



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD

TEMA:

**Diseño y análisis de factibilidad del cambio de motores de combustión
a diésel por motores eléctricos en planta de bombeo de crudo en
territorio amazónico**

AUTOR:

Quispe Bravo, Guillermo Gabriel

Trabajo de Integración Curricular previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO

TUTOR:

Ing. Medina Moreira, Washington Ph.D.

Guayaquil, Ecuador

2024



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr.
Quispe Bravo, Guillermo Gabriel como requerimiento para la obtención del
título de **INGENIERO ELÉCTRICO**.

TUTOR

Ing. Medina Moreira, Washington Ph.D.

DIRECTOR DE CARRERA

Ing. Bohórquez Escobar, Celso Bayardo, Ph.D

Guayaquil, 02 de septiembre del 2024



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Quispe Bravo, Guillermo Gabriel**

DECLARÓ QUE:

El trabajo de integración curricular “**Diseño y análisis de factibilidad del cambio de motores de combustión a diésel por motores eléctricos en planta de bombeo de crudo en territorio amazónico**” previo a la obtención del Título de **INGENIERO ELÉCTRICO**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Integración Curricular referido.

EL AUTOR

Quispe Bravo, Guillermo Gabriel

Guayaquil, 02 de septiembre del 2024



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD

AUTORIZACIÓN

Yo, **Quispe Bravo, Guillermo Gabriel**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Integración Curricular: **“Diseño y análisis de factibilidad del cambio de motores de combustión a diésel por motores eléctricos en planta de bombeo de crudo en territorio amazónico”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

EL AUTOR

Quispe Bravo, Guillermo Gabriel

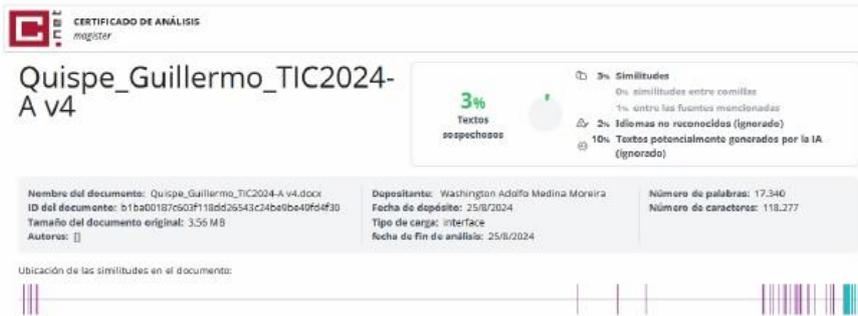
Guayaquil, 02 de septiembre del 2024

REPORTE ANTIPLAGIO COMPILATIO



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD TÉCNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD
TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR
INFORME SOFTWARE ANTIPLAGIO

COMPILATIO



Reporte Compilatio del trabajo de titulación de la Carrera INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD denominado: **“Diseño y análisis de factibilidad del cambio de motores de combustión a diésel por motores eléctricos en planta de bombeo de crudo en territorio amazónico”**, del estudiante Quispe Bravo, Guillermo Gabriel se encuentra al 3% de coincidencias.

Atentamente,

Ing. WASHINGTON MEDINA MOREIRA, PhD
DOCENTE-TUTOR

DEDICATORIA

A mis Hijos y mis padres quienes han sido la motivación para seguir con mis estudios y cumplir cada una de mis metas.

EL AUTOR

Quispe Bravo, Guillermo Gabriel

AGRADECIMIENTO

A mi tutor quien con sus enseñanzas y palabras de motivación ha forjado en mí una profesional en el sector eléctrico.

EL AUTOR

Quispe Bravo, Guillermo Gabriel

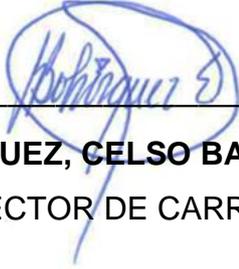


**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____


Ing, BOHÓRQUEZ, CELSO BAYARDO, Ph.D
DIRECTOR DE CARRERA

f. _____

Mgs. UBILLA GONZALEZ, RICARDO XAVIER
COORDINADOR DEL ÁREA

f. _____

Mgs. LUIS PALAU DE LA ROSA
OPONENTE

Guayaquil, 02 de septiembre del 2024

Índice General

Índice de Figuras	XI
Índice de Tablas	XII
Capítulo 1: Descripción General del TIC	2
1.1. Introducción.....	2
1.2. Antecedentes.	3
1.3. Definición del Problema.....	5
1.4. Justificación del Problema.....	6
1.5. Objetivos del Problema de Investigación.....	8
1.5.1. Objetivo General.....	8
1.5.2. Objetivos Específicos.....	8
1.6. Hipótesis.	8
1.7. Metodología de Investigación.....	9
Capítulo 2: Fundamentación Teórica	11
2.1. Contexto histórico y geográfico de la industria petrolera en la Amazonía ecuatoriana	11
2.2. Procesos de extracción y bombeo de crudo.	12
2.3. Impacto ambiental de las operaciones petroleras.....	14
2.4. Visión general de los motores de combustión y eléctricos.....	17
2.5. Motores de combustión interna.	19
2.6. Motores de combustión interna a diésel utilizadas en la industria petrolera.....	22
2.6.1. Principios de funcionamiento.	23
2.6.2. Aplicaciones en la industria petrolera.....	25
2.6.3. Ventajas y desventajas en plantas de bombeo.	27
2.7. Motores eléctricos (e-Motors).....	30
2.8. Ciclo de vida de motores de combustión vs. motores eléctricos	31
2.8.1. Ventajas y Desventajas en el Contexto de la Planta de Bombeo de Crudo.....	34

Capítulo 3: Diseño, Implementación y resultados	35
3.1. Diagnóstico del Desempeño Actual de los Motores de Combustión a Diésel en la Planta de Bombeo de Crudo	35
3.1.1. Estudio del consumo de combustible y la eficiencia energética	38
3.1.2. Costes de funcionamiento y mantenimiento.....	41
3.2. Análisis de frecuencia de fallos y emisiones contaminantes	42
3.2.1. Análisis de la frecuencia de fallos y eficiencia operativa	42
3.2.2. Análisis de las emisiones contaminantes y cumplimiento de la normativa.....	44
3.3. Estudio de Capacidad de Generación y Requerimientos de Energía para Conversión a Motores Eléctricos	45
3.3.1. Capacidad del Generador Existente	46
3.3.2. Requerimiento energético de los motores eléctricos propuestos	46
3.4. Propuesta.....	47
3.4.1. Evaluación de Requisitos Operativos y Técnicos.....	47
3.4.2. Elección de motor eléctrico	48
3.4.3. Justificación de la selección del motores WEG de inducción trifásica W60.....	53
3.5. Diseño del sistema de control de motores eléctricos en la estación de bombeo Amazonas.	55
3.6. Factibilidad de la implementación de motores eléctricos en la estación de bombeo Amazonas.	58
Conclusiones.....	61
Recomendaciones.....	62
Bibliografía.....	63

Índice de Figuras

Capítulo 2

Figura 2. 1: Diagrama de esquemático de un motor de combustión interna a diésel.	18
Figura 2. 2: Motor eléctrico Mahle de par continuo superior (Superior Continuous Torque, SCT).	19
Figura 2. 3: Motor Peugeot Grand Prix de 4 tiempos creado en 1913.	20
Figura 2. 4: Motor de combustión interna de 1.5 L y 8 cilindros en línea junto a su creador Miller.	21
Figura 2. 5: Modelo 3D-CFD de un cilindro de un motor de combustión interna.	22
Figura 2. 6: Parámetros de respuesta al escalón de sistemas lineales.	24
Figura 2. 7: Esquema de una estación de bombeo de petróleo con motores diésel.	27
Figura 2. 8: Estructura del e-Motor convencional BLDC para una EOP.	31
Figura 2. 9: Diagrama del ciclo de vida de un vehículo eléctrico.	32
Figura 2. 10: Diagrama del ciclo de vida de un vehículo de motor de combustión interna.	32

Capítulo 3

Figura 3. 1: Rutas de las estaciones de bombeo de crudo pesado de OCP.	35
Figura 3. 2: Planta de bombeo de petróleo en estación Amazonas.	37
Figura 3. 3: Estructura interna de un motor PMSM.	49
Figura 3. 4: Estructura interna de un motor de inducción trifásico vista (a) 3D y (b) 2D.	50
Figura 3. 5: Estructura interna de un motor síncrono de reluctancia conmutada electrónicamente.	50
Figura 3. 6: Motor eléctrico de inducción eléctrica W60 de la marca WEG.	53
Figura 3. 7: Estructura interna del motor W60.	54
Figura 3. 8: Diagrama de bloques del diseño del sistema de control de motores eléctricos W60 y bombas booster en la estación Amazonas.	57

Índice de Tablas

Capítulo 3

Tabla 3. 1: Desempeño actual de los motores de combustión Diésel en la planta de bombeo de crudo de la Estación Amazonas	35
Tabla 3. 2: Comparación entre el consumo de combustible y eficiencia energética de los motores de combustión interna y proyección de motores eléctricos	39
Tabla 3. 3: Comparación de costos entre motores diésel y eléctricos.	40
Tabla 3. 4: Comparación de costos entre motores diésel y eléctricos.	41
Tabla 3. 5: Comparación de costos entre motores diésel y eléctricos.	43
Tabla 3. 6: Comparación de emisiones contaminantes y cumplimiento de normativa.....	45
Tabla 3. 7: Comparativa de tecnologías disponibles de motores eléctricos. 51	
Tabla 3. 8: Comparativa de tecnologías disponibles de motores eléctricos. 52	
Tabla 3. 9: Costos de inversión estimados para la implementación de motores eléctricos WEG modelo W60 en la planta de bombeo de crudo.....	59

Resumen

Este trabajo de integración curricular, denominado "Diseño y análisis de factibilidad del cambio de motores de combustión a diésel por motores eléctricos en una planta de bombeo de crudo en el territorio amazónico", evalúo la viabilidad técnica y económica de reemplazar los motores diésel por motores eléctricos en una planta de bombeo de crudo. El estudio incluyó la identificación de tecnologías eléctricas, el análisis de costos de implementación y operación, y la comparación con los sistemas actuales de combustión. El diagnóstico de los motores diésel reveló problemas significativos, como el alto consumo de combustible, elevados costos de mantenimiento y operación, frecuentes fallos mecánicos y la emisión de contaminantes que ponen en riesgo el entorno ambiental y podrían violar normativas vigentes. En base a estos resultados, se propuso la implementación de motores eléctricos WEG W60, que ofrecen una solución más eficiente y sostenible desde el punto de vista operativo, financiero y medioambiental. El análisis concluyó que el cambio a motores eléctricos no solo disminuye los costos de operación y las emisiones contaminantes, sino que también mejora la fiabilidad del sistema, lo que permite una mayor competitividad de la planta en el futuro. La adopción de motores eléctricos garantiza una mayor eficiencia energética y promueve el desarrollo sostenible en una región tan vulnerable como el Amazonas.

Palabras claves: Motores Eléctricos, Planta de Bombeo, Bombas Elevadoras, Generadores Eléctricos, Sistemas de Control, Eficiencia Energética

Abstract

This curricular integration project, titled "Design and Feasibility Analysis of Replacing Diesel Combustion Engines with Electric Motors in a Crude Oil Pumping Plant in the Amazon Region", assessed the technical and economic viability of replacing diesel engines with electric motors in a crude oil pumping plant. The study involved identifying suitable electric technologies, analyzing implementation and operational costs, and comparing them with existing combustion systems. The diagnosis of the diesel engines revealed significant issues, including high fuel consumption, elevated maintenance and operational costs, frequent mechanical failures, and pollutant emissions that endanger the environment and could violate current regulations. Based on these findings, the implementation of WEG W60 electric motors was proposed, offering a more efficient and sustainable solution from an operational, financial, and environmental perspective. The analysis concluded that switching to electric motors not only reduces operational costs and pollutant emissions but also improves system reliability, enhancing the plant's competitiveness in the long term. The adoption of electric motors ensures greater energy efficiency and fosters sustainable development in a region as vulnerable as the Amazon.

Keywords: Electric Motors, Pumping Plant, Booster Pumps, Electric Generators, Control Systems, Energy Efficiency

Capítulo 1: Descripción General del TIC

1.1. Introducción.

La migración a fuentes de energía de menor impacto ambiental y más eficientes se ha convertido en una prioridad a escala mundial como consecuencia de la creciente amenaza climática y los retos que plantea la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero (IRENA, 2021; Roa G., 2018).

Las estaciones de bombeo de petróleo crudo, tan necesarias para transportar el petróleo (Neumann, 2023) desde los yacimientos hasta los terminales de procesamiento y exportación, se han basado en el uso de motores de combustión interna diésel (Padovan et al., 2023). Por otra parte, los motores diésel generan enormes emisiones contaminantes y unos costes de funcionamiento muy elevados.

Ante este panorama, este trabajo se enfoca en el "Diseño y análisis de factibilidad del cambio de motores de combustión a diésel por motores eléctricos en planta de bombeo de crudo en territorio amazónico". La región amazónica es una de las zonas con mayor biodiversidad del planeta y debido a su ecosistema sensible y a su importancia para la regulación del clima mundial, presenta desafíos específicos. (De Moraes et al., 2024; García-Villacís et al., 2021).

La operación de plantas de bombeo de crudo en esta región implica una cuidadosa consideración de los impactos ambientales. por ejemplo, el trabajo de (Gevorkov et al., 2022) se centra principalmente en la productividad de las plantas de bombeo equipadas con dos tipos de máquinas eléctricas conocidas como motores de inducción y de reluctancia síncrona.

Aunque los motores diésel no sólo contaminan el aire, sino que además generan ruido y provocan derrames de combustible con efectos devastadores para el ecosistema local. Como alternativa prometedora, los motores

eléctricos contribuyen a mitigar estos problemas, mejorando la operatividad y reduciendo costes a largo plazo.

La intención del presente estudio consiste en analizar de forma integral la factibilidad técnico-económica del reemplazo de motores diésel por motores eléctricos en una planta de bombeo de crudo ubicada en el territorio amazónico. Para esto es necesario hacer un análisis detallado de los motores de combustión existentes, selección minuciosa de las alternativas eléctricas, diseño del nuevo sistema y evaluación comparativa de los costos y beneficios asociados. Por otra parte, se abordarán los desafíos específicos de la implementación de esta tecnología en una región remota y sensible desde el punto de vista ecológico como es la Amazonia.

La transición hacia motores eléctricos en plantas de bombeo de crudo como en Lie, (2024), no solo tiene el potencial de reducir emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también puede disminuir significativamente los costos operativos debido a la mayor eficiencia y menor necesidad de mantenimiento de los motores eléctricos. Adicionalmente, la reducción del ruido y la eliminación de los riesgos asociados con el manejo de combustibles fósiles son beneficios adicionales que pueden mejorar las condiciones de trabajo y reducir el impacto ambiental negativo (Chen et al., 2019)

El presente trabajo de integración curricular se estructura de la siguiente manera: en primer lugar, se presentan los antecedentes y el contexto que motivan este estudio, seguido por una definición clara del problema que se pretende abordar. A continuación, se justifica la relevancia del problema y se establecen los objetivos de la investigación. La metodología utilizada para alcanzar estos objetivos se describe detalladamente, y finalmente, se propone hipótesis.

1.2. Antecedentes.

Tradicionalmente, el sector petrolero representa a escala mundial la mayor fuente de energía, no obstante, también es el mayor responsable de la contaminación ambiental.

Según Yue & Liu, (2023) Los motores de combustión interna, alimentados principalmente por diésel, han sido la tecnología predominante para el funcionamiento de equipos industriales, incluyendo las plantas de bombeo de crudo. Estos motores son conocidos por su robustez y capacidad para operar en condiciones extremas, pero también por sus emisiones de dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas, que contribuyen al calentamiento global y la contaminación del aire. (Qi et al., 2023)

Durante los últimos diez años se ha observado un crecimiento de la demanda de sistemas industriales electrificados para reducir el impacto ambiental vinculado a las operaciones de extracción de petróleo. En este sentido, los motores eléctricos tienden a ser más eficientes y requieren un mantenimiento menor que los motores diésel, por lo que, a largo plazo, pueden suponer un ahorro económico. (Muñoz-Maldonado et al., 2023)

Diversos estudios han demostrado los beneficios de la electrificación en distintas aplicaciones industriales. Por ejemplo, en el sector del transporte, la transición a vehículos eléctricos ha mostrado una reducción notable las emisiones de CO y CO₂ más bajas, en torno al 20%, mientras que los VEH y los PHEV muestran reducciones significativas en comparación con los vehículos de combustión interna. (Veza et al., 2023)

Otro ejemplo de beneficios en el sector industrial es la minería, que han migrado a utilizar maquinas eléctricas para la explotación minera lo que ha contribuido a reducir costos de combustible y mantenimiento, así como también a mejorar la calidad del aire en las minas subterráneas. El funcionamiento de las plantas de bombeo de crudo en la Amazonia implica retos específicos a causa del ecosistema y las limitaciones logísticas que supone la ubicación remota de las plantas de bombeo. La contaminación del aire y el ruido generado por los motores de combustión pueden tener efectos adversos sobre la fauna y flora locales. Además, el transporte y almacenamiento de combustible diésel en estas áreas remotas incrementan el riesgo de derrames y accidentes ambientales.

Ahora bien, la migración a motores eléctricos en las instalaciones de bombeo de crudo de la Amazonia puede suponer una alternativa para resolver estos problemas. Con todo, se requiere de un análisis exhaustivo que permita determinar la factibilidad técnica de la transición, lo que incluye la compatibilidad de los motores eléctricos con la infraestructura actual y el estado operativo de la planta. Además, resulta fundamental un detallado análisis económico que permita evaluar los costes de inversión iniciales y el ahorro en energía potencial a largo plazo.

1.3. Definición del Problema.

La planta de bombeo de crudo ubicada en el territorio amazónico opera actualmente con motores de combustión interna “Cummins” o “Detroit” alimentados por diésel. Estos motores, aunque eficientes en términos de su capacidad para operar en condiciones extremas, son una fuente significativa de un 70% de emisiones de gases contaminantes, incluyendo CO₂ y NO_x. Estas emisiones no solo contribuyen al cambio climático global, sino que también tienen un impacto negativo en la calidad del aire local y la salud de los trabajadores y comunidades cercanas.

Por otra parte, los motores diésel producen mucho ruido; por ejemplo, un nivel de ruido de 22 dB es perjudicial no sólo para la fauna local, sino también para el equilibrio ecológico de la zona. El tratamiento del combustible diésel en regiones tan vulnerables como la Amazonia plantea también riesgos considerables, como derrames accidentales o la contaminación del suelo y el agua, que provocan consecuencias nefastas y de larga duración en el medio ambiente.

Por otro lado, los costos operativos y de mantenimiento de los motores de combustión son significativamente más altos en comparación con los motores eléctricos. En general, los motores eléctricos requieren menos mantenimiento debido a que tienen menos piezas móviles. Por ejemplo, un motor eléctrico típico cuesta alrededor de \$0.31 por km en mantenimiento y reparaciones durante su vida útil, mientras que un vehículo con motor diésel cuesta aproximadamente \$0.61 por km.

Para las empresas que utilizan estos motores, el diésel es un tipo de carburante costoso ya que no está subvencionado por el Estado ecuatoriano, en especial si se considera su transporte y almacenamiento en zonas remotas. Además, el mantenimiento de los motores también es costoso y se efectúa con frecuencia: cambios de aceite, filtros y reparaciones mecánicas.

Si las plantas de bombeo de petróleo estuvieran totalmente equipadas con motores eléctricos, se reducirían considerablemente los costes de funcionamiento y mantenimiento. En efecto, los motores eléctricos están exentos de emisiones contaminantes directas, no producen ruido y sus costes de funcionamiento y mantenimiento son más bajos. Ahora bien, implementar motores eléctricos en una planta de bombeo en territorio amazónico implica una serie de dificultades técnicas y logísticas que hay que evaluar detenidamente.

1.4. Justificación del Problema.

Para la transición de motores de combustión a diésel por motores eléctricos en una planta de bombeo de crudo en el territorio amazónico se sustenta en varios factores clave: la reducción de emisiones contaminantes, la disminución de costos operativos y de mantenimiento, y la mitigación de impactos ambientales negativos en una región ecológicamente sensible.

- **Disminución de emisiones de agentes contaminantes:** los motores diésel son una fuente de gases contaminantes de efecto invernadero, tales como el CO₂, y de sustancias nocivas para la atmósfera, por ejemplo, NO_x y material particulado. Estos agentes contaminantes propician el cambio climático y afectan negativamente a las personas y a su entorno. Con la implementación de motores eléctricos en la planta de bombeo de petróleo se eliminan las emisiones directas de estos gases y se aumenta significativamente la calidad del aire en la región. Esto es particularmente relevante en el territorio amazónico, donde la protección del ecosistema es crucial para la biodiversidad y el equilibrio climático global. Todo esto se hace para cumplir con la normativa ISO 10849. La norma establece los métodos para evaluar

los niveles de emisiones de gases contaminantes procedentes de los motores diésel de los equipos móviles no de carretera. La norma incluye métodos de medición de gases tóxicos como NOx, CO, HC y partículas.

- **Disminución de Costos Operativos y de Mantenimiento:** el diésel es un combustible costoso \$ 2.55 por galón, y su transporte y almacenamiento en áreas remotas como la Amazonía incrementa aún más los costos. Los motores de combustión también requieren mantenimiento frecuente, lo que genera gastos adicionales y tiempos de inactividad operativa. Los motores eléctricos, en cambio, son más eficientes en términos de consumo de energía y tienen menores necesidades de mantenimiento. Esto se traduce en una reducción significativa de los costos operativos a largo plazo, lo que podría mejorar la rentabilidad de la planta de bombeo de crudo. (Romero et al., 2024)
- **Mitigación de Impactos Ambientales:** el ruido generado por los motores de combustión puede tener efectos negativos sobre la fauna local y alterar el comportamiento de las especies animales. Los motores eléctricos son mucho más silenciosos, lo que contribuye a un entorno de trabajo más seguro y saludable para los empleados y reduce la perturbación del hábitat natural. Además, la eliminación del manejo de combustible diésel disminuye el riesgo de derrames y contaminación del suelo y el agua, protegiendo así el delicado ecosistema amazónico. En el capítulo 2 se describirá la Legislación Ambiental en Ecuador, con énfasis en la Constitución, la Ley de Gestión Ambiental y el Código Orgánico del Ambiente.
- **Viabilidad Técnica y Logística:** Si bien la implementación de motores eléctricos representa un reto técnico, su tecnología en los últimos años ha evolucionado considerablemente. Estos motores eléctricos son muy eficaces, robustos y capaces de trabajar en una gran variedad de condiciones ambientales. Por otra parte, en la región amazónica la presencia de fuentes de energía renovables, por ejemplo, la energía hidroeléctrica, puede contribuir a la transición hacia un sistema eléctrico de bajo impacto ambiental y sostenible.

1.5. Objetivos del Problema de Investigación.

1.5.1. Objetivo General.

Evaluar la factibilidad técnica y económica de la conversión de motores de combustión diésel a motores eléctricos en una planta de bombeo de crudo en el territorio amazónico. Este análisis se llevará a cabo mediante un estudio detallado que abarque la identificación y selección de tecnologías eléctricas adecuadas, el cálculo de los costos de implementación y operación, y la comparación con los sistemas actuales de combustión.

1.5.2. Objetivos Específicos.

- Definir los fundamentos teóricos que fundamentan la transición de motores de combustión interna a motores eléctricos en plantas industriales, incluyendo principios de eficiencia energética, impactos ambientales de los combustibles fósiles, y ventajas de la electrificación.
- Establecer un diagnóstico exhaustivo del desempeño actual de los motores de combustión a diésel en la planta de bombeo de crudo, analizando el consumo de combustible, costos operativos y de mantenimiento, frecuencia de fallas, y emisiones contaminantes.
- Proponer la implementación de motores eléctricos adecuados que cumplan con los requisitos operativos y técnicos de la planta de bombeo de crudo.

1.6. Hipótesis.

La hipótesis central: La conversión de motores de combustión a diésel por motores eléctricos en una planta de bombeo de crudo en el territorio amazónico es técnica y económicamente viable.

En caso de que se cumpla la hipótesis planteada, se reducirán las emisiones de gases de efecto invernadero, los costes de explotación y mantenimiento serán menores y las operaciones serán más sostenibles desde el punto de vista medioambiental. La propuesta consiste en que los motores eléctricos de última generación, con una infraestructura eléctrica optimizada, ofrezcan un rendimiento superior o igual al de los motores diésel con ventajas

adicionales relacionadas con la eficiencia energética y los impactos negativos en el ecosistema amazónico.

La hipótesis planteada se comprobará mediante el análisis de los motores eléctricos disponibles, así como con la configuración de un sistema eléctrico compatible con las condiciones de funcionamiento de la planta y mediante una evaluación comparativa de los costos y beneficios asociados a la implantación de los motores eléctricos. Con ello se trata de demostrar que la inversión inicial se recuperará rápidamente gracias a la reducción de los costos de operación y mantenimiento, y también que la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero permitirá preservar el medio ambiente y proteger la salud de la población amazónica.

1.7. Metodología de Investigación.

La metodología de investigación propuesta abarca un análisis integral y multidisciplinario para evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de la conversión de motores de combustión a diésel por motores eléctricos en una planta de bombeo de crudo en el territorio amazónico. Los resultados de este estudio proporcionarán una base sólida para la toma de decisiones y la implementación de soluciones sostenibles en la industria petrolera. A continuación, se detallan los pasos y técnicas que se utilizarán en el estudio:

Revisión de Literatura: reunir información y antecedentes sobre tecnologías de motores eléctricos y diésel, así como estudios previos sobre conversiones similares. Marco teórico sólido que respalde la investigación y justifique la necesidad de la conversión.

Análisis Técnico: selección y evaluación comparativa de las tecnologías disponibles para la sustitución de los motores diésel por motores eléctricos. Diseño de un sistema para la instalación de motores eléctricos, con planos y especificaciones técnicas.

Análisis Económico: determinación de los precios asociados a la adquisición e instalación de motores eléctricos. Análisis comparativo de los precios de funcionamiento y mantenimiento de los motores eléctricos frente a los motores diésel.

Análisis Ambiental: análisis comparativo de las emisiones contaminantes y otros gases de efecto invernadero (antes y después de la reconversión). Aplicación de las normas ISO y la regulación medioambiental local e internacional.

Estudio de Factibilidad: obtención y evaluación de los resultados obtenidos desde el punto de vista técnico, económico y medioambiental. Análisis de factibilidad técnica, económica y medioambiental del proyecto.

Capítulo 2: Fundamentación Teórica

2.1. Contexto histórico y geográfico de la industria petrolera en la Amazonía ecuatoriana

La Amazonía ecuatoriana, también conocida como el Oriente, es una región de inmensa importancia ecológica y cultural que abarca aproximadamente 116,000 km², lo que representa alrededor del 45% del territorio nacional (Mena et al., 2006). Esta región se caracteriza por su extraordinaria biodiversidad, albergando una gran variedad de especies de flora y fauna, muchas de las cuales son endémicas (Bass et al., 2010).

El desarrollo de la industria petrolera del Ecuador data de principios del siglo XX, época en que compañías multinacionales realizaban las primeras exploraciones. Pero fue en los años sesenta cuando se produjo el verdadero boom petrolero, que marcó un punto de inflexión en la economía y el desarrollo del país (Larrea M., 2006).

El hito más significativo en esta historia fue el descubrimiento de yacimientos petroleros en 1967 por el consorcio Texaco-Gulf en la zona de Lago Agrio, en la provincia de Sucumbíos (Fontaine, 2003). Este hallazgo transformó radicalmente la dinámica económica y social no solo de la región amazónica sino de todo Ecuador. El primer pozo productivo, conocido como Lago Agrio 1, comenzó su producción en 1972, inaugurando una nueva era en la historia económica del país (Acosta, 2009).

Desde entonces, la industria petrolera se ha convertido en un pilar fundamental de la economía ecuatoriana. En las décadas siguientes, el petróleo llegó a representar más del 50% de las exportaciones del país y una parte significativa de los ingresos fiscales, convirtiéndose en el motor principal del crecimiento económico ecuatoriano (Larrea M., 2006).

A la industria petrolera ecuatoriana no le resulta tan fácil la extracción de petróleo como parece a causa de la geografía de la Amazonia ecuatoriana.

Las condiciones geográficas de la Amazonia ecuatoriana plantean retos únicos a la industria petrolera.

A la industria petrolera ecuatoriana no le resulta tan fácil la extracción de petróleo como parece a causa de la geografía de la Amazonia ecuatoriana. Además, tiene una topografía compleja, con áreas selváticas y numerosas zonas fluviales muy lluviosas. Todo esto ha hecho necesario que se desarrollen políticas y tecnologías especializadas para los trabajos de perforación y extracción de petróleo en la zona. (Baby et al., 2014).

La región petrolera amazónica se divide en varios bloques de exploración y explotación, distribuidos principalmente en las provincias de Sucumbíos, Orellana y Pastaza. Estos bloques han sido operados tanto por empresas estatales como por compañías privadas internacionales a lo largo de las décadas (Bernal, 2011).

2.2. Procesos de extracción y bombeo de crudo.

La extracción de petróleo en la Amazonía ecuatoriana es un proceso complejo que involucra varias etapas, cada una con sus propios desafíos técnicos y ambientales:

- a) Exploración: Esta fase inicial implica la realización de estudios geológicos y geofísicos para identificar potenciales yacimientos de petróleo. Las técnicas más comunes incluyen:
 - Estudios sísmicos: Se utilizan ondas sonoras para crear imágenes del subsuelo y detectar estructuras geológicas que podrían contener hidrocarburos (Baby et al., 2014).
 - Perforaciones exploratorias: Se realizan perforaciones de pozos para confirmar la presencia de petróleo y evaluar la viabilidad comercial del yacimiento (Finer et al., 2008).

- b) Perforación: Una vez identificado un yacimiento prometedor, se procede a la perforación de pozos de desarrollo. Este proceso implica:

- Preparación del sitio: Se despeja un área para la plataforma de perforación y se construyen vías de acceso.
 - Perforación direccional: Técnica que permite acceder a reservorios de petróleo desde diferentes ángulos, minimizando el impacto superficial (Baby et al., 2014).
 - Entubado y cementación: Se instalan tubería de revestimiento y se cementan para proteger los acuíferos y prevenir derrumbes.
- c) Extracción: Dependiendo de las características del yacimiento, se emplean diferentes métodos de extracción:
- Flujo natural: En las etapas iniciales, algunos pozos pueden producir por la presión natural del reservorio.
 - Bombeo mecánico por varillas: se utilizan con el fin de extraer petróleo de los pozos a baja presión.
 - Levantamiento artificial por gas: Se inyecta gas a alta presión para facilitar el flujo de petróleo.
 - Bombeo electro sumergible: Se emplean bombas eléctricas sumergidas en el pozo para elevar el crudo (Bernal, 2011).
- d) Separación: El fluido extraído del pozo es una mezcla de petróleo, gas y agua, que debe ser separada:
- Separadores trifásicos: Equipos que utilizan la gravedad y otros principios físicos para separar el crudo, el gas y el agua.
 - Tratamiento de agua: El agua separada (agua de formación) debe ser tratada antes de su disposición o reinyección.
 - Acondicionamiento del gas: El gas asociado puede ser utilizado para generación eléctrica o reinyectado al yacimiento (Baby et al., 2014).
- e) Almacenamiento y transporte: Una vez separado y tratado, el petróleo debe ser almacenado y transportado:
- Tanques de almacenamiento: Se utilizan para almacenar temporalmente el crudo antes de su transporte.

- Oleoductos: El Sistema de Oleoducto Transecuatoriano (SOTE) y el Oleoducto de Crudos Pesados (OCP) son las principales vías de transporte del crudo desde la Amazonía hasta la costa del Pacífico.
- Estaciones de bombeo: Se utilizan para mantener el flujo de petróleo a través de los oleoductos, especialmente al cruzar la cordillera de los Andes (Bernal, 2011).

2.3. Impacto ambiental de las operaciones petroleras

Las operaciones petroleras en la Amazonía ecuatoriana han generado diversos impactos ambientales, algunos de los cuales han sido objeto de controversia y litigios internacionales:

- a) Deforestación: La construcción de infraestructura petrolera ha contribuido significativamente a la pérdida de cobertura boscosa en la región:
 - Apertura de vías de acceso: La construcción de carreteras para acceder a los campos petroleros ha facilitado la colonización y la deforestación subsecuente.
 - Plataformas de perforación: Cada plataforma requiere el despeje de varias hectáreas de bosque.
 - Instalaciones de producción: Las estaciones de separación, almacenamiento y bombeo también demandan espacios considerables (Finer et al., 2008).

Un estudio de Suárez et al., (2009) estimó que entre 1970 y 2010, se deforestaron aproximadamente 1.2 millones de hectáreas en la Amazonía norte de Ecuador, con la actividad petrolera como uno de los principales impulsores.

- b) Contaminación de suelos y aguas: Los derrames de petróleo y la disposición inadecuada de aguas de formación han tenido impactos severos en los ecosistemas acuáticos y terrestres:

- Derrames: Se han documentado numerosos casos de derrames de petróleo, tanto por accidentes en los pozos como por roturas en los oleoductos.
- Piscinas de desechos: Históricamente, se utilizaron piscinas sin revestimiento para almacenar residuos de perforación y producción, lo que ha resultado en la contaminación de suelos y aguas subterráneas.
- Aguas de formación: La disposición inadecuada de estas aguas, que contienen altos niveles de sales y metales pesados, ha afectado la calidad de los cuerpos de agua superficiales (San Sebastián & Karin Hurtig, 2004).

Un caso emblemático es el litigio contra Chevron-Texaco por contaminación durante sus operaciones entre 1964 y 1992, que resultó en una sentencia de \$9.5 mil millones contra la compañía en 2011 (Kimerling, 2013).

- c) Emisiones atmosféricas: Las operaciones petroleras contribuyen a la contaminación del aire y al cambio climático:
- Quema de gas: La práctica de quemar gas asociado en mecheros ha sido una fuente significativa de emisiones de CO₂ y otros contaminantes.
 - Emisiones de equipos: Los motores de combustión interna utilizados en las operaciones son fuentes importantes de NO_x, SO_x y material particulado.
 - Emisiones fugitivas: Las fugas de metano y otros compuestos orgánicos volátiles son comunes en las instalaciones petroleras (Larrea M., 2006).
- d) Fragmentación de hábitats: La infraestructura petrolera ha fragmentado los ecosistemas amazónicos, afectando la biodiversidad de la región:

- Efecto de borde: La creación de claros en el bosque para las instalaciones petroleras aumenta la exposición de los ecosistemas a factores externos.
- Barreras para la fauna: Las carreteras y oleoductos pueden actuar como barreras para el movimiento de algunas especies animales.
- Alteración de patrones hidrológicos: La construcción de infraestructura puede alterar los flujos de agua superficial y subterránea (Finer et al., 2008).

e) Impactos sociales: Las operaciones petroleras han generado cambios significativos en las comunidades indígenas y locales:

- Desplazamiento: Algunas comunidades han sido desplazadas de sus territorios tradicionales para dar paso a las operaciones petroleras.
- Cambios culturales: a llegada de la industria petrolera aceleraron los procesos de aculturación en muchas comunidades indígenas.
- Conflictos por recursos: Han surgido disputas por el uso de la tierra y los recursos naturales entre las comunidades locales y las empresas petroleras.
- Impactos en la salud: Estudios han sugerido una mayor incidencia de ciertos problemas de salud en comunidades cercanas a las operaciones petroleras (San Sebastián & Karin Hurtig, 2004).

Ante estos efectos, se han implantado regulaciones más estrictas y mejores procedimientos para la explotación petrolera en estos últimos años. Además, en la Constitución del 2008 fueron reconocidos los derechos de la naturaleza y fue establecida la obligatoriedad de una consulta a los pueblos indígenas para la implementación de proyectos de extracción petrolera y de otros recursos. (Asamblea Constituyente, 2008).

Además, iniciativas como la Iniciativa Yasuní-ITT, aunque finalmente no se implementó, reflejaron un debate nacional sobre la necesidad de buscar

alternativas al modelo de desarrollo basado en la extracción petrolera (Larrea & Warnars, 2009) (Larrea & Warnars, 2009).

Finalmente, aunque la industria petrolera en Ecuador ha impulsado la economía del país, a la vez ha causado efectos medioambientales y sociales significativos en la región amazónica. Hoy en día, la tarea consiste en lograr una solución adecuada al problema de la explotación de los yacimientos y la conservación de la naturaleza y de la cultura autóctonas de la Amazonia.

2.4. Visión general de los motores de combustión y eléctricos.

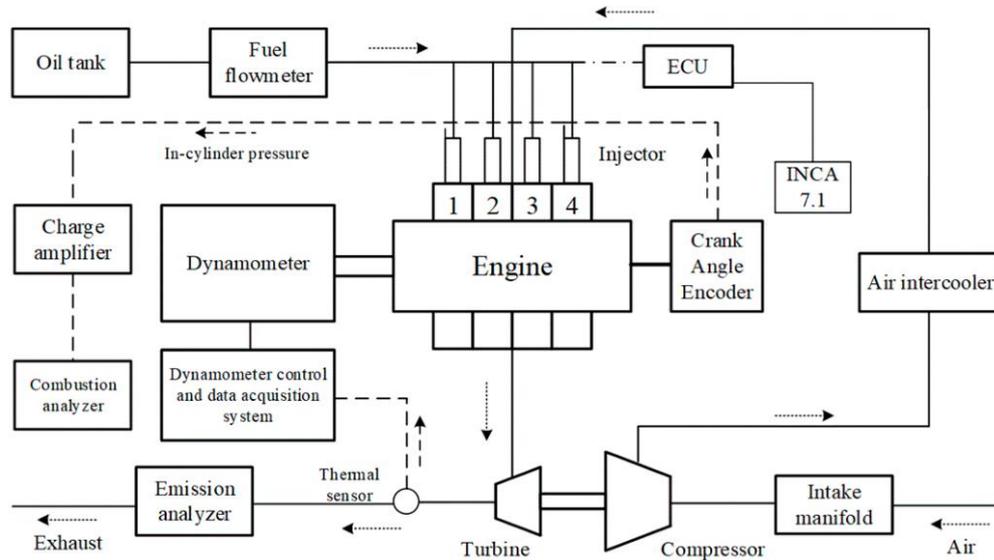
En el ámbito de la ingeniería y la tecnología, los motores tienen un papel esencial y tienen una gran variedad de aplicaciones comerciales e industriales (López et al., 2024; Oladimeji et al., 2023). En este caso, destacan tanto el motor de combustión como el eléctrico, por ejemplo, funcionan conjuntamente para propulsar automóviles (Ullah et al., 2023) denominados autos híbridos. Desde hace décadas, este tipo de motores de combustión y eléctricos se han desarrollado y adaptado para satisfacer las cambiantes demandas de eficiencia, durabilidad y rendimiento en una gran variedad de sectores.

Desde hace más de un siglo, los motores de combustión interna son una tecnología dominante en la industria automovilística, naval y aeroespacial (Yue & Liu, 2023). Estos motores requieren un combustible, como diésel, parafina o gasolina, para funcionar y generar energía mecánica dentro de la cámara de combustión. El revolucionario siglo XIX fue Nikolaus Otto, quien inventó el motor de combustión interna, permitiendo la movilidad de vehículos terrestres, marítimos y aéreos. En la figura 2.1 se ilustra un diagrama esquemático del banco de motores a diésel de alta velocidad, 4 cilindros, sobrealimentado, intercooler, controlado electrónicamente, de alta presión y rieles comunes, con una cilindrada de 2,771 (Li et al., 2024).

En toda la industria automotriz, los motores de combustión interna destacan por su potencia, velocidad y versatilidad aplicada a diversas áreas. En efecto, una de sus características es que generan presiones y temperaturas considerables que se transforman en energía mecánica

destinada a dar potencia a todo tipo de vehículos, generadores y equipos. Asimismo, a través del tiempo, se han optimizado sus prestaciones para incrementar su rendimiento, reduciendo la contaminación e incrementando su potencia, logrando así que sean utilizados con seguridad en numerosos sectores.

Figura 2. 1: Diagrama de esquemático de un motor de combustión interna a diésel.



Fuente: (Li et al., 2024).

Sin embargo, se enfrentan también a importantes retos, es decir, la necesidad de utilizar combustibles del petróleo, responsables de la emisión de gases tóxicos y de la contaminación acústica derivada del uso de los motores de combustión. Por todo ello, en la actualidad las empresas buscan alternativas más ecológicas y eficientes, impulsando el desarrollo y la implementación de motores eléctricos (en el capítulo 3 se describen los tres motores eléctricos que se utilizan como motores).

Como alternativa sostenible y eficiente a los motores de combustión, han surgido los motores eléctricos en muchas aplicaciones. Los motores eléctricos permiten convertir la energía eléctrica en energía mecánica mediante los campos magnéticos y las corrientes eléctricas. Su simplicidad de diseño, funcionamiento silencioso y gran eficiencia hace que resulten atractivos para una amplia variedad de aplicaciones, desde electrodomésticos hasta vehículos eléctricos.

La compañía MAHLE, especializada en la fabricación de motores para automóviles, desarrolló el motor eléctrico más duradero del mercado. Se trata de un motor de tracción único en el mercado que es capaz de funcionar por tiempo indefinido con un alto rendimiento. Este avance tecnológico se ha hecho posible gracias a un nuevo concepto de refrigeración, como se muestra en la figura 2.2. El nuevo motor eléctrico es extremadamente limpio, ligero y eficiente, y puede montarse sin utilizar tierras raras a petición del cliente.

La creciente preocupación por el medio ambiente y la reducción de gases contaminantes son las causas de la llegada de los motores eléctricos a sectores como la industria automotriz, agroalimentaria y de elaboración de alimentos y bebidas. El motor eléctrico no contamina durante su funcionamiento, lo que lo convierte en una opción medioambientalmente sostenible a largo plazo. Además, los sistemas de carga y de baterías de alta capacidad permiten aumentar tanto la autonomía como la eficiencia de los vehículos eléctricos, con lo cual su adopción en todo el mundo resulta cada vez más notable.

Figura 2. 2: Motor eléctrico Mahle de par continuo superior (*Superior Continuous Torque, SCT*).



Fuente: (Podmiljšak et al., 2024).

2.5. Motores de combustión interna.

Los motores de combustión interna (*Internal Combustion Engines, ICEs*) de cuatro tiempos y ciclo Otto representan hoy en día la principal forma de propulsión en todo el mundo y están sujetos a normativas muy estrictas en materia de emisiones de CO₂ y contaminantes (Joshi, 2019). En la actualidad,

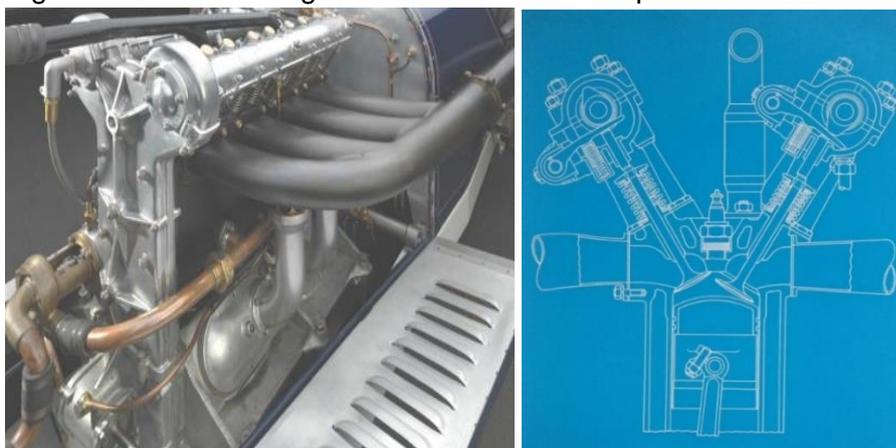
cuando la tecnología de las baterías ha alcanzado un nivel en el que los coches totalmente eléctricos se están convirtiendo en una posibilidad, puede parecer erróneo perseguir mejoras en el motor de combustión interna.

Ahora bien, hay muchas aplicaciones en las que el motor de ICE sigue siendo indispensable y lo seguirá siendo durante mucho tiempo. Por ello, es esencial que se continúe investigando para conseguir motores más eficientes. El rendimiento termodinámico típico sólo ronda el 25%, así que el margen de mejora parece enorme: incrementar la potencia específica y el rendimiento al tiempo que se reduce el consumo de combustible y, a su vez, las emisiones.

También hay maneras de conseguir que los motores no emitan carbono ni utilicen recursos, como los biocombustibles o el amoníaco generado por energía solar o eólica. Pero hay un problema. Las herramientas de modelización y análisis de que disponemos son limitadas. Esto restringe la capacidad de perfeccionar los diseños de motores actuales y obstaculiza la búsqueda y evaluación de nuevas ideas.

Desde hace más de 100 años, se han diseñado y fabricado motores, pero la habilidad del hombre para crearlos no ha estado a la altura de su limitada comprensión de la física que los rige. El motor de pistones de cuatro tiempos alcanzó su madurez mecánica en 1913 con el motor Peugeot Grand Prix, tal como se observa en la figura 2.3. A partir de ahí, Vittorio Jano y Harry Miller llevaron el motor a su forma definitiva y refinada en 1926.

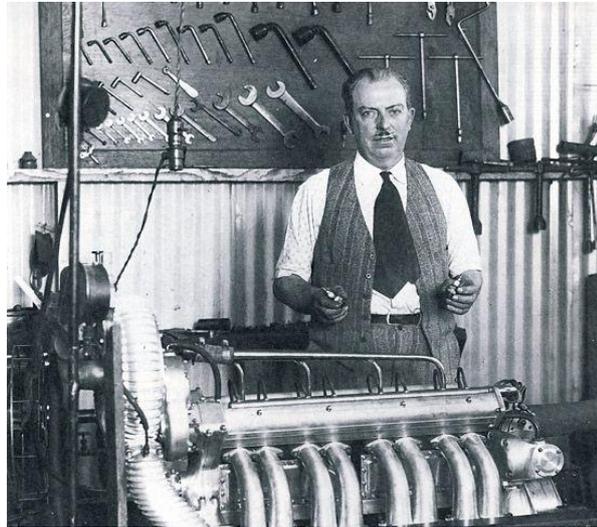
Figura 2. 3: Motor Peugeot Grand Prix de 4 tiempos creado en 1913.



Fuente: (Bisset, 2015)

La figura 2.4 muestra a Miller con uno de sus motores de 1,5 litros y ocho cilindros en línea sobre un banco de pruebas. En 1926, este motor de 330 libras producía 285 caballos a 8.200 RPM. Casi 100 años después, los motores de mayor rendimiento de nuestros coches son indistinguibles de este motor. Además, su eficiencia no ha mejorado significativamente.

Figura 2. 4: Motor de combustión interna de 1.5 L y 8 cilindros en línea junto a su creador Miller.



Fuente: (Wright, 2024)

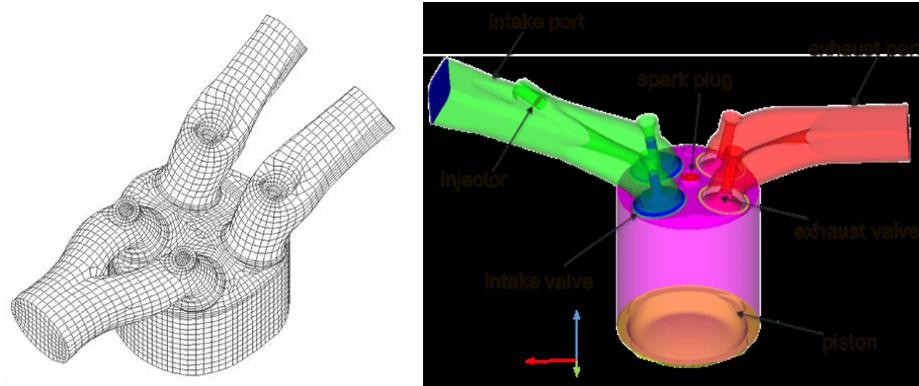
Hace más de un siglo comenzó la labor de desmitificación de la física del motor, a esta tarea contribuyeron algunos de los más grandes nombres de la ciencia y la ingeniería. En la década de 1920, la identificación, la comprensión y la utilidad de la mecánica, las estructuras, la dinámica vibratoria y la termodinámica de los motores quedaron demostradas.

No obstante, antes y, sorprendentemente, después, los desarrolladores de motores se vieron desconcertados una y otra vez porque algunos motores parecían negarse a funcionar como debían en función de las reglas empíricas de diseño y las herramientas analíticas. Con todo lo que se ha conseguido, ¿qué falta? La comprensión y la capacidad de predecir la física de la carga en el interior del cilindro y los flujos en los conductos de admisión y escape.

Los avances científicos en este campo son semejantes a los más recientes de la aerodinámica. Los problemas son los mismos: experimentalmente, intentar observar el comportamiento de un medio

invisible; analíticamente, intentar aplicar ecuaciones que se pueden escribir pero que no se pueden resolver. Y para complicar aún más el proceso, toda la física está oculta a la vista y ocurre en escalas de tiempo asombrosamente cortas.

Figura 2. 5: Modelo 3D-CFD de un cilindro de un motor de combustión interna.



Fuente: (Chiodi, 2011; Fogla et al., 2017)

Con la llegada de los ordenadores y la aplicación de la Dinámica Computacional de Fluidos (*Computational Fluid Dynamics, CFD*) a la solución de flujos de fluidos, los investigadores han intentado crear sistemas que puedan predecir el rendimiento de un motor con sus sistemas de admisión y escape antes de construirlo. Pero, como en toda ciencia e ingeniería, hay que hacer concesiones. Un enfoque obvio para simular los flujos de fluidos de un motor se muestra en la figura 2.5, donde el flujo en un cilindro y sus conductos de admisión y escape se modelan utilizando CFD tridimensional.

2.6. Motores de combustión interna a diésel utilizadas en la industria petrolera.

Un motor diésel es un motor térmico capaz de convertir la energía química del diésel en energía mecánica. Fabricado en 1893 e inventado por Rudolf Diesel, por su eficiencia y sus prestaciones, son muy utilizados en diversas aplicaciones industriales, entre ellas las plantas de extracción de crudo. (Reif, 2014).

Por lo general, estos motores son muy utilizados en el sector de la extracción y el transporte de petróleo crudo para proporcionar energía a bombas, generadores y otros equipos esenciales. Por su capacidad de

funcionamiento en entornos adversos y su rendimiento energético relativamente alto, son una opción preferida en muchas instalaciones remotas (Speight, 2015).

Ahora bien, en términos de contaminación y consumo de combustibles fósiles, el empleo de motores diésel presenta dificultades. Frente a la preocupante amenaza del cambio climático y frente a la posibilidad de buscar soluciones más sostenibles, las empresas petroleras están estudiando alternativas encaminadas a optimizar la eficiencia de los motores diésel e incluso a reemplazarlos por motores eléctricos. (Sharma & Mohan, 2013).

Independientemente de estos retos, con frecuencia los motores diésel resultan indispensables en las operaciones de extracción del petróleo, especialmente en los lugares donde las redes eléctricas son limitadas o insuficientes. Gracias a su resistencia, potencia de carga y adaptabilidad, continúan siendo relevantes para la industria, mientras que tratan de mitigar su impacto medioambiental. (Speight, 2015).

2.6.1. Principios de funcionamiento.

Los motores de combustión interna diésel operan bajo el principio del ciclo diésel, que se diferencia del ciclo Otto utilizado en motores de gasolina principalmente en su método de ignición. En lugar de utilizar una chispa para iniciar la combustión, los motores diésel emplean la compresión para elevar la temperatura del aire en la cámara de combustión hasta un punto en que el combustible inyectado se enciende espontáneamente (Reif, 2014).

El ciclo de funcionamiento de un motor diésel de cuatro tiempos se desarrolla de la siguiente manera:

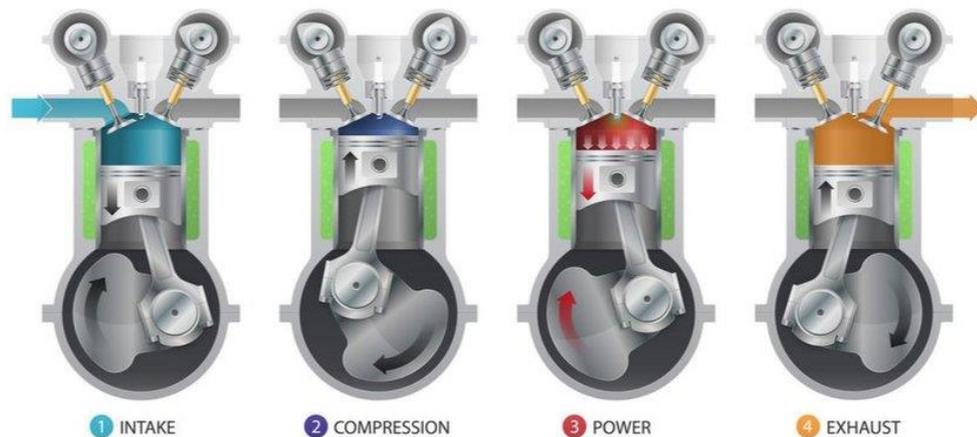
- ✓ Admisión: el pistón se mueve hacia abajo en el cilindro (ver imagen 1 de la Figura 2.5), creando un vacío que aspira aire fresco a través de la válvula de admisión abierta.
- ✓ Compresión: con las válvulas cerradas (ver imagen 2 de la Figura 2.5), el pistón se mueve hacia arriba, comprimiendo el aire en la

cámara de combustión. Esta compresión eleva significativamente la temperatura del aire.

- ✓ Combustión y expansión: justo antes de que el pistón alcance el punto muerto superior, se inyecta el combustible diésel a alta presión en la cámara (ver imagen 3 de la Figura 2.5). El combustible se atomiza y se mezcla con el aire caliente comprimido, iniciando la combustión espontánea. La expansión de los gases resultantes empuja el pistón hacia abajo, produciendo trabajo.
- ✓ Escape: el pistón se mueve nuevamente hacia arriba (ver imagen 4 de la Figura 2.5), expulsando los gases de combustión a través de la válvula de escape abierta (Stone, 1999).

Sin embargo, un elemento clave del rendimiento de los motores diésel son sus sistemas de inyección de combustible. Gracias a los más modernos dispositivos de inyección directa «common rail», se controla el caudal y la sincronización de la inyección de combustible, incrementando la eficiencia y disminuyendo notablemente los niveles contaminantes (Reif, 2014).

Figura 2. 6: Parámetros de respuesta al escalón de sistemas lineales.



Fuente: (Shahid et al., 2019)

A causa de una relación de compresión más alta y la ausencia de una válvula de admisión de aire, estos motores tienen un rendimiento térmico superior en comparación con los motores a gasolina. Esto mejora el ahorro de combustible, factor que favorece su uso en aplicaciones industriales por ejemplo en instalaciones de bombeo de petróleo. (Wild & Davis, 2023).

A efectos de lubricación, estos motores requieren lubricantes diseñados para resistir las altas presiones y temperaturas que se producen durante su funcionamiento. Además, la lubricación es indispensable para ayudar a disipar el calor y reducir la fricción entre las piezas móviles (Speight, 2015).

El sistema de refrigeración en los motores diésel industriales suele ser más robusto que en los motores de automóviles debido a las condiciones de operación más exigentes. Pueden utilizar refrigeración por agua o por aire, dependiendo del tamaño del motor y las condiciones de operación (Stone, 1999).

Para mantener un flujo continuo de producción, los motores diésel normalmente funcionan a velocidades estables en las plantas de extracción de petróleo. Por eso, es necesario instalar sistemas de control de velocidad que sean precisos y eficaces, ya sean controladores automáticos o eléctricos (Speight, 2015).

2.6.2. Aplicaciones en la industria petrolera.

En la industria petrolera, los motores de combustión interna diésel encuentran una amplia gama de aplicaciones, especialmente en las operaciones de campo donde la energía eléctrica de la red puede no estar disponible o ser poco confiable. Algunas de las principales aplicaciones incluyen:

- ✓ Accionamiento de bombas: Los motores diésel se utilizan comúnmente para impulsar bombas de diferentes tipos en las operaciones petroleras. Estas incluyen:
 - a) Bombas de levantamiento artificial: En pozos donde la presión natural del yacimiento no es suficiente para llevar el petróleo a la superficie, se utilizan bombas accionadas por motores diésel para elevar el crudo (Takács, 2018).
 - b) Bombas de transferencia: Estas bombas mueven el petróleo crudo desde los pozos hasta las instalaciones de procesamiento y almacenamiento (Speight, 2015).

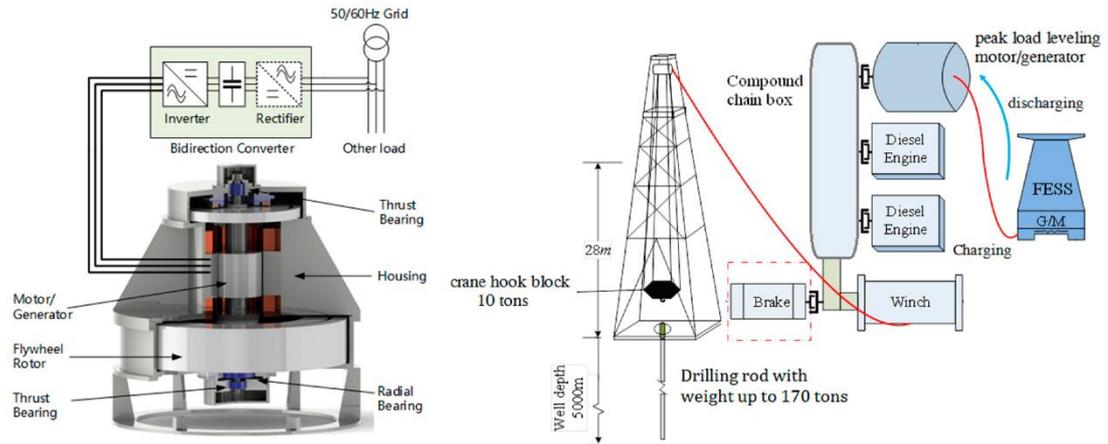
- c) Bombas de inyección de agua: En operaciones de recuperación secundaria, los motores diésel impulsan bombas que inyectan agua en el yacimiento para mantener la presión y mejorar la recuperación de petróleo (Green & Willhite, 2018).
- ✓ Generación de energía eléctrica: En ubicaciones remotas, los generadores diésel son una fuente común de energía eléctrica para alimentar equipos de perforación, sistemas de control, iluminación y otras necesidades operativas (Speight, 2015).
- ✓ Compresores de gas: Los motores diésel se utilizan para accionar compresores que manejan el gas natural asociado en las operaciones petroleras (Mokhatab et al., 2012)
- ✓ Equipos de perforación: Aunque muchos equipos modernos de perforación utilizan motores eléctricos, los motores diésel siguen siendo comunes en equipos más pequeños o móviles (Bommer & Baker, 2008).
- ✓ Transporte: Los camiones y otros vehículos utilizados en las operaciones de campo suelen estar equipados con motores diésel debido a su durabilidad y eficiencia (Speight, 2015).

Los motores diésel son indispensables para que las bombas de extracción de petróleo funcionen y permitan transportar el crudo a través de los oleoductos. Es necesario que estas plantas operen de forma permanente y estable para garantizar un caudal de petróleo constante.

Los motores diésel en estas aplicaciones suelen ser de gran tamaño y potencia, capaces de generar varios miles de caballos de fuerza. Por ejemplo, una estación de bombeo típica en un oleoducto principal podría utilizar varios motores diésel, cada uno capaz de producir entre 3,000 y 5,000 caballos de fuerza (Menon, 2011).

En la figura 2.7 se muestra el diagrama esquemático de una estación de bombeo para extracción de petróleo utilizando dos motores de combustión interna a diésel.

Figura 2. 7: Esquema de una estación de bombeo de petróleo con motores diésel



Fuente: (Dai et al., 2019)

Estos motores están diseñados para operar de manera continua durante largos períodos, con intervalos de mantenimiento planificados. La confiabilidad es crucial, ya que una falla en el motor puede resultar en una interrupción costosa del flujo de petróleo. En muchas instalaciones, se mantienen motores de reserva para garantizar la continuidad de las operaciones en caso de falla o durante el mantenimiento programado. Esto subraya la importancia de los motores diésel en la industria petrolera y la necesidad de sistemas robustos y redundantes (Speight, 2015).

Si bien es cierto que los motores diésel siguen utilizándose en muchas tareas de extracción de petróleo, hay que recordar que la industria busca opciones más eficientes y ecológicas. Entre ellas se incluye el abastecimiento de motores con gas natural (siempre que sea posible) y, cuando resulte práctico, los procesos eléctricos (Green & Willhite, 2018).

2.6.3. Ventajas y desventajas en plantas de bombeo.

El uso de motores de combustión interna diésel en plantas de bombeo de petróleo presenta una serie de ventajas y desventajas que deben ser consideradas cuidadosamente en el diseño y operación de estas instalaciones.

Ventajas:

- ✓ Alta eficiencia energética: Los motores diésel tienen una eficiencia térmica superior en comparación con otros tipos de motores de

combustión interna, lo que se traduce en un menor consumo de combustible por unidad de potencia producida. En aplicaciones de bombeo de petróleo, donde la operación continua es común, esta eficiencia puede resultar en ahorros significativos de combustible a largo plazo (Reif, 2014).

- ✓ **Confiabilidad y durabilidad:** Los motores diésel están diseñados para operar durante largos períodos bajo cargas pesadas. Su construcción robusta y la ausencia de sistemas de ignición eléctrica los hacen menos propensos a fallas en comparación con otros tipos de motores. Esta confiabilidad es crucial en operaciones petroleras donde el tiempo de inactividad puede ser extremadamente costoso (Speight, 2015)
- ✓ **Alto par motor a bajas revoluciones:** Los motores diésel producen un alto par motor a velocidades de rotación relativamente bajas. Esta característica los hace ideales para accionar bombas de desplazamiento positivo, que son comunes en las operaciones de bombeo de petróleo (Menon, 2011).
- ✓ **Flexibilidad de combustible:** Estos motores, diseñados básicamente para utilizar combustible diésel, son adaptables a diversos tipos de combustible, como el biodiésel y a veces el gas natural. Esta flexibilidad puede resultar ventajosa en situaciones en las que el suministro de combustible es variable o cuando se buscan alternativas más limpias. (Green & Willhite, 2018).
- ✓ **Independencia de la red eléctrica:** En ubicaciones remotas donde la red eléctrica no es confiable o no está disponible, los motores diésel proporcionan una fuente de energía autónoma. Esto es particularmente valioso en campos petroleros en desarrollo o en áreas con infraestructura limitada (Speight, 2015)

Desventajas:

- ✓ **Emisiones contaminantes:** Los motores diésel son conocidos por sus emisiones de partículas, óxidos de nitrógeno (NOx) y otros contaminantes. Aunque las tecnologías modernas de control de emisiones han mejorado significativamente este aspecto, sigue

siendo una preocupación importante, especialmente en áreas sensibles desde el punto de vista ambiental (Reif, 2014).

- ✓ Huella de carbono: Como todos los motores de combustión interna que utilizan combustibles fósiles, los motores diésel contribuyen significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto es cada vez más problemático en un contexto de creciente preocupación por el cambio climático y las regulaciones ambientales más estrictas (Green & Willhite, 2018).
- ✓ Costos de mantenimiento: Aunque son duraderos, los motores diésel requieren un mantenimiento regular y a veces costoso para mantener su eficiencia y confiabilidad. Esto incluye cambios de aceite frecuentes, reemplazo de filtros, y mantenimiento de los sistemas de inyección de combustible de alta presión (Speight, 2015)
- ✓ Ruido y vibraciones: Los motores diésel, especialmente los de gran tamaño utilizados en plantas de bombeo, pueden producir niveles significativos de ruido y vibraciones. Esto puede requerir medidas de mitigación costosas y puede ser problemático en áreas sensibles al ruido (Bommer & Baker, 2008).
- ✓ Dependencia del suministro de combustible: El mantenimiento de un abastecimiento estable de gasóleo en zonas remotas puede ser costoso y logísticamente difícil. Las operaciones pueden verse afectadas negativamente por las interrupciones del suministro (Menon, 2011).
- ✓ Arranque en frío: En el clima extremadamente frío, los motores diésel pueden tener problemas de inicio, lo que puede ser un problema en algunas regiones. Para ello podrían ser necesarios más sistemas de precalentamiento (Reif, 2014).
- ✓ Menor flexibilidad operativa: los motores de combustión interna a diésel son menos capaces de cambiar rápidamente su potencia y velocidad que los motores eléctricos. Esto podría ser una desventaja para los procesos que necesitan un control de flujo preciso y flexible (Menon, 2011).

La decisión de utilizar motores diésel en una planta de bombeo de petróleo en lugar de alternativas como los motores eléctricos será influenciada por una serie de variables, como la ubicación de la instalación, la disponibilidad de energía eléctrica fiable, las leyes ambientales locales y las preocupaciones económicas a largo plazo.

Mientras que los motores diésel han sido tradicionalmente la opción preferida debido a su confiabilidad y eficiencia, la creciente preocupación por las emisiones y la mejora en la tecnología de motores eléctricos están llevando a muchas operaciones a considerar la electrificación donde sea factible (Green & Willhite, 2018).

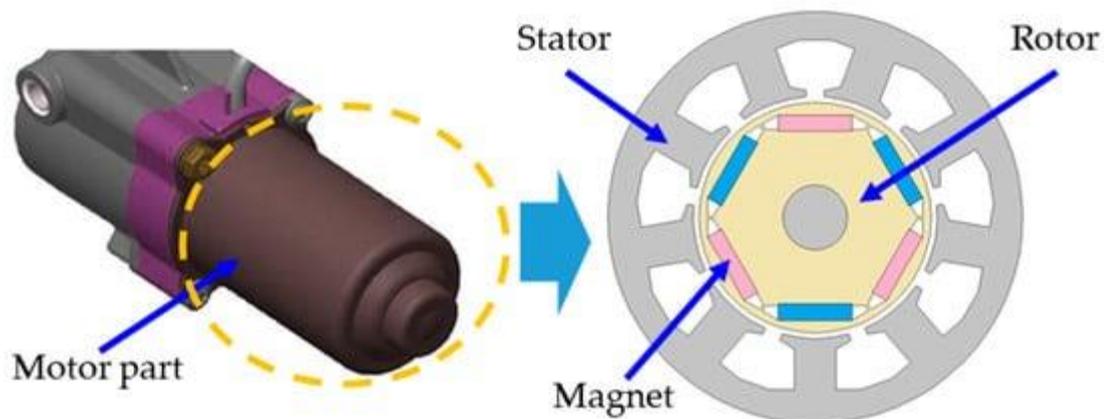
2.7. Motores eléctricos (e-Motors).

Los motores eléctricos son componentes vitales de las plantas de bombeo de petróleo porque transforman la energía eléctrica en energía mecánica, que alimenta las bombas y otras máquinas necesarias. Estos motores necesitan ser fiables, eficientes y capaces de funcionar en entornos difíciles para ser utilizados en el negocio del petróleo. (Saidur et al., 2012).

Los motores eléctricos utilizados en el bombeo de petróleo varían en tamaño y potencia, desde pequeñas unidades de menos de 1 kW hasta grandes motores de varios megavatios. Su selección depende de factores como el caudal requerido, la profundidad del pozo, las propiedades del fluido y las condiciones ambientales (Mahmoud et al., 2018). La figura 2.8 se muestra la estructura de un e-Motor convencional de corriente continua sin escobillas (BLDC) para un sistema de bombeo eléctrico de aceite (Electric Oil Pump, EOP).

Estos motores se caracterizan por su alta eficiencia energética, control preciso de velocidad y par, y bajas emisiones en comparación con los motores de combustión interna. Además, ofrecen ventajas como un mantenimiento reducido, mayor vida útil y la posibilidad de operación remota (Yari et al., 2015).

Figura 2. 8: Estructura del e-Motor convencional BLDC para una EOP.



Fuente: (Yoon & Baek, 2019)

En las plantas de bombeo de petróleo, los motores eléctricos se utilizan principalmente para accionar bombas centrífugas, de desplazamiento positivo y sumergibles. También se emplean en compresores, ventiladores y otros equipos auxiliares. La integración de tecnologías avanzadas, como variadores de frecuencia y sistemas de monitoreo en tiempo real, ha mejorado significativamente el rendimiento y la confiabilidad de estos motores en la industria petrolera (Zhang et al., 2019).

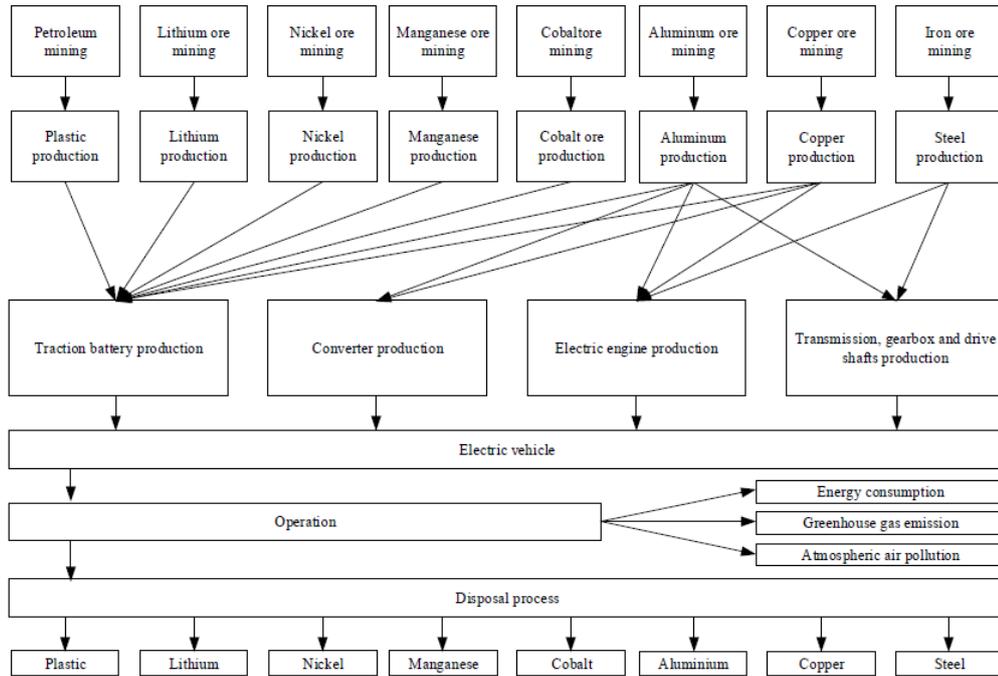
2.8. Ciclo de vida de motores de combustión vs. motores eléctricos

En el ámbito de la ingeniería eléctrica, la elección entre motores de combustión y motores eléctricos representa una decisión estratégica crucial en términos de eficiencia, costo y sostenibilidad ambiental. Los motores *ICEs* ha sido la columna vertebral de la industria durante décadas, mientras que los motores eléctricos (Electrical Motor, EM) emergen como una alternativa más limpia y eficiente en un mundo cada vez más preocupado por la huella ecológica.

Esta comparativa detallada entre ambos tipos de motores es fundamental para comprender sus implicaciones en diferentes contextos, por ejemplo Kurkin et al., (2024) comparó el ciclo de vida de motores eléctricos y de combustión interna en automóviles. El diagrama del ciclo de vida de EVs se presenta en la figura 2.9, y el diagrama del ciclo de vida de los vehículos de combustión interna (ICE Vehicles, ICEVs) se presenta en la figura 2.10. En

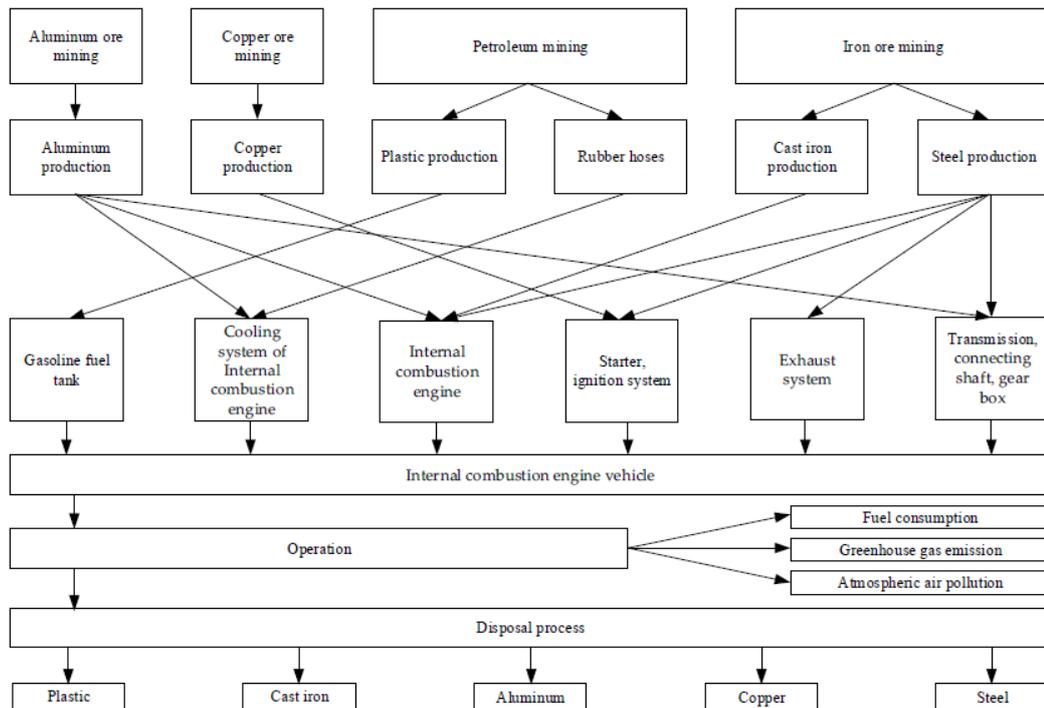
el presente trabajo de integración curricular se aplican para una planta de bombeo de crudo en un entorno desafiante como la región amazónica.

Figura 2. 9: Diagrama del ciclo de vida de un vehículo eléctrico.



Fuente: (Kurkin et al., 2024).

Figura 2. 10: Diagrama del ciclo de vida de un vehículo de motor de combustión interna.



Fuente: (Kurkin et al., 2024).

La gran diferencia entre los dos tipos de automóviles es la fuente de energía. Los vehículos eléctricos (Electric Vehicles, EVs) funcionan con la energía suministrada por las baterías, mientras que los vehículos de combustión interna se alimentan de la energía procedente de la combustión de combustibles fósiles en el motor (Emadi, 2017).

Athanasopoulou et al., (2018) indica que las emisiones de carbono son la principal causa del calentamiento global, y han ido en aumento en la Unión Europea en la última década. Los vehículos causan contaminación atmosférica, ya que liberan gases de efecto invernadero y otras sustancias tóxicas. En términos de eficiencia, los motores de combustión interna han demostrado una eficacia en la conversión de energía química a mecánica, con una larga historia de aplicación en diversos sectores.

No obstante, al convertir directamente la energía eléctrica en energía mecánica, eliminando las pérdidas y maximizando el rendimiento, los motores eléctricos vencen a los de combustión en términos de eficiencia energética (Oliveri et al., 2023). Los EVs y los ICEs contaminan el medio ambiente de maneras diferentes. Mientras que los ICEs liberan gases nocivos que empeoran la calidad del aire, los EVs contaminan el aire a través de compuestos liberados durante la producción.

Tanto la gasolina como el diésel se clasifican como compuestos extremadamente peligrosos y combustibles que representan un riesgo para la seguridad pública en caso de accidente. Cuando se trata de vehículos eléctricos, la falta de estos elementos aumenta la seguridad porque ya no hay riesgos. Además, el peligro de incendio y explosión se reduce en ausencia de un motor de combustión.

No obstante, los vehículos eléctricos se enfrentan también a problemas de seguridad. Así, por ejemplo, sus baterías de iones de litio son relativamente inestables en cuanto a voltaje y temperatura. Un sobrecalentamiento puede ocasionar fallos en su funcionamiento y causar un desbordamiento térmico. Por tanto, el peligro de incendio, fuga de electrolito o explosión es alto en caso

de mal funcionamiento técnico. Las causas del sobrecalentamiento incluyen la sobrecarga, presencia de partículas extrañas en las celdas y deformaciones de la batería

En cuanto a costos, si bien los motores de combustión suelen tener un menor costo inicial, los motores eléctricos presentan ventajas a largo plazo al requerir menos mantenimiento y ofrecer una mayor durabilidad, lo que puede compensar la inversión inicial más elevada.

2.8.1. Ventajas y Desventajas en el Contexto de la Planta de Bombeo de Crudo

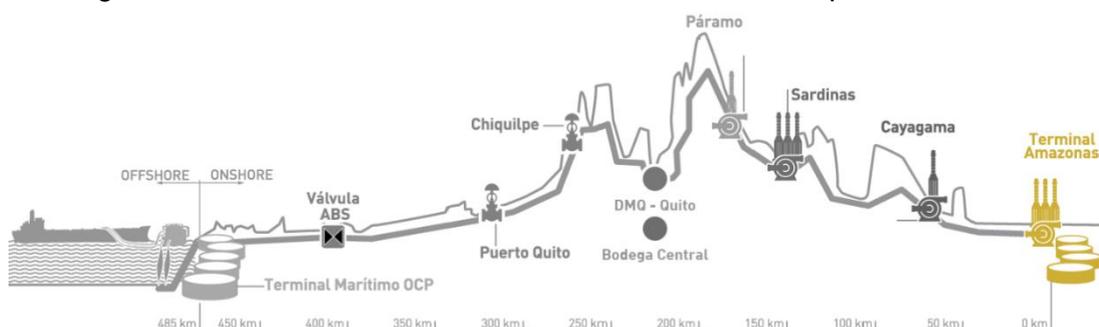
En el contexto específico de una planta de bombeo de crudo en la región amazónica, la elección entre motores de combustión y motores eléctricos conlleva consideraciones particulares. Los motores de combustión pueden ofrecer una respuesta inmediata y una mayor robustez en entornos remotos donde la infraestructura eléctrica es limitada. Sin embargo, su dependencia de combustibles fósiles y las emisiones asociadas pueden plantear desafíos ambientales en una región tan biodiversa y frágil como la Amazonía. Por otro lado, los motores eléctricos presentan ventajas en términos de sostenibilidad y reducción de impactos ambientales, pero requieren una infraestructura eléctrica adecuada y pueden implicar costos iniciales más elevados.

Capítulo 3: Diseño, Implementación y resultados

3.1. Diagnóstico del Desempeño Actual de los Motores de Combustión a Diésel en la Planta de Bombeo de Crudo

Un diagnóstico exhaustivo del funcionamiento actual de los motores de combustión diésel representa la primera fase de la evaluación de la viabilidad técnica y económica de la conversión de motores de combustión diésel a motores de combustión eléctrica en la planta de bombeo de petróleo crudo del territorio amazónico. La Figura 3.1 muestra toda la ruta de las estaciones de bombeo de crudo pesado, siendo la estación Amazonas la principal.

Figura 3. 1: Rutas de las estaciones de bombeo de crudo pesado de OCP.



Fuente: (OCP Ecuador, 2024)

La Tabla 3.1 se muestra el diagnóstico basado en el desempeño actual de los motores de combustión Diésel en la planta de bombeo de crudo de la Estación Amazonas.

Tabla 3. 1: Desempeño actual de los motores de combustión Diésel en la planta de bombeo de crudo de la Estación Amazonas

Parámetro	Descripción	Valor/ Especificaciones	Comentarios
Modelo del Motor	Tipo de motor de combustión interna utilizado en las bombas booster	Caterpillar, Modelo 3508	Los motores son estándar en aplicaciones industriales y tienen un buen historial de rendimiento.
Potencia Nominal	Potencia máxima que pueden entregar los motores	630 kW @ 1800 RPM	Adecuada para las bombas actuales, pero genera un consumo de combustible significativo.

Torque Máximo al Eje	Máximo torque que los motores pueden aplicar al eje de las bombas	3567 N-m @ 1300 RPM	El torque es suficiente para las condiciones de operación actuales.
Consumo de Combustible	Cantidad de diésel consumido por hora al operar a plena capacidad	162.9 LPH @ 638 kW, 1800 RPM	Representa un costo operativo significativo, especialmente con fluctuaciones en el precio del diésel.
Frecuencia de Fallas	Número promedio de fallas o mantenimiento correctivo necesario por mes	No especificado	Necesita ser registrado y analizado para evaluar la fiabilidad y el impacto en la operación.
Costos Operativos	Gastos asociados con el funcionamiento de los motores, incluyendo combustible, mantenimiento, y reparaciones	No especificado	Los costos operativos incluyen el alto consumo de combustible y la necesidad frecuente de mantenimiento, lo cual puede ser una carga económica.
Costos de Mantenimiento	Gastos promedio en mantenimiento preventivo y correctivo	No especificado	Es necesario desglosar para calcular la rentabilidad de continuar con motores diésel versus la conversión a eléctricos.
Emisiones Contaminantes	Emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes por operación de los motores	No especificado	Las emisiones de CO2 y otros contaminantes deben ser cuantificadas para evaluar el impacto ambiental y comparar con alternativas más limpias.
Presión Diferencial de las Bombas	Diferencia de presión que las bombas booster generan durante la operación	188.5 PSI	Debe mantenerse al cambiar a motores eléctricos para asegurar la continuidad en la eficiencia del sistema.
Velocidad de Operación	Rango de velocidad a la que operan las bombas con los motores diésel	600 – 850 RPM	La velocidad operativa es adecuada para el proceso actual, pero podría optimizarse con motores eléctricos y variadores de frecuencia.

Reductor de Velocidad	Equipo para reducir la velocidad del motor a rango adecuado de operación de las bombas	Lufkin, Modelo SF127CHS	Reducción de velocidad eficiente con una alta eficiencia mecánica del 98.3%.
Acoples	Utilizados para conectar el motor con el reductor y la bomba	EATON AIRFLEX, Modelo 14CB400 Dual y Centaflex, Model CF-A-600-K-50-2	Adecuados para las condiciones actuales, aunque la conversión a eléctricos podría requerir una revisión de estos componentes.
Eficiencia Mecánica del Reductor	Eficiencia con la que el reductor convierte la potencia del motor en movimiento de la bomba	98.3%	Muy alta eficiencia, lo que minimiza las pérdidas mecánicas en la transmisión de potencia.

Fuente: Elaborado por Autor

Figura 3. 2: Planta de bombeo de petróleo en estación Amazonas.



Fuente: Elaborado por Autor

En este diagnóstico se consideran aspectos fundamentales como el consumo de combustible, costos de operación y mantenimiento, frecuencia de fallas y emisiones contaminantes. Para la planta de la Estación Amazonas (ver Figura 3.2), en la que se utilizan motores Caterpillar Modelo 3508 para accionar las bombas de refuerzo (booster) Bornemann, este análisis es fundamental para identificar áreas de mejora y establecer una línea de base para la comparación con alternativas eléctricas.

3.1.1. Estudio del consumo de combustible y la eficiencia energética

Uno de los indicadores de rendimiento más críticos para los motores de combustión interna es el consumo de combustible, sobre todo en un funcionamiento continuo como el de la Estación Amazonia. En el caso de los motores Caterpillar 3508, el consumo de combustible es de 162,9 litros por hora (LPH) a 638 kW y 1800 RPM. Dicho nivel de consumo refleja la elevada demanda energética del proceso de bombeo, que está directamente relacionada con la capacidad de las bombas de refuerzo para mantener un caudal de entre 3547 y 5175 barriles por hora (BPH) y una presión diferencial de 188,5 PSI.

Al analizar la eficiencia energética de estos motores se debe tener en cuenta no sólo el consumo de combustible, sino también cómo se traduce esto en generación de energía útil. Con una potencia nominal de 630 kW y un par máximo de 3567 N-m a 1300 RPM, es imprescindible evaluar la eficiencia en la conversión de la energía contenida en el combustible en trabajo mecánico efectivo. Para ello, este diagnóstico permite comparar la eficiencia actual con la que podría obtenerse con los motores eléctricos, que suelen tener una eficiencia energética superior, en torno al 90-95%, frente a los motores de combustión interna, que suelen tener una eficiencia del 30-40%.

En la tabla 3.2 se muestra la comparación del consumo de combustible y la eficiencia energética de los motores de combustión interna actuales y una proyección aproximada de motores eléctricos

Tabla 3. 2: Comparación entre el consumo de combustible y eficiencia energética de los motores de combustión interna y proyección de motores eléctricos

Parámetro	Motores de Combustión Interna	Motores Eléctricos (Proyección)
Modelo del Motor	Caterpillar 3508	Motor Eléctrico
Consumo de Combustible	162.9 LPH (a 638 kW, 1800 RPM)	No aplica (no consume combustible)
Potencia Nominal	630 kW @ 1800 RPM	630 kW @ 1800 RPM
Torque Máximo al Eje	3567 N-m @ 1300 RPM	3567 N-m @ 1300 RPM
Eficiencia Energética	30-40%	90-95%
Consumo Energético	216 kWh (equivalente aproximado, considerando eficiencia)	660 kWh (a 90% eficiencia)
Costo del Combustible (Diésel)	Aproximadamente \$0.65 USD/Litro	No aplica
Costo Energético (Electricidad)	No aplica	Aproximadamente \$0.10 USD/kWh (dependiendo de la tarifa eléctrica)
Emisiones de CO₂	Aproximadamente 2.68 kg de CO ₂ por litro de diésel quemado	Cero emisiones directas
Costo Operativo Anual (estimado)	\$847,080 USD (considerando 8,000 horas/año de operación)	\$52,800 USD (considerando 8,000 horas/año de operación)
Eficiencia en Conversión de Energía	Baja eficiencia debido a pérdidas térmicas y mecánicas	Alta eficiencia, con mínimas pérdidas energéticas

Fuente: Elaborado por Autor

Para los motores de combustión interna, el cálculo se basa en un consumo de 162.9 litros por hora a plena carga, lo que equivale a aproximadamente 1,303,200 litros por año (considerando 8,000 horas de

operación). Se asumió una eficiencia del 35% para los motores de combustión interna, lo cual es típico para estos motores. En contraste, los motores eléctricos tienen una eficiencia mucho mayor, entre 90-95%.

Las emisiones de CO₂ se calcularon con base en un factor de emisión estándar de 2.68 kg de CO₂ por litro de diésel quemado. Finalmente, se consideraron los costos de diésel a un precio aproximado de \$0.48 USD por litro. Para los motores eléctricos, se asumió un costo energético de \$0.011 USD por kWh, aunque esto puede variar dependiendo de la región y tarifas eléctricas específicas. La tabla 3.3 muestra la comparativa de costos de motores a diésel y de motores eléctricos.

Tabla 3. 3: Comparación de costos entre motores diésel y eléctricos.

Parámetro	Motores de Combustión Interna	Motores Eléctricos Projectados
Consumo de combustible por hora	162.9 litros/hora	N/A
Costo por litro de diésel	\$0.65 USD/litro	N/A
Consumo anual de combustible	1,303,200 litros	N/A
Costo anual de consumo de diésel	\$847,080 USD	N/A
Potencia nominal	630 kW	630 kW
Eficiencia energética	35%	90%
Energía útil generada	220.5 kW (35% de 630 kW)	567 kW (90% de 630 kW)
Emisiones contaminantes	Altas (CO ₂ , NO _x , partículas)	Ninguna
Costos operativos y de mantenimiento	\$887,080 USD	\$ 55,440 USD
Frecuencia de fallas	Moderada a alta	Baja

Fuente: Elaborado por Autor

3.1.2. Costes de funcionamiento y mantenimiento

Otra cuestión decisiva a la hora de evaluar el rendimiento de los motores de combustión interna en la planta de bombeo de petróleo crudo son los costes de funcionamiento y mantenimiento. En efecto, los motores diésel requieren un mantenimiento regular que incluye el cambio de aceite y filtros, la inspección de inyectores, la calibración de válvulas y la revisión de otros componentes críticos para garantizar un funcionamiento fiable. Estos gastos aumentan con el tiempo debido al desgaste natural de las piezas y a la posible necesidad de reparaciones importantes o sustitución de componentes.

Además del mantenimiento programado, es importante tener en cuenta los costes de funcionamiento asociados al consumo de combustible. Teniendo en cuenta el elevado consumo de 162,9 LPH y la fluctuación de los precios del diésel, los gastos de funcionamiento por este concepto llegan a ser significativos y están sometidos a la variabilidad del mercado del combustible.

Este diagnóstico incluye un análisis detallado de los registros de mantenimiento y funcionamiento para determinar el coste medio por hora de funcionamiento, así como la frecuencia y el coste de las intervenciones de mantenimiento no programadas debidas a averías. Esta información es esencial para compararla con los costes de funcionamiento y mantenimiento de los motores eléctricos, que suelen ser más bajos debido al menor número de piezas móviles y a la ausencia de sistemas de combustible.

La tabla 3.4 presenta una comparación detallada entre los motores diésel actualmente en uso en la planta de bombeo de crudo y una proyección aproximada de los costos asociados a motores eléctricos equivalentes.

Tabla 3. 4: Comparación de costos entre motores diésel y eléctricos.

Parámetro	Motores Diésel	Motores Eléctricos
Consumo de Combustible (litros/hora)	162.9 LPH	N/A
Costo de Combustible Anual	\$847,080 USD (1,303,200 litros/año a \$0.65 USD/litro)	N/A

Consumo de Energía (kWh/año)	N/A	5,040,000 kWh/año
Costo de Energía Anual	N/A	\$52,800 USD (con un costo de \$0.011 USD/kWh)
Costo de Mantenimiento Anual	\$30,000 - \$50,000 USD (estimado, incluye piezas y mano de obra)	\$10,000 - \$15,000 USD (estimado, incluye inspecciones y mano de obra)
Frecuencia de Mantenimiento	Alto (cambio de aceite, filtros, calibración, etc. cada 500-1000 horas)	Bajo (inspección general anual, mantenimiento menor)
Coste de Mantenimiento por Hora	Aproximadamente \$3.75 - \$6.25 USD/hora	Aproximadamente \$1.25 - \$1.875 USD/hora
Intervenciones No Programadas	Frecuentes, con costes altos debido a averías y desgaste de piezas	Muy pocas, principalmente relacionadas con componentes electrónicos
Costes de Reparación/Averías	Altos, puede incluir la sustitución de componentes críticos (\$20,000 - \$40,000 USD por evento)	Bajos, generalmente reemplazo de componentes electrónicos (\$5,000 - \$10,000 USD por evento)
Durabilidad y Ciclo de Vida	Menor, con una vida útil de aproximadamente 15-20 años	Mayor, con una vida útil de aproximadamente 20-30 años
Coste Total Anual de Funcionamiento y Mantenimiento	\$887,080 - \$912,080 USD	\$62,800 - \$67,800 USD

Fuente: Elaborado por Autor

3.2. Análisis de frecuencia de fallos y emisiones contaminantes

3.2.1. Análisis de la frecuencia de fallos y eficiencia operativa

La frecuencia de fallos es un indicador decisivo de la eficacia de los motores de combustión interna de la planta de bombeo de petróleo crudo. Así, los motores Caterpillar 3508, del mismo modo que cualquier motor de

combustión interna, están sujetos a fallos mecánicos que pueden provocar paradas imprevistas y pérdidas de producción. Dichos fallos incluyen problemas en el sistema de inyección de combustible, fallos en los cilindros, problemas de lubricación y desgaste de componentes críticos como los cojinetes del cigüeñal y las válvulas.

La tabla 3.5 muestra la recopilación de datos sobre la frecuencia y el tipo de averías que se han producido en los últimos años de funcionamiento para evaluar la fiabilidad de los motores actuales. Esto incluye el número de horas de funcionamiento entre averías, la duración de las paradas para reparaciones y el impacto de estas averías en la capacidad de bombeo. Este análisis debe compararse con la fiabilidad esperada de los motores eléctricos, que suelen tener una menor frecuencia de fallos debido a su diseño más sencillo y robusto, y a la ausencia de combustión interna que puede generar una serie de problemas adicionales.

Tabla 3. 5: Comparación de costos entre motores diésel y eléctricos.

Parámetro	Motores Diésel	Motores Eléctricos
Horas de Funcionamiento Anuales	8,000 horas	8,000 horas
Frecuencia de Fallos (Averías/año)	10 - 15 fallos (promedio)	1 - 2 fallos (promedio)
Horas Entre Fallos (MTBF)	533 - 800 horas (promedio)	4,000 - 8,000 horas (promedio)
Duración de Paradas para Reparaciones	24 - 48 horas por avería	8 - 16 horas por avería
Costo de Reparación por Avería	\$20,000 - \$40,000 USD	\$5,000 - \$10,000 USD
Impacto en la Capacidad de Bombeo	Alta (posibles paradas prolongadas y reducción de producción)	Baja (paradas menos frecuentes y de corta duración)
Eficiencia Operativa (%)	30 - 40%	90 - 95%

Fuente: Elaborado por Autor

3.2.2. Análisis de las emisiones contaminantes y cumplimiento de la normativa

Otro aspecto decisivo a la hora de diagnosticar el rendimiento de los motores de combustión interna es el análisis de las emisiones contaminantes. Los motores de combustión interna se caracterizan por sus emisiones de dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NOx) y partículas (PM), factores que repercuten en el cambio climático y la contaminación atmosférica.

Así pues, las emisiones de los motores de combustión interna representan un reto importante para el cumplimiento de la normativa y la responsabilidad medioambiental en el proyecto de la estación Amazonas, situada en una región sensible desde el punto de vista medioambiental.

La evaluación incluye la valoración de las emisiones actuales de los motores Caterpillar 3508, mediante mediciones directas de los gases de escape y la comparación de estos valores con los límites permitidos por la normativa medioambiental local e internacional.

Además, deberá considerarse la exposición potencial de los trabajadores a estos contaminantes y los riesgos para la salud asociados. La transformación a motores eléctricos puede reducir significativamente las emisiones y ajustarse mejor a los objetivos de sostenibilidad y reducción de la huella de carbono de la empresa.

La tabla 3.6 destaca que la transición de motores de combustión interna a motores eléctricos no solo puede mejorar el cumplimiento de las normativas medioambientales locales e internacionales, sino que también reduce significativamente las emisiones de CO₂, NOx y partículas. Además, los motores eléctricos eliminan los riesgos asociados con la exposición de los trabajadores a contaminantes atmosféricos y contribuyen a un ambiente más saludable y sostenible.

Tabla 3. 6: Comparación de emisiones contaminantes y cumplimiento de normativa.

Parámetro	Motores de Combustión Interna (Diésel)	Motores Eléctricos
Modelo de Motor	Caterpillar 3508	No aplicable
Emisiones de CO2 (kg/hora)	700 kg/hora (estimado)	0 kg/hora (cero emisiones directas)
Emisiones de NOx (g/hora)	200 g/hora (estimado)	0 g/hora (cero emisiones directas)
Emisiones de PM (g/hora)	50 g/hora (estimado)	0 g/hora (cero emisiones directas)
Normativa Medioambiental Local	Límite permitido: 400 g NOx/hora, 100 g PM/hora	Cumple sin emisiones
Normativa Medioambiental Internacional	Límite permitido: 0.5 g CO2/kWh, 0.4 g NOx/kWh, 0.03 g PM/kWh	Cumple sin emisiones
Exposición de Trabajadores	Riesgo potencial alto	Riesgo potencial nulo
Impacto en la Salud	Problemas respiratorios, enfermedades cardiovasculares	Sin impacto asociado a emisiones

Fuente: Elaborado por Autor

3.3. Estudio de Capacidad de Generación y Requerimientos de Energía para Conversión a Motores Eléctricos

Teniendo en cuenta los datos complementarios sobre la capacidad de generación de la Estación Amazonas, resulta fundamental hacer un análisis detallado de si el sistema de generación actual puede soportar la carga adicional que resultaría de la conversión de motores de combustión interna a motores eléctricos para las bombas booster. Dicho análisis incluye la evaluación de la capacidad de los generadores existentes, la demanda

energética de los motores eléctricos propuestos y la viabilidad de operar dentro de los límites de carga del sistema de generación.

3.3.1. Capacidad del Generador Existente

El Sistema de Generación de la Estación Amazonas está constituido por dos generadores Leroy Somer, modelo LSA56UL8, con una potencia nominal combinada de 3608 kW a 480 V y 60 Hz, y una eficiencia del 96%. Asimismo, cada uno de los generadores puede suministrar 1804 kW de potencia, lo que representa la carga máxima que puede soportar el sistema de generación.

La energía de los generadores proviene de dos motores Wartsila, modelo 6R32LN, con una potencia de 2166 kW cada uno y un consumo de 199,4 g/kWh de crudo tratado. Este sistema de generación está diseñado para suministrar energía a la planta, garantizando que los equipos críticos, como las bombas de refuerzo, funcionen sin interrupción.

3.3.2. Requerimiento energético de los motores eléctricos propuestos

Para determinar la capacidad operativa de los generadores es necesario establecer la demanda energética prevista tras la conversión. En efecto, los motores eléctricos propuestos para sustituir a los motores diésel necesitan una potencia equivalente o superior a los motores Caterpillar 3508 instalados actualmente, con una potencia nominal de 630 kW cada uno.

Si se supone que los motores eléctricos trabajan con un rendimiento cercano al 95% y que se mantiene la misma carga de funcionamiento de la bomba, la demanda de energía de cada motor eléctrico (P_{me}) está definida por:

$$P_{me} = \frac{P_{actual}}{\eta} = \frac{630 \text{ kW}}{0.95} \approx 663.16 \text{ kW}$$

Cuando funcionan simultáneamente las 5 bombas booster, la demanda total de los motores eléctricos resulta:

$$D_T = n \cdot P_{me} = 5(663.16 \text{ kW}) = 3315.8 \text{ kW}$$

Este volumen de demanda total de 3315,8 kW no supera la capacidad máxima combinada de 3608 kW de los generadores de Leroy Somer. De todos modos, hay que considerar que esta estimación del consumo energético no tiene en cuenta otros equipos que dependen también del sistema de generación, lo que puede reducir el margen de seguridad de la operación.

3.4. Propuesta

El proyecto de extracción de petróleo crudo en la región amazónica tiene el reto de mejorar su eficiencia operativa y reducir su impacto ambiental. Esta instalación de bombeo, que se halla ubicada en territorio amazónico, funciona exclusivamente con motores de combustión interna diésel, específicamente los modelos Caterpillar 3508, para accionar las bombas booster que resultan indispensables para el transporte del crudo.

Hasta la fecha, las bombas booster son accionadas por motores de combustión interna que funcionan con gasóleo, generando elevadas emisiones de gases contaminantes, altos costes de operación y riesgos de incumplimiento de la normativa ambiental. Debido a que los motores de combustión interna contribuyen significativamente a las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas (PM), la migración a motores eléctricos es una medida prioritaria para reducir la huella de carbono, cumplir la normativa medioambiental y mejorar la eficiencia energética de la planta.

Para mitigar estos problemas, se propone la implantación de motores eléctricos, que ofrecen una solución sostenible y eficiente acorde con los requisitos operativos y técnicos de la planta.

3.4.1. Evaluación de Requisitos Operativos y Técnicos

Los motores eléctricos más adecuados se seleccionan en función de los requisitos técnicos y operativos de la planta de bombeo:

1. Condiciones de Operación:

- Características medioambientales: la planta está situada en una región con elevada humedad, altas temperaturas y condiciones

geográficas complejas. el diseño propuesto de los motores les permite funcionar en entornos hostiles, ser resistentes a la corrosión y garantizar un funcionamiento óptimo.

- Comportamiento de funcionamiento continuo: para que las bombas elevadoras funcionen de forma continua, es necesario que los motores eléctricos seleccionados tengan una alta fiabilidad, un bajo mantenimiento y una elevada resistencia a sobrecargas continuas sin sobrecalentarse.

2. Requisitos Técnicos:

- Potencia: hay que disponer de potencia suficiente para propulsar las bombas elevadoras con un rendimiento igual o superior al de los motores diésel actuales (Caterpillar 3508), que suministran aproximadamente 1.000 HP. De esta manera se asegura que la planta conserve su capacidad de bombeo sin interrupción.
- Requisitos de compatibilidad: los motores eléctricos del sistema de bombeo son compatibles con los sistemas de accionamiento existentes, entre ellos los reductores de velocidad y los acoplamientos mecánicos. De este modo se minimiza la posibilidad de realizar costosas modificaciones y prolongar el tiempo de inactividad durante la instalación.
- Rendimiento energético: al tratarse de una zona remota y con acceso limitado a la red eléctrica, es preciso que los motores sean muy eficientes energéticamente para optimizar al máximo el uso de la energía suministrada por la nueva línea aérea de media tensión.

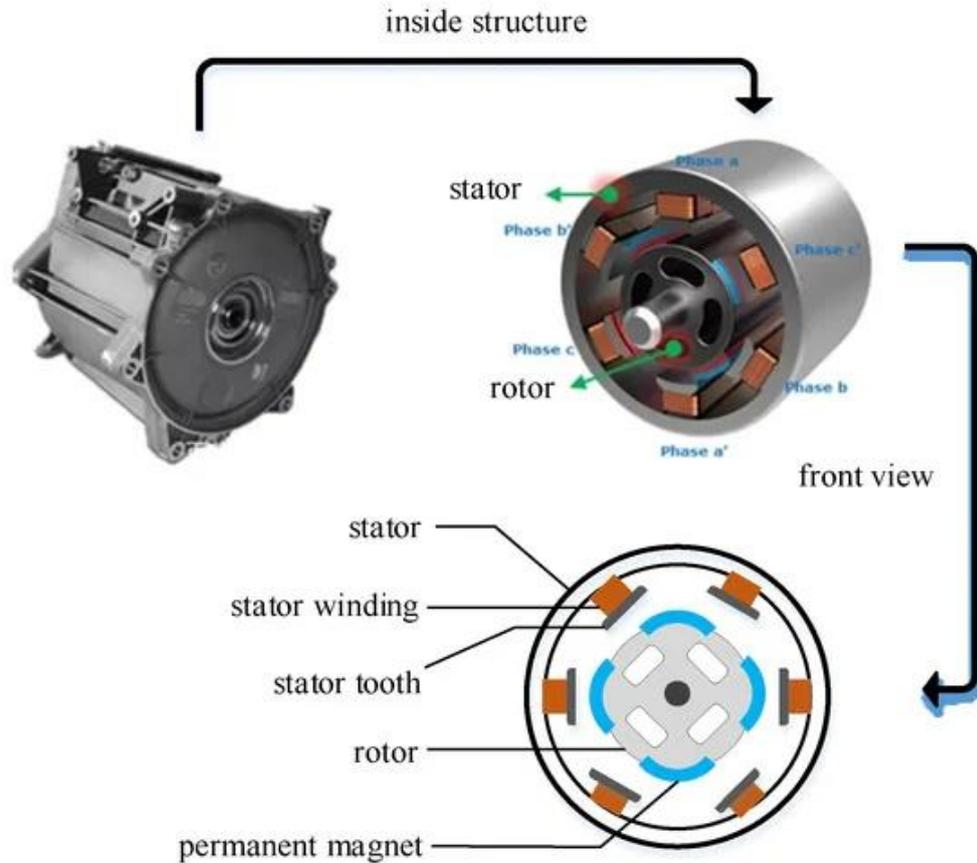
3.4.2. Elección de motor eléctrico

Para satisfacer los requerimientos de la planta de bombeo se dispone comercialmente de varias soluciones tecnológicas de motores eléctricos. Por ejemplo, entre las opciones más destacadas se encuentran:

- Motores síncronos de imanes permanentes (Permanent Magnet Synchronous Motors, PMSM): en la práctica, estos motores tienen un alto rendimiento energético, un reducido mantenimiento y son

idóneos para aplicaciones de carga constante, por ejemplo, las bombas elevadoras (booster pumps). Además, están especialmente diseñados para funcionar en plantas industriales gracias a su capacidad de mantener una velocidad constante con distintas cargas. La figura 3.3 muestra la estructura interna del motor síncrono de imán permanente (Guo et al., 2020).

Figura 3. 3: Estructura interna de un motor PMSM.

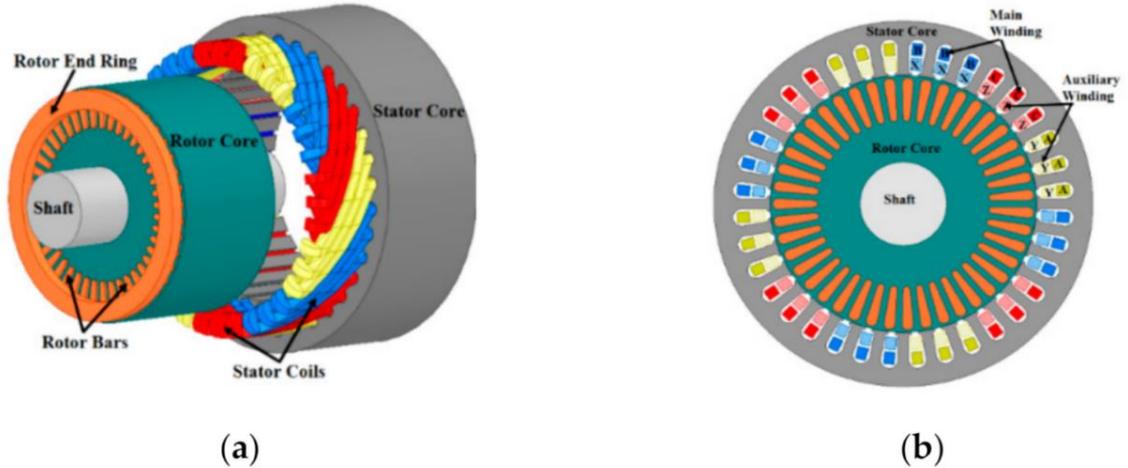


Fuente: (Guo et al., 2020).

- Motores de inducción trifásicos (Induction Motors, IM): estos motores, si bien son menos eficientes que los PMSM, son robustos, económicos y muy utilizados en aplicaciones industriales. Entre sus principales ventajas destacan su robustez y su facilidad de integración en los sistemas existentes. En la figura 3.4 se observa la estructura interna del motor de inducción trifásica.
- Motores síncronos de reluctancia conmutada electrónicamente (Synchronous Electronically Commutated Reluctance Motors, SynRM): se trata de una tecnología que combina el rendimiento de

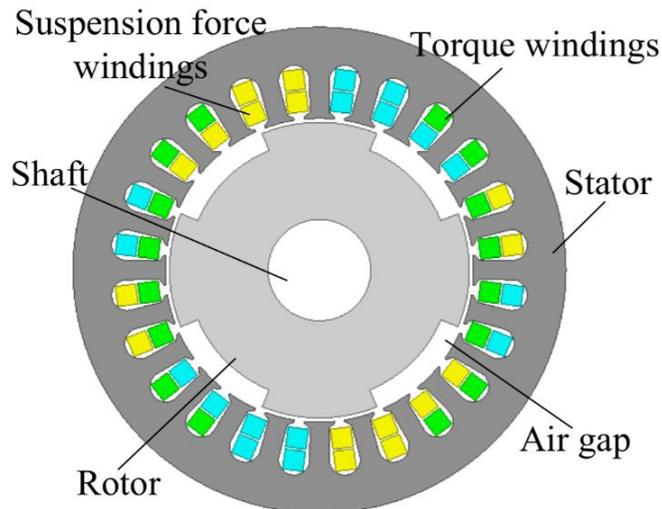
los motores PMSM y la robustez de los motores de inducción, lo cual la convierte en una opción intermedia en términos de coste y rendimiento. En la figura 3.5 se observa los componentes internos de un motor SynRM.

Figura 3. 4: Estructura interna de un motor de inducción trifásico vista (a) 3D y (b) 2D.



Fuente: (Muteba, 2021)

Figura 3. 5: Estructura interna de un motor síncrono de reluctancia conmutada electrónicamente.



Fuente: (Hua et al., 2021)

Además, se analizó comparativamente los tres motores eléctricos (PMSM, IM y SynRM) para identificar cuál puede cumplir con los requisitos operativos y técnicos de la planta de bombeo de crudo. La tabla 3.7 muestran las comparaciones de tecnologías más relevantes de cada uno de los tres motores eléctricos.

Tabla 3. 7: Comparativa de tecnologías disponibles de motores eléctricos.

Características	Motores Síncronos de Imán Permanente (PMSM)	Motores de Inducción Trifásicos (IM)	Motores Síncronos de Reluctancia (SynRM)
Eficiencia Energética	Alta (90-95%)	Moderada (85-90%)	Alta (88-92%)
Mantenimiento	Bajo	Moderado	Bajo
Costo Inicial	Alto	Bajo	Intermedio
Fiabilidad	Alta	Alta	Alta
Control de Velocidad	Excelente	Bueno	Muy Bueno
Disponibilidad de Repuestos	Media	Alta	Media
Facilidad de Integración	Moderada	Alta	Moderada
Compatibilidad con Infraestructura	Media	Alta	Media
Tamaño y Peso	Compacto	Relativamente grande	Compacto
Aplicación Típica	Aplicaciones de alta eficiencia en entornos controlados	Amplias aplicaciones industriales	Aplicaciones industriales y comerciales
Ventajas	Alta eficiencia, bajo mantenimiento, control preciso de velocidad	Bajo costo, robustez, facilidad de integración	Eficiencia combinada con robustez, buena relación costo-rendimiento
Desventajas	Alto costo inicial, complejidad en el control	Menor eficiencia energética comparado con PMSM	Disponibilidad limitada, tecnología relativamente nueva

Fuente: Elaborado por Autor

La tabla 3.8 muestran los criterios de la elección del motor eléctrico para implementación en la planta de bombeo de crudo en territorio amazónico.

Tabla 3. 8: Comparativa de tecnologías disponibles de motores eléctricos.

Criterios de Selección	Motores Síncronos de Imán Permanente (PMSM)	Motores de Inducción Trifásicos (IM)	Motores Síncronos de Reluctancia (SynRM)
Potencia y Capacidad de Carga	Excelente	Muy Buena	Muy Buena
Eficiencia Energética	Excelente	Buena	Muy Buena
Compatibilidad con Infraestructura	Media	Alta	Media
Facilidad de Mantenimiento	Baja (debido a la complejidad)	Alta	Alta
Disponibilidad en el Mercado Local	Media	Alta	Media
Costo-Beneficio	Bueno (a largo plazo)	Excelente (bajo costo inicial)	Muy Bueno (equilibrio entre costo y rendimiento)
Requerimientos de Capacitación	Alto	Bajo	Moderado
Impacto Ambiental	Bajo	Moderado	Bajo
Tiempo de Retorno de Inversión (ROI)	Largo	Medio	Medio

Fuente: Elaborado por Autor

La decisión de elegir un motor eléctrico de inducción trifásica para la planta de bombeo de petróleo fue basada en la combinación óptima de eficiencia, fiabilidad y compatibilidad con la infraestructura existente. Aunque hay otras buenas alternativas como los motores PMSM y SynRM, pero el motor de inducción trifásico destaca su robustez, facilidad de mantenimiento y amplia disponibilidad en el mercado, lo que garantiza una integración sin complicaciones y una reducción en los costos operativos a largo plazo.

Se seleccionó el motor W60 de la marca WEG, reconocido por su alto rendimiento y durabilidad en aplicaciones industriales. La Figura 3.6 muestra el modelo del motor W60, que no solo cumple con los requisitos operativos y técnicos de la planta, sino que ofrece una excelente relación costo-beneficio,

bajo costo de mantenimiento, y diseñado para funcionar de manera eficiente en ambientes severos como el territorio amazónico, asegurando un desempeño confiable y sostenido en las operaciones de bombeo de crudo.

Figura 3. 6: Motor eléctrico de inducción eléctrica W60 de la marca WEG.



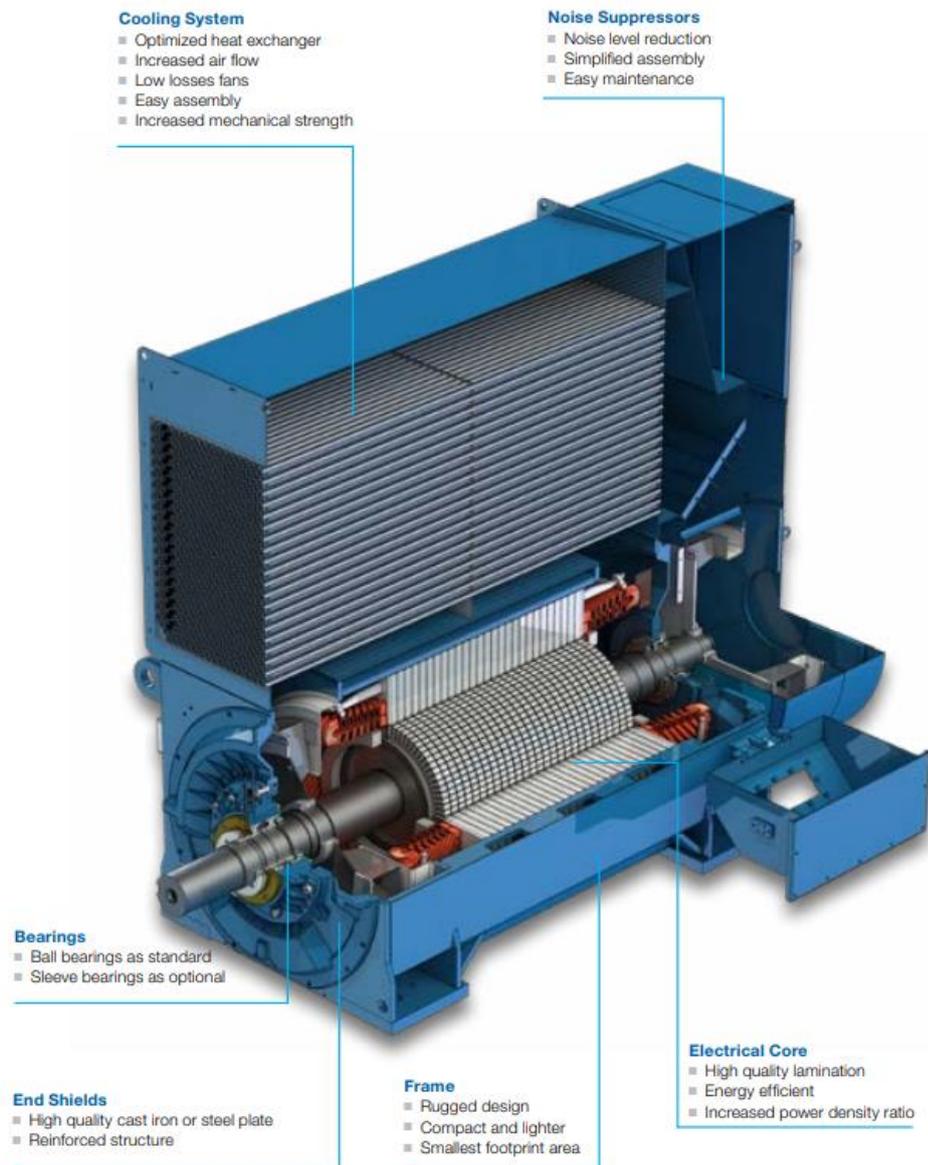
Fuente: (Weg, 2024)

3.4.3. Justificación de la selección del motores WEG de inducción trifásica W60.

Tras un análisis exhaustivo de las tecnologías disponibles y considerando los criterios de selección previamente descritos, se optó por la implementación de motores eléctricos Inducción Trifásicos de la marca WEG y modelo del motor W60 en la planta de bombeo de crudo. La Figura 3.7 muestra la estructura interna del motor W60 que se debe utilizar en reemplazo de motores diésel. A continuación, se describen las razones de esta elección:

- **Rendimiento y Fiabilidad:** el motor W60 es reconocido por su robustez y durabilidad, haciendo que sean ideales para aplicaciones industriales exigentes, en este caso, la extracción de petróleo. Este tipo de motor tiene un buen rendimiento en su funcionamiento, lo que es importante para la empresa la continuidad de las operaciones en la planta de bombeo en el sector amazónico.
- **Eficiencia Energética:** aunque los motores de inducción no son tan eficientes como los PMSM, en este caso el motor W60 ofrece una excelente eficiencia energética en su clase.

Figura 3. 7: Estructura interna del motor W60.



Fuente: (Weg, 2024)

- **Compatibilidad y Facilidad de Integración:** este motor es compatible con sistemas de transmisión y control en la planta de bombeo, que permite una integración sin problemas. Con esto, se minimiza la necesidad de modificaciones estructurales y también los costos asociados con la instalación y puesta en marcha.
- **Mantenimiento y Soporte:** existe stock en repuestos y acceso a servicios de mantenimiento en el mercado local. WEG, como fabricante global con una sólida presencia en América Latina, garantiza un

soporte técnico adecuado y un suministro rápido de repuestos, lo cual es esencial para operaciones continuas en regiones remotas.

- **Costo-Beneficio:** el motor WEG-W60 ofrece un equilibrio óptimo entre costo inicial, eficiencia operativa y fiabilidad a largo plazo. Aunque la inversión inicial es superior a la de los motores a diésel, el retorno de la inversión se estima en un plazo de 5 a 7 años, debido a los ahorros en combustible y mantenimiento.

Años	Valor anual demanda de combustible (Diesel)
2019	\$ 134.456.93
2020	\$ 130.103.55
2021	\$ 140.221.00
2022	\$ 110.211.52
2023	\$ 120.565.30

Fuente: Elaborado por Autor.

Cómo se puede ver en la tabla se muestra el valor de los últimos 5 años pasados estos datos están relacionados a la base de datos de la gestión energética, dado esta información podemos enfocarnos que el proyecto se estima que en 5 años se recupera la inversión, ya que tiene un costo inicial de \$ 638.000.00

3.5. Diseño del sistema de control de motores eléctricos en la estación de bombeo Amazonas.

En el diagrama de bloques que se muestra en la Figura 3.8 se ha diseñado un complejo sistema de control para gestionar y supervisar los motores eléctricos (MTR 1 a MTR 5) encargados de accionar las bombas (Bomba 1 a Bomba 5). En este sistema se han utilizado diversas tecnologías de control para garantizar un funcionamiento eficaz y seguro de los motores, y se han integrado en un esquema de supervisión centralizado mediante PLC (controladores lógicos programables) y un sistema SCADA.

A continuación, se describen las fases principales del diagrama de bloques que se observa en la Figura 3.6.

1. Alimentación principal y protección

- **Main Breaker:** el sistema dispone de un disyuntor principal que proporciona protección frente a sobrecargas y cortocircuitos. De este modo, se aísla cualquier fallo a gran escala para proteger los componentes posteriores.
- **Input Breaker:** hay un interruptor de entrada para cada uno de los motores W60, que proporciona una segunda línea de protección y permite desconectar cada uno de los motores del sistema principal en caso de que sea necesario.

2. Control de velocidad y arranque

- **VFD (Variable Frequency Drive):** el variador de frecuencia se encarga de controlar la velocidad de los motores eléctricos W60 variando la frecuencia de la alimentación eléctrica. Es ideal para un control preciso de la velocidad del motor y, por ende, del caudal de las bombas.
- **Soft Starter:** de manera alterna, el diseño del sistema se emplea arrancadores suaves para un arranque progresivo del motor minimizando el esfuerzo mecánico y eléctrico en los motores eléctricos W60 y en la red eléctrica durante el arranque.

3. Aislamiento y conmutación

- **Output Isolation Contactor:** cada uno de los VFD y arrancadores son equipados con contactores de aislamiento de salida los mismos nos permiten aislar eléctricamente el motor eléctrico W60 del sistema de control cuando sea necesario, proporcionando flexibilidad operativa y una capa adicional de seguridad del motor W60.
- **Bypass Contactors:** estos contactores de bypass permiten la operatividad de los motores eléctricos W60 en caso de que no estén disponibles el variador de frecuencia (VFD) o el arrancador suave o también, si se requiere una operación directa sin control de velocidad o sin arranque suave.

4. Capacitores para mejora del factor de potencia

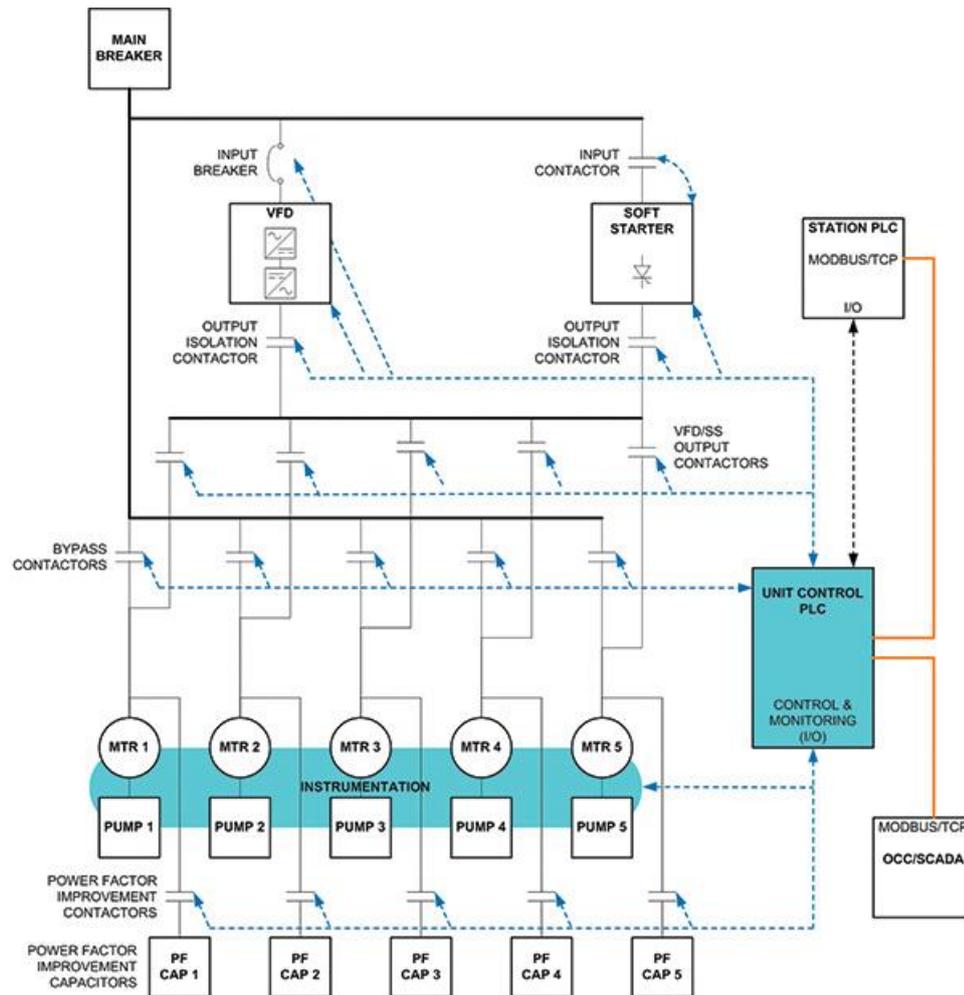
- **Power Factor Improvement Capacitors (PF CAP 1 a PF CAP 5):** en el diseño se estableció que el conjunto de los motores

eléctricos W60 está asociados al banco de capacitores con el propósito de mejorar el factor de potencia. Con esto se optimiza el consumo energético, minimizando pérdidas y mejorando la eficiencia del sistema de bombeo en la estación Amazonas. Además, con este banco de capacitores se compensa el desfase entre voltaje y corriente en sistemas inductivos, como lo son los motores eléctricos W60.

5. Control y Supervisión

- **Unit Control PLC:** el PLC de control de las unidades se encarga de controlar el funcionamiento de los motores y las bombas, además de garantizar que todo funcione de acuerdo con los parámetros establecidos. Este autómata programable controla las variables principales y controla los contactores, variadores de frecuencia y arrancadores progresivos.
- **Station PLC y Comunicación SCADA:** la estación PLC se conecta al PLC que controla las máquinas en la estación de bombeo Amazonas y se comunica con un sistema SCADA a través de protocolos de comunicación como Modbus/TCP. Con el sistema SCADA se supervisa y controla de todo el sistema.

Figura 3. 8: Diagrama de bloques del diseño del sistema de control de motores eléctricos W60 y bombas booster en la estación Amazonas.



Fuente: Elaborado por Autor.

Los sistemas de control de máquinas descritos en el diagrama de la Figura 3.8 son, en general, sistemas robustos y sofisticados capaces de integrar técnicas de control y protección que permiten garantizar el funcionamiento seguro, eficiente y estable de los motores y las bombas. Su integración con sistemas SCADA proporciona funciones avanzadas de supervisión y control, esenciales para las operaciones en el sector industrial moderno.

3.6. Factibilidad de la implementación de motores eléctricos en la estación de bombeo Amazonas.

La factibilidad de la implementación de los motores eléctricos en sustitución de los motores diésel para la estación de bombeo de petróleo crudo se basa tanto en el análisis técnico como en el presupuesto presentado. El presupuesto incluye un análisis técnico y una estimación detallada de los

costes. La tabla 3.9 se muestra el presupuesto estimado para la migración de motores eléctricos W60 marca WEG en la estación Amazonas en la planta de bombeo de crudo pesado.

Tabla 3. 9: Costos de inversión estimados para la implementación de motores eléctricos WEG modelo W60 en la planta de bombeo de crudo.

Ítem	Descripción	Cantidad	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)
1. Motores Eléctricos	Motor WEG W60 de inducción trifásico	4	\$ 60.000,00	\$ 240.000,00
2. Reductores de Velocidad	Reductor de velocidad compatible con motor WEG W60	4	\$ 15.000,00	\$ 60.000,00
3. Línea Aérea de Media Tensión	Diseño, construcción y montaje de línea aérea de 13.8 kV	1	\$ 100.000,00	\$ 100.000,00
4. Cámara de Transformación	Transformador elevador para 13.8 kV	1	\$ 50.000,00	\$ 50.000,00
5. Sistema de Protecciones	Protección para motores y sistema eléctrico (relés, breakers, etc.)	4	\$ 10.000,00	\$ 40.000,00
6. Instalación y Montaje	Mano de obra para instalación de motores y sistemas asociados	1	\$ 30.000,00	\$ 30.000,00
7. Sistema de Control y Automatización	Controladores, PLCs, y programación para integración	1	\$ 25.000,00	\$ 25.000,00
8. Estudios Técnicos y Supervisión	Estudios de factibilidad, ingeniería de detalle, y supervisión	1	\$ 20.000,00	\$ 20.000,00
9. Transporte y Logística	Transporte de equipos y materiales al sitio de instalación	1	\$ 15.000,00	\$ 15.000,00
10. Contingencias	Fondo para imprevistos (10% del total)	1	\$ 58.000,00	\$ 58.000,00
Total				\$ 638.000,00

Fuente: Elaborado por Autor.

Si bien la inversión inicial para la adquisición e instalación de motores eléctricos tales como el WEG W60 resulta considerable, se ve rápidamente compensada por el notable ahorro en costes de funcionamiento y mantenimiento a largo plazo. Así, la reducción del consumo de diésel, así como la eliminación de los gastos derivados del mantenimiento (como cambios de aceite, filtros y reparación de componentes mecánicos), suponen un beneficio económico tangible. Adicionalmente, la alta eficiencia energética de los motores eléctricos supone un menor consumo de energía, lo que se traduce en una reducción de la factura eléctrica y, por tanto, de los costes totales de explotación. Todo esto, sumado a los beneficios medioambientales y a una mayor eficacia operativa, permite que la migración de motores diésel a motores eléctricos no sólo sea factible, sino también beneficiosa, garantizando un retorno favorable de la inversión en un plazo de tiempo razonable.

Conclusiones.

- El cambio a motores eléctricos en la planta de bombeo de crudo en la estación Amazonas es fundamental para fomentar un desarrollo más sostenible y la protección del medio ambiente en una de las zonas más importantes y vulnerables del planeta, además de ser una manera viable de disminuir las emisiones y los gastos de explotación.

- Mediante el análisis del funcionamiento de los motores diésel de las unidades de bombeo de crudo ha revelado numerosos problemas significativos. Algunos ejemplos incluyen el alto consumo de combustible, los costosos gastos de mantenimiento y funcionamiento, así como las frecuentes averías mecánicas que causan paradas imprevistas y pérdidas de productividad. Además, la cantidad de contaminantes que producen estos motores aumentan la probabilidad de violar las leyes ambientales y poner en peligro el medio ambiente.

- La implementación de motores eléctricos WEG W60 en la planta de bombeo de crudo es una medida sensata y ventajosa desde un punto de vista operativo, financiero, medioambiental y tecnológico. La eficiencia energética, la reducción de costos operativos, la sostenibilidad y la confiabilidad de los motores diésel hacen que la inversión en ellos sea justificada y preferible. Esta elección está respaldada por el uso de motores WEG W60, que ofrecen el mejor equilibrio posible entre precio, rendimiento y longevidad. El cambio de la planta a un funcionamiento basado en motores eléctricos aumenta su competitividad y la prepara para una época en la que la eficacia operativa y el cumplimiento de las normas medioambientales serán aún más importantes.

Recomendaciones.

- Desarrollar un sistema de monitorización predictiva de los motores eléctricos instalados, para prever posibles averías y optimizar el mantenimiento preventivo, con el fin de optimizar la vida útil de los equipos y reducir los costes de explotación.
- Integrar fuentes de energía renovable, como la solar o eólica, en la planta de bombeo, con el fin de complementar el suministro eléctrico de los motores y reducir aún más la dependencia de fuentes no renovables y las emisiones de carbono.
- Optimizar el diseño de la red de distribución eléctrica existente en la planta, incluyendo la posibilidad de actualizar las líneas de transmisión y los transformadores, para asegurar un suministro de energía más eficiente

Bibliografía

- Acosta, A. (2009). *La maldición de la abundancia* (1a. ed). Abya-Yala : Comité Ecuménico de Proyectos. <https://radialistas.net/wp-content/uploads/2022/09/La-Maldicion-De-La-Abundancia-Alberto-Acosta.pdf>
- Asamblea Constituyente. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. https://www.defensa.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/02/Constitucion-de-la-Republica-del-Ecuador_act_ene-2021.pdf
- Athanasopoulou, L., Bikas, H., & Stavropoulos, P. (2018). Comparative Well-to-Wheel Emissions Assessment of Internal Combustion Engine and Battery Electric Vehicles. *Procedia CIRP*, 78, 25–30. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.169>
- Baby, P., Rivadeneira, M., & Barragán, R. (2014). *La Cuenca Oriente: Geología y petróleo* (3era ed.). IFEA, IRD Institut de recherche pour le développement, Petroecuador. https://www.researchgate.net/profile/Patrice-Baby/publication/280027594_La_Cuenca_Oriente_Geologia_y_Petroleo_Nueva_edicion/links/55a47a9008ae00cf99c903a4/La-Cuenca-Oriente-Geologia-y-Petroleo-Nueva-edicion.pdf
- Bass, M. S., Finer, M., Jenkins, C. N., Kreft, H., Cisneros-Heredia, D. F., McCracken, S. F., Pitman, N. C. A., English, P. H., Swing, K., Villa, G., Di Fiore, A., Voigt, C. C., & Kunz, T. H. (2010). Global Conservation Significance of Ecuador's Yasuní National Park. *PLoS ONE*, 5(1), e8767. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0008767>
- Bernal, A. M. (2011). Power, Powerlessness and Petroleum: Indigenous Environmental Claims and the Limits of Transnational Law. *New Political Science*, 33(2), 143–167. <https://doi.org/10.1080/07393148.2011.570078>

- Bisset, M. (2015, diciembre 11). 1912/13 Peugeot GP Car: Especially its Engines.... *Primotipo...* <https://primotipo.com/2015/12/11/191213-peugeot-gp-car-especially-its-engines/>
- Bommer, P. M., & Baker, R. (2008). *A primer of oilwell drilling* (7th ed). University of Texas at Austin.
- Chen, H., He, L., Chen, J., Yuan, B., Huang, T., & Cui, Q. (2019). Impacts of Clean Energy Substitution for Polluting Fossil-Fuels in Terminal Energy Consumption on the Economy and Environment in China. *Sustainability*, 11(22), 6419. <https://doi.org/10.3390/su11226419>
- Chiodi, M. (2011). Three-Dimensional Simulation (3D-CFD Simulation). En M. Chiodi, *An Innovative 3D-CFD-Approach towards Virtual Development of Internal Combustion Engines* (pp. 52–72). Vieweg+Teubner. https://doi.org/10.1007/978-3-8348-8131-1_6
- Dai, X., Wei, K., & Zhang, X. (2019). Analysis of the Peak Load Leveling Mode of a Hybrid Power System with Flywheel Energy Storage in Oil Drilling Rig. *Energies*, 12(4), 606. <https://doi.org/10.3390/en12040606>
- De Morais, I. L. L., De Lima, A. A., Santos, I. N. L. D., Meneses, C., Da Silva, R. F., Lopes, R., Ramos, S. L. F., De Aguiar, A. V., Wrege, M. S., & Lopes, M. T. G. (2024). Climate Change Impact on the Distribution of Forest Species in the Brazilian Amazon. *Sustainability*, 16(8), 3458. <https://doi.org/10.3390/su16083458>
- Emadi, A. (Ed.). (2017). *Advanced Electric Drive Vehicles* (1st edition). CRC Press. <https://www.aston-recruitment.co.uk/wp-content/uploads/2022/12/Advanced-Electric-Drive-Vehicles-Energy-Power-Electronics-and-Machines-PDFDrive-.pdf>
- Finer, M., Jenkins, C. N., Pimm, S. L., Keane, B., & Ross, C. (2008). Oil and Gas Projects in the Western Amazon: Threats to Wilderness, Biodiversity, and Indigenous Peoples. *PLoS ONE*, 3(8), e2932. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002932>

- Fogla, N., Bybee, M., Mirzaeian, M., Millo, F., & Wahiduzzaman, S. (2017). Development of a K-k- ϵ Phenomenological Model to Predict In-Cylinder Turbulence. *SAE International Journal of Engines*, 10(2), 562–575. <https://doi.org/10.4271/2017-01-0542>
- Fontaine, G. (2003). *El precio del petróleo: Conflictos socio-ambientales y gobernabilidad en la región amazónica* (1a. ed). FLACSO, Sede Académica de Ecuador.
- García-Villacís, K., Ramos-Guerrero, L., Canga, J. L., Hidalgo-Lasso, D., & Vargas-Jentzsch, P. (2021). Environmental Impact Assessment of Remediation Strategy in an Oil Spill in the Ecuadorian Amazon Region. *Pollutants*, 1(4), 234–252. <https://doi.org/10.3390/pollutants1040019>
- Gevorkov, L., Domínguez-García, J. L., Rassõlkin, A., & Vaimann, T. (2022). Comparative Simulation Study of Pump System Efficiency Driven by Induction and Synchronous Reluctance Motors. *Energies*, 15(11), 4068. <https://doi.org/10.3390/en15114068>
- Green, D. W., & Willhite, G. P. (2018). *Enhanced Oil Recovery* (Second Edition). Society of Petroleum Engineers Richardson, Texas, USA. <https://doi.org/10.2118/9781613994948>
- Guo, H., Ding, Q., Song, Y., Tang, H., Wang, L., & Zhao, J. (2020). Predicting Temperature of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Deep Neural Network. *Energies*, 13(18), 4782. <https://doi.org/10.3390/en13184782>
- Hua, Y., Zhu, H., Gao, M., & Ji, Z. (2021). Design and Analysis of Two Permanent-Magnet-Assisted Bearingless Synchronous Reluctance Motors with Different Rotor Structure. *Energies*, 14(4), 879. <https://doi.org/10.3390/en14040879>
- IRENA. (2021). *World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway* (pp. 1–28). International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/>

/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_WETO_Summary_2021_ES.pdf

- Joshi, A. (2019). Review of Vehicle Engine Efficiency and Emissions. *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*, 1(2), 734–761. <https://doi.org/10.4271/2019-01-0314>
- Kimerling, J. (2013). *Oil, Contact, and Conservation in the Amazon: Indigenous Huaorani, Chevron, and Yasuni* (SSRN Scholarly Paper 2332782). <https://papers.ssrn.com/abstract=2332782>
- Kurkin, A., Kryukov, E., Masleeva, O., Petukhov, Y., & Gusev, D. (2024). Comparative Life Cycle Assessment of Electric and Internal Combustion Engine Vehicles. *Energies*, 17(11), 2747. <https://doi.org/10.3390/en17112747>
- Larrea, C., & Warnars, L. (2009). Ecuador's Yasuni-ITT Initiative: Avoiding emissions by keeping petroleum underground. *Energy for Sustainable Development*, 13(3), 219–223. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2009.08.003>
- Larrea M., C. (2006). *Hacia una historia ecológica del Ecuador: Propuestas para el debate* (1. ed). Corporación Editora Nacional: Universidad Andina Simón Bolívar: Ecociencia.
- Li, X., Liu, Q., Ma, Y., Wu, G., Yang, Z., & Fu, Q. (2024). Simulation Study on the Combustion and Emissions of a Diesel Engine with Different Oxygenated Blended Fuels. *Sustainability*, 16(2), 631. <https://doi.org/10.3390/su16020631>
- Lie, B. (2024). Electric Submersible Pump Lifted Oil Field: Basic Model for Control, and Comparison of Simulation Tools. *Energies*, 17(2), 507. <https://doi.org/10.3390/en17020507>
- López, E. J., Leyva, P. A. L., López, A. A., Estrella, F. J. O., Vázquez, J. J. D., Velázquez, B. L., & Molina, V. M. M. (2024). Mechanics 4.0 and

- Mechanical Engineering Education. *Machines*, 12(5), 320.
<https://doi.org/10.3390/machines12050320>
- Mena, C. F., Bilsborrow, R. E., & McClain, M. E. (2006). Socioeconomic Drivers of Deforestation in the Northern Ecuadorian Amazon. *Environmental Management*, 37(6), 802–815.
<https://doi.org/10.1007/s00267-003-0230-z>
- Menon, E. S. (Ed.). (2011). *Pipeline planning and construction field manual*. Gulf Professional Pub.
- Mokhatab, S., Poe, W. A., & Zatzman, G. (2012). *Handbook of natural gas transmission and processing* (Second edition). Gulf Professional Publishing.
- Muñoz-Maldonado, Y., Correa-Quintana, E., & Ospino-Castro, A. (2023). Electrification of Industrial Processes as an Alternative to Replace Conventional Thermal Power Sources. *Energies*, 16(19), 6894.
<https://doi.org/10.3390/en16196894>
- Muteba, M. (2021). Optimization of Air Gap Length and Capacitive Auxiliary Winding in Three-Phase Induction Motors Based on a Genetic Algorithm. *Energies*, 14(15), 4407. <https://doi.org/10.3390/en14154407>
- Neumann, T. (2023). Efficient Use of Low-Emission Power Supply for Means of Transport. *Energies*, 16(8), 3536.
<https://doi.org/10.3390/en16083536>
- OCP Ecuador. (2024). *Transporte de crudo pesado: Ruta de las estaciones*. <https://www.ocpecuador.com/funcionamiento/transporte-crudo-pesado/>
- Oladimeji, D., Gupta, K., Kose, N. A., Gundogan, K., Ge, L., & Liang, F. (2023). Smart Transportation: An Overview of Technologies and Applications. *Sensors*, 23(8), 3880. <https://doi.org/10.3390/s23083880>

- Oliveri, L. M., D'Urso, D., Trapani, N., & Chiacchio, F. (2023). Electrifying Green Logistics: A Comparative Life Cycle Assessment of Electric and Internal Combustion Engine Vehicles. *Energies*, 16(23), 7688. <https://doi.org/10.3390/en16237688>
- Padovan, C., Fagundes, J. A. G., D'Agosto, M. D. A., Angelo, A. C. M., & Carneiro, P. J. P. (2023). Impact of Fuel Production Technologies on Energy Consumption and GHG Emissions from Diesel and Electric–Hydrogen Hybrid Buses in Rio de Janeiro, Brazil. *Sustainability*, 15(9), 7400. <https://doi.org/10.3390/su15097400>
- Podmiljšak, B., Saje, B., Jenuš, P., Tomše, T., Kobe, S., Žužek, K., & Šturm, S. (2024). The Future of Permanent-Magnet-Based Electric Motors: How Will Rare Earths Affect Electrification? *Materials*, 17(4), 848. <https://doi.org/10.3390/ma17040848>
- Qi, Z., Gu, M., Cao, J., Zhang, Z., You, C., Zhan, Y., Ma, Z., & Huang, W. (2023). The Effects of Varying Altitudes on the Rates of Emissions from Diesel and Gasoline Vehicles Using a Portable Emission Measurement System. *Atmosphere*, 14(12), 1739. <https://doi.org/10.3390/atmos14121739>
- Reif, K. (Ed.). (2014). *Diesel Engine Management: Systems and Components*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-03981-3>
- Roa G., D. (2018). *Cambio climático y transición energética* [Trabajo Fin de Grado, Universidad Politécnica de Madrid]. https://oa.upm.es/53804/1/TFG_DAVID_ROA_GONZALEZ.pdf
- Romero, C. A., Correa, P., Ariza Echeverri, E. A., & Vergara, D. (2024). Strategies for Reducing Automobile Fuel Consumption. *Applied Sciences*, 14(2), 910. <https://doi.org/10.3390/app14020910>
- San Sebastián, M., & Karin Hurtig, A. (2004). Oil exploitation in the Amazon basin of Ecuador: A public health emergency. *Revista Panamericana*

de Salud Pública, 15(3). <https://doi.org/10.1590/S1020-49892004000300014>

Shahid, S. M., Ko, S., & Kwon, S. (2019). Real-Time Classification of Diesel Marine Engine Loads Using Machine Learning. *Sensors*, 19(14), 3172. <https://doi.org/10.3390/s19143172>

Speight, J. G. (2015). *Handbook of petroleum product analysis* (2nd edition). Wiley.

Stone, R. (1999). *Introduction to Internal Combustion Engines*. Macmillan Education UK. <https://doi.org/10.1007/978-1-349-14916-2>

Suárez, E., Morales, M., Cueva, R., Utreras Bucheli, V., Zapata-Ríos, G., Toral, E., Torres, J., Prado, W., & Vargas Olalla, J. (2009). Oil industry, wild meat trade and roads: Indirect effects of oil extraction activities in a protected area in north-eastern Ecuador. *Animal Conservation*, 12(4), 364–373. <https://doi.org/10.1111/j.1469-1795.2009.00262.x>

Takács, G. (2018). *Electrical submersible pumps manual: Design, operations, and maintenance* (Second edition). Gulf Professional Publishing.

Ullah, I., Safdar, M., Zheng, J., Severino, A., & Jamal, A. (2023). Employing Bibliometric Analysis to Identify the Current State of the Art and Future Prospects of Electric Vehicles. *Energies*, 16(5), 2344. <https://doi.org/10.3390/en16052344>

Veza, I., Asy'ari, M. Z., Idris, M., Epin, V., Rizwanul Fattah, I. M., & Spraggon, M. (2023). Electric vehicle (EV) and driving towards sustainability: Comparison between EV, HEV, PHEV, and ICE vehicles to achieve net zero emissions by 2050 from EV. *Alexandria Engineering Journal*, 82, 459–467. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.10.020>

Weg. (2024). *W60 Three-Phase Induction Motor: Technical Catalogue Asian Market*. <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h07/he0/WEG-w60-three-phase-induction-motor-50084225-brochure-english-web.pdf>

Wild, T. W., & Davis, J. M. (2023). *Aircraft powerplants: Powerplant certification* (Tenth edition). McGraw Hill.

Wright, M. (2024, mayo 2). *Harry Miller Changed The Course Of Race Engine History*. EngineLabs. <https://www.enginelabs.com/news/harry-miller-changed-the-course-of-race-engine-history/>

Yoon, K.-Y., & Baek, S.-W. (2019). Robust Design Optimization with Penalty Function for Electric Oil Pumps with BLDC Motors. *Energies*, 12(1), 153. <https://doi.org/10.3390/en12010153>

Yue, Z., & Liu, H. (2023). Advanced Research on Internal Combustion Engines and Engine Fuels. *Energies*, 16(16), 5940. <https://doi.org/10.3390/en16165940>



DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Quispe Bravo, Guillermo Gabriel** con C.C: 230058032-7 autor del Trabajo de Titulación: **Diseño y análisis de factibilidad del cambio de motores de combustión a diésel por motores eléctricos en planta de bombeo de crudo en territorio amazónico**, previo a la obtención del título de **INGENIERO ELÉCTRICO** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 2 de septiembre del 2024

f. 
Nombre: Quispe Bravo, Guillermo Gabriel
C.C: 230058032-7

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA			
FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN			
TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Diseño y análisis de factibilidad del cambio de motores de combustión a diésel por motores eléctricos en planta de bombeo de crudo en territorio amazónico		
AUTOR(ES)	Quispe Bravo, Guillermo Gabriel		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Ing. Medina Moreira, Washington Ph.D.		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
CARRERA:	Ingeniería en Electricidad		
TITULO OBTENIDO:	Ingeniero Eléctrico		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	2 de septiembre del 2024	No. DE PÁGINAS:	80
ÁREAS TEMÁTICAS:	Máquinas Eléctricas, Sistemas de Control y Controles Eléctricos		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Motores Eléctricos, Planta de Bombeo, Bombas Elevadoras, Generadores Eléctricos, Sistemas de Control, Eficiencia Energética		
RESUMEN/ABSTRACT	<p>Este trabajo de integración curricular, denominado "Diseño y análisis de factibilidad del cambio de motores de combustión a diésel por motores eléctricos en una planta de bombeo de crudo en el territorio amazónico", evaluó la viabilidad técnica y económica de reemplazar los motores diésel por motores eléctricos en una planta de bombeo de crudo. El estudio incluyó la identificación de tecnologías eléctricas, el análisis de costos de implementación y operación, y la comparación con los sistemas actuales de combustión. El diagnóstico de los motores diésel reveló problemas significativos, como el alto consumo de combustible, elevados costos de mantenimiento y operación, frecuentes fallos mecánicos y la emisión de contaminantes que ponen en riesgo el entorno ambiental y podrían violar normativas vigentes. En base a estos resultados, se propuso la implementación de motores eléctricos WEG W60, que ofrecen una solución más eficiente y sostenible desde el punto de vista operativo, financiero y medioambiental. El análisis concluyó que el cambio a motores eléctricos no solo disminuye los costos de operación y las emisiones contaminantes, sino que también mejora la fiabilidad del sistema, lo que permite una mayor competitividad de la planta en el futuro. La adopción de motores eléctricos garantiza una mayor eficiencia energética y promueve el desarrollo sostenible en una región tan vulnerable como el Amazonas.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593 96 087 7957	E-mail: guillog7@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE	Nombre: Ubilla González, Ricardo Xavier		
	Teléfono: +593 99 952 8515		
	E-mail: ricardo.ubilla@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			



**Presidencia
de la República
del Ecuador**



**Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes**



SENESCYT

Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

DIRECCIÓN URL (tesis en la web):