4	10379	\$ 7924.38	0.40	1.50	9
RTG 5	10398	\$ 7938.83	0.52	1.98	7
RTG 6	9289	\$ 7092.06	0.42	1.58	8
RTG 7	11311	\$ 8635.32	0.43	1.64	9

Nota: Datos tomados desde indicadores de productividad y mantenimiento de la terminal portuaria.

Analizando las **Tabla 2-3** correspondiente al mes de diciembre del 2024 seleccionando los valores más altos en este mes se puede considerar los siguientes resultados:

- El motor diésel tiene un total de 740 horas de trabajo.
- La grúa realiza 6903 movimientos de contenedores.
- Consume 2988 galones de diésel premium industrial.
- Consume hasta 0.52 galones por cada contenedor movido.
- Gasta \$8635.32 en diésel premium industrial al mes.
- Gasta \$1.50 por cada movimiento de contenedor.

### 3.1.1.1. Emisión de CO<sub>2</sub> sistema actual

El dióxido de carbono es parte natural del ciclo del carbono en la tierra, pero las actividades humanas han alterado este equilibrio al aumentar las emisiones y reducir la capacidad de los sumideros naturales, como los bosques, para absorberlo. Desde la Revolución Industrial, este impacto ha sido la principal causa del aumento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. La mayor actividad del ser humano que emite CO<sub>2</sub> es la quema de combustibles fósiles (gas natural, petróleo, etc) para generar energía y con fines de transporte, aunque ciertos procesos industriales y cambios en el uso de la tierra también emiten CO<sub>2</sub> [43].

En este caso, la generación de CO<sub>2</sub> proviene del uso de los motores de combustión interna al consumir diésel para su funcionamiento y operación de las grúas RTG, para esto realizaremos el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> que produjo la grúa que más combustible diésel consumió en el mes de diciembre con la siguiente formula.

$$Emisiones_{CO_2} = Consumo\ de\ diésel * Factor\ de\ emisión [44].$$

*Emisiones<sub>CO2</sub>*: Emisiones de dióxido de carbono del motor

*Consumo de diésel*: Consumo de diésel en litros

*Factor de emisión*: Un litro de diésel crea 2.67 kgCO<sub>2</sub>

$$Emisiones_{CO_2} = 11311\ ltr * 2.67 \frac{kgCO_2}{ltr} = 30200.37\ kgCO_2 \approx 30.2\ TnCO_2$$

Como resultado tenemos que una grúa RTG puede llegar a emitir 30,2 toneladas de CO<sub>2</sub> al mes.

Para darse una idea tomamos el recorrido del bus urbano de Guayaquil de la ruta 116, de ida y vuelta que recorre 45km y consume 12.5ltr de diésel en la ruta, el bus debe realizar 902 recorridos, lo que equivale a transitar aproximadamente 40590 km para poder igualar las 30.2 Toneladas de CO<sub>2</sub> que emite una grúa RTG al mes [45].

### 3.1.2. Análisis de mantenimiento motor diésel

El mantenimiento del motor diésel se lo debe realizar a partir de las 500 horas trabajadas por recomendación del fabricante (Cummins), considerando que la grúa que más trabaja realiza 740 horas al mes. Se debe realizar el mantenimiento motor aproximadamente a partir de los 21 días.

Esto a su vez implica que se debe invertir en insumos y recursos como mano de obra, aceites lubricantes, refrigerante, filtros, etc. A continuación, se detalla en la **Tabla 4** un listado de implementos y consumibles que se utilizan en un mantenimiento de motor diésel.

**Tabla 4: Listado de insumos y recursos utilizados en mantenimiento motor diésel**

Nombre	Cantidad	Precio
Fleetguard WF2126 filtro refrigerante	1	\$ 43.00
Fleetguard LF 14000nn filtro de aceite	1	\$ 26.46
Fleetguard FS 1040 filtro de combustible	1	\$ 24.50
Fleetguard AF 26208 filtro aire secundario	1	\$ 68.37
Fleetguard AF 26207 filtros de aire	1	\$ 69.75
Fleetguard FS20202 filtro racor	1	\$ 13.63
Fleetguard refrigerante eco50/50 (caneca de 5gl)	1	\$ 70.00
Aceite 15w40 (caneca de 5gl)	5	\$ 345.00
Mano de obra	1	\$ 460.00
<b>Total</b>		<b>\$ 1120.71</b>

Nota: Referencia de precios tomados desde sistema de mantenimiento/bodega de la terminal portuaria.

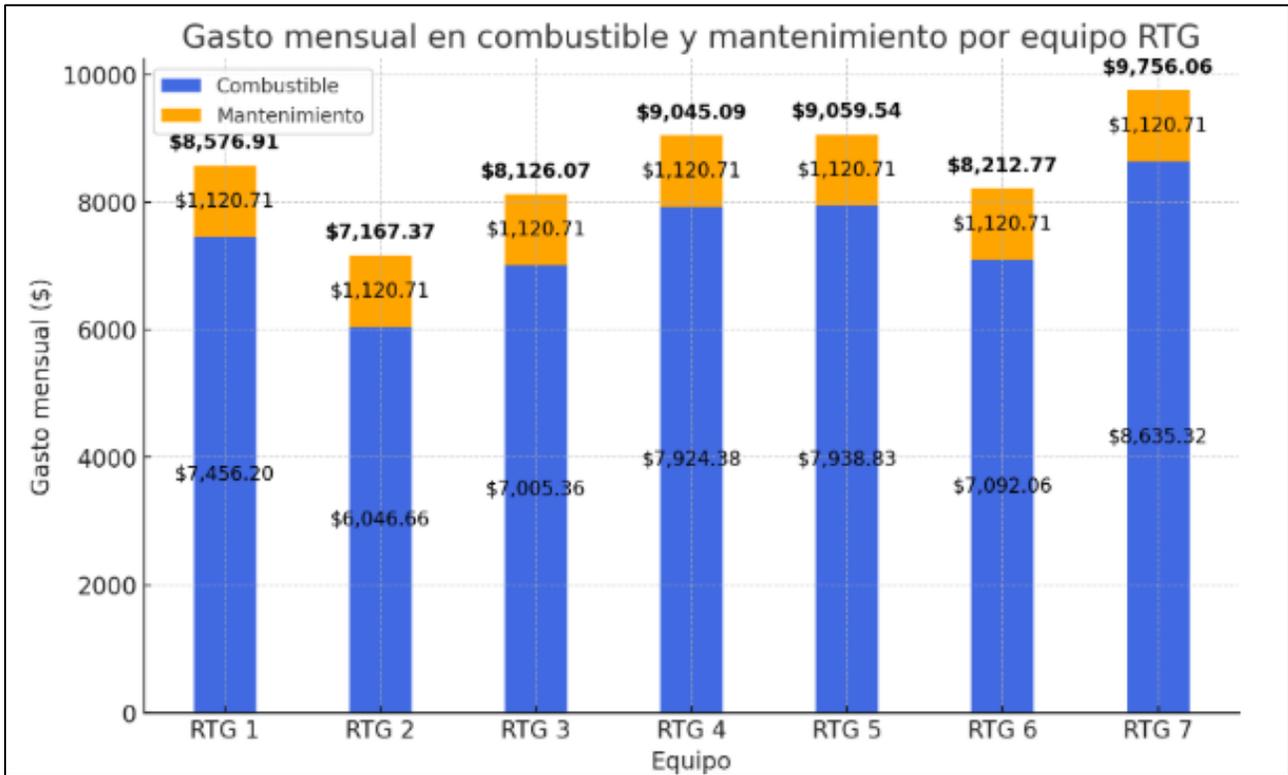
Al analizar la **Tabla 4**, se pueden observar los costos de cada ítem, destacando que la mano de obra representa una parte significativa del gasto total. El costo total del mantenimiento asciende a \$1120.71, y al aplicarlo a siete grúas RTG, el gasto estimado alcanza aproximadamente \$7844.97.

### 3.1.3. Costos totales de consumo de combustible y mantenimiento motor diésel

Para evaluar el impacto económico de la operación de una grúa RTG, es fundamental analizar tanto el consumo de combustible como los costos de mantenimiento del motor diésel. Estos factores representan una parte significativa del gasto total y pueden influir en la eficiencia operativa a largo plazo. Mientras que el consumo de combustible está directamente relacionado con el tiempo de operación y la demanda de carga, los costos de mantenimiento dependen de la frecuencia de servicio, la calidad de los repuestos utilizados y la correcta ejecución de las tareas preventivas. A continuación, se presenta en la **Tabla 5** los costos totales al mes de ambos aspectos, con el objetivo de identificar oportunidades de optimización y reducción de costos.

**Tabla 5: Costos totales de consumo de combustible y mantenimiento motor diésel.**

<b>Equipo</b>	<b>Gasto mensual en combustible</b>	<b>Gasto mensual en mantenimiento motor</b>	<b>Gasto total mensual</b>
RTG 1	\$ 7456.20	\$ 1120.71	\$ 8576.91
RTG 2	\$ 6046.66	\$ 1120.71	\$ 7167.37
RTG 3	\$ 7005.36	\$ 1120.71	\$ 8126.07
RTG 4	\$ 7924.38	\$ 1120.71	\$ 9045.09
RTG 5	\$ 7938.83	\$ 1120.71	\$ 9059.54
RTG 6	\$ 7092.06	\$ 1120.71	\$ 8212.77
RTG 7	\$ 8635.32	\$ 1120.71	\$ 9756.06



*Figura 26: Comparación de gastos en combustible y mantenimiento motor diésel en cada RTG.*

Con la muestra de datos del mes de diciembre del 2024, se puede obtener el siguiente resumen:

- La grúa que más impacto económico en la operación tuvo fue la RTG 7 con un gasto de \$9756.06.
- La grúa que menos impacto económico en la operación tuvo fue la RTG 2 con un gasto de \$7167.37.

## CAPÍTULO IV

### 4.1. METODOLOGÍA DEL DISEÑO DE UN SISTEMA HÍBRIDO CON GRUPO ELECTRÓGENO

#### 4.1.1. Dimensionamiento de banco de baterías

En el contexto de los sistemas híbridos aplicados a maquinaria portuaria, como las grúas RTG (Rubber-Tired Gantry), el cálculo preciso de la potencia activa es un paso crítico para el diseño de soluciones energéticas sostenibles. Estas grúas, que tradicionalmente operan con motores diésel, están siendo transformadas mediante la incorporación de sistemas eléctricos híbridos que incluyen bancos de baterías. Este enfoque permite reducir significativamente las emisiones de carbono, mejorar la eficiencia energética y disminuir los costos operativos.

##### 4.1.1.1. Cálculo del consumo total de potencia de la grúa

Este cálculo permite determinar la energía necesaria para garantizar el funcionamiento eficiente de componentes clave como los motores eléctricos, los sistemas de control y el aire acondicionado, estableciendo así la base para el diseño del sistema energético. A continuación, se detallan los subsistemas involucrados:

- Motores eléctricos.
- Sistema de alumbrado
- Sistema de climatización.

##### 4.1.1.2. Motores eléctricos

Los motores eléctricos en una grúa RTG son fundamentales para el movimiento y operación de sus distintos mecanismos, como el izaje (hoist), traslación (gantry), carro (trolley) y de otros sistemas auxiliares. Generalmente, utilizan motores trifásicos con variadores de frecuencia para mejorar la eficiencia y el control de velocidad, aunque esta grúa presenta motores auxiliares de baja capacidad

que no usan variadores de frecuencia. Los motores principales están diseñados para soportar cargas pesadas, trabajar en condiciones exigentes y garantizar precisión en las maniobras, optimizando el rendimiento y la seguridad en las operaciones.

La grúa cuenta con 15 motores eléctricos, a continuación, en la **Tabla 6** se detallan en lugar utilizado y sus características.

**Tabla 6: Motores eléctricos disponibles en la grúa**

<b>NOMBRE DE MOTOR</b>	<b>CANTIDAD DE MOTORES</b>	<b>CORRIENTE (A)</b>	<b>VOLTAJE (V)</b>	<b>POTENCIA NOMINAL (kW)</b>
Bomba giro de ruedas gantry	2	23.7	440	11
Hoist	1	370	440	230
Bomba de skew	1	4.20	440	3
Trolley	4	16	440	7.5
Gantry	4	44	440	25
Telescopio spreader	1	8.40	440	4
Twistlock spreader	2	1.75	440	0.55

Nota: Información tomada desde los planos eléctricos de la grúa.

La potencia total en los motores eléctricos de la grúa RTG es de 390.1 kW.

Cabe recalcar que los motores de cada movimiento nunca funcionan en conjunto, a excepción de los motores de hoist y trolley, debido a que permiten maniobrar con mayor facilidad los contenedores, estos son controlados por variadores de frecuencia y están conectadas a cajas reductoras. Estos motores trabajan en un periodo de 25 a 50 segundos variando su velocidad desde el inicio de la maniobra.

#### 4.1.1.3. Muestra de consumo de potencia en los motores principales

Se recopilan datos durante un día de operaciones de una grúa, tomando como referencia una hora de trabajo en los movimientos principales. Estos datos pueden variar según la frecuencia con la que la grúa cambie de bloque o la altura a la que estén ubicados los contenedores.

**Tabla 7: Resumen de pruebas realizadas en motores principales**

<b>Movimiento</b>	<b>Tiempo trabajado</b>	<b>Consumo (P<sub>entregada</sub>)</b>	<b>Regenerada (P<sub>devuelta</sub>)</b>	<b>Ref. Velocidad con carga</b>	<b>Ref. Velocidad sin carga</b>
Hoist	20 min	11.72 kWh	7.42 kWh	50%	85%
Trolley	12 min	1.6 kWh	0.00 kWh	55%	80%
Gantry	5 min	2.21 kWh	0.06 kWh	40%	40%

Nota: Información tomada desde software Sinamics Starter de Siemens de la grúa y desde indicadores de productividad.

Transcurrido el periodo de tiempo antes especificado se movilizaron 26 contenedores, donde la potencia activa máxima entregada al motor de hoist llegó hasta 223.84kW con carga de 30 toneladas y de 120.15kW con cargas de 12 toneladas, estos valores fueron por pocos segundos; se obtuvo también valores devueltos del motor de hoist cuando bajaba el contenedor de 171.55kW. Al peso de contenedores se le debe sumar el peso de 10 toneladas correspondientes al spreader.

Cuando la grúa se encuentra en standby el generador entrega 3.7kW, con las luces y aires acondicionados encendidos.

Las referencias de velocidades de hoist y trolley están seteadas en los valores indicados en la **Tabla 7**, estas dependen si trabaja con carga o sin carga, las velocidades eran variables durante las pruebas ya que al tener recorrido limitado y disminuir al máximo el péndulo mientras maniobra el contenedor, es necesario bajar la velocidad.

#### 4.1.1.4. Variadores de frecuencia (inverter)

A continuación, en la **Tabla 8** se detallan características de los inverter utilizados en los movimientos principales de la grúa.

**Tabla 8: Descripción de características de inverter utilizados en la grúa**

Modelo	Movimiento	Cantidad	Características
6SL3320-1TE35-0AA3	Hoist	1	Vin: 510 ... 750 VDC Vout: 400 VAC Iout: 490 A P: 132kW
6SL3120-1TE31-3AA3	Trolley	1	Vin: 510 ... 720 V Vout: 400 VAC Iout: 132 A P: 75kW
6SL3120-1TE31-3AA3	Gantry	4	Vin: 510 ... 720 V Vout: 400 VAC Iout: 132 A P: 75kW

Nota: Datos tomados de planos eléctricos de la grúa.

#### 4.1.1.5. Sistema de alumbrado

El sistema de alumbrado en una grúa es esencial para garantizar la seguridad y operatividad en condiciones de baja visibilidad. Generalmente incluye lámparas led, luces de trabajo en la cabina del operador, señalización luminosa en puntos críticos y pasarelas de acceso. Estos sistemas suelen estar diseñados para resistir vibraciones e intemperie, asegurando una iluminación eficiente y duradera.

En el sistema de alumbrado se cuenta el siguiente número de lámparas:

**Tabla 9: Número de lámparas instaladas en la grúa**

Cantidad (Unidades)	Potencia(W)	Voltaje(V)
12	150	220
4	100	220
32	5	220

Para obtener la potencia total del sistema se tiene la siguiente formula:

$$P = \text{Unidad} * \text{Potencia}$$

- 12 unidades \* 150W = 1800W
- 4 unidades \* 100W = 400W
- 32 unidades \* 5 W = 160W

$$P_{total} = 1800W + 400W + 160W = 2360W$$

Convertidos a kW tenemos:

$$P_{total} = \frac{1kW * 2060W}{1000W} = 2.36kW$$

Como esta es nuestra potencia total del sistema de alumbrado y su uso es 12 horas al día se tiene que el consumo es de **2.36kWh**.

#### 4.1.1.6. Sistema de climatización

El sistema de climatización se compone de 3 aire acondicionado de 12000 BTU. Utilizando la fórmula para convertir de BTU/h a kW tendríamos la siguiente potencia.

$$P = \frac{P_{BTU}}{3412.14}$$

- P: Potencia en kilovatios (kW).

- $P_{BTU/h}$ : Potencia en unidades térmicas británicas por hora (BTU/h).
- 3412.14: Factor de conversión (1 kW equivale aproximadamente a 3412.14 BTU/h).

#### Cálculo de potencia de aires acondicionados

$$P = \frac{12000}{3412.14} = 3.52kW$$

Este resultado se multiplica por la cantidad de aire totales en el sistema:

$$P_{total} = 3 \text{ unidades} * 3.52kW = 10.55kW$$

El consumo total del sistema de climatización es de **10.55kWh** ya que estás funcionan siempre que la grúa está encendida.

#### 4.1.1.7. Consumo total de potencia de la grúa

Para este cálculo se tomaron valores de consumo de potencia las pruebas realizadas en los motores de la **Tabla 10**, consumo del sistema de alumbrado y de climatización, tenemos los siguientes datos:

**Tabla 10: Consumo en kWh de la grúa.**

*Consumo de potencia en la grúa*

Sistemas	Consumo de potencia (kWh)
Motores principales	15.53
Sistema de alumbrado	2.36
Sistema de climatización	10.55

El consumo total de la grúa trabajando con máxima carga es de 28.44kWh.

#### **4.1.2. Sistema de almacenamiento de energía**

En los sistemas de almacenamiento utilizados en grúas RTG híbridas, tenemos las empresas como Corvus Energy, Konecranes y Conductix-Wampfler que realizan la aplicación de sistemas de almacenamiento de baterías, en las cuales todas tienen un sistema de frenado regenerativo la cual toma la energía generada cuando el movimiento hoist baja con o sin contenedor y esta energía es almacenada en el banco de baterías lo cual permite una mayor duración de carga [46], [47], [48].

Para este caso en específico se usará el sistema de almacenamiento de la empresa Corvus Energy, que es Orca ESS, desde el 2009 ha liderado el uso de la tecnología de baterías a bordo de los barcos para reducir las emisiones. La excelencia tecnológica combinada con el ADN marítimo ha convertido a Corvus Energy en pionero en su campo con la mayor cantidad de instalaciones a nivel global [49].

A partir de enero del 2017 se empezaron aplicar su tecnología diseñada por CCCC Shanghai Equipment Engineering (CCCCSEE), esta solución se compuso de un sistema más pequeño, de ultra alta potencia y refrigerado por líquido, diseñado específicamente para satisfacer los requisitos de energía de la RTG de manera más rentable [48].

La tecnología del sistema ESS de Corvus Energy hace que la energía de frenado regenerativo sea obtenida y la almacene como electricidad conduciéndola hasta el banco de baterías. El sistema de gestión de baterías (BMS integrado en Orca ESS) regula el flujo de electricidad de entrada y salida de las baterías del módulo, esto permite que se distribuya a todos los módulos de baterías, tenga un buen estado de salud y mayor seguridad en el pack.

Este sistema también hace que el motor diésel deje de tener los periodos de ralentí cuando no esté realizando trabajos la grúa, ya que este solo se encenderá cuando las baterías necesiten ser cargadas la cual no bajará del 30% ni superará los 80% para tener una mejor vida útil [50].

#### 4.1.2.1. Características del sistema de baterías Corvus Energy

En las *Tablas 11 y 12* se detalla toda la información de los módulos de baterías tales como el rendimiento, especificaciones, seguridad, etc.

**Tabla 11: Especificaciones de rendimiento y del sistema de baterías [51].**

*Información de módulos de baterías*

<b>Especificaciones de rendimiento</b>	
Taca C – (Descarga / Carga)	Hasta 3C / hasta 3C
<b>Especificaciones del sistema</b>	
Química de las celdas de la batería	Iones de litio NMC / grafito
Tamaño de módulo único / incrementos	5.7kWh / 50VCC
Capacidad de un solo módulo	1281Ah
Gama de paquetes individuales	38-136kWh / 350 - 1200VCC
Densidad gravimétrica máxima – Paquete	77 Wh/kg   13kg/kWh
Densidad volumétrica máxima – Paquete	88Wh / l

**Tabla 12: Especificaciones de seguridad y generales de las baterías [51].**

*Información de módulos de baterías*

<b>Especificaciones de seguridad</b>	
Anti-propagación de fugas térmicas	Aislamiento térmico pasivos nivel de celdas con sistemas de gases de escape
Supresión de incendios	Por SOLAS, clase y recomendación de Corvus
Desconectar circuito	Sistema de seguridad basado en hardware para

	sobre temperatura y sobretensión
Protección contra cortocircuitos	Fusibles incluidos en el paquete
Circuito de parada de emergencia	Cableado duro
Detección de falla a tierra	Integrado
Clasificación de los interruptores de desconexión	Carga completa

---

### Especificaciones generales

---

Cumplimiento de la clase	DNV, Lloyds Register, Bureau Veritas, ABS, RINA
Homologación de tipo	DVN, Bureau Veritas, ABS, RINA
Aprobación de seguridad cibernética	VND
Protección de ingreso	Sistema: IP44
Enfriamiento	Aire Forzado

---

#### 4.1.2.2. Selección de baterías

Es fundamental considerar baterías con alta densidad energética y capacidad de absorción de picos regenerativos. Esto lo garantiza el BMS de Corvus Energy para optimizar rendimiento y seguridad. En este caso se utilizarán baterías de iones de litio NMC (Níquel-Manganeso-Cobalto) y ánodo de grafito que son diseñadas para esta aplicación, en la **Tabla 13** nos muestra sus características [52].

**Tabla 13: Detalles de una batería Iones de litio NMC / grafito**

*Ficha técnica de una batería Corvus Energy*

Voltaje (VDC)	Amperios-hora (Ah)	Kilovatio-hora (kWh)	Almacenamiento (VDC)	C-rate
44.2	128	5.7	43.8 - 45	3C

---



*Figura 27: Detalles de una batería Iones de litio NMC / grafito [53].*

#### 4.1.3. Capacidad calculada del banco de baterías del sistema ESS

Al tener una potencia máxima al utilizar el movimiento hoist de 230kW y el banco de baterías debe soportar esta potencia por lo que podemos cubrir teniendo las baterías de 5.7kWh al tener un C-rate de 3C tendríamos por cada batería una potencia máxima de descarga/carga de 17.1kWh, para la potencia que debe cubrir la demanda. Se le adiciona una tolerancia del 20% a la potencia máxima por los picos de carga tendríamos 276kW.

$$N_s = \frac{P_{sb}}{P_b}$$

Donde:

$P_{sb}$ : Potencia del sistema de baterías

$N_s$ : Numero de baterías en serie

$P_b$ : Voltaje de baterías

$$N_s = \frac{276kW}{17.1kWVDC} = 16.14 \approx 16 \text{ baterías}$$

La unidad ESS estará compuesto de 16 unidades conectadas en serie de las baterías de Iones de litio NMC / grafito, para poder cubrir la demanda máxima y tener una potencia libre lo cual tendríamos el siguiente análisis:

- Voltaje total del banco de baterías:

$$V_{total} = 16 * 44.2VDC = \mathbf{707.2VDC}$$

- Capacidad total en Ah:

$$C_{total} = \mathbf{128Ah}$$

- Energía total del banco de baterías:

$$E_{total} = 16 * 5.7kWh = \mathbf{91.2kWh}$$

- Corriente máxima de descarga/carga (3C):

$$I_{descarga \text{ máx}} = 128Ah * 3C = \mathbf{384A}$$

- Potencia máxima de descarga/carga (3C):

$$P = V * I = 707.2V * 384A = \mathbf{271.6kW}$$

#### 4.1.4. Selección de elementos de protección, de rectificación y de inversor

Para los elementos de rectificación, inversor y protección utilizaremos VACON NXA 0004 Active Front End Unit donde esta contiene elementos preestablecidos para el tipo de unidad que se vaya a seleccionar como fusibles de CA y CC, también la unidad AFE cuenta con un circuito de precarga externo el cual nos permitirá cargar la tensión en el circuito intermedio hasta alcanzar un nivel adecuado para enlazar la unidad Active Front End (AFE) a la red de alimentación principal [38].

#### 4.1.4.1 Unidad AFE

Se elige una unidad AFE de la marca VACON® NXP Common DC Bus para que esta sea el encargado de suministrar de energía al sistema ESS, ya que por sus características este puede realizar la rectificación al voltaje deseado para el banco de baterías de forma segura y eficiente, además de mejorar la calidad de energía a entregar a las baterías puede ser utilizado de forma bidireccional, pero en nuestro caso debemos aprovechar la energía regenerativa para que sea tomado por el sistema ESS y cargar las baterías.

Elegimos una unidad AFE **FI9 1 x NXA\_0261 5 A0T02SF** [54], por sus datos técnicos el cual nos ayuda con el suministro adecuado para el banco de baterías, al tener una corriente máxima de carga de 384 A y una potencia máxima de 271.6kW, la unidad AFE puede suministrar la siguiente corriente:

$$I_{AFE} = \frac{176000W}{707VDC} = 249A$$

Esto nos permite cargar dentro de los límites seguros de corriente sin exigir demasiado al banco, permite ajustar el perfil de carga para maximizar la vida útil de la batería, evitando sobrecarga o calentamiento.

#### 4.1.4.2. Fusibles AC / DC

Con la tabla de elementos preestablecidos para cada modelo de unidad AFE tenemos la siguiente tabla:

**Tabla 14: Tabla de fusibles de protección en voltaje AC y DC [38].**

<b>Fusibles AC (380-500 VAC)</b>				
Código	Ferraz Shawmut [aR]*	$U_N[V]$	$I_N[A]$	Cantidad
NXA_0261 5	NH2UD69V500PV	690	500	3
<b>Fusibles DC (465-800VDC)</b>				
Código	Ferraz Shawmut [aR]*	$U_N[V]$	$I_N[A]$	Cantidad
NXA_0261 5	PC73UD13C500TF	1250	500	2

#### 4.1.4.3. Circuito de precarga

La unidad de precargar va a limitar la corriente de irrupción cuando la unidad AFE se la energiza por primera vez, ya que esta precarga es importante para los capacitores del bus DC interior de la unidad AFE que pueden estar completamente descargados, este protege a todos los componentes internos del mismo [38].

**Tabla 15: Componentes del circuito de precarga de la unidad AFE [38].**

Tamaño bastidor	Resistencia	Capacitancia	
		Mínimo	Máximo
FI9	2*47R	4950 $\mu F$	30000 $\mu F$

**Figura 28: Elementos que componen el circuito de precarga de la unidad AFE [38].**

<b>FI9 AFE / CARGA AFE-FFE-FI9</b>				
<b>Elemento</b>	<b>Cant.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Código de producto</b>
1	1	Puente de diodos	Semikron	SKD 82
2	2	Resistencias de carga	Danotherm	CAV150C47R
3	1	Condensador snubber	Rifa	PHE448
4	1	Contactador	Telemecanique	LC1D32P7

#### **4.1.4.4. Filtro LCL**

Se elige un filtro LCL para una unidad AFE, ya que el uso de inversores y rectificadores de potencia generan componentes armónicas no deseadas debido a la conmutación de alta frecuencia, este filtro nos ayuda a reducir los contenidos armónicos, a mejorar la calidad de energía, a disminuir la distorsión armónica total y proteger los equipos que están conectados a él.

Elegimos una unidad **VACON-LCL-0261-5-B0R011T** [55], por sus características ya que este protege tanto a la unidad AFE y al generador.

$$I_{\text{generador}} = \frac{356000W}{\sqrt{3} * 440V} = 467.12A$$

$$I_{\text{AFE}} = \frac{176000W}{\sqrt{3} * 440V} = 230.94A$$

El filtro puede manejar la corriente del sistema, puede proteger al generador evitando fluctuaciones de voltaje y sobrecalentamiento, reduce las pérdidas y estabiliza el factor de potencia.



Para este sistema hemos seleccionado el inversor **NXI01405-A0T0CSS-A1A2000000** [56], por sus características puede cubrir la demanda de los sistemas auxiliares de la grúa ya que el inversor tiene una capacidad de 75kW y los sistemas auxiliares pueden consumir hasta 43.01kW en total.

#### **4.1.4.6. Módulos de diodos**

El uso de estos elementos de protección es fundamental para aprovechar la energía regenerativa generada por el motor de hoist y otros motores principales. Al conectar el banco de baterías y el bus DC de los variadores a una barra común, es crucial evitar el flujo de voltaje DC hacia la unidad AFE. Del mismo modo, dado que el inversor está vinculado a las barras del bus DC, se empleará un módulo de diodos como medida de protección adicional.

En este caso se utilizará 2 módulos de diodos de 600 A para la salida de la unidad AFE hacia el sistema ESS y de 300 A desde la alimentación del inversor.

#### **4.1.5. Cálculo de rendimiento del banco de batería**

Se realiza un cálculo para medir el rendimiento de nuestro banco de baterías seleccionado, donde se tendrán resultados como tiempo de carga y descarga con datos de las pruebas realizadas, teniendo los siguientes:

##### **4.1.5.1. Potencia utilizable del banco de baterías**

Para tener una mayor vida útil de las baterías, se le asignó un SoC para tener un rango máximo y mínimo de carga/descarga, el cual sería de 85% y de 35% respectivamente [57].

$$P_{\text{útil}} = P_{\text{total}} * (SoC_{\text{máximo}} - SoC_{\text{mínimo}})$$

*P<sub>útil</sub>*: Potencia que puede utilizar la grúa luego de asignar el SoC.

*P<sub>total</sub>*: Potencia nominal del banco de baterías.

$$P_{\text{útil}} = 91.2kWh * (0.85 - 0.35) = 45.6kWh$$

#### 4.1.5.2. Tiempo de descargar usando a la energía regenerativa de las pruebas realizadas.

El consumo total de la grúa utilizando todos los sistemas tenemos que se consumen 28.44 kWh y la energía regenerativa de los motores es de 7 kWh.

Utilizando la energía regenerativa (28.44 kWh - 7 kWh= 21.44kWh) el tiempo de duración de la carga del banco de baterías es:

$$t_{\text{duración}} = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{consumida}}}$$

$t_{\text{duración}}$ : Tiempo de duración de baterías.

$P_{\text{útil}}$ : Potencia que puede utilizar la grúa luego de asignar el SoC.

$P_{\text{consumida}}$ : Potencia consumida por la grúa en operaciones usando la energía regenerativa.

$$t_{\text{duración}} = \frac{45.6kWh}{21.44kWh} * 60 \text{ minutos} = 127.61 \text{ minutos}$$

Esto equivale a la duración del banco de baterías será de **2 horas con 8 minutos**.

#### 4.1.5.3. Tiempo de carga del banco de baterías

Al presentar un parámetro de C-rate de 3C, esto me permite una potencia máxima de 271.6kW, y corriente máxima de 384A y la unidad AFE que seleccionamos tiene la potencia de salida hasta 176kW esto nos permite sin problemas cargar las baterías. Calculamos el valor de corriente que entrega la unidad AFE:

$$P_{\text{carga}} = V_{\text{carga}} * I_{\text{carga}}$$

$V_{carga}$ : Voltaje entregado por la unidad AFE

$P_{carga}$ : Potencia entregada por la unidad AFE.

$I_{carga}$ : Corriente entregada por la unidad AFE

$$I_{carga} = \frac{P_{carga}}{V_{carga}} \text{ [58].}$$

$$I_{carga} = \frac{176000 \text{ W}}{707.2 \text{ V}} = 248.9 \text{ A}$$

Cálculo del tiempo de carga con la eficiencia del cargador o ESS:

$$t_{carga} = \frac{C_{baterías}}{I_{carga} * \eta} * 60 \text{ minutos}$$

$t_{carga}$ : Tiempo de carga

$C_{baterías}$ : Capacidad de baterías

$I_{carga}$ : Corriente de carga

$\eta$ : Eficiencia del cargador = 90%

$$t_{carga} = \frac{128 \text{ Ah}}{248.9 \text{ A} * 0.90} * 60 \text{ minutos} = 34.28 \text{ minutos}$$

El tiempo de carga del banco de baterías sería de 34 minutos, Sin embargo, en la práctica, el tiempo de carga es superior al tiempo teórico debido a las pérdidas de energía durante el proceso.

Normalmente, se añade una hora adicional como tiempo de presión constante [59].

Entonces el tiempo de carga de las baterías sería de aproximadamente de **1 hora 34 minutos**.

#### 4.1.6. Reducción de horas trabajadas del motor y consumo de combustible con el sistema híbrido.

Una vez obtenido el tiempo de carga y descarga de la batería podemos realizar un cálculo para tener una referencia para saber cuántas horas de trabajo realizará el motor y cuánto de combustible estaríamos ahorrando al implementar el sistema híbrido en la grúa RTG.

##### 4.1.6.1. Horas trabajadas del motor con el sistema híbrido

El encendido del motor se llevaría a cabo para cargar el banco de batería en estado automático el cual recibe la orden del sistema ESS. El motor diésel duraría 1 hora con 34 minutos encendido para cargar las baterías luego de que las baterías trabajen 2 horas con 8 minutos tendríamos el siguiente resultado.

Ciclos de trabajo del banco de baterías y el motor si la grúa operase 24 horas al día:

$$1.57 \text{ horas} + 2.13 \text{ horas} = 3.7 \text{ horas}$$

Dividimos para 24 horas y tenemos:

$$\frac{24 \text{ horas}}{3.7 \text{ horas}} = 6.49 \text{ ciclos}$$

Tenemos que las baterías y el motor diésel trabajan 6.49 ciclos durante 24 horas.

El motor diésel trabajaría las siguientes horas:

$$6.49 \text{ ciclos} * 1.57 \text{ horas} = 10.18 \text{ horas}$$

El banco de baterías trabajaría las siguientes horas:

$$6.49 \text{ ciclos} * 2.13 \text{ horas} = 13.82 \text{ horas}$$

En una jornada laboral de 24 horas, el motor funcionaría durante 10 horas y 11 minutos. Esto se traduciría en un tiempo total de aproximadamente **315 horas y 35 minutos** al mes.

Con respecto al inicio del proyecto el motor trabajaba hasta 740 horas, con la implementación del sistema híbrido tendría 424 horas con 25 minutos menos de trabajo.

**Porcentaje de horas reducidas de trabajado sería de:**

$$740 \text{ horas} - 315.58 \text{ horas} = 424.42 \text{ horas}$$

$$\left( \frac{424.42}{740} \right) * 100 = 57.33\%$$

#### **4.1.6.2. Consumo de combustible con el sistema híbrido**

En la **Tabla 2** nos muestra las horas trabajadas del motor y los galones consumidos, tendríamos el siguiente resultado:

$$\frac{G_{consumidos/mes}}{H_{Trabajadas/motor}} = \frac{2988Glns}{740H} = 4.03glns/hora$$

Con la reducción de horas trabajadas del motor tendríamos un consumo de:

$$315.58 \text{ horas} * \frac{4.03 \text{ glns}}{\text{hora}} = 1271.78glns$$

El costo en uso de combustible sería de:

$$1271.78 \text{ glns} * \$2.88 = \$3662.72$$

La reducción en costo con respecto al sistema actual con el sistema híbrido sería de:

$$\$8635.32 - \$3662.72 = \$4972.6$$

$$\left( \frac{\$ 4972.6}{\$ 8635.32} \right) * 100 = 57.58\%$$

Con estos valores tendríamos una reducción de horas de trabajo y reducción en el consumo de combustible del **57%**.

#### **4.1.6.3. Emisión de CO<sub>2</sub> con el sistema híbrido**

Con el sistema híbrido la grúa va a reducir la emisión de dióxido de carbono ya que este reduce las horas de operación del motor y por ende reduce el consumo de diésel, el motor con el nuevo sistema híbrido emitiría la siguiente cantidad de CO<sub>2</sub>.

$$Emisiones_{CO_2} = Consumo\ de\ diésel * Factor\ de\ emisión [44].$$

$Emisiones_{CO_2}$ : Emisiones de dióxido de carbono del motor

*Consumo de diésel*: Consumo de diésel en litros

*Factor de emisión*: Un litro de diésel crea 2.67 kgCO<sub>2</sub>

$$Emisiones_{CO_2} = (1271.78\ glns \frac{3.785\ Ltr}{1\ gln}) * 2.67 \frac{kgCO_2}{ltr} = 12852.54\ kgCO_2 \approx 12.85\ TnCO_2$$

#### 4.1.6.4. Comparativa entre el sistema con motor diésel y sistema híbrido

En la **Tabla 16** resume los costos operativos, el consumo de combustible, emisiones de CO<sub>2</sub> de un sistema con motor diésel actual y de implementar un sistema híbrido a futuro. El objetivo es evaluar la eficiencia energética, el ahorro económico y emisiones de CO<sub>2</sub> logrado al combinar un motor diésel con un banco de baterías.

**Tabla 16: Comparativa de los sistemas con motor diésel y sistema híbrido.**

Variable	Sistema actual (MCI)	Sistema híbrido	Ahorro	% de ahorro
Horas trabajadas motor	740 horas	315 horas	425 horas	57.3 %
Consumo de combustible	2988 galones	1271.78 galones	1716.22 galones	57.43%
Gasto en combustible	\$ 8635.32	\$ 3662.72	\$ 4972.6	57.58%
Emisiones de CO <sub>2</sub>	30.2 TnCO <sub>2</sub>	12.85 TnCO <sub>2</sub>	17.35 TnCO <sub>2</sub>	57.45%

#### Análisis de la Tabla 16

- **Reducción en horas de trabajo:** El sistema híbrido reduce el tiempo de funcionamiento del motor en **57.43%**, debido a que el sistema eléctrico reemplaza en lo posible el trabajo del motor diésel.

- **Ahorro de combustible:** Se obtiene una gran reducción en el consumo de combustible del **57.43%**, lo cual contribuye directamente al ahorro económico.
- **Ahorro económico:** El gasto en combustible disminuye en **\$4972.6** mensuales, equivalente a un **57.58%** menos de costo operativo.
- **Reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>:** Se logra reducir la emisión del dióxido de carbono ya que, al reducir las horas de trabajo del motor, será directamente proporcional a esta reducción de emisión de CO<sub>2</sub>.

#### 4.1.7. Mantenimiento motor diésel con la aplicación del sistema Híbrido

Cuando el sistema híbrido se implemente en la grúa RTG, será posible calcular una nueva frecuencia de mantenimiento para el motor diésel. Al disminuir sus horas de operación mensuales, se establecerá un nuevo intervalo para llevar a cabo el mantenimiento.

Con el sistema híbrido el motor trabajaría 10.18 horas al día, lo que se traduce a 315.58 horas al mes. Partiendo de este resultado tenemos que el mantenimiento motor diésel se debe realizar cada 500 horas por recomendación del fabricante.

##### 4.1.7.1. Frecuencia de mantenimiento motor diésel con sistema híbrido

$$F_{\text{mantenimiento motor}} = \frac{H_{\text{mantenimiento motor}}}{H_{\text{trabajadas al día}}}$$

$$F_{\text{mantenimiento motor}} = \frac{500 \text{ horas}}{10.18 \frac{\text{horas}}{\text{día}}} = 49.11 \text{ días}$$

El mantenimiento de motor diésel tendría una nueva frecuencia ya que al trabajar solo 10.18 horas al día, esto aumentaría el intervalo y como resultado sería cada 49 días desde su última intervención.

#### 4.1.7.2. Comparativa entre el sistema con motor diésel y sistema híbrido

La tabla presenta la frecuencia de mantenimiento del motor diésel tanto en el sistema actual como en la posible implementación de un sistema híbrido. El propósito es analizar cómo la combinación del motor diésel con un sistema eléctrico de apoyo impacta en la eficiencia energética y el ahorro económico.

**Tabla 17: Comparativa de frecuencia de mantenimiento motor entre sistema actual y sistema híbrido.**

Variable	Frecuencia	Beneficio
Mantenimiento motor sistema actual	21 días	Mayor desgaste de piezas y mayor costo
Mantenimiento motor sistema híbrido	49 días	Menor desgaste y mayor eficiencia

#### **Análisis de la Tabla 17**

- **Sistema diésel convencional**, el mantenimiento es más frecuente (cada 21 días), lo que implica mayores costos operativos y tiempos de inactividad.
- **Sistema híbrido**, la frecuencia de mantenimiento se extiende a **49 días**, lo que reduce la necesidad de intervenciones, mejora la eficiencia operativa y disminuye los costos de mantenimiento.

#### 4.1.8. Tiempo de recuperación de la inversión (ROI)

En la implementación del sistema ESS, cubriendo solo los gastos de equipamiento como partes eléctricas y electrónicas se realizará una inversión aproximadamente de \$ 84459.75, donde con la implementación del sistema híbrido podría ahorrarse hasta \$ 4972.6. Recuperaría esta inversión en el siguiente tiempo:

$$\textit{Tiempo de recuperación} = \frac{\textit{Inversión inicial}}{\textit{Ahorro mensual}}$$

$$\textit{Tiempo de recuperación} = \frac{\$ 84459.75}{\$ 4972.6 / \textit{mes}} = 16.98 \textit{ meses} \approx 17 \textit{ meses}$$

La inversión se recuperaría en un tiempo de 17 meses aproximadamente.

## CAPÍTULO V

### 5.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### **5.1.1. Recopilar información sobre sistemas híbridos en maquinaria y la carga de la grúa para evaluar su rendimiento y fiabilidad.**

Se llevó a cabo una revisión de la literatura, incluyendo artículos, publicaciones, caso de estudio, revistas y proyectos de tesis, en los cuales se comparan distintos sistemas híbridos de almacenamiento de energía, como FESS (volantes de inercia), BESS (sistemas de almacenamiento con baterías), ESS (sistemas de almacenamiento de energía en general) y SCES (supercapacitores). El objetivo principal de esta comparación fue identificar cuál de estos sistemas tiene el mayor potencial para reducir en manera considerable la emisión de CO<sub>2</sub> y el consumo de combustibles fósiles.

Además, en esta revisión se analizaron diversos tipos de baterías, entre ellas las de polímero de litio, óxido metálico de iones de litio, cebra Z5C y otras baterías de litio, evaluando aspectos clave como eficiencia, durabilidad, tensión del bus de corriente continua (CC) y ciclo de vida, entre otros parámetros determinantes para su aplicación.

En la actualidad, la tecnología híbrida ha ganado una presencia significativa en el sector portuario, extendiéndose desde maquinaria utilizada para la manipulación de contenedores hasta embarcaciones que, en algunos casos, han evolucionado hasta ser completamente eléctricas, marcando una tendencia hacia sistemas más sostenibles y eficientes en la industria.

#### **5.1.2. Calcular la capacidad del banco de baterías y los componentes del circuito para asegurar el funcionamiento adecuado de la grúa.**

Para llevar a cabo el dimensionamiento adecuado se obtuvieron datos a partir de los planos de la grúa y se consideró la carga máxima así mismo del consumo de potencia en una hora de trabajo, para contar con una referencia más precisa. Se analizaron valores relativos al consumo de potencia entregada por

el variador y la potencia recuperada durante en el descenso de la carga, el tiempo de trabajo de cada movimiento dentro de un período específico del motor de mayor capacidad, el cual corresponde al hoist. Además, se consideraron los bancos de baterías de la empresa Corvus Energy debido a que sus características y los componentes que los conforman la posiciona como en una de las grandes opciones para este diseño. La elección de elementos eléctricos/electrónicos específicos de la marca Vacon para las características que demanda el sistema ESS y protección de este.

### **5.1.3. Elaborar los planos eléctricos en AutoCAD.**

Seleccionado el banco de baterías a utilizar y el tipo de carga, se procede a elaborar el diagrama unifilar del nuevo sistema híbrido a aplicar en la grúa. Se tienen en cuenta algunos elementos del sistema instalado actualmente ya que por sus características son de utilidad, así mismo se agregan nuevos elementos los cuales cumplen con las características como voltaje, potencia y corriente que aportaría el banco de batería, en este nuevo sistema se incluye la tecnología para obtener la energía regenerativa de los motores para que esta sea recuperada y almacenada en el banco de baterías.

## **5.2. DESCRIPCIÓN DE LA GRÚA RTG CON SISTEMA HÍBRIDO**

Con el nuevo sistema híbrido, la grúa RTG tendrá como fuente principal de energía un sistema ESS conformado por un banco de baterías de 128Ah/91.2kWh/707.2VDC, el cual tendrá suministro para cargar las baterías de un grupo electrógeno compuesto por un motor diésel de 447 kW y un generador con una capacidad de 445 kVA / 356 kW, que genera un voltaje de 440 VAC. La energía producida por el generador es dirigida hacia un filtro LCL con una capacidad de 200 kW y un rango de operación de 380-480V  $\pm 10\%$ , cuya función es proteger tanto a la unidad AFE como al generador, reduciendo armónicos y mejorando la calidad de la energía.

Posteriormente, pasará por un circuito de precarga el cual cagará de voltaje al circuito intermedio hasta

un nivel suficiente para conectar una unidad AFE, esta será la encargada de convertir la energía y suministrar de 707 VDC a una barra común. En esta barra estarán conectados el sistema ESS, el bus DC destinado a los inversores de los motores y el inversor para los sistemas auxiliares de la grúa, garantizando así un suministro eficiente y estable de energía en todo el sistema. Los inverter de los motores principales pueden trabajar con este voltaje DC ya que tienen un rango de operación de 720 a 750VDC como lo indica la **Tabla 8**.

En la salida de voltaje del generador tendrá un circuito paralelo para suministrar de 440VAC a los sistemas auxiliares donde se encuentran transformadores a 220VAC y 110VAC, esto servirá en caso de emergencias y se necesite suministrar energía desde el generador.

En caso de emergencias, el bus DC será suministrado de energía por el motor diésel, tendrá una configuración para este modo y los inverter de los movimientos principales funcionarán a una velocidad del 10%.

En las **Figuras 30 y 31** se muestra el diagrama unifilar de como quería el nuevo sistema híbrido ya implementado en la grúa RTG.

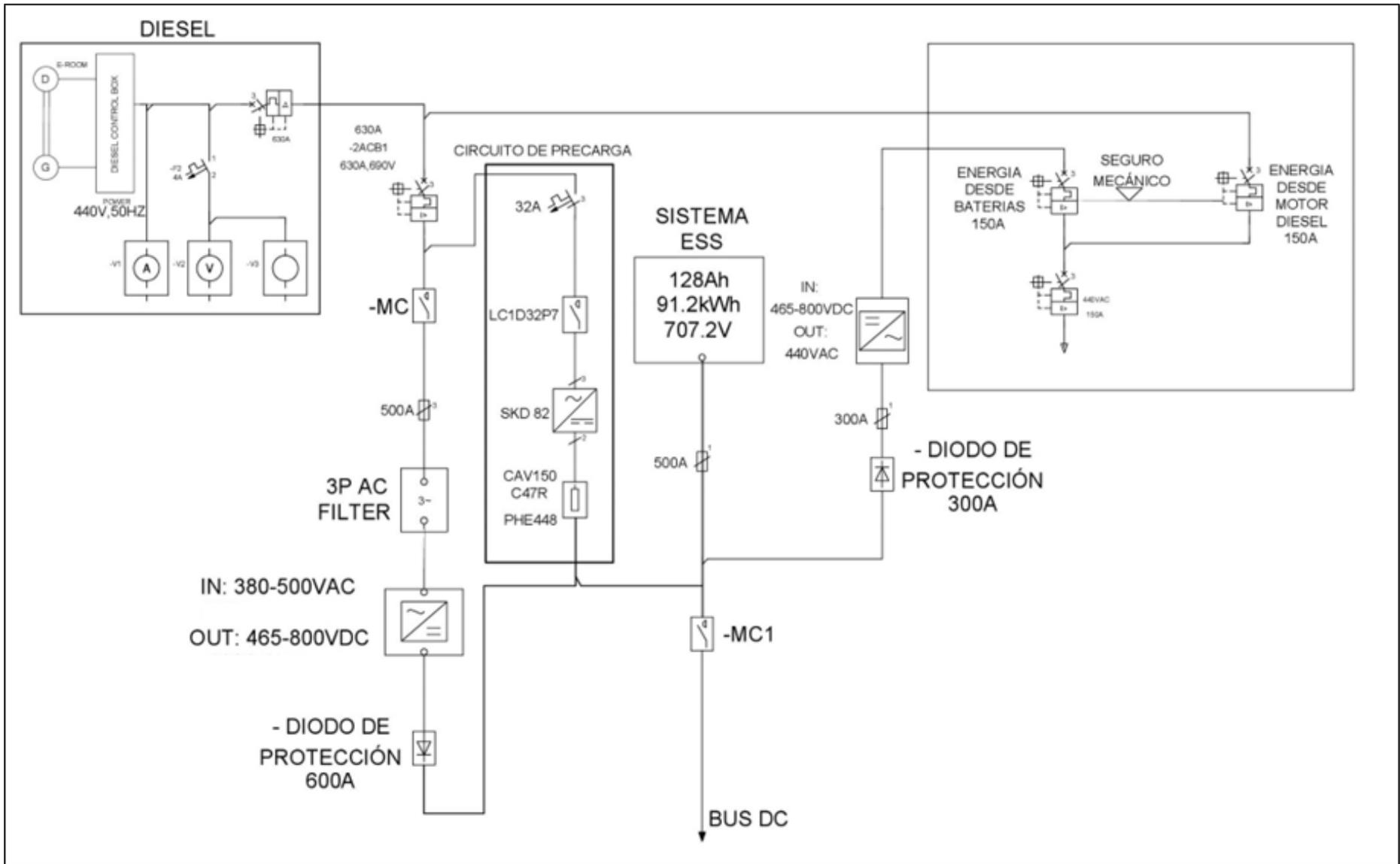


Figura 30: Diagrama unifilar con el nuevo sistema híbrido.

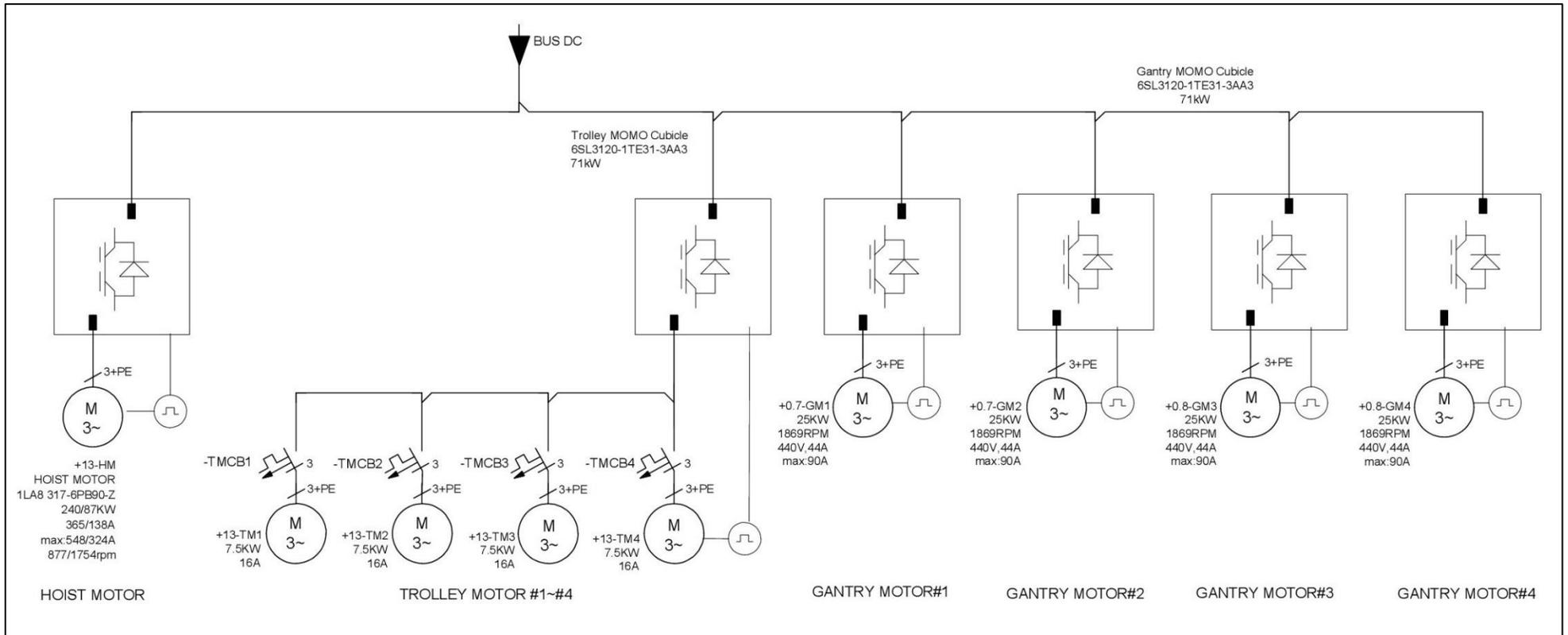


Figura 31: Diagrama unifilar, ingreso del Bus DC a los inverter

## CONCLUSIONES

A partir de la información obtenida en el primer objetivo específico, se logró reunir una cantidad significativa de datos esenciales que han servido como base para la justificación y desarrollo de este proyecto técnico. La recopilación de modelos, especificaciones, comparaciones y análisis ha sido un pilar fundamental, ya que permitió comprender las distintas opciones disponibles y seleccionar aquellas que mejor se ajustan a los requerimientos del sistema. Gracias a esta información detallada, ha sido posible estructurar un enfoque sólido que garantice la viabilidad del proyecto, permitiendo tomar decisiones fundamentadas en datos técnicos que aseguran su correcta implementación y funcionamiento.

En lo que respecta al segundo objetivo específico, el análisis y la interpretación de los planos eléctricos jugaron un papel clave en la ejecución de los cálculos para dimensionar adecuadamente el banco de baterías. Este proceso permitió definir con precisión la capacidad requerida para garantizar un suministro de energía eficiente y confiable a lo largo del tiempo de operación de la grúa. Al establecer un sistema que pueda cubrir la demanda energética sin comprometer la vida útil del banco de baterías, se asegura un funcionamiento seguro y estable, evitando sobrecargas o deficiencias en la entrega de energía. Además, la correcta planificación de la capacidad de almacenamiento energético permite optimizar el rendimiento del sistema, asegurando que pueda operar dentro de parámetros adecuados y sin riesgo de fallos por insuficiencia de energía.

Una vez alcanzados los dos primeros objetivos, se llevó a cabo el diseño del diagrama unifilar utilizando el software AutoCAD, junto con la selección y especificación de los componentes eléctricos esenciales que conformarán el sistema. Este proceso no solo garantizó que todos los elementos fueran correctamente integrados, sino que también se aseguraron medidas de seguridad y eficiencia en su funcionamiento. Además, se contempló una alternativa de respaldo que consiste en el uso del motor diésel, lo que permite tener una fuente de alimentación auxiliar en caso de que el banco de baterías

presente algún problema por cualquier circunstancia. La inclusión de esta opción adicional proporciona mayor seguridad operativa, asegurando la continuidad del sistema ante cualquier eventualidad y permitiendo mantener un alto grado de confiabilidad en la operación de la grúa.

## RECOMENDACIONES

Considerando toda la información recolectada y los cálculos efectuados durante la ejecución de este proyecto técnico, se puede deducir que el diseño sugerido es totalmente viable y posible de poner en práctica en la grúa. Este sistema facilitará la consecución de las metas fijadas desde el comienzo, entre las que sobresalen la optimización del tiempo de funcionamiento, consiguiendo una disminución en las horas de trabajo del equipo, lo que a su vez reduce el deterioro de los componentes y potencia la eficiencia del sistema. Además, la incorporación de este diseño aportará de manera notable a la disminución del uso de combustible, lo que no solo implica un significativo ahorro económico mensual, sino que también repercute positivamente en la sostenibilidad ambiental al reducir las emisiones contaminantes. Asimismo, al disminuir la demanda de combustible y la carga de trabajo del motor diésel, se incrementará la frecuencia y efectividad del mantenimiento preventivo, lo que contribuirá a extender la vida útil del sistema y garantizará un rendimiento óptimo durante un período más prolongado.

## REFERENCIAS

- [1] Mikael Wegmüller, Anci Sandås, Otavamedia Ltd, Leena Leppänen, Mauri Kaarre, and Ari Hirvonen, “Revista sobre Lifting Businesses WAY UP,” *WAY UP*, vol. 1, no. 1/2013, pp. 1–36, Jan. 2013, Accessed: Feb. 03, 2025. [Online]. Available: [https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos\\_y\\_documentos/3333/Konecranes\\_Way-Up\\_2013\\_ESP.pdf](https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/3333/Konecranes_Way-Up_2013_ESP.pdf)
- [2] M. Ghiji *et al.*, “A review of lithium-ion battery fire suppression,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 19, Oct. 2020, doi: 10.3390/EN13195117.
- [3] “Guía completa sobre métricas SoC y SoH de baterías.” Accessed: Feb. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.ufinebattery.com/blog/battery-state-of-charge-and-battery-state-of-health/>
- [4] J. Antonio, R. Manrique, A. : Carlos, and J. G. Lemus, “Grúas Portacontenedores,” 2015.
- [5] G. En, I. Mecánica, D. De, L. A. Alumna, and D. Alumno, “ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL DE BILBAO GRÚA PORTUARIA PARA ELEVACIÓN DE EMBARCACIONES DOCUMENTO 2. MEMORIA,” 2014.
- [6] “Herramientas Para Las Emisiones Portuarias Guía N.º 1: Evaluación de las emisiones portuarias.”
- [7] “Un nuevo paquete híbrido completa la gama de opciones de alimentación de Konecranes para grúas RTG | Ins-news.” Accessed: Aug. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.ins-news.com/es/100/832/2069/Un-nuevo-paquete-h%C3%ADbrido-completa-la-gama-de-opciones-de-alimentaci%C3%B3n-de-Konecranes-para-gr%C3%BAas-RTG--.htm>
- [8] “diferencia entre la grúa de contenedores con neumáticos de caucho y la grúa de contenedores montada sobre rieles | GRÚA ZOKE.” Accessed: Aug. 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.zoke-crane.com/es/posts/8740/>
- [9] C. Rovetto, J. Sutherland, Y. Martínez-López, and E. E. Cano, “ANÁLISIS DE LOS MOVIMIENTOS DE LAS OPERACIONES DE LAS GRÚAS RTG EN PUERTOS DE PANAMÁ USANDO SIMULADOR E-TECH,” *Anais do X Congresso Internacional de Conhecimento e Inovação (ciKi)*, vol. 1, Nov. 2020, doi: 10.48090/CIKI.V1I1.996.
- [10] “Grúas pórtico con neumáticos de caucho - (Grúa RTG) | WeiHuaGrúa.” Accessed: Feb. 01, 2025. [Online]. Available: <https://overheadcranemanufacturer.com/es/gantry-cranes/rtg-crane>
- [11] “Noticias - Entendiendo la función de un spreader de contenedores.” Accessed: Feb. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.maxtechcorp.com/news/understanding-the-function-of-a-container-spreader/>
- [12] “ZPMC Single-lift Spreader – Eu Jin Sdn Bhd.” Accessed: Feb. 14, 2025. [Online]. Available: [https://eujin.com.my/v2/project\\_category/zpmc-single-lift-spreader/](https://eujin.com.my/v2/project_category/zpmc-single-lift-spreader/)
- [13] “UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID Escuela politécnica superior”.
- [14] “(399) Start-Stop y Vehículos Híbridos - YouTube.” Accessed: Feb. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=uab205fWFF8>
- [15] “Batería - Enciclopedia de Energía.” Accessed: Aug. 14, 2024. [Online]. Available: [https://energyeducation.ca/Enciclopedia\\_de\\_Energia/index.php/Bater%C3%ADa](https://energyeducation.ca/Enciclopedia_de_Energia/index.php/Bater%C3%ADa)
- [16] “Corvus Orca ESS - Corvus Energy.” Accessed: Feb. 02, 2025. [Online]. Available: <https://corvusenergy.com/products/energy-storage-solutions/corvus-orca-energy/>
- [17] “Explicación de las baterías de iones de litio de NMC: la guía definitiva.” Accessed: Feb. 17, 2025. [Online]. Available: [https://www-ufinebattery-com.translate.goog/blog/complete-guide-to-nmc-lithium-ion-battery/?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=sge](https://www-ufinebattery-com.translate.goog/blog/complete-guide-to-nmc-lithium-ion-battery/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=sge)
- [18] “El análisis completo de la clasificación C de la batería de litio.” Accessed: Feb. 06, 2025. [Online]. Available: <https://www.bsl-battery.com/es/news/what-is-c-rating-of-solar-lithium-batteries/>
- [19] “Tasa C de baterías y carga rápida - Conocimiento - DS New Energy.” Accessed: Feb. 06, 2025. [Online]. Available: <https://www.dsisolar.com/info/c-rate-of-batteries-and-fast-charging-58458962.html>
- [20] “BESS: Qué son y cómo funcionan.” Accessed: Feb. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.enlight.mx/blog/bess-que-son-y-como-funcionan>
- [21] “¿Qué es y para qué sirve el sistema de gestión de baterías BMS?” Accessed: Feb. 06, 2025. [Online].

- Available: <https://www.cambioenergetico.com/blog/sistema-gestion-bateria-bms/>
- [22] “Corvus Energy presenta solución estandarizada de sala de baterías modular para contenedores - PortalPortuario.” Accessed: Feb. 02, 2025. [Online]. Available: <https://portalportuario.cl/corvus-energy-presenta-solucion-estandarizada-de-sala-de-baterias-modular-para-contenedores/>
- [23] “¿Qué es un grupo electrógeno? | Grupel.” Accessed: Aug. 14, 2024. [Online]. Available: <https://grupel.eu/es/faqs/que-es-un-grupo-electrogeno/>
- [24] “Diferencia entre un Generador Eléctrico y un Grupo Electrónico - Blog Renthal Services.” Accessed: Feb. 02, 2025. [Online]. Available: <https://renthalservices.com/blog/diferencia-entre-un-generador-electrico-y-un-grupo-electrogeno>
- [25] “¿QUÉ ES y CÓMO FUNCIONA un MOTOR DIESEL?” Accessed: Aug. 14, 2024. [Online]. Available: <https://motorkote.com.co/como-funciona-motor-diesel/>
- [26] “10 cosas que debes saber sobre los motores diésel Cummins - Dieselval.” Accessed: Feb. 02, 2025. [Online]. Available: <https://dieselval.com/10-cosas-que-debes-saber-sobre-los-motores-diesel-cummins/>
- [27] “Que es un motor eléctrico, como funciona y características.” Accessed: Aug. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.orionitalia.com/es/aplicaciones/industriales/que-es-un-motor-electrico>
- [28] “Como funciona un Motor Eléctrico, Historia, Futuro, Innovaciones.” Accessed: Feb. 02, 2025. [Online]. Available: <https://tecnoelite.co/como-funciona-un-motor-electrico/>
- [29] “Inducción magnética. Generador eléctrico.” Accessed: Aug. 14, 2024. [Online]. Available: <https://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/magnet/generador.html>
- [30] “500kVA Generador Stamford sin escobillas - China Stamford alternador, alternador sin escobillas.” Accessed: Feb. 02, 2025. [Online]. Available: [https://es.made-in-china.com/co\\_elephant/product\\_500kVA-Brushless-Stamford-Generator\\_erryinneg.html](https://es.made-in-china.com/co_elephant/product_500kVA-Brushless-Stamford-Generator_erryinneg.html)
- [31] “¿Qué son los gases de efecto invernadero o ‘greenhouse gases’?” Accessed: Aug. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-son-los-gases-de-efecto-invernadero-o-greenhouse-gases/>
- [32] “Gases de efecto invernadero: causas, efectos y sistemas de medición para la acción climática - Kunak.” Accessed: Feb. 02, 2025. [Online]. Available: <https://kunakair.com/es/gases-de-efecto-invernadero-y-accion-climatica/>
- [33] “Oiltanking: Petróleo y productos derivados del petróleo.” Accessed: Aug. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.oiltanking.com/es/publicaciones/glosario/petroleo-y-productos-derivados-del-petroleo.html>
- [34] “Conjunto de concepto de diseño de petróleo | Vector Gratis.” Accessed: Feb. 02, 2025. [Online]. Available: [https://www.freepik.es/vector-gratis/conjunto-concepto-diseno-petroleo\\_3948910.htm](https://www.freepik.es/vector-gratis/conjunto-concepto-diseno-petroleo_3948910.htm)
- [35] “(29) ¿Qué son los variadores de frecuencia y cómo pueden ayudarle a reducir el consumo y prolongar la vida útil de sus equipos eléctricos? | LinkedIn.” Accessed: Nov. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/qu%C3%A9-son-los-variadores-de-frecuencia-y-c%C3%B3mo-pueden-ayudarte/>
- [36] “Variadores de Velocidad SIEMENS Compacto Sinamics G120C Trifásico comunicación PROFINET/EtherNet IP - Gonzaga & Rodriguez Cia. Ltda.” Accessed: Feb. 02, 2025. [Online]. Available: <https://electricoindustrial.com.ec/producto/variadores-de-velocidad-sinamics-g120c-trifasico-comunicacion-profinet-ethernet-ip/>
- [37] “FILTROS LCL MANUAL DE INSTRUCCIONES (M98121701-01-09A)”.
- [38] “VACON NXA 0004 Active Front End Unit Instruction Manual.” Accessed: Feb. 14, 2025. [Online]. Available: <https://hmn.manuals.plus/vacon/nxa-0004-active-front-end-unit-manual>
- [39] “SKKE 600/12 - Módulo de diodos 600A 1200V Reemplazo Semikron – AS ENERGI.” Accessed: Feb. 15, 2025. [Online]. Available: <https://asenergi.com/en/products/diode-modules-skke/skke-600-12.html#more>
- [40] “SKKE 600F12 - Fast Diode Module 600A 1200V Replacement Semikron – AS ENERGI.” Accessed: Feb. 15, 2025. [Online]. Available: <https://asenergi.com/en/products/diode-modules-skke/skke-600f12.html>
- [41] Siemens AG, “SINAMICS G130,” 2010.

- [42] PETROECUADOR, “PRECIOS DE VENTA EN TERMINAL PARA LAS COMERCIALIZADORAS SECTOR AÉREO SECTORES PESQUERO Y ATUNERO SECTOR AUTOMOTRIZ CALIFICADAS Y AUTORIZADAS A NIVEL NACIONAL,” Dec. 11, 2024, *GUAYAQUIL*. Accessed: Feb. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.eppetroecuador.ec/wp-content/uploads/2024/12/ESTRUCTURA-DE-PRECIOS-DICIEMBRE-2024.pdf>
- [43] “Emisiones de dióxido de carbono | US EPA.” Accessed: Feb. 24, 2025. [Online]. Available: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono>
- [44] “Cómo calcular las emisiones de CO2 de Vehículos | MCF Blog.” Accessed: Feb. 24, 2025. [Online]. Available: <https://connectedfleet.michelin.com/es/blog/calcular-emisiones-de-co2/>
- [45] A. Ramos, S. Lisbeth, and K. Tutor, “UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR INGENIERA AMBIENTAL”.
- [46] “BatteryPack BatteryPack-Hybrid-Hybrid More Performance Less Emissions BatteryPack-BE With large battery BatteryPack-Hybrid With medium battery and smal diesel genset BatteryPack-FE With small battery and grid power”.
- [47] “RTG Hybrid Power Pack | Konecranes.” Accessed: Feb. 06, 2025. [Online]. Available: <https://www.konecranes.com/port-equipment-services/port-services/ecolifting/rtg-hybrid-power-pack>
- [48] “Corvus Energy ofrecerá una solución de batería de ultraalta potencia para equipos portuarios híbridos - Corvus Energy.” Accessed: Feb. 06, 2025. [Online]. Available: <https://corvusenergy.com/corvus-energy-to-deliver-ultra-high-power-battery-solution-for-hybrid-port-equipment/>
- [49] “Corvus Energy: impulsando un futuro limpio.” Accessed: Feb. 06, 2025. [Online]. Available: <https://corvusenergy.com/>
- [50] “A Greener Solution CASE STUDY: Hybrid Rubber Tired Gantry Cranes Hybrid Power Cleaning up Port Operations Hybrid Rubber Tired Gantry (RTG) Cranes Type: 35 and 40 LT Port Crane”.
- [51] “Corvus Orca ESS - Energía Corvus.” Accessed: Feb. 06, 2025. [Online]. Available: <https://corvusenergy.com/products/energy-storage-solutions/corvus-orca-energy/>
- [52] H. Zhao, S. Guo, and H. Zhao, “Comprehensive Performance Assessment on Various Battery Energy Storage Systems,” *Energies* 2018, Vol. 11, Page 2841, vol. 11, no. 10, p. 2841, Oct. 2018, doi: 10.3390/EN11102841.
- [53] “Corvus Energy to expand production in response to high demand for energy storage - Corvus Energy.” Accessed: Feb. 11, 2025. [Online]. Available: <https://corvusenergy.com/corvus-energy-to-expand-production-in-response-to-high-demand-for-energy-storage/>
- [54] “Utilizza e redistribuisci l’energia in modo efficiente”.
- [55] “VACON-LCL-0261-5-B0R011T | VACON® LCL, REG & RLC Filter | VACON® Filters and Braking Options | Filtros y opciones de frenado | Variadores de frecuencia | Danfoss Spain Product Store.” Accessed: Feb. 18, 2025. [Online]. Available: <https://store.danfoss.com/es/es/Variadores-de-frecuencia/Filtros-y-opciones-de-frenado/VACON%C2%AE-Filters-and-Braking-Options/VACON%C2%AE-LCL%2C-REG-%26-RLC-Filter/VACON-LCL-0261-5-B0R011T/p/181B0532>
- [56] “VACON Common DC Bus NXI , NXB.” Accessed: Feb. 18, 2025. [Online]. Available: [https://www.alandcontrols.com/pages/vacon-common-dc-bus-nxi-nxb?srsltid=AfmBOoq8TuCErJxKk8\\_V7t5njBdZulVUIQ\\_OGwWlIkf6P1NQWrFURWT3](https://www.alandcontrols.com/pages/vacon-common-dc-bus-nxi-nxb?srsltid=AfmBOoq8TuCErJxKk8_V7t5njBdZulVUIQ_OGwWlIkf6P1NQWrFURWT3)
- [57] “Cómo cargar baterías de litio | Jungheinrich PROFISHOP.” Accessed: Feb. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.jungheinrich-profishop.es/es/guia-profi/baterias-de-litio-recargables/>
- [58] “Cómo calcular el tiempo de carga de la batería - Jackery.” Accessed: Feb. 10, 2025. [Online]. Available: [https://www-jackery-com.translate.goog/blogs/knowledge/how-to-calculate-battery-charging-time?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=sge](https://www-jackery-com.translate.goog/blogs/knowledge/how-to-calculate-battery-charging-time?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=sge)
- [59] “Cómo calcular el tiempo de carga y descarga de la batería de litio-xmacey.com.” Accessed: Feb. 17, 2025. [Online]. Available: [https://es.xmacey.com/blog/how-to-calculate-the-charging-and-discharging-time-of-lithium-battery\\_b52](https://es.xmacey.com/blog/how-to-calculate-the-charging-and-discharging-time-of-lithium-battery_b52)

## ANEXOS

Tabla 18: Lista de precios de los componentes electrónicos a usar en el sistema híbrido

Ítem	Descripción	Cantidad	Precio unitario (\$)	Precio total (\$)
1	AFE VACON NXA_0261 5 A0T02SF	1	20000.00	20000.00
2	INVERTER VACON NXI01405-A0T0CSS- A1A2000000	1	14000.00	14000.00
3	FILTRO LCL VACON- LCL-0261-5-B0R011T	1	8104.00	8104.00
4	SISTEMA CORVUS ORCA ESS ENERGY	1	40000.00	40000.00
5	MÓDULO DE DIODO SKKE600F12	2	399.00	798.00
6	MÓDULO DE DIODO SKKE301F12	2	119.67	239.34
7	FUSIBLES AC NH2UD69V500PV	3	203.49	610.47
8	FUSIBLES DC PC73UD13C500TF	2	199.00	398.00
9	RESISTENCIAS SPN4001-65W 47R	2	154.97	309.94
<b>TOTAL</b>				<b>84459.75</b>