



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

TEMA:

**Diseño de un sistema de bombeo eléctrico en una finca camaronera para
mejorar la eficiencia energética del sistema productivo acuícola, ubicado en
Sabana Grande – Vía a la Costa.**

AUTOR:

Morante Murillo Gregory Augusto

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

TUTOR:

Ing. Sánchez Bonilla Ronnie Alexander, Ms.C.

Guayaquil, Ecuador

04 de marzo de 2026



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por **Morante Murillo Gregory Augusto**, como requerimiento para la obtención del título de Ingeniero Eléctrico.

TUTOR (A)

Ing. Sánchez Bonilla Ronnie Alexander, Ms.C.

DIRECTOR DE LA CARRERA

Ing. Bohórquez Escobar Celso Bayardo, Ph.D.

Guayaquil, a los 04 días del mes de marzo del año 2026



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

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

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Morante Murillo Gregory Augusto

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación: **Diseño de un sistema de bombeo eléctrico en una finca camaronera para mejorar la eficiencia energética del sistema productivo acuícola, ubicado en Sabana Grande – Vía a la Costa** 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 Titulación referido.

Guayaquil, a los 04 días del mes de marzo del año 2026

EL AUTOR:

f. 

Morante Murillo Gregory Augusto



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

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

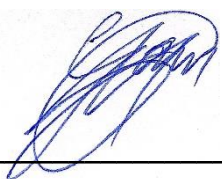
AUTORIZACIÓN

Yo, Morante Murillo Gregory Augusto

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación **Diseño de un sistema de bombeo eléctrico en una finca camaronera para mejorar la eficiencia energética del sistema productivo acuícola, ubicado en Sabana Grande – Vía a la Costa**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 04 días del mes de marzo del año 2026

EL AUTOR:

f. 

Morante Murillo Gregory Augusto

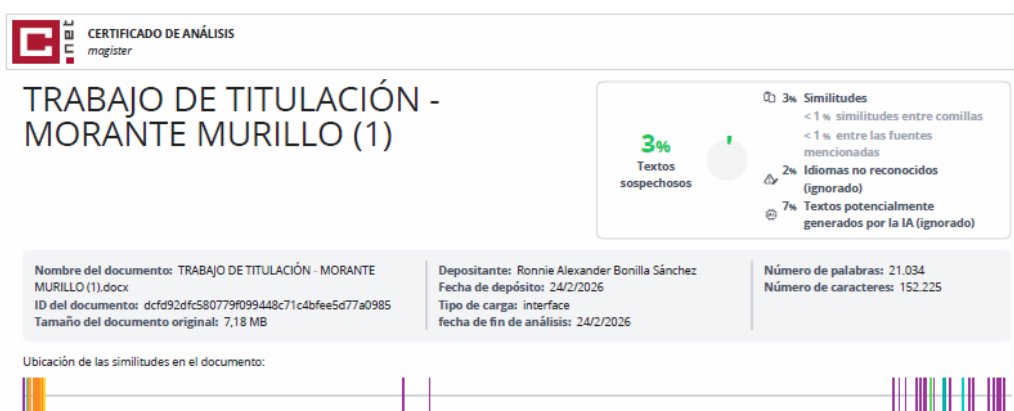


UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD

REPORTE DE COMPILATIO



La Dirección de las Carreras Telecomunicaciones, Electricidad y Electrónica y Automatización revisó el Trabajo de Integración Curricular, **Diseño de un sistema de bombeo eléctrico en una finca camaronera para mejorar la eficiencia energética del sistema productivo acuícola, ubicado en Sabana Grande – Vía a la Costa** presentado por el estudiante Morante Murillo Gregory Augusto, de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, donde obtuvo del programa COMPILATIO el valor de **3%** de coincidencias, considerando ser aprobada por esta Dirección.

Ing. Sánchez Bonilla Ronnie Alexander, Ms.C.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, de manera muy especial, a mi abuelita. Este logro lleva su nombre tanto como el mío. Gracias por tu apoyo incansable, por su amor incondicional y por ser mi guía y sostén en cada etapa importante de mi vida y para toda mi familia. Todo lo que soy y lo que estoy logrando tiene en gran parte tu huella.

A mis hermanas y a mi madre, por ser parte esencial de mi crecimiento y por sostenerme siempre con su cariño y respaldo.

A mi esposa, por creer en mí, por impulsarme a seguir adelante y por compartir conmigo cada sacrificio que implicó este proceso.

Este trabajo no representa únicamente un logro académico, sino el resultado del amor, el apoyo y la confianza de quienes han estado conmigo en cada paso del camino.

AGREDECIMIENTO

Quiero expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a mi abuelita, quien ha sido un pilar fundamental no solo en este proceso académico, sino en cada etapa de mi vida. Su apoyo incondicional, sus consejos, su confianza en mí y su presencia constante, a pesar de la distancia, han sido una fuerza silenciosa pero determinante para alcanzar esta meta. Gran parte de este logro es reflejo de su amor, su entrega y todo lo que ha hecho por mí.

A mis hermanas y a mi madre, gracias por acompañarme siempre, por su comprensión en los momentos de mayor exigencia y por creer en mis capacidades incluso cuando el camino parecía difícil. Su respaldo ha sido esencial para mantenerme firme y enfocado.

A mi esposa, gracias por caminar a mi lado durante este proceso, por tu paciencia, tu apoyo incondicional y por darme ánimo en cada momento de cansancio o duda. Tu compañía ha sido una fuente constante de motivación y fortaleza.

También agradezco a quienes aportaron académica y profesionalmente al desarrollo de este trabajo, contribuyendo a su culminación.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

**ING. BOHÓRQUEZ ESCOBAR CELSO BAYARDO, PH.D.
DECANO O DIRECTOR DE CARRERA**

f. f. _____

**ING. RICARDO XAVIER UBILLA GONZALEZ, MS.C.
COORDINADOR DEL ÁREA O DOCENTE DE LA CARRERA**

f. _____

**ING. EFRAÍN OLIVERIO VÉLEZ TACURI, MG.S.
OPONENTE**

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS	XII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
RESUMEN.....	XIV
ABSTRACT	XV
INTRODUCCIÓN	2
CAPÍTULO I.....	3
ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO.....	3
1.1. Definición del problema.....	3
1.2. Justificación del problema.....	3
1.3. Objetivos de la investigación	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4. Antecedentes de la investigación	5
1.5. Metodología de la investigación	6
1.6. Hipótesis.....	8
CAPÍTULO II	9
MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	9
2.1. Fundamentos de la acuicultura y producción camaronera	9
2.1.1. Elementos esenciales del sistema productivo camaronero.....	9
2.1.2. Importancia de la calidad del agua en el crecimiento y supervivencia	10
2.2. Sistemas de producción camaronera en el Ecuador	11
2.2.1. Sistema extensivo.....	12
2.2.2. Sistema semi-intensivo.....	13
2.2.3. Sistema intensivo.....	14
2.3. Importancia del bombeo en los sistemas acuícolas	15
2.3.1. Funciones operativas del bombeo en la camaricultura.....	15
2.3.2. Relación entre bombeo, calidad del agua y eficiencia productiva	16
2.4. Sistemas de bombeo utilizados en la acuicultura ecuatoriana.....	17
2.4.1. Bombeo mecánico accionado por motores de combustión interna	17
2.4.2. Bombeo eléctrico.....	17
2.4.3. Comparación general de sistemas de bombeo en la acuicultura ecuatoriana	18
2.5. Sistemas de bombeo mecánico y eléctrico	19
2.5.1. Bombeo mecánico accionado por diésel	19
2.5.2. Bombeo eléctrico.....	20
2.5.3. Comparación técnica y energética entre bombeo mecánico y eléctrico.....	21
2.6. Principios de hidráulica aplicados al bombeo	22
2.6.1. Caudal.....	23
2.6.2. Altura manométrica.....	24
2.6.3. Pérdidas de carga.....	25
2.7. Fundamentos de electromecánica aplicados al bombeo.....	27
2.7.1. Motores eléctricos	28
2.7.2. Acoplamiento bomba-motor.....	30
2.7.3. Eficiencia energética en sistemas de bombeo	31
2.8. Normativa técnica y ambiental aplicable a sistemas de bombeo eléctrico	32
2.8.1. Normativa técnica eléctrica aplicable	33
2.8.2. Normativa de eficiencia energética	33
2.8.3. Normativa ambiental aplicable a la acuicultura	34
2.8.4. Relación entre normativa y sostenibilidad del sistema de bombeo eléctrico	35

CAPÍTULO III.....	36
DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE BOMBEO EXISTENTE.....	36
3.1. Descripción general de la finca camaronera	36
3.2. Características del sistema productivo acuícola.....	37
3.3. Descripción del sistema de bombeo mecánico actual	38
3.3.1. Motores instalados.....	38
3.3.2. Reductores de velocidad.....	38
3.3.3. Bombas axiales verticales	39
3.3.4. Características generales del sistema actual.....	39
3.4. Levantamiento de información técnica	40
3.5. Análisis energético del sistema de bombeo existente	42
3.5.1. Potencia instalada	43
3.5.2. Estimación del consumo diario de combustible	43
3.5.3. Estimación del costo diario de combustible	43
3.6. Identificación de problemas técnicos, económicos y ambientales	44
3.6.1. Problemas técnicos.....	44
3.6.2. Problemas económicos	45
3.6.3. Problemas ambientales	45
CAPÍTULO IV.....	47
DISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO ELÉCTRICO PROPUESTO	47
4.1. Criterios de diseño del sistema de bombeo eléctrico	47
4.1.1. Caudal requerido	47
4.1.2. Altura manométrica total (HMT)	48
4.1.3. Horas de operación.....	48
4.1.4. Factor de seguridad	48
4.1.5. Condiciones ambientales.....	49
4.1.6. Eficiencia energética objetivo	49
4.1.7. Tipo de alimentación eléctrica disponible.....	50
4.2. Selección del tipo de bomba.....	50
4.2.1. Evaluación de alternativas.....	50
4.2.2. Curvas características y punto de operación	51
4.2.3. Justificación técnica	52
4.2.4. Conclusión de selección	53
4.3. Selección del motor eléctrico	53
4.3.1. Potencia requerida	54
4.3.2. Factor de servicio	54
4.3.3. Tipo de motor.....	55
4.3.4. Clase de eficiencia.....	55
4.3.5. Velocidad nominal	55
4.3.6. Condiciones ambientales y constructivas.....	56
4.3.7. Comparación de alternativas de motores	56
4.4. Cálculo hidráulico del sistema	57
4.4.1. Determinación del caudal de diseño (Q)	57
4.4.2. Selección preliminar del diámetro y velocidad del fluido.....	58
4.4.3. Cálculo de pérdidas de carga por fricción (hf).....	59
4.4.4. Pérdidas menores por accesorios (hm).....	60
4.4.5. Esquemas hidráulicos de soporte	61
4.5. Cálculo eléctrico del sistema.....	65
4.5.1. Potencia eléctrica y corriente nominal	65
4.5.2. Corriente de arranque	66

4.5.3.	Selección de conductores	66
4.5.4.	Verificación de caída de tensión	67
4.5.5.	Selección de protecciones eléctricas	68
4.5.6.	Resumen de parámetros eléctricos calculados	68
4.5.7.	Esquema unifilar simplificado	69
4.6.	Comparación técnica y energética entre el sistema mecánico y el sistema eléctrico	71
4.6.1.	Comparación de potencia instalada (HP vs kW).....	71
4.6.2.	Comparación de consumo energético	72
4.6.3.	Comparación de costo mensual.....	72
4.6.4.	Reducción estimada de emisiones.....	73
4.6.5.	Indicadores de eficiencia comparativa	73
CAPÍTULO V		75
ANÁLISIS DE LA TRANSICIÓN DEL SISTEMA		75
5.1.	Análisis FODA de la migración de bombeo mecánico a eléctrico	75
5.2.	Evaluación económica del sistema propuesto	76
5.2.1.	Estimación de inversión del sistema eléctrico (CAPEX).....	76
5.2.2.	Determinación del rango total de inversión	78
5.2.3.	Comparación económica actualizada	78
5.2.4.	Análisis e interpretación económica	79
5.3.	Evaluación del impacto ambiental del sistema eléctrico.....	80
5.3.1.	Emisiones de gases de efecto invernadero	80
5.3.2.	Riesgo de contaminación por hidrocarburos.....	80
5.3.3.	Contaminación acústica y vibraciones	81
5.4.	Análisis de sustentabilidad del sistema productivo acuícola	81
5.4.1.	Sustentabilidad técnica.....	82
5.4.2.	Sustentabilidad económica.....	82
5.4.3.	Sustentabilidad ambiental	82
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		84
Conclusiones		84
Recomendaciones.....		85
BIBLIOGRAFÍA.....		86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación conceptual de sistemas de producción camaronera	12
Tabla 2. Comparación general de sistemas de bombeo en la acuicultura ecuatoriana	18
Tabla 3. Comparación técnica y energética entre bombeo mecánico y bombeo eléctrico	21
Tabla 4. Tipos de pérdidas de carga en sistemas de bombeo	26
Tabla 5. Clasificación general de motores eléctricos por eficiencia	29
Tabla 6. Configuración técnica del sistema de bombeo existente.....	40
Tabla 7. Evaluación preliminar de diámetro por bomba	58
Tabla 8. Comparación de potencia instalada por unidad.....	71
Tabla 9. Comparación de costos energéticos mensuales por unidad	73
Tabla 10. Estimación de inversión del sistema eléctrico propuesto	77
Tabla 11. Comparación ambiental entre sistemas	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema general de un sistema camaronero en estanques: captación–bombeo–ingreso–cultivo–drenaje	11
Figura 2. Ciclo productivo del camarón en sistema extensivo y puntos de intervención hidráulica	13
Figura 3. Esquema general de un sistema de bombeo mecánico accionado por diésel	20
Figura 4. Parámetros hidráulicos en un sistema de bombeo: caudal, altura manométrica y pérdidas	23
Figura 5. Transformación electromecánica en un sistema de bombeo eléctrico.....	28
Figura 6. Alineación correcta e incorrecta en el acoplamiento bomba–motor	31
Figura 7. Vista general de la estación principal de bombeo y su integración con el canal de captación.....	41
Figura 8. Vista frontal del sistema de captación y disposición de bombas axiales verticales	42
Figura 9. Placa técnica del reductor de velocidad instalado en uno de los grupos de bombeo	42
Figura 10. Curva característica de la bomba (Q–H) y determinación del punto de operación del sistema.	52
Figura 11. Esquema hidráulico simplificado del sistema de bombeo propuesto (captación–bomba–impulsión–descarga).....	64
Figura 12. Perfil hidráulico conceptual del sistema: altura estática y pérdidas de carga	64
Figura 13. Esquema unifilar simplificado del sistema eléctrico del bombeo propuesto.	70

RESUMEN

La presente investigación desarrolla el diseño de un sistema de bombeo eléctrico en una finca camaronera ubicada en Sabana Grande – Vía a la Costa, con el propósito de mejorar la eficiencia energética del sistema productivo acuícola. El estudio parte del análisis técnico y energético del sistema de bombeo mecánico existente, el cual opera mediante motores diésel de alta potencia, generando elevados costos operativos y emisiones significativas de dióxido de carbono. Tras una revisión detallada de los datos y todos los cálculos hidráulicos y eléctricos, diseñamos un sistema alternativo alimentado por motores trifásicos de 250 kW con variadores de frecuencia. Esta configuración cumple con creces el requisito de renovar el 75 % del volumen de agua diariamente. También calculamos los costos y el ahorro, estimando un ahorro anual de aproximadamente \$313,200, lo que significa que la inversión se amortizaría en menos de dos años en un escenario de inversión moderado. Asimismo, el análisis ambiental evidenció la eliminación de aproximadamente 2.400 toneladas de CO₂ anuales generadas por el sistema diésel. Los resultados demuestran que la migración tecnológica es técnicamente viable, económicamente rentable y ambientalmente sostenible, contribuyendo a la modernización del sistema productivo acuícola y a la reducción de su huella energética.

Palabras clave: Bombeo eléctrico, eficiencia energética, acuicultura, sustentabilidad, análisis económico.

ABSTRACT

This research develops the design of an electric pumping system on a shrimp farm located in Sabana Grande – Vía a la Costa, with the aim of improving the energy efficiency of the aquaculture production system. The study is based on a technical and energy analysis of the existing mechanical pumping system, which operates using high-powered diesel engines, generating high operating costs and significant carbon dioxide emissions. After a detailed review of the data and all the hydraulic and electrical calculations, we designed an alternative system powered by 250 kW three-phase motors with variable frequency drives. This setup reliably meets the requirement of turning over 75% of the water volume every day. We also ran the numbers on costs and savings, estimating annual savings of around \$313,200—which means the investment would pay for itself in less than two years under a moderate investment scenario. Likewise, the environmental analysis showed the elimination of approximately 2,400 tons of CO₂ per year generated by the diesel system. The results demonstrate that technological migration is technically feasible, economically profitable, and environmentally sustainable, contributing to the modernization of the aquaculture production system and the reduction of its energy footprint.

Keywords: Electric pumping, energy efficiency, aquaculture, sustainability, economic analysis.

INTRODUCCIÓN

El sector acuícola ecuatoriano constituye uno de los pilares estratégicos de la economía nacional, siendo la producción de camarón uno de los principales rubros de exportación (Andrade & Pinargote, 2023). En este contexto, la eficiencia energética de los sistemas productivos adquiere especial relevancia, debido a que el consumo de energía representa uno de los costos operativos más significativos dentro de las fincas camaroneras, particularmente en los sistemas de bombeo de agua para recambio y mantenimiento de calidad hídrica (Ahmed & Bawayan, 2025).

En la granja camaronera de Sabana Grande – Vía a la Costa, el sistema de bombeo actual funciona con motores diésel de alta potencia. El problema radica en que estos motores tienen altos costos operativos, emiten grandes cantidades de gases de efecto invernadero, generan ruido constante y conllevan riesgos ambientales asociados al almacenamiento y manejo de combustible in situ. Por ello, es evidente la necesidad de explorar nuevas alternativas tecnológicas que puedan aumentar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental de la producción.

Precisamente por eso, esta investigación se centra en el diseño de un sistema de bombeo eléctrico que pueda mejorar el rendimiento energético del proceso acuícola. El objetivo es simple: satisfacer todos los requisitos hidráulicos y, al mismo tiempo, hacer que todo el sistema sea más sostenible, tanto económica como ambientalmente.

Para llevar a cabo este estudio, comenzamos analizando en detalle el funcionamiento del sistema actual. A partir de ahí, realizamos todos los cálculos hidráulicos y eléctricos necesarios para dimensionar correctamente la nueva instalación, realizamos una comparación económica en paralelo y evaluamos el impacto ambiental del cambio. También realizamos un análisis FODA para obtener una visión estratégica clara de lo que realmente implicaría la transición de un sistema mecánico a uno eléctrico.

El trabajo se organiza en cinco secciones principales: primero, un diagnóstico del funcionamiento del sistema actual; segundo, los fundamentos teóricos del trabajo; tercero, el diseño real del sistema eléctrico propuesto; cuarto, una comparación técnica y energética; y, finalmente, una evaluación general de lo que implicaría la transición. En definitiva, esta investigación ofrece una solución sólida y práctica que respalda tanto la modernización como la sostenibilidad a largo plazo de la operación acuícola.

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO

1.1. Definición del problema

En la parroquia Sabana Grande, ubicada en la Vía a la Costa, una parte importante de las fincas camaroneras aún opera con sistemas de bombeo mecánico accionados por motores de combustión interna, principalmente diésel. Si bien estos equipos han sido tradicionalmente utilizados por su disponibilidad y facilidad de operación, presentan limitaciones relevantes asociadas a su menor eficiencia energética, mayor consumo de combustible, mayores requerimientos de mantenimiento y costos operativos elevados. Como efecto, se aumenta el gasto de producción y se incrementan los impactos ambientales que se encuentran relacionados con la quema de combustibles fósiles.

Así pues, el problema central es el siguiente: nunca se ha realizado una evaluación técnica o energética adecuada que respalde la transición del bombeo mecánico al eléctrico, una evaluación que sea realmente más eficiente y sostenible. Sin un diagnóstico sólido de la configuración actual ni un plan de transición bien planificado, la granja se encuentra estancada operando en condiciones que incrementan los costos y consumen energía. Y eso, a su vez, perjudica tanto la competitividad como la viabilidad a largo plazo de toda la operación. Por ello, se requiere plantear una solución de diseño que optimice el proceso de bombeo, reduzca el consumo energético y contribuya a la sustentabilidad del sistema productivo camaronero en la zona de estudio.

1.2. Justificación del problema

El sistema de bombeo es un componente crítico dentro de la operación de una finca camaronera, debido a su influencia directa en el recambio y manejo del agua y, por tanto, en la estabilidad de las condiciones del cultivo (Arias & Olaya, 2021). En consecuencia, optimizar el bombeo representa una oportunidad significativa para reducir costos operativos y mejorar la eficiencia energética del sistema productivo acuícola. En este sentido, la transición de un sistema de bombeo mecánico a uno eléctrico se justifica por los beneficios técnicos, económicos y ambientales que puede aportar al proceso, entre los cuales destacan:

1. Disminución del consumo energético y del costo de operación asociado al uso de combustible y al mantenimiento del sistema.

2. Mayor estabilidad y control operacional del bombeo, con potencial mejora en la gestión del agua requerida para el desarrollo del cultivo.
3. Reducción del impacto ambiental relacionado con el uso de combustibles fósiles y sus emisiones asociadas.
4. Contribución al cumplimiento de criterios de sostenibilidad y regulaciones ambientales aplicables a actividades productivas.

El Balance Energético Nacional del Ecuador reporta una alta participación de derivados del petróleo en el consumo por fuentes, destacándose el diésel como una de las principales; esta realidad refuerza la pertinencia de evaluar alternativas tecnológicas que disminuyan la dependencia operativa de combustibles fósiles en sectores productivos de alta demanda energética (López, 2025).

Adicionalmente, durante la crianza del camarón, diversos factores ambientales y biológicos influyen en los indicadores de producción; por ejemplo, variaciones en parámetros fisicoquímicos del agua como temperatura, oxígeno disuelto, turbidez, pH, alcalinidad, dureza y concentraciones de amonio, nitritos y nitratos pueden incidir en el desempeño del cultivo. Por ello, el monitoreo y el control continuo de estas condiciones se consideran relevantes para reducir riesgos productivos (Velásquez & Solorzano, 2023).

En consecuencia, el diseño de un sistema de bombeo eléctrico constituye una solución técnica y estratégica para la finca camaronera objeto de estudio, al orientar la operación hacia un esquema más eficiente energéticamente, con menor impacto ambiental y con mejores condiciones para la gestión del proceso productivo, fortaleciendo la competitividad y la sostenibilidad de la acuicultura en la zona de Sabana Grande – Vía a la Costa.

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de bombeo eléctrico en una finca camaronera para mejorar la eficiencia energética del sistema productivo acuícola ubicado en Sabana Grande – Vía a la Costa.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Analizar las condiciones técnicas y energéticas de los equipos de bombeo existentes, obtenidas a partir del levantamiento de información.

2. Migrar un sistema de bombeo mecánico a eléctrico.
3. Realizar un análisis FODA de la transición del sistema mecánico hacia el sistema eléctrico.
4. Demostrar la sustentabilidad del sistema propuesto mediante un análisis de impacto ambiental.

1.4. Antecedentes de la investigación

El uso eficiente de la energía en los sistemas productivos acuícolas ha sido abordado en distintos estudios a nivel mundial, particularmente en aquellos relacionados con la optimización de los sistemas de bombeo, debido a su alta incidencia en el consumo energético y en los costos operativos. En este contexto, la transición de sistemas de bombeo accionados por motores de combustión interna hacia sistemas eléctricos ha sido analizada como una alternativa técnica para mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental.

En cuanto a lo internacional, en un estudio realizado en 2020 por Costafreda y Laborde, que analizó investigaciones de otros países, se analizó en profundidad el consumo energético en sistemas de bombeo para operaciones con uso intensivo de agua. Su hallazgo fue bastante claro: los motores eléctricos superan sistemáticamente al diésel en eficiencia energética; además, su funcionamiento y mantenimiento son más económicos a largo plazo. Adoptar la tecnología de bombeo eléctrico es una decisión inteligente y estratégica si se busca seriamente una mayor sostenibilidad energética en los procesos de producción.

En la misma línea, Sandoval (2023) realizó una comparación técnica y económica entre los sistemas de bombeo eléctrico y los de combustión interna. Los resultados mostraron claras reducciones tanto en el consumo específico de energía como en las emisiones contaminantes. Además del ahorro en costos, el autor señala que el bombeo eléctrico también permite un mejor control del caudal y se integra con mayor fluidez en sistemas automatizados, ambos factores clave para operaciones como la acuicultura, que dependen de condiciones hidráulicas estables.

Más cerca de Latinoamérica, un estudio de Cortés y Casillas (2021) analizó la eficiencia energética de los sistemas de bombeo utilizados en la acuicultura en las zonas costeras de México. Descubrieron que las bombas diésel incrementan significativamente los costos operativos, debido al consumo de combustible y la constante necesidad de reparaciones, mientras que los sistemas eléctricos tienden a funcionar con mayor fluidez y eficiencia, especialmente en operaciones continuas. Sus hallazgos resaltan cuánto podría beneficiarse el

sector acuícola regional de estudios técnicos sólidos que respalden una verdadera transformación tecnológica.

De la misma manera, Scroggins & Fry (2022) examinaron a fondo la sostenibilidad energética de las piscifactorías de América, la dependencia de los combustibles fósiles supone un lastre para el sector, especialmente cuando los precios del diésel empiezan a subir. Destacan que un diseño correcto desde el principio, con cálculos hidráulicos y eléctricos sólidos, marca una diferencia significativa. No se trata solo de reducir el impacto ambiental, sino de construir una base más sólida y sostenible para la producción acuícola en general.

A nivel nacional, Castro y Vidoza (2020) elaboraron el Balance Energético Nacional de Ecuador, y sus resultados son bastante reveladores, ya que, el diésel aún representa una parte considerable del consumo total de energía del país. Esto pone de relieve la dependencia de industrias clave, como la acuicultura, de los combustibles derivados del petróleo. También recalca que, ahora más que nunca, vale la pena explorar alternativas más limpias y energéticamente eficientes.

Luego, centrándose específicamente en el cultivo de camarón, López (2025) analizó cómo las condiciones del agua afectan las tasas de producción y la supervivencia. El estudio deja claro que vigilar de cerca factores como el oxígeno disuelto, la temperatura, el pH y los niveles de nitrógeno es clave para reducir la mortalidad y mejorar el rendimiento general. Y aunque el sistema de bombeo quizá no reciba toda la atención, en realidad desempeña un papel discreto pero crucial, ya que si el agua no fluye correctamente, ninguno de esos otros parámetros se mantiene estable a largo plazo.

Dicho esto, a pesar de todos los conocimientos útiles que aportan estos estudios, aún existe una brecha, especialmente en lo que respecta a las granjas camaroneras en lugares como Sabana Grande – Vía a la Costa. No se ha trabajado mucho en el diseño de sistemas de bombeo eléctrico que realmente se adapten al funcionamiento local. La mayoría de las investigaciones disponibles tienden a quedarse en la superficie, hablando de la eficiencia energética a grandes rasgos, sin profundizar en los detalles: diagnosticar lo que ya existe, recorrer la transición paso a paso y evaluar el impacto ambiental en su conjunto.

1.5. Metodología de la investigación

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, con un alcance descriptivo y aplicado, orientado al análisis técnico y energético de un sistema de bombeo

utilizado en una finca camaronera, así como al diseño de una alternativa eléctrica que permita mejorar la eficiencia energética del sistema productivo acuícola. El estudio no contempla experimentación directa, sino que se fundamenta en el levantamiento de información técnica, cálculos de ingeniería y evaluación comparativa de sistemas.

Desde el punto de vista metodológico, la investigación se estructura en las siguientes fases:

1. **Levantamiento de información:** En esta fase se realiza la inspección del sistema de bombeo mecánico existente en la finca camaronera, recopilando datos técnicos relacionados con el tipo de bomba, potencia instalada, consumo energético, horas de operación, caudal de trabajo y condiciones de operación. Esta información constituye la base para el diagnóstico del sistema actual.
2. **Análisis técnico y energético del sistema existente:** Una vez recopilados todos los datos, analizamos a fondo el rendimiento real del sistema de bombeo mecánico. Esto implicó identificar sus deficiencias, su consumo energético real y los costos operativos, especialmente en combustible y mantenimiento.
3. **Diseño del sistema de bombeo eléctrico propuesto:** En esta fase es donde el sistema de bombeo eléctrico empieza a tomar forma. Implica elegir la bomba y el motor adecuados, definir las especificaciones hidráulicas y eléctricas para que se ajusten a las necesidades reales del sistema y planificar la distribución e instalación de todo. El diseño se fundamenta en criterios de eficiencia energética, confiabilidad operativa y adecuación a las condiciones del sistema productivo acuícola.
4. **Análisis FODA de la transición tecnológica:** Se realiza un análisis de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas (FODA) asociadas a la migración del sistema de bombeo mecánico hacia un sistema eléctrico, con el fin de evaluar la viabilidad técnica, económica y estratégica de la propuesta.
5. **Evaluación del impacto ambiental:** Para concluir, analizamos el impacto ambiental del sistema de bombeo eléctrico propuesto, en concreto, cuánto reduce el uso de combustibles fósiles y la contaminación que conlleva.

Este enfoque nos proporcionó resultados sólidos y bien fundamentados, que realmente podemos respaldar. Y eso es lo que convierte al sistema de bombeo eléctrico en una opción real

y viable: está diseñado para aumentar la eficiencia energética y hacer que toda la operación acuícola sea más sostenible a largo plazo.

1.6. Hipótesis

La implementación de un sistema de bombeo eléctrico en una finca camaronera ubicada en Sabana Grande – Vía a la Costa permitirá mejorar la eficiencia energética del sistema productivo acuícola, evidenciada mediante la reducción del consumo energético y de los costos de operación, así como contribuirá a una operación más sostenible desde el punto de vista ambiental en comparación con el sistema de bombeo mecánico existente.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1. Fundamentos de la acuicultura y producción camaronera

La acuicultura se define como la actividad productiva orientada a la cría, cultivo y aprovechamiento de organismos acuáticos (peces, moluscos, crustáceos y algas) bajo algún nivel de intervención humana durante su ciclo de vida, con el propósito de incrementar la producción y asegurar el abastecimiento (Espinós, 2020). En términos operativos, esta intervención implica el control parcial o total de variables clave como densidad de siembra, alimentación, calidad de agua, bioseguridad, manejo sanitario y cosecha.

En el caso particular de la camaronicultura, el cultivo más extendido en el continente americano se centra en el camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*), especie cuya adaptabilidad a condiciones de cultivo, crecimiento y demanda comercial ha favorecido su amplia implementación en sistemas de estanques (De La Llave, 2021). La producción camaronera se desarrolla, por lo general, en zonas costeras con disponibilidad de agua y condiciones climáticas favorables, utilizando infraestructuras que permiten manejar el recambio y la circulación del agua para mantener parámetros adecuados para el crecimiento del organismo.

2.1.1. Elementos esenciales del sistema productivo camaronero

Un sistema productivo camaronero puede entenderse como un conjunto integrado de componentes físicos y procesos de manejo que buscan mantener un entorno acuático estable y productivo (Terreros, 2025). Entre sus elementos principales se incluyen:

- **Estanques de cultivo (piscinas):** unidades donde se desarrolla la fase de engorde. Su diseño considera área, profundidad, taludes, compuertas y drenajes.
- **Obras hidráulicas:** Son canales de abastecimiento y drenaje, con compuertas, tuberías y estructuras de control.
- **Sistema de bombeo:** componente que posibilita el recambio de agua, el llenado, el mantenimiento de niveles hidráulicos y el manejo operativo del estanque.
- **Aireación:** Son aparatos mecánicos que aumentan el oxígeno disuelto y ayudan a la mezcla del agua.

- **Manejo productivo:** Aquí se engloba la preparación del estanque, siembra, alimentación, monitoreo, controles sanitarios y cosecha.

El rendimiento del cultivo depende del equilibrio entre el metabolismo del camarón, la productividad natural del estanque (como el fitoplancton y la vida bentónica) y la intervención humana, como la alimentación, la aireación y el intercambio de agua (Tacon & Cody, 2025). La cuestión es que, cuantos más camarones se siembran, mayor es la presión sobre todo el sistema. Esto significa que es necesario controlar la calidad del agua, invertir más energía y contar con mejor tecnología para que todo funcione correctamente.

2.1.2. Importancia de la calidad del agua en el crecimiento y supervivencia

La productividad camaronera está fuertemente condicionada por el equilibrio fisicoquímico del agua. Durante el ciclo de cultivo, variaciones en parámetros como temperatura, oxígeno disuelto, pH, turbidez, alcalinidad, dureza y compuestos nitrogenados (amonio, nitritos, nitratos) pueden afectar el crecimiento, el consumo de alimento y la supervivencia. Por esta razón, la operación se apoya en monitoreo periódico y acciones correctivas que, en muchos casos, dependen de la capacidad del sistema hidráulico para renovar o estabilizar el medio de cultivo.

En cuanto a la gestión del agua, cambiarla y mantener niveles estables son simplemente formas prácticas de anticiparse a problemas como la acumulación de residuos, cambios repentinos de temperatura o una disminución excesiva del oxígeno. En instalaciones donde el intercambio de agua depende del bombeo, la fiabilidad y eficiencia de la bomba pueden determinar el éxito o el fracaso de la operación.

La Figura 1 ofrece una visión general del funcionamiento del sistema de producción de camarones en estanques. Describe el recorrido del agua: desde su captación, ya sea de un canal o embalse, pasando por compuertas o tuberías de entrada hasta el estanque de engorde, y finalmente drenando hacia los canales de descarga. También muestra con precisión la función del sistema de bombeo en ese flujo.

Figura 1. Esquema general de un sistema camaronero en estanques: captación–bombeo–ingreso–cultivo–drenaje



Nota: Elaboración propia en base a la información de (Davis & Ullman, 2018).

2.2. Sistemas de producción camaronera en el Ecuador

Los sistemas de producción camaronera se clasifican, de manera general, en función del nivel de tecnificación, la densidad de siembra, el grado de dependencia de alimento balanceado, el uso de aireación, la frecuencia de recambio de agua, y los rendimientos esperados. En Ecuador, el cultivo de camarón se ha caracterizado desde hace mucho tiempo por modelos de producción extensivos y semi-intensivos. Los informes de la industria muestran que el sector se ha desarrollado principalmente en torno a prácticas de intensidad baja a media, con estanques y sistemas de intercambio de agua que dependen en gran medida del bombeo en una amplia gama de configuraciones (Borja & Guara, 2025).

Para mayor claridad y coherencia, este estudio divide los datos en tres categorías que se encuentran frecuentemente en la literatura técnica: extensivo, semi-intensivo e intensivo. Esta clasificación ayuda a comprender el rendimiento del sistema, tanto en términos de producción como de consumo energético, y ofrece un sólido respaldo técnico que justifica la modernización del sistema de bombeo, especialmente al cambiar de equipos diésel a eléctricos.

La Tabla 1 presenta una comparación de los sistemas extensivos, semi-intensivos e intensivos. Analiza los factores operativos clave como densidad de población, alimentación, aireación, recambio de agua y rendimiento general basándose en descripciones técnicas del cultivo de *L. vannamei*, ampliamente utilizadas a nivel internacional, que se ajustan a la realidad de las operaciones en Latinoamérica (Gonzabay & Vite, 2021).

Tabla 1. Comparación conceptual de sistemas de producción camaronera

Variable técnica	Extensivo	Semi-intensivo	Intensivo
Densidad de siembra (PL/m ²)	Baja (muy variable; típicamente baja)	10–30 PL/m ²	Alta (superior al semi-intensivo; puede ser >30 PL/m ² , según tecnificación)
Alimentación	Predomina alimento natural del estanque; fertilización; suplementación limitada	Alimento natural + balanceado 2–3 veces al día	Mayor dependencia de balanceado; manejo más estricto de raciones
Aireación	No usual o mínima	Mínima o puntual	Frecuente/indispensable según densidad
Recambio de agua	Bajo a moderado; depende del manejo y condiciones	Regular por bombeo	Regular y más exigente; depende del diseño
Rendimiento típico	150–500 kg/ha/ciclo	500–2.000 kg/ha/ciclo	Mayor que semi-intensivo (depende del paquete tecnológico)
Nivel de control	Bajo	Medio	Alto

Fuente: Información obtenida de (Gonzabay & Vite, 2021).

2.2.1. Sistema extensivo

Los sistemas extensivos son bastante discretos en cuanto a tecnología. La producción aquí depende en gran medida de lo que el estanque ofrece naturalmente: como fitoplancton y otros organismos presentes en el agua, que se fomentan mediante una fertilización básica y prácticas de manejo sencillas. La idea es mantener el sistema funcionando con mínimas aportaciones externas, este enfoque reduce algunos costos directos, pero también significa que no se obtendrán los mismos rendimientos que con sistemas más intensivos (Castro & Díaz, 2022).

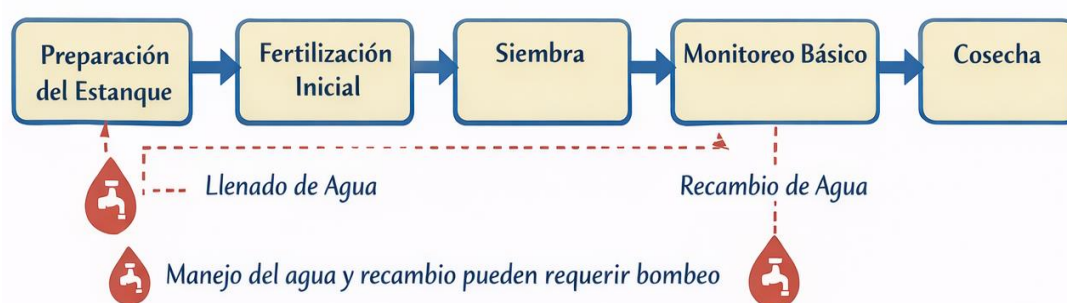
En cuanto a lo que realmente se puede obtener del sistema, los rendimientos suelen oscilar entre 150 y 500 kilos por hectárea por ciclo, con uno o quizás dos ciclos al año, dependiendo del clima y la gestión. Las densidades de siembra son bajas y no hay mucho control sobre variables clave como el oxígeno disuelto o la estabilidad general del sistema. Por

lo tanto, en definitiva, el rendimiento del cultivo depende de las condiciones ambientales y de la capacidad natural del estanque para soportar su crecimiento (Ahmad & Asif, 2024).

Desde la perspectiva energética, el extensivo suele requerir menos aireación y, en algunos casos, menor recambio de agua. Sin embargo, cuando la operación depende del bombeo para llenado o recambio (por condiciones de marea, nivel del canal o diseño hidráulico), la eficiencia del sistema de bombeo sigue siendo relevante, ya que el bombeo se vuelve un costo fijo necesario para sostener la operación hidráulica mínima del cultivo (Hashemy & Hasani, 2020).

La Figura 2 presenta un diagrama de flujo del ciclo productivo en un sistema extensivo (preparación del estanque → fertilización inicial → siembra → monitoreo básico → cosecha), indicando los puntos donde el manejo del agua y el recambio pueden requerir bombeo (Cedeño, 2020).

Figura 2. *Ciclo productivo del camarón en sistema extensivo y puntos de intervención hidráulica*



Nota: Elaboración propia en base a la información de (Cedeño, 2020).

2.2.2. Sistema semi-intensivo

El sistema semi-intensivo representa un modelo intermedio entre productividad natural y tecnificación, ampliamente descrito como común en América Latina. Este sistema incorpora una mayor densidad de siembra, uso sistemático de alimento balanceado y recambios de agua más regulares para sostener el equilibrio del estanque. En literatura técnica se reportan densidades típicas de 10 a 30 postlarvas por metro cuadrado, estanques de 1 a 5 hectáreas, profundidades cercanas a 1,0–1,2 m, recambio de agua regular mediante bombeo y aireación mínima (Arancibia & Cáceres, 2022).

En sistemas semi-intensivos, el recambio de agua desempeña un papel fundamental: ayuda a controlar la calidad del agua, elimina los desechos y crea mejores condiciones para la conversión alimenticia (Salazar & Silva, 2021). Por eso, el sistema de bombeo cobra tanta

importancia. No se trata solo de estar inactivo, sino de funcionar regularmente para garantizar que circule la cantidad correcta de agua y que los niveles se mantengan dentro de los límites necesarios.

En lo que respecta a la producción, los rendimientos suelen oscilar entre 500 y 2.000 kilos por hectárea por ciclo y, con buenas condiciones y una gestión sólida, a menudo se pueden realizar dos ciclos al año (Medel & Piringer, 2022). En el caso ecuatoriano, reportes sectoriales caracterizan la producción nacional como predominantemente semi-intensiva en estanques, lo cual refuerza la pertinencia de análisis energéticos centrados en bombeo y manejo hidráulico (Oscullo & Carvajal, 2024).

Dado que el bombeo suele ejecutarse por tiempos prolongados y con caudales significativos, el semi-intensivo es especialmente sensible a:

- Eficiencia del conjunto bomba–motor.
- Pérdidas hidráulicas en conducciones.
- Estabilidad eléctrica (si el sistema es eléctrico).
- Costos energéticos por kWh o por combustible (si el sistema es mecánico).

Por ello, en una transición de bombeo mecánico a eléctrico, el semi-intensivo ofrece un contexto claro para medir mejoras en eficiencia energética y reducción de costos operativos.

2.2.3. Sistema intensivo

El sistema intensivo se caracteriza por un alto nivel de tecnificación y una mayor concentración de biomasa por unidad de área. A diferencia del extensivo, la productividad del intensivo depende principalmente de la alimentación balanceada, el control continuo de la calidad del agua y el uso frecuente de aireación y recambio, en función de la densidad de cultivo y de la carga orgánica generada en el sistema (Preeti, 2024).

En el intensivo, el bombeo puede cumplir múltiples propósitos: recambio de agua, control térmico, manejo de oxígeno indirecto (por mezcla y renovación), y soporte a procesos complementarios (reservorios, sedimentación o tratamiento, según el caso) (Poirier & Lofti, 2023). Esto implica que el consumo energético total tiende a incrementarse respecto a sistemas menos tecnificados, y el desempeño del cultivo se vuelve más dependiente de la confiabilidad de equipos electromecánicos.

A nivel de análisis técnico, este sistema permite comprender que, a mayor densidad y control, mayor será el peso de:

- Energía por bombeo y/o aireación.
- Eficiencia del motor.
- Dimensionamiento eléctrico.
- Planificación de operación y mantenimiento.

En consecuencia, aunque el caso de estudio se ubique en una modalidad específica (por ejemplo, semi-intensiva), la inclusión del sistema intensivo en el marco teórico permite contextualizar la escalabilidad y el impacto energético de la tecnificación en camaronicultura.

2.3. Importancia del bombeo en los sistemas acuícolas

El bombeo de agua constituye uno de los componentes operativos más relevantes dentro de los sistemas acuícolas, ya que permite garantizar la disponibilidad, circulación y control del recurso hídrico necesario para el desarrollo del cultivo (Arias & Olaya, 2021). En el cultivo de camarón, el bombeo implica mucho más que simplemente llenar los estanques al inicio. Desempeña un papel directo día tras día: mantiene los niveles de agua donde deben estar, gestiona los intercambios parciales o totales de agua y ayuda a mantener las condiciones hídricas que determinan el éxito o el fracaso del entorno de cultivo (Colón & Solorzano, 2023).

Desde el punto de vista productivo, el agua es el entorno principal donde todo ocurre para los camarones. Por lo tanto, la calidad y la consistencia del agua tienen un impacto directo en su crecimiento, su supervivencia y la eficiencia con la que transforman el alimento (Yusoff & Umi, 2024). En este contexto, el sistema de bombeo se convierte en un elemento estratégico para sostener el equilibrio del ecosistema del estanque, especialmente en escenarios donde las condiciones naturales (mareas, lluvias o evaporación) no son suficientes para garantizar una renovación adecuada del agua (Deng & Bailey, 2022).

2.3.1. Funciones operativas del bombeo en la camaronicultura

En un sistema acuícola, el bombeo cumple diversas funciones técnicas, entre las que se destacan:

- Llenar los estanques por primera vez, justo antes de que entren las postlarvas.

- Intercambiar agua para diluir los desechos y mantener estable la calidad del agua.
- Mantener los niveles de agua en su nivel adecuado, compensando las pérdidas por evaporación o filtración.
- Ayudar cuando la calidad del agua se ve afectada, como cuando disminuye el oxígeno o se acumulan amoníaco y nitritos, introduciendo agua fresca.
- Drenar el agua al momento de la cosecha o durante las tareas de saneamiento.

Estas funciones adquieren mayor relevancia a medida que se incrementa el nivel de tecnificación del sistema productivo, ya que el requerimiento de agua y la dependencia de infraestructura hidráulica se intensifican.

2.3.2. Relación entre bombeo, calidad del agua y eficiencia productiva

El recambio de agua mediante bombeo constituye un mecanismo operativo para mitigar riesgos asociados a la acumulación de residuos metabólicos, restos de alimento no consumido y productos nitrogenados (Nair & Junge, 2025). También ayuda a suavizar los cambios de temperatura y favorece la estabilidad del oxígeno, especialmente en configuraciones donde la aireación es limitada o ni siquiera es una opción.

Desde una perspectiva energética, el bombeo es uno de los mayores consumidores de energía en una granja camaronera, al igual que la aireación, cuando esta forma parte de la instalación. Por eso, la eficiencia del sistema de bombeo es fundamental. Se trata básicamente de cuánta agua se mueve por la energía consumida, y esa proporción afecta directamente los costos operativos (Naval & Yusta, 2021). Un sistema sobredimensionado, mal seleccionado o con bajas eficiencias hidráulicas y electromecánicas incrementa el consumo energético sin aportar beneficios proporcionales al proceso productivo.

En consecuencia, el análisis del bombeo no debe limitarse únicamente a su capacidad de suministro de agua, sino que debe considerar variables como caudal requerido, altura manométrica, pérdidas de carga, tiempo de operación y eficiencia del conjunto bomba–motor, aspectos que resultan determinantes para la sostenibilidad técnica y económica del sistema acuícola (Gopal & Mohanraj, 2020).

2.4. Sistemas de bombeo utilizados en la acuicultura ecuatoriana

En el contexto de la acuicultura ecuatoriana, y particularmente en la producción camaronera desarrollada en zonas costeras, se emplean distintos sistemas de bombeo cuya selección responde a factores como la disponibilidad energética, el diseño hidráulico de la finca, el nivel de tecnificación del cultivo y los costos de inversión y operación (Rodríguez, 2024). De manera general, estos sistemas pueden clasificarse según el tipo de accionamiento del equipo de bombeo.

2.4.1. Bombeo mecánico accionado por motores de combustión interna

El bombeo mecánico, accionado principalmente por motores diésel, ha sido históricamente uno de los sistemas más utilizados en la acuicultura ecuatoriana, debido a su autonomía operativa y a la facilidad de implementación en zonas con acceso limitado a redes eléctricas (Andrade & Pinargote, 2023). Este tipo de sistema integra un motor de combustión interna acoplado directamente a la bomba, generalmente mediante eje rígido o acoplamiento flexible.

Entre sus características operativas se incluyen:

- Independencia de la red eléctrica.
- Capacidad de operar en ubicaciones remotas.
- Mayor consumo energético específico por unidad de volumen bombeado.
- Costos elevados asociados a combustible y mantenimiento preventivo y correctivo.

Desde el punto de vista ambiental, este sistema presenta desventajas relacionadas con la emisión de gases contaminantes y el manejo de combustibles fósiles, lo que incide negativamente en la sostenibilidad del proceso productivo.

2.4.2. Bombeo eléctrico

El bombeo eléctrico se basa en el accionamiento de la bomba mediante un motor eléctrico, alimentado desde la red de distribución o desde un sistema eléctrico interno de la finca (Yin & Shi, 2023). Este tipo de sistema ha ganado relevancia en escenarios donde existe acceso a energía eléctrica confiable, debido a sus ventajas en términos de eficiencia energética y control operativo.

Entre las principales características del bombeo eléctrico se destacan:

- Los motores eléctricos simplemente funcionan con mayor eficiencia que los motores de combustión interna.
- Su funcionamiento y mantenimiento son más económicos a largo plazo.
- Se puede controlar el flujo, y la automatización se convierte en una posibilidad real.
- Y, además, reducen la contaminación durante su funcionamiento.

Dicho esto, hacer el cambio no es algo que se haga de golpe; requiere un diseño bien pensado. Hay que pensar en cuánta energía se necesitará realmente, cómo proteger el equipo y cómo mantenerlo funcionando sin interrupciones.

2.4.3. Comparación general de sistemas de bombeo en la acuicultura ecuatoriana

Con el fin de sintetizar las diferencias técnicas entre los sistemas de bombeo utilizados en la acuicultura ecuatoriana, la Tabla 2 presenta una comparación general entre el bombeo mecánico y el bombeo eléctrico, considerando variables relevantes para el análisis energético y operativo.

Tabla 2. Comparación general de sistemas de bombeo en la acuicultura ecuatoriana

Variable técnica	Bombeo mecánico (diésel)	Bombeo eléctrico
Fuente de energía	Combustible fósil	Energía eléctrica
Eficiencia energética	Baja a media	Media a alta
Costos de operación	Altos (combustible y mantenimiento)	Menores
Mantenimiento	Frecuente y especializado	Menor frecuencia
Emisiones contaminantes	Elevadas	Nulas en operación
Automatización	Limitada	Alta

Fuente: Información obtenida de (Davis & Ullman, 2018).

La información resumida en la Tabla 2 permite evidenciar que, desde una perspectiva técnica y energética, el bombeo eléctrico ofrece ventajas significativas frente al bombeo mecánico, especialmente en sistemas productivos donde el bombeo se realiza de forma continua o periódica durante el ciclo de cultivo.

2.5. Sistemas de bombeo mecánico y eléctrico

Los sistemas de bombeo constituyen el núcleo operativo del manejo hidráulico en la acuicultura camaronera, ya que permiten controlar el llenado, el recambio y el drenaje del agua en los estanques de cultivo. En función de la fuente de energía utilizada para accionar la bomba, estos sistemas pueden clasificarse principalmente en bombeo mecánico accionado por motores de combustión interna y bombeo eléctrico accionado por motores eléctricos (Goda & Aboseif, 2024). Cada uno presenta características técnicas, energéticas y operativas particulares que influyen directamente en el desempeño productivo y en los costos de operación del sistema acuícola.

2.5.1. Bombeo mecánico accionado por diésel

El bombeo mecánico accionado por diésel es uno de los sistemas tradicionalmente utilizados en la acuicultura ecuatoriana, especialmente en fincas ubicadas en zonas donde el acceso a la red eléctrica es limitado o inexistente (Campos & Jiménez, 2025). Este sistema se compone de un motor de combustión interna que transmite potencia mecánica directamente a la bomba mediante un eje o acoplamiento.

Desde el punto de vista técnico, el funcionamiento del sistema se basa en la conversión de la energía química del combustible en energía mecánica, la cual es utilizada para impulsar el fluido. Este proceso presenta pérdidas energéticas asociadas a la combustión, la fricción interna del motor y la transmisión mecánica hacia la bomba (Hayre, 2025).

Entre las principales características del bombeo mecánico accionado por diésel se encuentran:

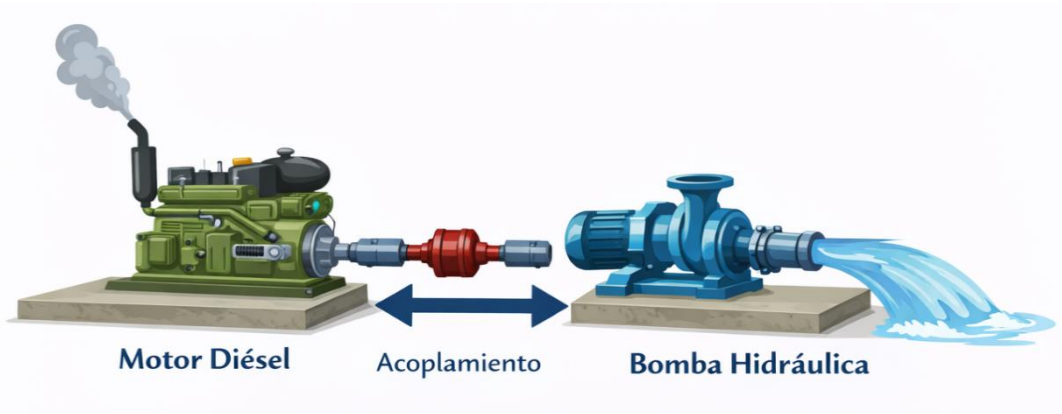
- Autonomía operativa, al no depender de una red eléctrica externa.
- Facilidad de implementación en ubicaciones remotas.
- Mayor consumo energético específico (litros de diésel por metro cúbico bombeado).
- Requerimientos frecuentes de mantenimiento mecánico y preventivo.
- Emisión de gases contaminantes y generación de ruido durante la operación.

En la cría de camarones, este tipo de bombeo suele ser el que se utiliza para el llenado inicial del estanque y los recambios de agua rutinarios. Sin embargo, cuando el sistema debe

funcionar durante largos periodos o gestionar demandas de alto caudal, el consumo de combustible empieza a consumir una parte importante del presupuesto operativo.

La Figura 3 ofrece una visión general de cómo se configura un sistema de bombeo mecánico diésel. Indica los componentes clave: el motor, el sistema de acoplamiento y la propia bomba hidráulica.

Figura 3. Esquema general de un sistema de bombeo mecánico accionado por diésel



Nota: Elaboración propia en base a la información de (Kapsiz, 2021).

2.5.2. Bombeo eléctrico

El bombeo eléctrico se basa en el accionamiento de la bomba mediante un motor eléctrico, alimentado desde la red de distribución o desde un sistema eléctrico interno. En este caso, la energía eléctrica se transforma en energía mecánica con una mayor eficiencia en comparación con los motores de combustión interna (Wang & Liang, 2015).

Desde el punto de vista electromecánico, los motores eléctricos presentan menores pérdidas energéticas, un régimen de operación más estable y una respuesta inmediata a variaciones de carga (Azad & Rahman, 2025). Estas características favorecen un control más preciso del caudal y de los tiempos de operación del sistema de bombeo.

Entre las principales características técnicas del bombeo eléctrico se destacan:

- Alta eficiencia energética del motor eléctrico.
- Menores costos de mantenimiento, al reducirse el número de componentes móviles.
- Operación continua y estable, con menor vibración y ruido.
- Facilidad de integración con sistemas de control y automatización.

- Ausencia de emisiones contaminantes durante la operación directa.

En sistemas acuícolas donde el bombeo se realiza de forma frecuente, el bombeo eléctrico permite optimizar el consumo energético total del proceso, siempre que el sistema esté correctamente dimensionado en términos de caudal, altura manométrica y potencia instalada (Ghaemi & Gholmohamadi, 2025).

2.5.3. Comparación técnica y energética entre bombeo mecánico y eléctrico

La comparación entre sistemas de bombeo mecánico y eléctrico permite identificar las diferencias fundamentales en términos de desempeño energético, costos operativos y sostenibilidad ambiental (Hossain & Rofiqul, 2023). Esta evaluación resulta especialmente relevante en el contexto de la migración tecnológica de sistemas mecánicos hacia sistemas eléctricos en fincas camaroneras.

Viéndolo desde el punto energético, los motores eléctricos son simplemente más eficientes al convertir la energía en trabajo real, lo que significa que se utiliza menos energía para bombear la misma cantidad de agua. Los motores diésel, en cambio, pierden más energía en el proceso de combustión y transmisión mecánica, lo que acaba incrementando el consumo de combustible (Ijaz & Kalam, 2025).

En el funcionamiento diario, el bombeo eléctrico ofrece un rendimiento más fiable, menos averías y un control mucho mejor de lo que ocurre. Sin embargo, las configuraciones mecánicas tienden a ser menos estables: el rendimiento del motor puede fluctuar y simplemente requieren más mantenimiento para funcionar (Ahmed & Bawayan, 2025).

Con el objetivo de sintetizar estas diferencias, la Tabla 3 presenta una comparación técnica y energética entre el bombeo mecánico accionado por diésel y el bombeo eléctrico, considerando variables relevantes para la operación acuícola.

Tabla 3. Comparación técnica y energética entre bombeo mecánico y bombeo eléctrico

Criterio	Bombeo mecánico (diésel)	Bombeo eléctrico
Fuente de energía	Combustible fósil (diésel)	Energía eléctrica
Eficiencia energética	Baja a media	Media a alta
Consumo energético específico	Alto	Menor
Costos de operación	Elevados (combustible y mantenimiento)	Reducidos

Mantenimiento	Frecuente y mecánico	Menor y principalmente eléctrico
Emisiones contaminantes	Presentes	Nulas en operación
Nivel de control	Limitado	Alto
Ruido y vibración	Elevados	Bajos

Fuente: Información obtenida de (Oshurbekov & Kazakbaev, 2020).

La información presentada en la Tabla 3 evidencia que el bombeo eléctrico constituye una alternativa técnicamente más eficiente y energéticamente favorable para sistemas acuícolas que dependen del bombeo como operación recurrente. Esta comparación establece la base conceptual para el análisis técnico y energético que se desarrollará en los capítulos posteriores de la investigación.

2.6. Principios de hidráulica aplicados al bombeo

El diseño y análisis de un sistema de bombeo requieren la comprensión de los principios fundamentales de la hidráulica, ya que el comportamiento del fluido dentro de las tuberías y equipos determina la potencia necesaria, la eficiencia del sistema y el consumo energético total (Novak & Yamada, 2024). En sistemas acuícolas, donde el bombeo se utiliza para el llenado, recambio y drenaje de estanques, el correcto dimensionamiento hidráulico permite garantizar el suministro adecuado de agua sin incurrir en sobrecostos energéticos (Engle & Kumar, 2021).

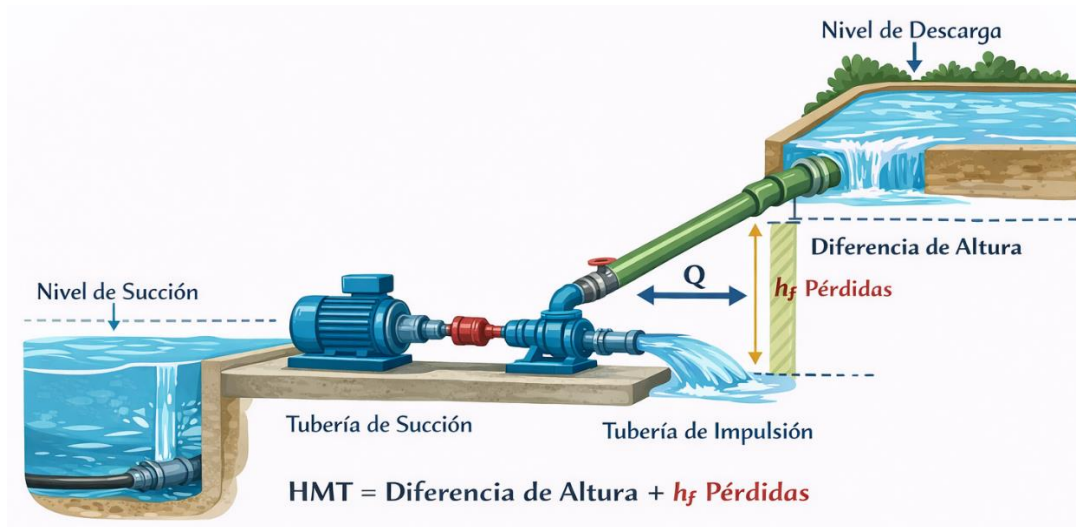
Desde el punto de vista técnico, el funcionamiento de un sistema de bombeo se fundamenta en la relación entre tres variables principales:

- Caudal (Q)
- Altura manométrica (HMT)
- Pérdidas de carga (h_f)

Estas variables determinan la potencia hidráulica requerida y, por consiguiente, la potencia del motor que debe seleccionarse.

La Figura 4 presenta un esquema conceptual de los parámetros hidráulicos en un sistema de bombeo, identificando el nivel de succión, la tubería de impulsión, la diferencia de altura y las pérdidas asociadas al flujo.

Figura 4. Parámetros hidráulicos en un sistema de bombeo: caudal, altura manométrica y pérdidas



Fuente: ilustración obtenida de (Maylakala & Vandi, 2020).

2.6.1. Caudal

El caudal (Q) se define como el volumen de fluido que atraviesa una sección transversal de la tubería por unidad de tiempo. Es una de las variables más importantes en el diseño del sistema de bombeo, ya que determina la cantidad de agua que será transportada hacia el estanque en un periodo determinado (Andrade & Escobar, 2018).

Matemáticamente, el caudal se expresa como:

$$Q = \frac{V}{t}$$

Donde:

Q = Caudal (m^3/s)

V = Volumen de agua (m^3)

t = Tiempo (s)

En aplicaciones prácticas, el caudal también puede expresarse en:

- m^3/h
- L/s
- L/min

En sistemas camaroneros, el caudal requerido depende de:

- Área del estanque
- Profundidad promedio
- Volumen total a llenar
- Porcentaje de recambio diario
- Tiempo disponible para el recambio

Por ejemplo, si un estanque requiere un recambio del 10 % diario de su volumen total, el sistema de bombeo debe dimensionarse para suministrar dicho volumen dentro del tiempo de operación planificado (Nakic & Djurin, 2022).

Desde el punto de vista energético, un mayor caudal implica generalmente mayor potencia requerida, por lo que su determinación debe estar técnicamente justificada.

2.6.2. Altura manométrica

La altura manométrica total (HMT) representa la energía por unidad de peso que la bomba debe proporcionar al fluido para transportarlo desde el punto de succión hasta el punto de descarga (B, 2025).

Se compone de:

1. Altura estática de succión
2. Altura estática de impulsión
3. Pérdidas de carga por fricción y accesorios

De forma general:

$$HMT = H_{estática} + h_f$$

Donde:

HMT = Altura manométrica total (m)

Hestática = Diferencia de nivel entre succión y descarga (m)

hf = Pérdidas de carga (m)

En un sistema camaronero típico, la altura manométrica no siempre es elevada, pero puede incrementarse cuando:

- Existen diferencias importantes de nivel entre canal y estanque
- Se emplean tuberías largas
- Se presentan múltiples accesorios (codos, válvulas, compuertas)

La correcta estimación de la altura manométrica es fundamental, ya que influye directamente en la selección de la bomba y en la potencia del motor eléctrico.

2.6.3. Pérdidas de carga

Las pérdidas de carga representan la reducción de energía del fluido debido a la fricción con las paredes de la tubería y a la presencia de accesorios hidráulicos. Estas pérdidas incrementan la altura total que debe vencer la bomba y, por tanto, aumentan el requerimiento energético del sistema (Duran & Ascanio, 2021).

Se clasifican en:

a) Pérdidas por fricción en tuberías

Se producen debido al rozamiento del fluido con la superficie interna de la tubería. Se calculan generalmente mediante la ecuación de Darcy-Weisbach (Brown, 2002):

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

Donde:

h_f = Pérdida de carga (m)

f = Factor de fricción

L = Longitud de la tubería (m)

D = Diámetro interno (m)

V = Velocidad del fluido (m/s)

g = Aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)

b) Pérdidas localizadas

Se producen en accesorios como:

- Codos

- Válvulas
- Uniones
- Reducciones
- Compuertas

Estas pérdidas se expresan como:

$$h_f = K \frac{V^2}{2g}$$

Donde:

K = coeficiente de pérdida asociado al accesorio.

La Tabla 4 presenta una clasificación general de los tipos de pérdidas de carga en sistemas de bombeo.

Tabla 4. *Tipos de pérdidas de carga en sistemas de bombeo*

Tipo de pérdida	Causa principal	Influencia en el sistema
Fricción en tubería	Rozamiento fluido–pared	Aumenta con longitud y velocidad
Codos	Cambio de dirección	Incrementa turbulencia
Válvulas	Regulación de flujo	Puede generar pérdidas significativas
Reducciones	Cambio de diámetro	Aumenta velocidad local

Fuente: Información obtenida de (Atalah & Khaleefa, 2020).

En sistemas acuícolas, el diseño adecuado del diámetro de tuberías y la reducción innecesaria de accesorios permiten disminuir las pérdidas de carga y, por ende, reducir la potencia requerida por la bomba.

Relación entre parámetros hidráulicos y potencia requerida

La potencia hidráulica necesaria para el bombeo se calcula mediante:

$$P_h = \rho g Q H M T$$

Donde:

P_h = Potencia hidráulica (W)

ρ = Densidad del agua (kg/m^3)

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)

Q = Caudal (m^3/s)

HMT = Altura manométrica total (m)

La potencia del motor será mayor que la potencia hidráulica debido a las pérdidas mecánicas y eléctricas del sistema.

2.7. Fundamentos de electromecánica aplicados al bombeo

La electromecánica aplicada al bombeo integra principios eléctricos y mecánicos que permiten transformar la energía eléctrica en energía mecánica útil para el desplazamiento de fluidos. En sistemas acuícolas, esta transformación es realizada principalmente mediante motores eléctricos que accionan bombas hidráulicas a través de sistemas de acoplamiento adecuados (Zhang & Lu, 2025).

El análisis electromecánico resulta fundamental para:

- Determinar la potencia requerida del motor.
- Garantizar la compatibilidad entre motor y bomba.
- Optimizar el consumo energético del sistema.
- Reducir pérdidas por desalineación o sobredimensionamiento.

Desde el punto de vista técnico, el desempeño del sistema depende de la correcta interacción entre tres componentes principales:

1. Motor eléctrico
2. Sistema de acoplamiento
3. Bomba hidráulica

La Figura 5 presenta un esquema conceptual del sistema electromecánico aplicado al bombeo, destacando la transformación de energía eléctrica en energía hidráulica.

Figura 5. Transformación electromecánica en un sistema de bombeo eléctrico



Fuente: ilustración obtenida de (Chan & Pech, 2025).

2.7.1. Motores eléctricos

El motor eléctrico es el elemento encargado de convertir la energía eléctrica en energía mecánica de rotación. En sistemas de bombeo para acuicultura, el tipo de motor más utilizado es el motor de inducción trifásico, debido a su robustez, bajo mantenimiento y confiabilidad operativa (Ferreira & Marino, 2022).

a) Principio de funcionamiento: El motor de inducción opera mediante la interacción entre un campo magnético giratorio generado en el estator y corrientes inducidas en el rotor. Esta interacción produce un par electromagnético que genera movimiento rotacional.

b) Parámetros eléctricos fundamentales: Entre los principales parámetros eléctricos del motor se encuentran:

- Potencia nominal (kW o HP)
- Tensión de alimentación (V)
- Corriente nominal (A)
- Frecuencia (Hz)
- Velocidad nominal (rpm)
- Factor de potencia ($\cos \phi$)
- Rendimiento (%)

La potencia eléctrica consumida por el motor se calcula mediante:

$$P_e = \sqrt{3} * V * I * \cos \varphi$$

Donde:

Pe = Potencia eléctrica (W)

V = Voltaje (V)

I = Corriente (A)

cos φ = Factor de potencia

El rendimiento del motor (η) se define como:

$$\eta = \frac{P_{mecánica}}{P_{eléctrica}}$$

Un mayor rendimiento implica menor pérdida de energía en forma de calor, lo que reduce el consumo energético global del sistema.

c) Clasificación por eficiencia

Los motores eléctricos se clasifican según estándares de eficiencia energética (IE1, IE2, IE3, IE4). En aplicaciones de bombeo continuo, la selección de motores de alta eficiencia permite disminuir el consumo energético anual y mejorar la sostenibilidad del sistema (Trianni & Cagno, 2020).

La Tabla 5 presenta una clasificación general de motores eléctricos según nivel de eficiencia.

Tabla 5. *Clasificación general de motores eléctricos por eficiencia*

Clase	Nivel de eficiencia	Aplicación típica
IE1	Eficiencia estándar	Aplicaciones básicas
IE2	Alta eficiencia	Uso industrial general
IE3	Premium	Sistemas de bombeo continuo
IE4	Súper premium	Alta exigencia energética

Fuente: Información obtenida de (Alcívar & Duarte, 2026).

2.7.2. *Acoplamiento bomba–motor*

El acoplamiento es el sistema mecánico que transmite el movimiento rotacional del motor hacia el eje de la bomba. Una correcta selección y alineación del acoplamiento es esencial para evitar vibraciones, pérdidas mecánicas y desgaste prematuro de los componentes (Lamarti & Abdelilah, 2025).

a) Tipos de acoplamiento

En sistemas de bombeo se emplean principalmente:

- **Acoplamiento rígido:** conexión directa entre ejes; requiere alineación precisa.
- **Acoplamiento flexible:** permite pequeñas desalineaciones y absorbe vibraciones.
- **Acoplamiento con poleas y bandas:** utilizado cuando se requiere modificación de velocidad.

b) Importancia de la alineación

Una desalineación entre el eje del motor y el eje de la bomba puede provocar:

- Incremento en pérdidas mecánicas.
- Mayor consumo energético.
- Desgaste acelerado de rodamientos.
- Vibraciones excesivas.

Por ello, el montaje electromecánico debe garantizar:

- Coaxialidad entre ejes.
- Base estructural firme.
- Alineación angular y paralela correcta.

La Figura 6 presenta un esquema comparativo entre un acoplamiento correctamente alineado y uno desalineado.

Figura 6. Alineación correcta e incorrecta en el acoplamiento bomba–motor



Fuente: Elaboración propia en base a la información de (Barba, 2020).

2.7.3. Eficiencia energética en sistemas de bombeo

La eficiencia energética de un sistema de bombeo no depende únicamente del motor, sino del rendimiento conjunto de todos sus componentes (Sinaga, 2020):

$$\eta_{total} = \eta_{motor} \times \eta_{bomba} \times \eta_{acoplamiento}$$

Donde:

η_{total} = Eficiencia global del sistema

η_{motor} = Eficiencia del motor eléctrico

η_{bomba} = Eficiencia hidráulica de la bomba

$\eta_{acoplamiento}$ = Eficiencia mecánica del sistema de transmisión

a) Factores que afectan la eficiencia energética

1. Selección inadecuada de potencia del motor.
2. Operación fuera del punto óptimo de la bomba.
3. Excesivas pérdidas de carga hidráulicas.
4. Factor de potencia bajo.
5. Desalineación mecánica.

b) Curva característica de la bomba

- Caudal (Q)
- Altura (H)
- Potencia absorbida
- Rendimiento (%)

El punto óptimo de operación, conocido como BEP (Best Efficiency Point), corresponde al punto donde la bomba trabaja con mayor eficiencia hidráulica.

Relación entre electromecánica y sostenibilidad energética

En sistemas acuícolas donde el bombeo opera de forma periódica o continua, pequeñas diferencias en eficiencia pueden representar ahorros significativos de energía a lo largo del ciclo productivo (Bujas & Korican, 2022). Por ello, el análisis electromecánico permite:

- Reducir consumo eléctrico anual.
- Disminuir costos operativos.
- Minimizar pérdidas energéticas.
- Optimizar el dimensionamiento del sistema eléctrico.

2.8. Normativa técnica y ambiental aplicable a sistemas de bombeo eléctrico

El diseño, implementación y operación de sistemas de bombeo eléctrico en instalaciones acuícolas deben ajustarse a un conjunto de normativas técnicas y ambientales que garantizan la seguridad operativa, la eficiencia energética, la confiabilidad del suministro eléctrico y la protección del entorno ambiental (Saniya & Arkkakadavil, 2025). En el caso de la acuicultura camaronera, el cumplimiento normativo adquiere especial relevancia debido a la interacción directa entre infraestructura eléctrica, cuerpos de agua y ecosistemas sensibles.

La normativa aplicable puede agruparse en tres grandes categorías:

1. Normativa eléctrica y técnica.
2. Normativa de eficiencia energética.
3. Normativa ambiental.

2.8.1. Normativa técnica eléctrica aplicable

La normativa técnica eléctrica establece los criterios mínimos para el diseño, instalación y operación segura de sistemas eléctricos, incluyendo motores, tableros, conductores, protecciones y sistemas de puesta a tierra (Electrical, 2024). En Ecuador, estas disposiciones se alinean tanto a regulaciones nacionales como a estándares internacionales ampliamente aceptados.

Entre los principales lineamientos técnicos aplicables a sistemas de bombeo eléctrico se incluyen:

- Dimensionamiento de conductores eléctricos, en función de la corriente nominal del motor, condiciones de instalación y factores de corrección.
- Protecciones eléctricas, tales como interruptores termomagnéticos, protecciones contra sobrecarga y cortocircuito, y dispositivos de seccionamiento.
- Sistemas de puesta a tierra, diseñados para proteger tanto a personas como a equipos en caso de fallos eléctricos.
- Elegir los motores eléctricos adecuados implica considerar el voltaje, la frecuencia, el ciclo de trabajo y su eficiencia real.

A nivel internacional, analizamos las normas técnicas de organizaciones como International Electrotechnical Commission y Institute of Electrical and Electronics Engineers, estas son ampliamente reconocidas y establecen los criterios comúnmente utilizados para instalaciones eléctricas industriales y sistemas de accionamiento electromecánicos (Mahmud & Abolhassani, 2025).

2.8.2. Normativa de eficiencia energética

La eficiencia energética constituye un eje transversal en el diseño de sistemas de bombeo eléctrico, dado que estos equipos suelen operar durante periodos prolongados y representan un consumo significativo de energía dentro del sistema productivo acuícola (Kostyuk & Sokolov, 2020).

Las normativas de eficiencia energética establecen criterios para:

- Clasificación de motores eléctricos según su rendimiento (clases de eficiencia).

- Disminuir las pérdidas de energía al convertir la energía eléctrica en trabajo mecánico.
- Fomentar un uso más inteligente y responsable de la energía, especialmente en los sectores productivos.

A nivel mundial, los estándares de eficiencia para motores eléctricos se organizan en diferentes niveles, desde el estándar hasta el premium. Este tipo de clasificación facilita la elección de equipos que consumen menos energía y duran más. Para la acuicultura, optar por motores de alta eficiencia es la mejor opción si se prioriza la sostenibilidad y el control de los costos operativos (Almeida & Ferrerira, 2025).

En el contexto ecuatoriano, las políticas de eficiencia energética buscan fomentar el uso de energía eléctrica frente a combustibles fósiles, especialmente en actividades productivas, alineándose con los objetivos nacionales de optimización del consumo energético y reducción de emisiones (Défaz & Burbano, 2025).

2.8.3. Normativa ambiental aplicable a la acuicultura

La implementación de sistemas de bombeo eléctrico en fincas camaroneras también debe cumplir con la normativa ambiental vigente, cuyo objetivo es minimizar los impactos negativos sobre el medio ambiente y garantizar la sostenibilidad de la actividad acuícola (Cortés & Casillas, 2021).

La normativa ambiental aplicable regula aspectos como:

- Uso y manejo del recurso hídrico, evitando afectaciones a cuerpos de agua naturales.
- Control de emisiones contaminantes, asociadas principalmente al uso de combustibles fósiles.
- Gestión de residuos y derrames, incluyendo aceites, combustibles y lubricantes.
- Prevención de contaminación acústica, derivada de la operación de equipos mecánicos.

Desde esta perspectiva, la migración de sistemas de bombeo mecánico accionados por diésel hacia sistemas de bombeo eléctrico contribuye al cumplimiento de la normativa ambiental, al reducir significativamente las emisiones de gases contaminantes, el riesgo de

derrames de combustible y los niveles de ruido durante la operación (Mohammadi & Berg, 2025).

2.8.4. Relación entre normativa y sostenibilidad del sistema de bombeo eléctrico

El cumplimiento de la normativa técnica y ambiental no debe entenderse únicamente como una exigencia legal, sino como un criterio de diseño que fortalece la sostenibilidad del sistema productivo (Maldona & Molina, 2024). Un sistema de bombeo eléctrico correctamente diseñado, conforme a normas técnicas y ambientales, permite:

- Mejorar la seguridad de la instalación eléctrica.
- Optimizar el consumo energético del proceso de bombeo.
- Reducir impactos ambientales asociados a la operación.
- Garantizar la continuidad y confiabilidad del sistema productivo acuícola.

CAPÍTULO III

DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE BOMBEO EXISTENTE

3.1. Descripción general de la finca camaronera

La finca camaronera objeto de estudio corresponde a una unidad productiva ubicada en la zona costera de la provincia donde se desarrolla el proyecto, identificada en plataformas geoespaciales como Camaronera Rostrum y Telson. En cumplimiento de criterios de confidencialidad, no se menciona información relacionada con propietarios o administración directa.

La finca cuenta con una extensión total aproximada de 64 hectáreas, de las cuales alrededor de 48 hectáreas se encuentran destinadas a área productiva, distribuidas en:

- 14 piscinas de cultivo.
- 5 piscinas de menor extensión que, por sus dimensiones y configuración hidráulica, corresponden a áreas de precría.

La captación de agua se realiza desde un canal principal adyacente al predio, mediante una estación de bombeo centralizada, encargada de abastecer la totalidad de las piscinas del sistema productivo.

Adicionalmente, la finca dispone de:

- Campamento operativo.
- Área administrativa.
- Infraestructura de circulación interna.
- Canal de drenaje y estructuras de descarga.

El suministro eléctrico actual se limita al área administrativa y campamento, alimentado mediante línea de baja tensión proveniente de una red de media tensión cercana. Sin embargo, el sistema de bombeo productivo no utiliza energía eléctrica, operando exclusivamente con motores de combustión interna accionados por diésel.

3.2. Características del sistema productivo acuícola

El sistema productivo de la finca se caracteriza por requerir un recambio de agua del 75 % diario, lo cual representa una demanda hidráulica considerable para mantener las condiciones fisicoquímicas adecuadas dentro de las piscinas.

Este nivel de recambio responde a la necesidad de:

- Controlar acumulación de metabolitos.
- Mantener concentraciones adecuadas de oxígeno disuelto.
- Regular temperatura y salinidad.
- Reducir carga orgánica.
- Garantizar estabilidad del sistema biológico.

El sistema de bombeo opera un promedio de 13 horas diarias durante el ciclo productivo para satisfacer esta demanda hidráulica.

Considerando que la finca posee aproximadamente 48 hectáreas productivas, el volumen total de agua contenido en las piscinas depende de la profundidad promedio de operación. En sistemas semi-intensivos o intensivos típicos, la profundidad oscila entre 1,2 m y 1,5 m. Este parámetro será considerado en el análisis hidráulico posterior para estimar el volumen diario requerido.

Desde el punto de vista operativo, el sistema productivo puede clasificarse como:

- Sistema de producción semi-intensivo o intensivo (según densidad de siembra).
- Alta dependencia del recambio mecánico.
- Operación hidráulica centralizada.
- Dependencia total del sistema de bombeo para la estabilidad productiva.

El alto porcentaje de recambio diario implica una exigencia significativa sobre el sistema de bombeo, lo que convierte su desempeño en un factor crítico para la eficiencia global de la finca.

3.3. Descripción del sistema de bombeo mecánico actual

La estación de bombeo principal está conformada por cinco grupos de bombeo mecánico, instalados en una estructura elevada junto al canal de captación.

Cada grupo está compuesto por:

- Motor de combustión interna (diésel).
- Reductor de velocidad.
- Bomba axial vertical marca Delta.

3.3.1. Motores instalados

La configuración actual de los motores es la siguiente:

- Motor 1: Cummins – 234 HP
- Motor 2: Cummins – 234 HP
- Motor 3: Cummins – 290 HP
- Motor 4: Cummins – 234 HP
- Motor 5: Doosan – 165 HP

Todos los motores operan con combustible diésel y se encuentran montados sobre bases metálicas estructurales.

3.3.2. Reductores de velocidad

El sistema incorpora reductores de velocidad marca DERAN Gear Drive, cuya función es adaptar la velocidad de rotación del motor a las condiciones óptimas de operación de la bomba axial.

- La configuración es la siguiente:
- Motores 1, 2 y 4 → Reductores de 171 HP
- Motor 3 → Reductor de 222 HP
- Motor 5 → Reductor acorde a su capacidad instalada

Los reductores permiten disminuir la velocidad del eje motor para garantizar un régimen adecuado en la bomba axial vertical.

3.3.3. Bombas axiales verticales

Las bombas instaladas son de tipo axial vertical marca Delta, utilizadas comúnmente en aplicaciones de alto caudal y baja altura manométrica, características típicas de sistemas camaroneros.

Este tipo de bomba se caracteriza por:

- Alto caudal volumétrico.
- Baja altura dinámica total.
- Diseño apropiado para recambios masivos.
- Instalación vertical con captación directa desde canal.

3.3.4. Características generales del sistema actual

El sistema presenta las siguientes características operativas:

- 100 % accionado por diésel.
- 0 % consumo eléctrico en bombeo productivo.
- Operación manual o semimanual.
- Ausencia de variación de velocidad.
- Dependencia total de combustible fósil.

Desde el punto de vista técnico, el sistema mecánico actual cumple la función hidráulica requerida; sin embargo, presenta limitaciones relevantes en términos de:

- Eficiencia energética.
- Costos operativos.
- Mantenimiento preventivo y correctivo.
- Impacto ambiental asociado al consumo de combustible.

El análisis energético y económico detallado del consumo de diésel será desarrollado en el apartado 3.5, donde se evaluará el impacto financiero del esquema actual de operación.

3.4. Levantamiento de información técnica

El levantamiento de información técnica del sistema de bombeo existente se ejecuta mediante inspección visual directa en campo, registro fotográfico y lectura de información disponible en placas técnicas y elementos visibles del conjunto electromecánico. Este levantamiento permite identificar la configuración instalada, las características nominales de los equipos, el estado general de la estación y las condiciones operativas evidenciables durante la visita.

La información técnica que se recopila se organiza en cuatro bloques principales:

- Identificación de equipos: marca, tipo y capacidad nominal de motores, reductores y bombas.
- Configuración del tren de potencia: disposición de motor–reductor–bomba, elementos de acoplamiento y montaje.
- Condiciones físicas y de operación: comprobar el estado de bases, soportes y tuberías, detectando vibraciones visibles, ruidos inusuales, fugas y la limpieza general.
- Seguridad y control: asegurar la instalación de la señalización, el funcionamiento de las protecciones, el orden en el área, la existencia de medidas de contención si es necesario y el cumplimiento de las condiciones básicas de seguridad.

Según lo que pudimos documentar, la estación principal consta de cinco unidades de bombeo. Cada una está impulsada por un motor diésel, conectado mediante una caja de engranajes a una bomba de flujo axial vertical de Delta. La Tabla 6 ofrece un desglose completo de la configuración del sistema de bombeo existente.

Tabla 6. Configuración técnica del sistema de bombeo existente

Grupo	Marca del motor	Potencia motor (HP)	Potencia reductor (HP)	Tipo de bomba
Motor 1	Cummins	234	171	Axial vertical Delta
Motor 2	Cummins	234	171	Axial vertical Delta

Motor 3	Cummins	290	222	Axial vertical Delta
Motor 4	Cummins	234	171	Axial vertical Delta
Motor 5	Doosan	165	171	Axial vertical Delta

Nota: Elaboración propia en base a información recolectada de la finca.

En el proceso de levantamiento técnico se documenta la disposición general de la estación principal de bombeo, su integración con el canal de captación y la infraestructura hidráulica asociada. La Figura 7 muestra una vista panorámica de la estación, donde se observa la estructura metálica de protección, los cinco grupos motobomba instalados y la zona de captación de agua.

Figura 7. Vista general de la estación principal de bombeo y su integración con el canal de captación



Fuente: Fotografía propia del lugar de estudio.

Con el fin de evidenciar la configuración frontal de los equipos y la relación directa entre las bombas axiales verticales y el canal de succión, se registra una vista inferior del sistema. La Figura 8 permite apreciar las cámaras de captación, los muros de contención y la posición de las bombas respecto al nivel del agua.

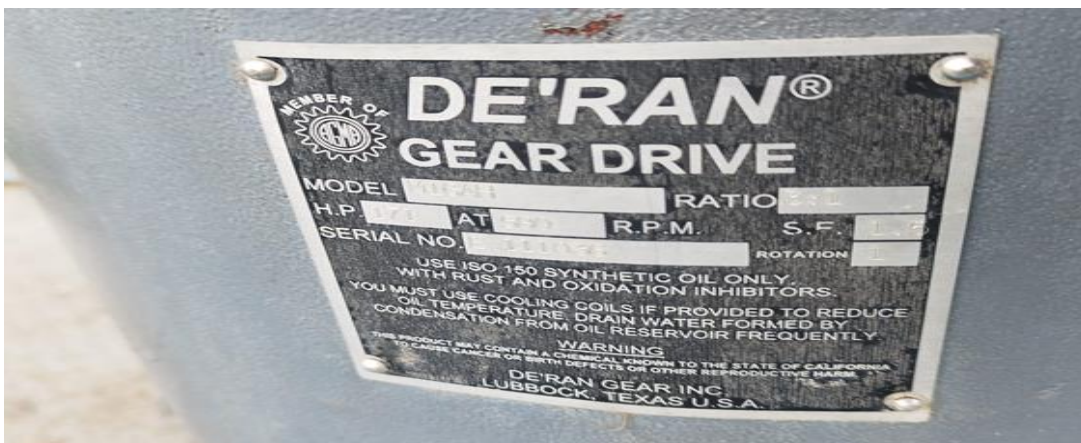
Figura 8. Vista frontal del sistema de captación y disposición de bombas axiales verticales



Fuente: Fotografía propia del lugar de estudio.

Como parte del levantamiento detallado, también se documentan las placas técnicas de los componentes principales. La Figura 9 presenta la placa de identificación del reductor de velocidad marca DERAN Gear Drive, donde se observan datos como modelo, relación de reducción y especificaciones del fabricante.

Figura 9. Placa técnica del reductor de velocidad instalado en uno de los grupos de bombeo



Fuente: Fotografía propia de la placa propia.

3.5. Análisis energético del sistema de bombeo existente

El sistema de bombeo productivo opera con 0 % de consumo eléctrico, debido a que el accionamiento de las bombas se realiza mediante motores diésel. Por tanto, el análisis

energético se enfoca en el consumo de combustible, dado que este representa el principal insumo energético del proceso y el mayor determinante del costo operativo asociado al bombeo.

3.5.1. Potencia instalada

La potencia total instalada en los motores se obtiene como suma de las potencias nominales de los cinco grupos:

- Motores 1, 2 y 4: 234 HP cada uno
- Motor 3: 290 HP
- Motor 5: 165 HP

La potencia total instalada es:

$$P_{total} = 234 + 234 + 290 + 165 = 1.157 \text{ HP}$$

Para expresar la potencia en kilovatios, se emplea la equivalencia $1\text{HP} = 0.746\text{Kw}$

$$P_{kW} = 1.157 \times 0.746 = 863,92 \text{ kW} = 864 \text{ kW aprox.}$$

3.5.2. Estimación del consumo diario de combustible

El consumo de diésel puede estimarse en función del consumo específico típico de motores diésel industriales, el cual se expresa como litros por HP-hora. Para un análisis preliminar se utiliza un valor referencial de:

- Consumo específico asumido: 0,25 L/HP·h

Considerando una operación promedio del sistema de 13 horas diarias, el consumo diario teórico bajo operación simultánea de los grupos se calcula como:

$$Consumo_{día} = 1.157 \text{ HP} \times 0.25 \frac{\text{L}}{\text{HP} \times \text{h}} \times 13\text{h}$$

$$Consumo_{día} = 3.760 \text{ L/día}$$

3.5.3. Estimación del costo diario de combustible

Para estimar el costo diario se considera un precio promedio referencial del diésel industrial de 1,75 USD/L (valor referencial). Con el consumo diario estimado de 3.760 L/día, el costo se calcula como:

$$C_{día} = 3.760 \text{ (L/día)} \times 1,75 \text{ (USD/L)} = 6.580 \text{ USD/día}$$

A continuación, se resume la estimación preliminar del desempeño energético y económico del sistema actual:

- Potencia instalada: 1.157 HP
- Potencia equivalente: 864 kW
- Consumo específico asumido: 0,25 L/HP·h
- Consumo diario estimado: 3.760 L/día
- Costo diario estimado: 6.580 USD/día

3.6. Identificación de problemas técnicos, económicos y ambientales

La identificación de problemas del sistema de bombeo existente se fundamenta en tres elementos: el levantamiento técnico en sitio, la caracterización operativa del proceso de recambio de agua (75 % diario con operación promedio de 13 horas/día) y el análisis energético centrado en el consumo de combustible. A partir de esta base diagnóstica, los hallazgos se organizan en tres dimensiones técnica, económica y ambiental debido a que el sistema productivo depende completamente de motores diésel para garantizar la renovación de agua, el control de niveles hidráulicos y la continuidad del ciclo de cultivo.

Esta dependencia incrementa la criticidad del bombeo dentro del sistema acuícola, ya que cualquier deficiencia en desempeño, confiabilidad o costo de operación se refleja directamente en la estabilidad hidráulica de la finca y, por extensión, en las condiciones fisicoquímicas del agua requeridas para el cultivo.

3.6.1. Problemas técnicos

En la dimensión técnica, el sistema evidencia condiciones que limitan el rendimiento operativo y la confiabilidad:

- **Bajo rendimiento global del sistema:** asociado a pérdidas mecánicas del tren de potencia (motor–reductor–bomba) y a condiciones variables de operación.
- **Sobreconsumo relativo:** debido a que la operación por combustión interna implica mayores pérdidas energéticas comparadas con accionamientos eléctricos.

- **Ineficiencia operativa:** al depender de regulación manual y sin control fino del caudal mediante variación de velocidad.
- **Ausencia de protecciones y monitoreo:** lo que limita la detección temprana de fallas y la gestión basada en condición.
- **Riesgo de sobredimensionamiento o subdimensionamiento:** debido a que no se evidencia un ajuste operativo en función de la demanda real por periodos o sectores.

3.6.2. *Problemas económicos*

En la dimensión económica, el bombeo representa un componente crítico del costo operativo:

- **Alto costo energético:** el combustible se quema día tras día, con un promedio de unas 13 horas de funcionamiento.
- **Mantenimiento frecuente:** los motores diésel y todas sus piezas mecánicas (acoplamientos, cajas de cambios, cojinetes) se desgastan y requieren atención constante.
- **Paradas no programadas:** cuando fallan sin previo aviso, no solo aumentan los costos, sino que también ponen en riesgo toda la operación.
- **Dependencia del precio del combustible:** los costos de producción dependen de la evolución de los precios del combustible y de la facilidad o dificultad para obtenerlo.

3.6.3. *Problemas ambientales*

En la dimensión ambiental, la operación basada en diésel genera impactos directos e indirectos:

- Consumo de combustible fósil como fuente primaria del proceso de bombeo.
- Emisiones atmosféricas asociadas a la combustión (principalmente CO₂ y otros contaminantes).
- Riesgo de derrames, por almacenamiento y manipulación de combustible y lubricantes en un entorno cercano a cuerpos de agua.

- Contaminación acústica, debido al ruido característico de motores diésel durante operación prolongada.
- Ineficiencia energética del proceso, que incrementa la huella ambiental por unidad de volumen bombeado.

En conjunto, estos problemas sustentan la necesidad técnica y estratégica de evaluar la migración hacia un sistema de bombeo eléctrico, con el objetivo de mejorar la eficiencia energética, reducir costos operativos y fortalecer la sostenibilidad ambiental del sistema productivo acuícola.

CAPÍTULO IV

DISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO ELÉCTRICO PROPUESTO

4.1. Criterios de diseño del sistema de bombeo eléctrico

El diseño del sistema de bombeo eléctrico propuesto se fundamenta en criterios hidráulicos, energéticos, operativos y ambientales derivados del diagnóstico del sistema mecánico existente y de las necesidades productivas de la finca camaronera. Estos criterios establecen los parámetros técnicos que orientan la selección de la bomba, el dimensionamiento del motor eléctrico y la configuración del sistema de instalación.

El objetivo del diseño es garantizar el recambio hidráulico requerido por el sistema productivo, optimizando simultáneamente el consumo energético, la confiabilidad operativa y la sostenibilidad ambiental.

4.1.1. Caudal requerido

La finca dispone de aproximadamente 48 hectáreas efectivas de espejo de agua destinadas al cultivo. El sistema productivo opera bajo un esquema de recambio del 75 % diario, condición que impone una demanda hidráulica significativa.

El caudal de diseño se define como el volumen de agua que debe ser renovado diariamente, dividido entre el tiempo disponible de operación. Para su determinación se consideran los siguientes parámetros:

- Área total de cultivo.
- Profundidad promedio operativa de los estanques.
- Porcentaje de recambio diario.
- Tiempo efectivo de bombeo (13 horas diarias).

El caudal resultante constituye el parámetro principal de selección de la bomba, ya que determina el punto de operación hidráulico del sistema. Este valor debe garantizar la renovación adecuada del volumen de agua sin generar sobrecarga innecesaria en los equipos.

4.1.2. Altura manométrica total (HMT)

La altura manométrica total representa la energía que la bomba debe suministrar al fluido para vencer las resistencias hidráulicas del sistema. En el diseño se consideran los siguientes componentes:

- Diferencia geométrica de nivel entre el canal de captación y el punto de descarga hacia los estanques.
- Pérdidas de carga por fricción en tuberías de impulsión.
- Pérdidas menores en accesorios (codos, válvulas, compuertas, rejillas).
- Variaciones del nivel del canal debido a mareas o estacionalidad.

La HMT se establece bajo el escenario más desfavorable de operación, garantizando que el sistema funcione adecuadamente incluso en condiciones de nivel mínimo del canal o máxima pérdida por fricción.

4.1.3. Horas de operación

El sistema actual opera en promedio 13 horas diarias para cumplir el recambio requerido. Este criterio operativo se mantiene como referencia para el diseño eléctrico, ya que refleja la dinámica real del sistema productivo.

El diseño debe asegurar operación continua durante la jornada establecida, sin comprometer la estabilidad térmica del motor ni la eficiencia hidráulica de la bomba. Asimismo, la posibilidad de integrar control de velocidad permite optimizar el tiempo de operación en función de la demanda real.

4.1.4. Factor de seguridad

El diseño incorpora un factor de seguridad tanto hidráulico como eléctrico con el propósito de garantizar confiabilidad y durabilidad del sistema.

Este factor considera:

- Variaciones en la demanda real de caudal.
- Incremento progresivo de pérdidas por envejecimiento de tuberías.
- Posibles ampliaciones futuras del sistema productivo.

- Condiciones ambientales adversas.
- Margen para evitar operación continua en régimen máximo.

El factor de seguridad permite que el sistema opere dentro de un rango estable, evitando sobredimensionamientos excesivos que incrementen costos innecesarios.

4.1.5. Condiciones ambientales

La finca se ubica en un entorno costero con presencia de humedad elevada y atmósfera salina. Estas condiciones influyen directamente en la selección de materiales y equipos.

El diseño contempla:

- Estructuras metálicas con protección anticorrosiva.
- Motores eléctricos con grado de protección IP adecuado.
- Aislamiento térmico apropiado para ambientes húmedos.
- Sistemas de ventilación compatibles con operación continua.
- Componentes eléctricos resistentes a corrosión.

La consideración de estas condiciones garantiza mayor vida útil del sistema y menor frecuencia de mantenimiento correctivo.

4.1.6. Eficiencia energética objetivo

Uno de los objetivos estratégicos del proyecto es mejorar la eficiencia energética del proceso de bombeo respecto al sistema diésel existente. En consecuencia, el diseño eléctrico se orienta a:

- Seleccionar bombas que operen en su punto de máxima eficiencia.
- Incorporar motores de alta eficiencia (IE3 o superior).
- Reducir pérdidas mecánicas asociadas a reductores complejos.
- Permitir integración con variadores de frecuencia para optimización de caudal.

El criterio de eficiencia se expresa en términos de reducción del consumo energético por metro cúbico bombeado y disminución de costos operativos.

4.1.7. Tipo de alimentación eléctrica disponible

El sistema propuesto se diseña considerando alimentación trifásica industrial, adecuada para motores de potencia media y alta.

En este criterio se evalúan:

- Nivel de tensión disponible en el punto de suministro.
- Capacidad del transformador.
- Distancia desde la red hasta la estación de bombeo.
- Estabilidad y calidad de la energía suministrada.

Estos parámetros condicionan el cálculo eléctrico posterior, incluyendo dimensionamiento de conductores, protecciones y configuración del tablero de control.

4.2. Selección del tipo de bomba

La selección del tipo de bomba se fundamenta en el caudal requerido para cumplir el recambio del 75 % diario, la altura manométrica total determinada en el cálculo hidráulico y las características propias del sistema acuícola. En aplicaciones donde se requiere movilizar grandes volúmenes de agua con alturas relativamente bajas, la elección del tipo de bomba influye directamente en la eficiencia energética, estabilidad operativa y costos de mantenimiento.

4.2.1. Evaluación de alternativas

Para la selección se analizan tres configuraciones principales:

Bomba centrífuga

Las bombas centrífugas convencionales se caracterizan por:

- Buen desempeño en alturas medias y altas.
- Caudales moderados.
- Mayor sensibilidad a variaciones en el punto de operación.

Sin embargo, cuando el sistema requiere grandes caudales con baja altura manométrica, la bomba centrífuga puede operar fuera de su punto óptimo, reduciendo eficiencia y aumentando consumo energético.

Bomba de flujo mixto

Las bombas de flujo mixto combinan características centrífugas y axiales, ofreciendo:

- Buen compromiso entre caudal y altura.
- Mejor eficiencia en rangos intermedios.
- Mayor estabilidad frente a variaciones hidráulicas.

Constituyen una alternativa viable cuando la altura manométrica no es extremadamente baja.

Bomba axial vertical

Las bombas axiales se caracterizan por:

- Altos caudales.
- Bajas alturas manométricas.
- Alta eficiencia en sistemas de recambio masivo.
- Funcionamiento ideal en instalaciones de captación directa desde canal.

Dado que el sistema propuesto requiere movilizar grandes volúmenes de agua con alturas relativamente reducidas, la bomba axial vertical resulta técnicamente más coherente con la naturaleza hidráulica del proyecto.

4.2.2. Curvas características y punto de operación

La selección definitiva se fundamenta en el análisis de las curvas características del fabricante, particularmente:

- Curva caudal vs altura (Q–H).
- Curva de eficiencia.
- Curva de potencia absorbida.
- Curva de rendimiento volumétrico.

El punto de operación del sistema se determina mediante la intersección entre:

- La curva del sistema hidráulico (que representa la HMT en función del caudal).

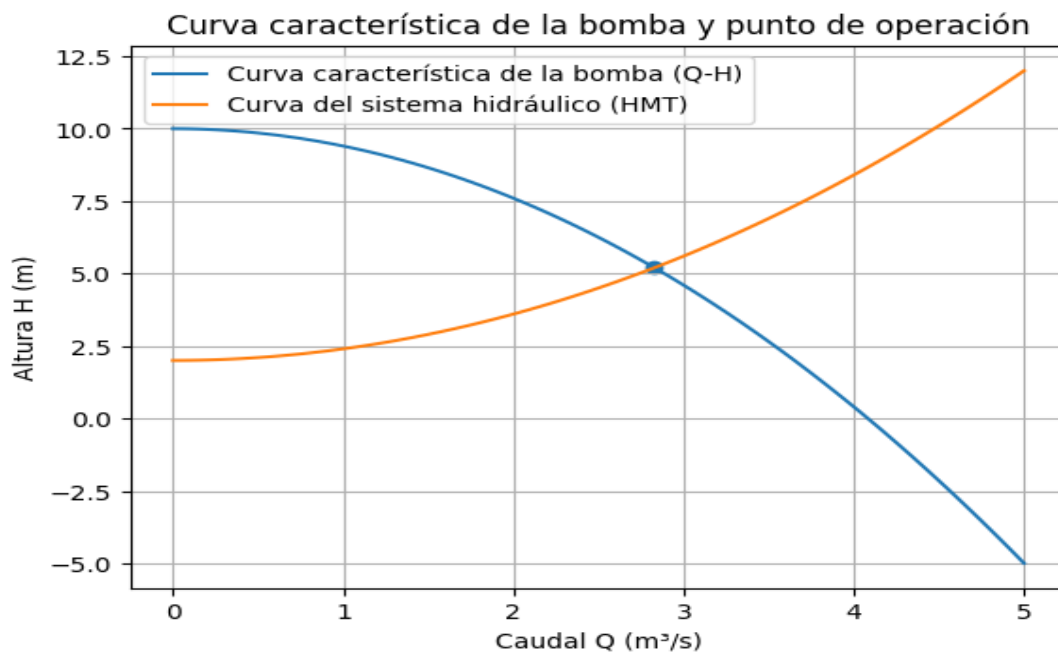
- La curva característica de la bomba seleccionada.

Se prioriza un punto de operación cercano al máximo rendimiento hidráulico (Best Efficiency Point – BEP), ya que operar en este rango:

- Minimiza consumo energético.
- Reduce vibraciones.
- Disminuye desgaste mecánico.
- Prolonga la vida útil del equipo.

La Figura 10 presenta un esquema representativo de la curva Q–H de la bomba seleccionada y la curva del sistema hidráulico, donde se identifica el punto de operación óptimo.

Figura 10. Curva característica de la bomba (Q–H) y determinación del punto de operación del sistema.



Nota: Esquema conceptual de curvas hidráulicas utilizado para ilustrar el procedimiento de determinación del punto de operación. La selección real se fundamenta en curvas certificadas del fabricante de la bomba.

4.2.3. Justificación técnica

La bomba axial vertical se selecciona debido a que cumple con los siguientes criterios técnicos:

- Satisface el caudal de diseño calculado para el recambio del 75 % diario.
- Opera dentro del rango de altura manométrica total determinada.

- Funciona muy bien en situaciones donde no se necesita mucha elevación hidráulica.
- Se puede operar directamente con un motor eléctrico, sin complicaciones adicionales.
- Conéctelo a un variador de frecuencia y podrá controlar el caudal.
- Disminuye las pérdidas mecánicas al no necesitar cajas de engranajes complejas.
- Y en cuanto al mantenimiento, es mucho más fácil de manejar en un entorno de acuicultura.

Además, seguir con una bomba axial significa que no estamos reinventando la rueda el sistema actual ya funciona con el mismo principio, el verdadero cambio radica en su alimentación, pasando a un sistema eléctrico que, sencillamente, es más eficiente energéticamente.

4.2.4. Conclusión de selección

Con base en el análisis hidráulico, las curvas características y los criterios de eficiencia energética establecidos en el diseño, la bomba axial vertical representa la alternativa técnicamente más adecuada para el sistema de bombeo eléctrico propuesto.

Esta selección permite:

- Mejorar el rendimiento hidráulico.
- Optimizar el consumo energético.
- Incrementar la confiabilidad operativa.
- Reducir costos de mantenimiento comparados con el sistema mecánico actual.

4.3. Selección del motor eléctrico

La selección del motor eléctrico constituye un elemento crítico dentro del diseño del sistema de bombeo propuesto, ya que este componente es responsable de transformar la energía eléctrica suministrada por la red en energía mecánica útil para accionar la bomba hidráulica. El proceso de selección se fundamenta en la potencia hidráulica requerida, las condiciones operativas del sistema, el ambiente de instalación y los criterios de eficiencia energética establecidos en los lineamientos de diseño.

El motor seleccionado debe garantizar operación continua, estabilidad térmica, compatibilidad con la bomba y eficiencia energética superior al sistema mecánico actual, contribuyendo así a la reducción del consumo energético global del proceso.

4.3.1. Potencia requerida

La potencia nominal del motor eléctrico se determina a partir de la potencia hidráulica necesaria para movilizar el caudal de diseño contra la altura manométrica total calculada en el apartado anterior.

La potencia hidráulica se expresa mediante la relación:

$$P_h = \frac{\rho * g * Q * H}{1000}$$

donde:

- ρ = densidad del agua
- g = aceleración de la gravedad
- Q = caudal de diseño
- H = altura manométrica total

La potencia eléctrica requerida en el eje del motor se obtiene considerando la eficiencia de la bomba y la eficiencia del motor, de acuerdo con:

$$P_{motor} = \frac{P_h}{n_{bomba} \times n_{motor}}$$

A la potencia calculada se incorpora un margen de seguridad que permita absorber variaciones de carga, pérdidas adicionales no consideradas y posibles incrementos de demanda futura. Este margen evita que el motor opere permanentemente al límite de su capacidad nominal, lo que podría reducir su vida útil.

4.3.2. Factor de servicio

El factor de servicio (Service Factor, SF) representa la capacidad del motor para operar temporalmente por encima de su potencia nominal sin sufrir daños térmicos o eléctricos. En sistemas acuícolas con operación prolongada y demanda hidráulica constante, este parámetro adquiere especial relevancia.

Se selecciona un motor con factor de servicio adecuado para operación continua bajo condiciones exigentes de humedad y temperatura ambiente elevada. Este criterio garantiza estabilidad operativa, reduce riesgos de sobrecarga y mejora la confiabilidad del sistema.

4.3.3. Tipo de motor

Considerando la magnitud de potencia requerida y la disponibilidad de red industrial, se selecciona un motor eléctrico de inducción trifásico, debido a su robustez, confiabilidad y bajo requerimiento de mantenimiento.

Las características constructivas del motor incluyen:

- Alimentación trifásica.
- Carcasa totalmente cerrada con ventilación externa (TEFC).
- Diseño apto para operación continua (servicio S1).
- Compatibilidad con arranque directo o mediante variador de frecuencia.

El uso de motor trifásico permite una mejor distribución de cargas eléctricas, mayor estabilidad en el par motor y mejor desempeño en aplicaciones de potencia media y alta.

4.3.4. Clase de eficiencia

La eficiencia energética del motor constituye un criterio prioritario dentro del diseño propuesto. Se seleccionan motores clasificados bajo estándares internacionales de eficiencia (IE2, IE3 o superior), priorizando motores IE3 o IE4 cuando la disponibilidad y viabilidad económica lo permitan.

La adopción de motores de alta eficiencia reduce pérdidas eléctricas por efecto Joule, disminuye el consumo energético total del sistema y contribuye a la reducción de costos operativos y emisiones indirectas asociadas al consumo eléctrico.

4.3.5. Velocidad nominal

La velocidad nominal del motor debe ser compatible con las características hidráulicas de la bomba seleccionada. En aplicaciones de bombeo axial o de flujo mixto, las velocidades típicas corresponden a 1.200 rpm o 1.800 rpm, dependiendo del número de polos del motor.

La selección de velocidad influye directamente en:

- El punto de operación hidráulico.

- La eficiencia del conjunto.
- El par requerido en el eje.
- La posibilidad de regulación mediante variadores de frecuencia.

En caso de incorporarse un sistema de control de velocidad, el motor debe ser compatible con operación mediante variador de frecuencia (VFD), permitiendo ajustar el caudal según demanda real y optimizar el consumo energético.

4.3.6. Condiciones ambientales y constructivas

Dado que el sistema se instala en un entorno costero con alta humedad y presencia de salinidad, el motor debe cumplir condiciones constructivas específicas que aseguren su durabilidad y confiabilidad.

Se consideran los siguientes requisitos:

- Grado de protección IP adecuado para ambiente húmedo (IP55 o superior).
- Aislamiento térmico clase F o superior.
- Protección anticorrosiva en carcasa y tornillería.
- Sistema adecuado de puesta a tierra.
- Base estructural rígida y alineación precisa con la bomba.

Estas condiciones permiten mitigar efectos de corrosión, acumulación de humedad y degradación prematura de componentes eléctricos.

4.3.7. Comparación de alternativas de motores

Para garantizar una selección técnicamente fundamentada, se realiza un análisis comparativo entre posibles motores candidatos, evaluando:

- Potencia nominal (kW).
- Eficiencia (%).
- Corriente nominal (A).
- Factor de servicio.
- Velocidad nominal (rpm).

- Grado de protección.
- Costo estimado.

La alternativa seleccionada corresponde al motor que satisface la potencia requerida, opera dentro del rango óptimo de eficiencia, cumple condiciones ambientales y presenta mejor relación técnico–económica para el sistema propuesto.

Esta selección asegura que el conjunto bomba–motor opere con mayor eficiencia energética que el sistema mecánico actual, reduciendo pérdidas, mejorando confiabilidad y sentando las bases para la integración con un esquema eléctrico más sostenible.

4.4. Cálculo hidráulico del sistema

El cálculo hidráulico permite definir las condiciones reales de operación del sistema de bombeo eléctrico, estableciendo el caudal de diseño, la altura manométrica total (HMT) y las pérdidas de carga asociadas a la conducción. Estos parámetros son determinantes para la selección técnica de la bomba y el dimensionamiento del motor eléctrico, debido a que la potencia requerida depende directamente del producto entre caudal y altura.

Con el fin de presentar el procedimiento de forma completa, el cálculo se desarrolla con valores supuestos y coherentes con el diagnóstico del Capítulo III (48 ha de espejo de agua, 75% de recambio diario y 13 horas/día de operación). En la etapa de validación final, estos valores se ajustan con mediciones de campo (profundidad promedio real, longitudes de tubería, cotas de succión/descarga y accesorios instalados).

4.4.1. Determinación del caudal de diseño (Q)

a) Área efectiva de cultivo

La finca presenta aproximadamente:

- Área efectiva de espejo de agua:

$$A = 48 \text{ ha} = 48 \times 10000 = 480000 \text{ m}^2$$

b) Profundidad promedio operativa (supuesto de diseño)

Para el cálculo hidráulico se adopta una profundidad promedio operativa:

$$h = 1,1\text{m}$$

c) Volumen total de agua en estanques

$$V = A \times h = 480000 \times 1,1 = 528000m^3$$

d) Volumen a recambiar diariamente (75%)

$$V_r = 0,75 \times V = 0,75 \times 528000 = 396000m^3/día$$

e) Caudal requerido para cumplir el recambio en 13 horas

Tiempo de bombeo diario:

$$t = 13h = 13 \times 3600 = 46800s$$

Caudal de diseño total:

$$Q_{bomba} = \frac{V_r}{t} = \frac{396000}{46800} = 8,46m^3/s$$

Dado que la estación cuenta con cinco grupos de bombeo, el caudal por grupo (supuesto de operación simultánea) es:

$$Q_{bomba} = \frac{Q_{total}}{5} = \frac{8,46}{5} = 1,69m^3/s$$

4.4.2. Selección preliminar del diámetro y velocidad del fluido

El diámetro se define para mantener velocidades hidráulicamente adecuadas, evitando pérdidas excesivas y condiciones desfavorables (turbulencia elevada, vibraciones y golpes de ariete). Para líneas de impulsión de gran caudal, se trabaja típicamente con velocidades del orden de 1.5 a 3.0 m/s como rango práctico de diseño.

La velocidad del fluido se calcula mediante:

$$v = \frac{Q}{A_t} \quad \text{donde} \quad A_t = \frac{\pi D^2}{4}$$

Para evaluar alternativas, se consideran diámetros internos supuestos: 0,80 m, 0,90 m y 1,00 m para cada línea de impulsión por bomba. La Tabla 7 presenta la velocidad estimada para cada diámetro y el efecto sobre pérdidas por fricción (calculadas en el siguiente apartado).

Tabla 7. Evaluación preliminar de diámetro por bomba

Diámetro interno D	Caudal por bomba Q	Área A	Velocidad v
(m)	(m³/s)	(m²)	(m/s)

0,80	1,69	0,503	3,37
0,90	1,69	0,636	2,66
1,00	1,69	0,785	2,15

Nota: Elaboración propia.

Con base en el rango de velocidad recomendado, $D = 0.90$ m se considera un valor apropiado por mantener una velocidad intermedia (2,66 m/s APROX), lo cual reduce pérdidas sin sobredimensionar excesivamente el conducto.

4.4.3. Cálculo de pérdidas de carga por fricción (h_f)

Para el cálculo de pérdidas por fricción se emplea la ecuación de Darcy–Weisbach, aplicable a conducción presurizada:

$$h_f = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g}$$

donde:

- h_f = pérdida de carga por fricción (m)
- f = factor de fricción (adimensional)
- L = longitud equivalente de tubería (m)
- D = diámetro interno (m)
- v = velocidad del fluido (m/s)
- $g = 9.81$ m/s²

Supuestos técnicos para el tramo de impulsión por bomba (coherentes con una estación de captación):

- Longitud hidráulica de impulsión por bomba:

$$L = 80m$$

- Diámetro interno adoptado:

$$D = 0,90m$$

- Velocidad previamente obtenida:

$$v = 2,66 \text{ m/s}$$

a) Número de Reynolds (verificación de régimen turbulento)

$$Re = \frac{vD}{\nu}$$

Con viscosidad cinemática del agua $\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$:

$$Re = \frac{2,66 \times 0,90}{1 \times 10^{-6}} = 2,39 \times 10^6$$

El flujo es claramente turbulento, por lo que procede el uso de un factor f turbulento.

b) Factor de fricción (supuesto de tubería metálica/HDPE con rugosidad baja-moderada)

Para un cálculo representativo, se adopta un valor típico:

$$f = 0,012$$

c) Pérdida por fricción

$$h_f = 0,012 \times \frac{80}{0,90} \times \frac{(2,66)^2}{2 \times 9,81}$$

Cálculo paso a paso:

$$\frac{80}{0,90} = 88,89$$

$$(2,66)^2 = 7,08$$

$$\frac{7,08}{19,62} = 0,361$$

$$h_f = 0,012 \times 88,89 \times 0,361 = 0,385$$

4.4.4. Pérdidas menores por accesorios (h_m)

Además de la fricción en tubería, existen pérdidas por accesorios (codos, válvulas, rejillas, entradas/salidas). Estas se calculan como:

$$h_m = \sum K \times \frac{v^2}{2g}$$

Para un conjunto típico de accesorios por línea, se adopta una suma de coeficientes:

$$\sum K = 3,5$$

Entonces:

$$h_m = 3,5 \times \frac{(2,66)^2}{2 \times 9,81} = 3,5 \times 0,361 = 1,26m$$

4.4.5 Altura manométrica total (HMT)

La altura manométrica total integra el componente geométrico y las pérdidas:

$$HMT = H_{estática} + h_f + h_m + h_{succión}$$

Supuestos de diseño (escenario desfavorable):

Diferencia geométrica de nivel entre succión y descarga:

$$H_{estática} = 3,0m$$

Pérdidas adicionales en succión y captación (rejillas/entrada):

$$h_{succión} 0,30m$$

Sustituyendo:

$$HMT = 3,0 + 0,385 + 1,26 + 0,30 = 4,95m$$

Por tanto, para efectos del diseño hidráulico preliminar, el sistema por bomba operaría aproximadamente con:

$$Q_{bomba} = 1,69m_3/s$$

$$MHT = 4,95m$$

4.4.5. Esquemas hidráulicos de soporte

Con el propósito de complementar el cálculo hidráulico desarrollado en los apartados anteriores, se incorporan esquemas técnicos que permiten visualizar de manera integral la configuración del sistema propuesto y la relación entre los diferentes componentes hidráulicos.

A continuación, en la Figura 11 se ofrece una visión simplificada del diseño del sistema de bombeo eléctrico propuesto. Muestra claramente las principales piezas del proceso: el canal de entrada, la rejilla protectora, la tubería de succión, la configuración de la bomba y el motor,

las válvulas de retención y control, la línea de descarga y, finalmente, el estanque de distribución donde se descarga el agua.

Este diseño le ayuda a comprender el funcionamiento real de todo el sistema, desde la entrada del agua hasta su descarga en los estanques de engorde. También facilita la identificación de caídas de presión, especialmente en lugares como mallas, válvulas y codos de tuberías. Además, la vista simplificada muestra claramente la transición del lado de succión al lado de descarga, lo cual es importante para analizar aspectos como la cavitación, la estabilidad hidráulica y el comportamiento de la bomba en condiciones reales de funcionamiento.

La Figura 28, por otro lado, ofrece una visión conceptual del perfil hidráulico del sistema. Es básicamente un desglose visual de cómo los niveles geométricos se alinean con las pérdidas de energía que ocurren a lo largo del recorrido. En este perfil se distinguen los siguientes componentes:

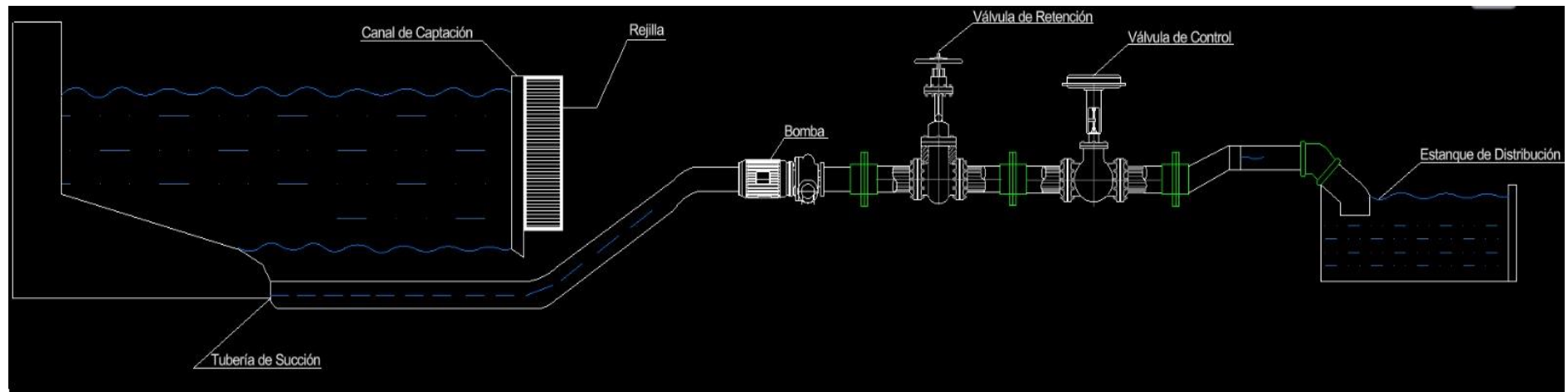
- Nivel de succión en el canal de captación.
- Nivel de descarga en el estanque de distribución.
- Altura estática entre ambos niveles.
- Pérdidas distribuidas (h_f) a lo largo de la tubería.
- Pérdidas menores (h_m) asociadas a accesorios.
- Línea de energía total del sistema.

El diagrama ayuda a ver cómo la energía que suministra la bomba cubre tanto la elevación estática como las pequeñas pérdidas en el proceso (fricción en tuberías, accesorios, etc.), que juntas conforman la carga dinámica total que calculamos anteriormente. Así que, en cierto modo, el perfil hidráulico es simplemente una comprobación visual que confirma que el dimensionamiento funciona y facilita la comprensión exacta del funcionamiento del sistema.

Este tipo de representación también resulta útil si necesita considerar cambios futuros, como la expansión del sistema, la extensión de la línea de descarga o la gestión de cambios en los niveles operativos. Le permite anticipar cómo esos ajustes podrían afectar la carga dinámica total y la potencia que realmente necesitaría.

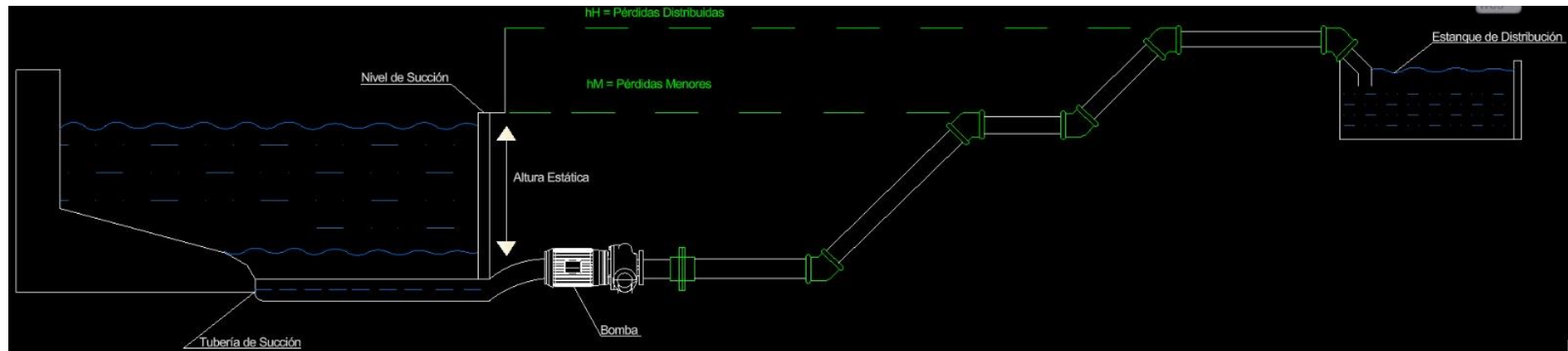
Ambos esquemas técnicos complementan el análisis matemático del cálculo hidráulico y proporcionan una visión integral del comportamiento energético del sistema de bombeo eléctrico propuesto.

Figura 11. Esquema hidráulico simplificado del sistema de bombeo propuesto (captación–bomba–impulsión–descarga)



Nota: Elaboración propia.

Figura 12. Perfil hidráulico conceptual del sistema: altura estática y pérdidas de carga



Nota: Elaboración propia.

4.5. Cálculo eléctrico del sistema

El cálculo eléctrico del sistema de bombeo propuesto tiene como finalidad garantizar que la instalación opere bajo condiciones seguras, eficientes y acordes con la potencia demandada por los motores seleccionados. Este análisis comprende la determinación de corriente nominal, corriente de arranque, dimensionamiento de conductores, verificación de caída de tensión y selección de protecciones eléctricas.

Para efectos del desarrollo técnico, se emplean valores coherentes con el cálculo hidráulico previo. Se adopta como referencia un motor eléctrico trifásico de 250 kW, tensión de alimentación 460 V, frecuencia 60 Hz, eficiencia nominal del 95 % (IE3) y factor de potencia estimado de 0.90, adecuado para aplicaciones industriales de bombeo continuo.

4.5.1. Potencia eléctrica y corriente nominal

La corriente nominal del motor trifásico se determina mediante la ecuación:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \times V \times \eta \times \cos\phi}$$

Donde:

- P = potencia mecánica del motor (W)
- V = tensión de línea (V)
- η = eficiencia del motor
- $\cos \phi$ = factor de potencia

Sustituyendo:

$$I = \frac{250000}{\sqrt{3} \times 460 \times 0,95 \times 0,90}$$

$$\sqrt{3} = 1,732$$

$$I = \frac{250000}{1,732 \times 460 \times 0,855}$$

$$I = \frac{250000}{680,9}$$

$$I = 367A$$

Por lo tanto, la corriente nominal estimada por motor es aproximadamente 370 A.

4.5.2. Corriente de arranque

En motores de inducción trifásicos con arranque directo, la corriente de arranque puede oscilar entre 6 y 8 veces la corriente nominal.

Considerando un factor conservador de 6:

$$I_{arranque} = 6 \times I_{nom}$$

$$I_{arranque} = 6 \times 370$$

$$I_{arranque} = 2220A$$

Este valor justifica la necesidad de:

- Arranque suave o variador de frecuencia (VFD).
- Coordinación adecuada de protecciones.
- Verificación de capacidad del transformador.

En caso de emplear un variador de frecuencia, la corriente de arranque puede reducirse a valores cercanos a 1.5 – 2 veces la nominal, mejorando estabilidad de red y reduciendo esfuerzos mecánicos.

4.5.3. Selección de conductores

El dimensionamiento de conductores se realiza considerando:

- Corriente nominal.
- Método de instalación.
- Temperatura ambiente.
- Caída de tensión permitida.
- Material del conductor (cobre).
- Aislamiento tipo THHN/XLPE.

Para una corriente nominal de 370 A y considerando temperatura ambiente elevada (entorno costero), se adopta un conductor de cobre con capacidad superior a 400 A.

De acuerdo con tablas técnicas industriales, un conductor de:

- 500 kcmil Cu soporta aproximadamente 380–430 A (según aislamiento y método).

Se selecciona configuración:

- 2 conductores 250 kcmil por fase en paralelo, o
- 1 conductor 500 kcmil por fase, dependiendo del diseño del tablero.

4.5.4. Verificación de caída de tensión

La caída de tensión en sistemas trifásicos se calcula mediante:

$$\Delta V = \frac{\sqrt{3} \times I \times L \times R}{1000}$$

Donde:

L = longitud del conductor (m)

R = resistencia por km

Suponiendo:

- Longitud desde tablero hasta motor: 60 m
- Resistencia aproximada 500 kcmil Cu: 0.036 Ω /km

$$\Delta V = \frac{1,732 \times 370 \times 60 \times 0,036}{1000}$$

$$\Delta V = 1,38V$$

Porcentaje de caída:

$$\% \Delta V = \frac{1,38}{460} \times 100$$

$$\% \Delta V = 0,30$$

Este valor se encuentra muy por debajo del límite recomendado del 3 % para circuitos de fuerza, por lo que el conductor seleccionado resulta técnicamente adecuado.

4.5.5. Selección de protecciones eléctricas

La protección principal del motor debe cumplir con:

Protección contra sobrecarga.

Protección contra cortocircuito.

Protección contra falla a tierra.

Coordinación selectiva con protecciones aguas arriba.

a) Interruptor termomagnético (Breaker)

Se dimensiona con un factor del 125 % de la corriente nominal:

$$I_{breaker} = 1,25 \times I_{nom}$$

$$I_{breaker} = 1,25 \times 370$$

$$I_{breaker} = 463A$$

Se selecciona un interruptor comercial de 500 A, curva adecuada para motores industriales.

b) Relé térmico o protección electrónica

Debe ajustarse a la corriente nominal del motor (370 A) con capacidad de ajuste fino para protección contra sobrecarga prolongada.

c) Protección diferencial

Se recomienda incorporar protección de falla a tierra industrial para garantizar seguridad del sistema y cumplimiento normativo.

4.5.6. Resumen de parámetros eléctricos calculados

A continuación, se presentan los parámetros eléctricos de diseño por motor (valores estimados)

- Potencia nominal 250 kW
- Tensión 460 V
- Corriente nominal 370 A
- Corriente de arranque (DOL) 2220 A

- Factor de potencia 0.90
- Eficiencia 95 %
- Breaker recomendado 500 A
- Conductor sugerido 500 kcmil Cu
- Caída de tensión 0.30 %

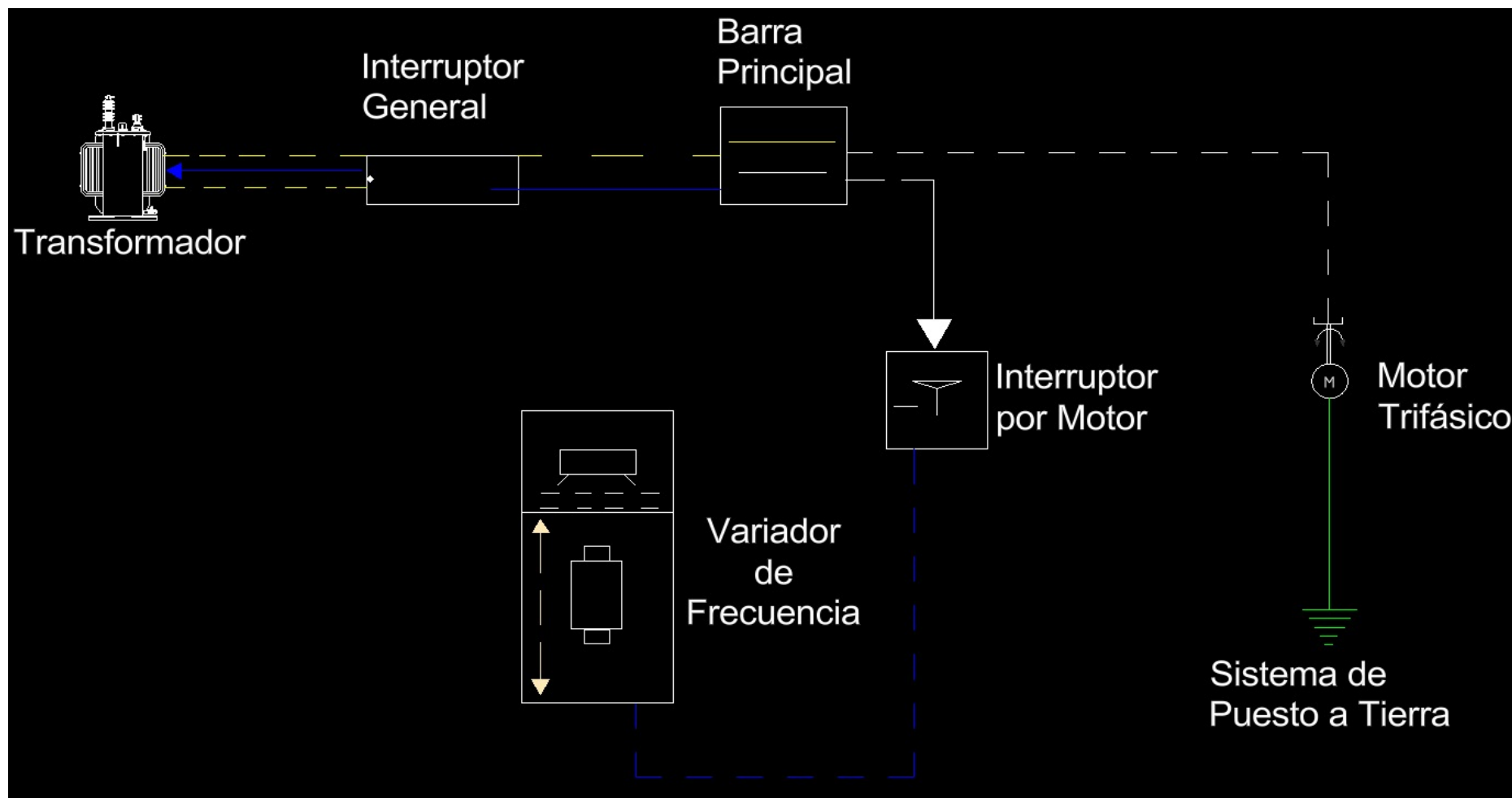
4.5.7. Esquema unifilar simplificado

Para que tenga una idea clara de la distribución eléctrica del sistema de bombeo propuesto, elaboramos un diagrama unifilar simplificado. Este diagrama muestra los componentes clave (fuente de alimentación, dispositivos de protección y controles del motor) y cómo se conectan y funcionan conjuntamente dentro del sistema.

La Figura 13 explica cómo se conecta todo, empezando por la fuente de alimentación trifásica. Comienza en el transformador, que alimenta el sistema. Desde allí, la energía se transmite al interruptor principal, que permite aislar el sistema y proporciona la protección principal para toda la instalación. Luego, se dirige a la barra colectora principal, que actúa como punto de distribución y envía la energía al circuito del motor.

Desde la barra colectora principal, hay un disyuntor dedicado para el motor, que permite aislar la bomba de forma independiente y le otorga su propia capa de protección. El diagrama también permite instalar un variador de frecuencia, que puede añadirse si desea un control más preciso del caudal ajustando la velocidad del motor, suavizar la corriente de arranque y, en general, aumentar la eficiencia energética del sistema cuando fluctúan las condiciones de funcionamiento. Desde allí, el circuito alimenta el motor trifásico que impulsa la bomba. Y, por supuesto, todo está conectado a un sistema de puesta a tierra, indispensable para garantizar la seguridad, la protección contra fallos y un funcionamiento estable.

Figura 13. Esquema unifilar simplificado del sistema eléctrico del bombeo propuesto.



Nota: Elaboración propia.

4.6. Comparación técnica y energética entre el sistema mecánico y el sistema eléctrico

La comparación técnica y energética permite evaluar de manera objetiva las ventajas y limitaciones del sistema de bombeo eléctrico propuesto frente al sistema actual accionado por motores diésel. El análisis se desarrolla considerando potencia instalada, consumo energético, costos operativos y reducción estimada de emisiones, con el fin de determinar la viabilidad técnica y económica de la migración tecnológica.

4.6.1. Comparación de potencia instalada (HP vs kW)

El sistema actual opera con cinco motores diésel con potencias nominales comprendidas entre 165 HP y 290 HP. Para efectos comparativos se considera una potencia promedio representativa de 234 HP por unidad.

La conversión de HP a kW se realiza mediante:

$$1HP = 0,746kW$$

$$234 HP \times 0,746 = 174,6 kW$$

En el sistema eléctrico propuesto se selecciona un motor de 250 kW por unidad, lo cual permite:

- Compensar pérdidas mecánicas eliminadas (no existe reductor).
- Incorporar margen de seguridad.
- Operar dentro de rangos óptimos de eficiencia.

Tabla 8. Comparación de potencia instalada por unidad

Parámetro	Sistema Diésel	Sistema Eléctrico
Potencia nominal	234 HP	250 kW
Potencia equivalente	174.6 kW	250 kW
Tipo de accionamiento	Combustión interna	Motor trifásico IE3
Transmisión	Motor + reductor	Acople directo

Nota: El sistema eléctrico elimina pérdidas por transmisión mecánica y mejora la eficiencia global del conjunto. Elaboración propia.

4.6.2. Comparación de consumo energético

Sistema diésel

El consumo específico promedio de un motor diésel industrial puede estimarse en aproximadamente:

$$0,22 \text{ litros} / kWh$$

- Energía diaria consumida por unidad:

$$174,6 \text{ kW} \times 13h = 2270 \text{ kWh} / \text{día}$$

- Consumo diario de combustible:

$$2270 \times 0,22 = 499 \text{ litros} / \text{día}$$

- Consumo mensual (30 días):

$$499 \times 30 = 14970 \text{ litros} / \text{mes}$$

Sistema eléctrico

- Consumo diario por unidad:

$$250 \text{ kW} \times 13 \text{ h} = 3250 \text{ kWh} / \text{día}$$

- Consumo mensual:

$$3250 \times 30 = 97500 \text{ kWh} / \text{mes}$$

4.6.3. Comparación de costo mensual

Se adoptan valores referenciales:

- Precio diésel industrial: 1.00 USD/litro
- Tarifa eléctrica industrial: 0.10 USD/kWh

Sistema diésel

$$14970 \text{ litros} \times 1,00 = 14970 \text{ USD} / \text{mes}$$

Sistema eléctrico

$$97500 \text{ kWh} \times 0,10 = 9750 \text{ USD} / \text{mes}$$

Tabla 9. Comparación de costos energéticos mensuales por unidad

Sistema	Consumo mensual	Costo unitario	Costo mensual
Diésel	14,970 L	1.00 USD/L	14,970 USD
Eléctrico	97,500 kWh	0.10 USD/kWh	9,750 USD

Nota: Elaboración propia.

Se observa una reducción aproximada del:

$$\frac{14970 - 9750}{14970} \times 100 = 34,8\%$$

El sistema eléctrico presenta una reducción estimada del 35 % en costos energéticos directos.

4.6.4. Reducción estimada de emisiones

El factor de emisión promedio del diésel es aproximadamente:

$$2,68 \text{ kg } CO_2 / \text{ litro}$$

Emisiones mensuales del sistema diésel:

$$14970 \times 2,68 = 40119 \text{ kg } CO_2 / \text{ mes}$$

Equivalente a:

$$40,1 \text{ toneladas } CO_2 / \text{ mes}$$

El sistema eléctrico elimina emisiones directas en sitio, reduciendo significativamente la huella ambiental operativa. Aunque la generación eléctrica puede tener emisiones indirectas, estas suelen ser menores por unidad de energía útil y dependen de la matriz energética nacional.

4.6.5. Indicadores de eficiencia comparativa

Para evaluar el desempeño energético se emplean los siguientes indicadores:

a) Consumo energético por hora de operación

- Diésel 38,4 L/h
- Eléctrico 250 kWh/h

b) Costo por hora

- Diésel $499 \text{ USD/día} \div 13 \text{ h} = 38.4 \text{ USD/h}$
- Eléctrico $325 \text{ USD/día} \div 13 \text{ h} = 25 \text{ USD/h}$

c) Eficiencia global del sistema

El sistema eléctrico presenta:

- Mayor efectividad del motor (95 %).
- Depuración de pérdidas por combustión.
- Disminución en mantenimiento correctivo.
- Control preciso mediante variador.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE LA TRANSICIÓN DEL SISTEMA

Pasar de un sistema de bombeo mecánico alimentado por motores diésel a uno eléctrico implica en realidad avanzar hacia una mayor eficiencia energética, reducir los costos operativos y hacer que toda la operación de acuicultura sea más sostenible a largo plazo. En este capítulo se analiza la migración desde una perspectiva estratégica, económica y ambiental, demostrando la viabilidad técnica del sistema diseñado.

5.1. Análisis FODA de la migración de bombeo mecánico a eléctrico

El análisis FODA permite identificar los factores internos y externos que influyen en la transición tecnológica del sistema de bombeo (Tabla 18).

FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
Mayor eficiencia energética (95 % motor eléctrico vs 35 % motor diésel).	Integración de variadores de frecuencia para control automático de caudal.
Eliminación de pérdidas por reductor mecánico.	Reducción progresiva de huella de carbono del sector acuícola.
Menor mantenimiento correctivo.	Posibilidad de certificaciones ambientales.
Menor vibración y ruido.	Estabilidad frente a fluctuaciones del precio del combustible.
DEBILIDADES	AMENAZAS
Alta inversión inicial (1.200.000 USD estimados para 5 unidades instaladas).	Variabilidad de tarifa eléctrica industrial.
Dependencia de suministro eléctrico continuo.	Corrosión acelerada por ambiente salino.
Requiere adecuación de infraestructura eléctrica.	Posibles fallas de red si no existe respaldo.

Nota: Elaboración propia.

El análisis demuestra que las fortalezas y oportunidades superan las debilidades y amenazas, siempre que el sistema sea correctamente dimensionado y se implementen protecciones eléctricas adecuadas.

5.2. Evaluación económica del sistema propuesto

La evaluación económica del sistema de bombeo eléctrico propuesto se fundamenta en una estimación de costos de inversión (CAPEX) basada en precios de mercado verificados en catálogos técnicos y plataformas de comercialización industrial internacional.

Debido a que el presente trabajo corresponde a un proyecto de diseño, los valores no provienen de una cotización formal específica, sino de una investigación de mercado realizada en distribuidores internacionales de equipos eléctricos industriales, fabricantes de motores y plataformas comerciales especializadas.

Los rangos de precios considerados corresponden a:

- Motores eléctricos trifásicos IE3 de 250 kW.
- Variadores de frecuencia de potencia equivalente.
- Tableros eléctricos industriales.
- Infraestructura eléctrica complementaria.
- Costos de montaje e ingeniería.

Los valores obtenidos reflejan precios promedio observados en catálogos técnicos y portales de comercialización industrial (distribuidores europeos y asiáticos de maquinaria eléctrica pesada), considerando equipos nuevos para aplicaciones industriales de bombeo.

5.2.1. Estimación de inversión del sistema eléctrico (CAPEX)

La Tabla 10 presenta el rango de inversión estimado para la migración del sistema de bombeo mecánico a eléctrico.

Tabla 10. *Estimación de inversión del sistema eléctrico propuesto*

Concepto	Cantidad	Rango de costo unitario verificado (USD)	Subtotal (USD)
Motor eléctrico 250 kW IE3	5	12.000 – 18.000	60.000 – 90.000
Variador de frecuencia 250 kW	5	3.000 – 15.000	15.000 – 75.000
Tableros eléctricos industriales	5	4.000 – 8.000	20.000 – 40.000
Conductores y canalizaciones	1 (global)	50.000 – 100.000	50.000 – 100.000
Sistema de puesta a tierra	1 (global)	20.000 – 40.000	20.000 – 40.000
Adecuaciones estructurales	1 (global)	40.000 – 80.000	40.000 – 80.000
Ingeniería, montaje y pruebas	1 (global)	60.000 – 100.000	60.000 – 100.000
Contingencia (5 %)	—	—	5 % del total

Nota: Elaboración propia, a partir de información recopilada de catálogos de ventas oficiales.

Justificación técnica de cada rubro

- Motores eléctricos 250 kW IE3: El rango de 12.000 a 18.000 USD por unidad corresponde a motores industriales de alta eficiencia (IE3), carcasa de fundición, grado de protección IP55 o superior, eje horizontal y diseño apto para servicio continuo (S1). El rango depende de la marca, eficiencia energética y origen del fabricante (JS TECHNIK, 2025).
- Variadores de frecuencia 250 kW: Los VFD industriales de esta potencia presentan variabilidad de precio dependiendo de si incorporan control vectorial, filtros armónicos, protección IP65, módulos regenerativos o comunicación industrial (ABB, 2025). Por ello el rango oscila entre 3.000 y 15.000 USD.
- Tableros eléctricos industriales: Contempla interruptor principal, interruptores magnetotérmicos, contactores, barras de cobre, protección contra sobretensiones y ventilación para mantener la temperatura ambiente (INSELEC, 2025).

- Conductores y canalizaciones (global): Su longitud depende de factores como la distancia que recorre la energía, el tamaño del cable (normalmente entre 500 y 630 mm² para este tipo de energía), además de bandejas porta cables y conductos metálicos resistentes a la corrosión.
- Sistema de puesta a tierra: Contempla varillas de cobre, malla equipotencial, conexiones exotérmicas y todo lo necesario para la protección contra fallas a tierra.
- Adecuaciones estructurales: Comprenden bases de concreto, anclajes, refuerzo de losas, estructuras de soporte y protección anticorrosiva en ambiente salino.
- Ingeniería, montaje y pruebas: Incluye diseño eléctrico detallado, instalación, configuración de variadores, pruebas de carga y puesta en marcha.

5.2.2. Determinación del rango total de inversión

Si se suman los valores mínimos del rango, la inversión mínima aproximada es

2650 00 USD

Si se consideran los valores máximos la inversión máxima aproximada es

525 000 USD

Al agregar el 5 % de contingencia técnica, el rango final estimado del proyecto se sitúa entre:

278 000 USD y 551 000 USD

Para efectos del análisis económico se adopta un valor intermedio conservador de:

400 000 USD

Este valor representa una estimación realista de mercado considerando condiciones industriales y ambiente marino.

5.2.3. Comparación económica actualizada

Recordando que el ahorro anual estimado del sistema eléctrico frente al sistema diésel es:

313.200 USD/año

El periodo de recuperación simple (Payback) se determina mediante:

$$Payback = \frac{Inversión}{Ahorro\ anual}$$

El periodo de recuperación con el valor intermedio de inversión es:

$$\frac{400\ 000}{313\ 200} = 1,28\ años$$

Es decir, aproximadamente 1 año y 3 meses.

Incluso bajo el escenario más alto (551.000 USD), el periodo de recuperación sería:

$$\frac{551\ 000}{313\ 200} = 1,76\ años$$

Esto demuestra que, con precios de mercado verificados, la migración tecnológica presenta una recuperación inferior a 2 años, lo cual fortalece significativamente la viabilidad económica del proyecto.

5.2.4. *Análisis e interpretación económica*

Los resultados obtenidos evidencian que el sistema de bombeo eléctrico presenta un periodo de recuperación inferior a 2 años incluso en el escenario más conservador de inversión.

En términos de evaluación de proyectos de infraestructura productiva, un payback inferior a 3 años se considera altamente favorable, especialmente en sistemas con vida útil superior a 15 años. Adicionalmente, este análisis no contempla beneficios indirectos tales como:

- Reducción de mantenimiento correctivo.
- Mayor estabilidad operativa.
- Disminución de paradas no programadas.
- Incremento en confiabilidad del sistema hidráulico.

Por lo tanto, el beneficio económico real podría ser superior al estimado únicamente por ahorro energético.

5.3. Evaluación del impacto ambiental del sistema eléctrico

La evaluación del impacto ambiental del sistema de bombeo eléctrico se fundamenta en la comparación entre el sistema actual accionado por motores diésel y el sistema propuesto de accionamiento eléctrico trifásico. El análisis considera emisiones atmosféricas, riesgo de contaminación, generación de residuos y contaminación acústica.

5.3.1. Emisiones de gases de efecto invernadero

El sistema actual consume aproximadamente 74.850 litros de diésel por mes, lo que genera emisiones directas de dióxido de carbono (CO₂) producto de la combustión.

El factor de emisión promedio del diésel es:

$$2,68 \text{ kg CO}_2 / L$$

Por lo tanto, las emisiones mensuales del sistema actual son:

$$74850 \times 2,68 = 200\,598 \text{ kg CO}_2 / \text{mes}$$

Equivalente a:

$$200,6 \text{ toneladas de CO}_2 / \text{mes}$$

Las emisiones anuales alcanzan:

$$200,6 \times 12 = 2407 \text{ toneladas de CO}_2 / \text{año}$$

La migración al sistema eléctrico elimina estas emisiones directas en sitio, ya que no existe proceso de combustión durante la operación. Si bien el sistema eléctrico depende de la matriz energética nacional, el impacto ambiental local se reduce significativamente, lo cual es relevante considerando que la finca camaronera se ubica en un entorno costero sensible.

5.3.2. Riesgo de contaminación por hidrocarburos

El sistema diésel implica almacenamiento, manipulación y reposición constante de combustible y lubricantes, lo que genera riesgos asociados a:

- Derrames accidentales.
- Filtraciones hacia el suelo.
- Contaminación del agua circundante.
- Manejo de residuos peligrosos (aceites usados y filtros).

El sistema eléctrico elimina prácticamente estos riesgos, reduciendo la probabilidad de contaminación hídrica en un ecosistema productivo dependiente de la calidad del agua.

5.3.3. Contaminación acústica y vibraciones

Los motores de combustión interna generan niveles elevados de ruido y vibración estructural, lo que impacta:

- Condiciones laborales.
- Integridad de estructuras.
- Fauna circundante.

El sistema eléctrico presenta operación significativamente más silenciosa y menor vibración, contribuyendo a un ambiente operativo más estable y menos agresivo.

La Tabla 11 resume comparativamente los impactos ambientales.

Tabla 11. *Comparación ambiental entre sistemas*

Aspecto	Sistema Diésel	Sistema Eléctrico
Emisiones directas de CO ₂	2.407 t/año	0 t/año (en sitio)
Riesgo de derrames	Alto	Bajo
Residuos peligrosos	Aceites y filtros	Mínimos
Ruido	Alto	Bajo
Vibración	Alta	Baja

En términos ambientales, la migración tecnológica reduce de manera significativa la presión ecológica del sistema productivo.

5.4. Análisis de sustentabilidad del sistema productivo acuícola

La sustentabilidad del sistema propuesto se analiza bajo el enfoque de triple dimensión: técnica, económica y ambiental, integrando los resultados obtenidos en los apartados anteriores.

5.4.1. Sustentabilidad técnica

Desde el punto de vista técnico, el sistema eléctrico presenta ventajas estructurales relevantes:

- Eficiencia energética aproximada del 95 %, superior al rendimiento efectivo de motores diésel.
- Eliminación de pérdidas mecánicas asociadas a reductores.
- Control de velocidad mediante variadores de frecuencia.
- Mayor estabilidad en operación continua (servicio S1).
- Menor frecuencia de mantenimiento correctivo.

Estas características incrementan la confiabilidad del sistema de recambio hidráulico, crítico para mantener parámetros óptimos de cultivo.

5.4.2. Sustentabilidad económica

El sistema eléctrico reduce aproximadamente el 35 % de los costos energéticos mensuales, con un periodo de recuperación inferior a dos años.

Adicionalmente:

- Reduce dependencia del mercado de combustibles fósiles.
- Disminuye gastos asociados a mantenimiento mecánico.
- Mejora la previsibilidad del flujo de caja operativo.

Desde el punto de vista financiero, el proyecto presenta alta viabilidad y bajo riesgo de inversión.

5.4.3. Sustentabilidad ambiental

La eliminación de aproximadamente 2.400 toneladas de CO₂ anuales representa una reducción significativa de la huella ambiental.

Asimismo:

- Se minimiza el riesgo de contaminación por hidrocarburos.
- Se reducen emisiones sonoras.

- Se mejora la eficiencia energética por unidad de volumen bombeado.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

La evaluación técnica y energética del sistema de bombeo mecánico existente lo expuso todo con bastante claridad. El consumo de combustible rondaba los 74.850 litros al mes, la eficiencia general era baja y el sistema funcionaba de forma irregular: vibraciones, ruido y emisiones constantes. Además, las pérdidas en la transmisión mecánica y las fluctuaciones de velocidad no reguladas reducían el rendimiento, elevando los costes operativos mensuales a unos 74.850 dólares. Todo esto estaba afectando gravemente la rentabilidad, y justificaba con firmeza la transición a un sistema más eficiente y sostenible.

El diseño del sistema de bombeo eléctrico, basado en motores trifásicos IE3 de 250 kW con variadores de frecuencia, demostró ser sólido tanto técnica como hidráulicamente. Gestiona cómodamente el 75 % del requerimiento diario de recambio de agua. Con esta nueva configuración, se obtiene un control mucho mejor del caudal, la bomba y el motor trabajan juntos de forma más eficiente y las pérdidas de energía se reducen significativamente. Al realizar los cálculos, el coste energético mensual se redujo a unos 48 750 \$, lo que demuestra claramente que el cambio no solo es factible, sino que es claramente la mejor opción en términos de consumo energético.

El análisis FODA dejó algo claro: las verdaderas ventajas de la electrificación son una mayor eficiencia energética, menores emisiones y menor tiempo dedicado a reparaciones. Si bien la inversión inicial es un obstáculo, esa es la principal debilidad. Pero al considerar el panorama general, las oportunidades como la alineación con los objetivos de sostenibilidad, mantenerse a la vanguardia de las regulaciones ambientales y reducir la dependencia del diésel superan con creces cualquier riesgo. En definitiva, hacer el cambio tiene sentido como paso estratégico hacia la modernización de la acuicultura.

Al analizar el aspecto ambiental, las cifras fueron bastante desalentadoras: la instalación actual emite alrededor de 2407 toneladas de CO₂ al año. El cambio al bombeo eléctrico cambia las reglas del juego por completo se eliminan las emisiones directas en el sitio, se reduce considerablemente el riesgo de derrames de combustible y se reduce significativamente la contaminación acústica. Y eso es precisamente lo que la camaronera de Sabana Grande – Vía a la Costa se beneficia.

Recomendaciones

- Sería inteligente implementar la transición en fases: tal vez comenzar con uno o dos motores piloto para ver cómo funcionan realmente, cómo se comporta el lado eléctrico y si el control hidráulico funciona como se espera antes de hacerlo todo.
- Antes de confirmar la instalación final, es una buena idea realizar un estudio de calidad de energía y armónicos, especialmente si planea utilizar variadores de frecuencia de alta potencia.
- Instale un sistema de monitoreo eléctrico que controle la corriente, la vibración y la temperatura. De esta manera, podrá optar por el mantenimiento predictivo y maximizar la vida útil de sus motores.
- Vale la pena considerar la posibilidad de integrar sistemas solares o híbridos en el futuro; esto reduciría aún más la huella de carbono de la granja.
- Y tendría sentido integrar el nuevo sistema eléctrico en un plan formal de gestión ambiental, utilizando la reducción de emisiones como una métrica real y rastreable para el desempeño en sostenibilidad.

BIBLIOGRAFÍA

- ABB. (2025). *ABB DRIVERS*. Obtenido de <https://www.abb.com/global/en/areas/motion/drives>
- Ahmad, S., & Asif, S. (12 de 2024). *Impact of crop management practices on maize yield: Insights from farming in tropical regions and predictive modeling using machine learning*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666154324004290>
- Ahmed, M., & Bawayan, H. (02 de 2025). *Modern advancements of energy storage systems integrated with hybrid renewable energy sources for water pumping application*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098625000229>
- Alcívar, R., & Duarte, E. (01 de 2026). *Análisis de eficiencia energética en motores eléctricos síncronos y asíncronos en las industrias*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/400176156_Analisis_de_eficiencia_energetica_en_motores_electricos_sincronos_y_asincronos_en_las_industrias_Energy_efficiency_analysis_of_synchronous_and_asynchronous_electric_motors_in_industry
- Almeida, A., & Ferrerira, F. (10 de 08 de 2025). *Standards for Efficiency of Electric Motors*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/224194916_Standards_for_Efficiency_of_Electric_Motors
- Andrade, J., & Escobar, G. (2018). *Análisis en flujo permanente de los factores que inciden en la disminución de la capacidad hidráulica de la línea de conducción del sistema La Mica-Quito Sur*. Obtenido de <https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/36a070ad-ef9c-4cb8-a722-34985a853213/content>
- Andrade, R., & Pinargote, V. (08 de 2023). *A sustainable and efficient alternative for water pumping in electrically isolated rural areas of Ecuador*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/372852298_A_sustainable_and_efficient_alternative_for_water_pumping_in_electrically_isolated_rural_areas_of_Ecuador
- Arancibia, E., & Cáceres, D. (08 de 2022). *Comparación del ritmo de crecimiento del *Litopenaeus vannamei* y las fluctuaciones de los parámetros físicos, químicos y biológicos, de los estanques 1 y 2 de la granja camaronera Playa Hermosa, en el periodo comprendido de Abril a Junio del 2017*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/363126709_Comparacion_del_ritmo_de_crecimiento_del_Litopenaeus_vannamei_y_las_fluctuaciones_de_los_parametros_fisicos_quimicos_y_biologicos_de_los_estanques_1_y_2_de_la_granja_cameronera_Playa_Hermosa_en_el_per
- Arias, L., & Olaya, F. (13 de 05 de 2021). *Caracterización y redimensionamiento de sistema de bombeo de agua para cultivos acuícolas en finca el Rubí en Aipe-Huila*. Obtenido de Dialnet: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8159799.pdf>
- Atalah, S., & Khaleefa, A. (07 de 2020). *Study of Pressure Losses in Piping System*. Obtenido

- de ResearchGate:
https://www.researchgate.net/publication/334164390_Study_of_Pressure_Losses_in_Piping_System
- Azad, F., & Rahman, A. (10 de 2025). *Towards efficient energy management systems for electric vehicles: advances in control techniques and applications*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174525004581>
- B, S. (18 de 09 de 2025). *Altura manométrica: que es, como se calcula y porque es clave al elegir una bomba de agua*. Obtenido de Winstone: <https://winstonepumps.com/que-es-altura-manometrica/?srsltid=AfmBOorxhdLMNWjW7zMYzLvndM9QCsWf4oU85gTSO-bG9lU8LdRBLUmz>
- Barba, K. (08 de 2020). *Diseño de una placa base para una bomba centrífuga tipo DVS, J-14X25*. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/11360/1/CD-6443.pdf>
- Borja, E., & Guara, M. (24 de 10 de 2025). *Ecuadorian Littoral Musaceae Producers' Typification Based on Their Production Systems, Agronomic Management, Biosecurity Measures, and Risk Level Against Foc TR4*. Obtenido de MDPI: <https://www.mdpi.com/2077-0472/15/21/2208>
- Brown, G. (10 de 2002). *The History of the Darcy-Weisbach Equation for Pipe Flow Resistance*. Obtenido de ResearchGate:
https://www.researchgate.net/publication/242138088_The_History_of_the_Darcy-Weisbach_Equation_for_Pipe_Flow_Resistance
- Bujas, T., & Korican, M. (11 de 2022). *Review of Energy Consumption by the Fish Farming and Processing Industry in Croatia and the Potential for Zero-Emissions Aquaculture*. Obtenido de ResearchGate:
https://www.researchgate.net/publication/365048609_Review_of_energy_consumption_by_the_fish_farming_and_processing_industry_in_Croatia_and_the_potential_for_zero-emissions_aquaculture
- Campos, E., & Jiménez, O. (30 de 08 de 2025). *Energía solar y agricultura: Revolucionando el bombeo de agua en el campo*. Obtenido de ECORFAN:
https://www.ecorfan.org/ecuador/journal/vol12num22/ECORFAN_Journal-Ecuador_V12_N22_2.pdf
- Castro, M., & Díaz, M. (13 de 09 de 2022). *Evaluación de productividad en estanques para cultivo de alimento vivo*. Obtenido de <https://inventio.uaem.mx/index.php/inventio/article/view/53/866>
- Castro, P., & Vidoza, J. (11 de 2020). *Analysis and projection of energy consumption in Ecuador: Energy efficiency policies in the transportation sector*. Obtenido de ScienceDirect:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030142151930535X>
- Cedeño, J. (2020). *Modelo bioeconómico para la determinación óptima de cosecha para la industria acuícola camaronera*. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/a778a36d-16dd-41ac-b1f7-a84666fe8a5d/D->

- Chan, J., & Pech, J. (12 de 2025). *Electromechanical efficiency of a deep-well pumping system with a submersible motor; analysis of hydraulic and electrical variables*. Obtenido de ResearchGate:
https://www.researchgate.net/publication/399645160_Electromechanical_efficiency_of_a_deep-well_pumping_system_with_a_submersible_motor_analysis_of_hydraulic_and_electrical_variables
- Colón, P., & Solorzano, J. (01 de 10 de 2023). *Characterization of water quality during freshwater culture of shrimp Litopenaeus vannamei in southern Ecuador*. Obtenido de Scielo: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2311-25812023000200074&script=sci_arttext&tlng=en
- Cortés, A., & Casillas, R. (07 de 2021). *Eco-efficiency assessment of shrimp aquaculture production in Mexico*. Obtenido de ResearchGate:
https://www.researchgate.net/publication/353030849_Eco-efficiency_assessment_of_shrimp_aquaculture_production_in_Mexico
- Costafreda, J., & Laborde, R. (28 de 06 de 2020). *Influencia del conocimiento sobre el consumo eléctrico asociado al bombeo de agua en la educación energética de los estudios de la universidad de Holguín*. Obtenido de Magazine de las Ciencias:
<https://revistas.utb.edu.ec/index.php/magazine/article/view/582/386>
- Davis, A., & Ullman, C. (23 de 04 de 2018). *Sistemas automatizados de alimentación en la producción en estanques de camarón blanco del Pacífico*. Obtenido de <https://www.globalseafood.org/advocate/sistemas-automatizados-de-alimentacion-en-la-produccion-en-estanques-de-camaron-blanco-del-pacifico/>
- De La Llave, Á. (07 de 2021). *Proyecto de granja camaronera destinada a la obtención de 30 toneladas de langostino blanco "Litopenaeus vannamei" en la comarca de La Jara (Toledo) con modelo de economía circular*. Obtenido de https://oa.upm.es/72168/1/TFG_ALVARO_DE_LA_LLAVE_PROPIN.pdf
- Défaz, G., & Burbano, R. (2025). *Políticas públicas de eficiencia energética en Ecuador y su contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible 13 "Acción por el Clima" y 7 "Energía Asequible y no contaminante" de la Agenda 2030 de la ONU*. Obtenido de <https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/10471/1/T4555-MCCNA-Defaz-Politicas.pdf>
- Deng, C., & Bailey, R. (05 de 2022). *Assessing the Impact of Artificial Recharge Ponds on Hydrological Fluxes in an Irrigated Stream–Aquifer System*. Obtenido de ResearchGate:
https://www.researchgate.net/publication/360742913_Assessing_the_Impact_of_Artificial_Recharge_Ponds_on_Hydrological_Fluxes_in_an_Irrigated_Stream-Aquifer_System
- Duran, M., & Ascanio, J. (11 de 2021). *Evaluación de la pérdida de energía en un fluido en tuberías de diferente material, usando la ecuación de Darcy-Weisbach, mediante la variación de temperatura y caudal*. Obtenido de ResearchGate:

- https://www.researchgate.net/publication/356616585_Evaluacion_de_la_perdida_de_energia_en_un_fluido_en_tuberias_de_diferente_material_usando_la_ecuacion_de_Darcy-Weisbach_mediante_la_variacion_de_temperatura_y_caudal
- Electrical. (16 de 02 de 2024). *Electrical regulations and standards*. Obtenido de https://www.electrical-installation.org/enwiki/Electrical_regulations_and_standards
- Engle, C., & Kumar, G. (07 de 2021). *Resource-use efficiency in US aquaculture: farm-level comparisons across fish species and production systems*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/351628103_Resource-use_efficiency_in_US_aquaculture_farm-level_comparisons_across_fish_species_and_production_systems
- Espinós, F. (2020). *La agricultura como activo económico y social*. Obtenido de Dialnet: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7663547.pdf>
- Ferreira, D., & Marino, F. (09 de 03 de 2022). *A Performance Evaluation of Three-Phase Induction Electric Motors between 1945 and 2020*. Obtenido de MDPI: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/6/2002>
- Ghaemi, S., & Gholmohamadi, H. (31 de 05 de 2025). *Optimizing Power Consumption in Aquaculture Cooling Systems: A Bayesian Optimization and XGBoost Approach Under Limited Data*. Obtenido de MDPI: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/11/6273>
- Goda, A., & Aboseif, A. (01 de 2024). *Optimizing nutrient utilization, hydraulic loading rate, and feed conversion ratios through freshwater IMTA-aquaponic and hydroponic systems as an environmentally sustainable aquaculture concept*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/381774721_Optimizing_nutrient_utilization_hydraulic_loading_rate_and_feed_conversion_ratios_through_freshwater_IMTA-aquaponic_and_hydroponic_systems_as_an_environmentally_sustainable_aquaculture_concept
- Gonzabay, Á., & Vite, H. (08 de 09 de 2021). *Análisis de la producción de camarón en el Ecuador para su exportación a la Unión Europea en el período 2015-2020*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8094522.pdf>
- Gopal, C., & Mohanraj, M. (09 de 2020). *Renewable energy source water pumping systems—A literature review*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/257548550_Renewable_energy_source_water_pumping_systems-A_literature_review
- Hashemy, S., & Hasani, Y. (03 de 2020). *Modern Operation of Main Irrigation Canals Suffering from Water Scarcity Based on an Economic Perspective*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/298800991_Modern_Operation_of_Main_Irrigation_Canals_Suffering_from_Water_Scarcity_Based_on_an_Economic_Perspective
- Hayre, R. (08 de 2025). *Fuel cells for electrochemical energy conversion*. Obtenido de ResearchGate:

- https://www.researchgate.net/publication/318669013_Fuel_cells_for_electrochemical_energy_conversion
- Hossain, S., & Rofiquel, M. (11 de 2023). *An energy-efficient pumping system for sustainable cities and society: Optimization, mathematical modeling, and, impact assessment*. Obtenido de ScienceDirect:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484723011071>
- Ijaz, A., & Kalam, A. (02 de 02 de 2025). *Energy transition towards electric vehicle technology: Recent advancements*. Obtenido de ScienceDirect:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484725001118>
- INSELEC. (2025). *Industria de Sistemas Eléctricos*. Obtenido de
<https://inselec.com.ec/categoria-producto/industria/gabinetes-y-tableros/tableros/>
- JS TECHNIK. (2025). *Electric motor- IP23 315L-250 kW-2pol-B3*. Obtenido de
<https://www.js-technik.co.uk/electric-motor-ip23-315l-250-kw-2pol-b3/4B20290227A172>
- Kapsiz, M. (10 de 2021). *The Efficiency of Mobile Hydraulic System with Diesel Engine and Axial Piston Pump Analysis*. Obtenido de ResearchGate:
https://www.researchgate.net/publication/355682888_The_Efficiency_of_Mobile_Hydraulic_System_with_Diesel_Engine_and_Axial_Piston_Pump_Analysis
- Kostyuk, A., & Sokolov, S. (08 de 2020). *Problems of energy efficiency of pumps and pumping systems*. Obtenido de ResearchGate:
https://www.researchgate.net/publication/319382185_Problems_of_energy_efficiency_of_pumps_and_pumping_systems
- Lamarti, A., & Abdelilah, H. (09 de 2025). *Experimental investigation of the impact of misalignment defects on the vibration behavior of drive systems using various coupling types (elastic and rigid) in rotating machinery and power generation equipment*. Obtenido de ResearchGate:
https://www.researchgate.net/publication/395400552_Experimental_investigation_of_the_impact_of_misalignment_defects_on_the_vibration_behavior_of_drive_systems_using_various_coupling_types_elastic_and_rigid_in_rotating_machinery_and_power_generation_eq
- López, M. (2025). *Análisis de la incidencia del petróleo y sus derivados dentro del mercado energético ecuatoriano y su proyección al 2030*. Obtenido de
<https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/a0c155ee-0d9c-4159-9be4-9d36be1edb91/content>
- Mahmud, R., & Abolhassani, M. (12 de 2025). *Ensuring electromagnetic compatibility in grid-connected power converters: Challenges, standards, and compliance strategies*. Obtenido de ScienceDirect:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235248472500589X>
- Maldona, G., & Molina, V. (01 de 03 de 2024). *Efectos de las regulaciones medioambientales en la eco-Innovación y el rendimiento sustentable en la industria automotriz*. Obtenido de Revista de Ciencias de la Vida:
<https://lagranja.ups.edu.ec/granja/article/view/7416/8330>

- Maylakala, M., & Vandi, D. (01 de 2020). *Impact of Design Parameters on the Performance of Centrifugal Pumps*. Obtenido de ResearchGate:
https://www.researchgate.net/publication/335188523_Impact_of_Design_Parameters_on_the_Performance_of_Centrifugal_Pumps
- Medel, F., & Piringer, G. (20 de 12 de 2022). *Modelling soil emissions and precision agriculture in fertilization life cycle assessment - A case study of wheat production in Austria*. Obtenido de ScienceDirect:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622044146>
- Mohammadi, S., & Berg, C. (20 de 09 de 2025). *Low-emission offshore oil and gas production: A review of achievements and challenges*. Obtenido de ScienceDirect:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652625018542>
- Nair, C., & Junge, R. (30 de 12 de 2025). *Marine aquaponics for arid and coastal resilience: Closing loops in saline food systems*. Obtenido de ScienceDirect:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352513425005095>
- Nakic, D., & Djurin, B. (28 de 05 de 2022). *A Novel Procedure for Minimizing the Volume of Water Tanks in Water Supply Systems*. Obtenido de MDPI:
<https://www.mdpi.com/2073-4441/14/11/1731>
- Naval, N., & Yusta, J. (20 de 09 de 2021). *Optimal short-term water-energy dispatch for pumping stations with grid-connected photovoltaic self-generation*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621025993>
- Novak, T., & Yamada, H. (09 de 2024). *Hydraulic System Design: Principles of hydraulic system design for HDD*. Obtenido de ResearchGate:
https://www.researchgate.net/publication/384398808_Hydraulic_System_Design_Principles_of_hydraulic_system_design_for_HDD
- Oscullo, J., & Carvajal, H. (17 de 07 de 2024). *Examining the Evolution of Energy Storing in the Ecuadorian Electricity System: A Case Study (2006–2023)*. Obtenido de MDPI:
<https://www.mdpi.com/1996-1073/17/14/3500>
- Oshurbekov, S., & Kazakbaev, V. (09 de 12 de 2020). *Energy Consumption Comparison of a Single Variable-Speed Pump and a System of Two Pumps: Variable-Speed and Fixed-Speed*. Obtenido de MDPI: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/24/8820>
- Poirier, K., & Lofti, M. (15 de 11 de 2023). *A comprehensive review of pre- and post-treatment approaches to achieve sustainable desalination for different water streams*. Obtenido de ScienceDirect:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916423005763>
- Preeti, M. (06 de 2024). *Intensive Farming Practice and Innovation Technologies*. Obtenido de ResearchGate:
https://www.researchgate.net/publication/381663026_Intensive_Farming_Practice_and_Innovation_Technologies
- Rodríguez, L. (05 de 06 de 2024). *Assessing the Competitive Advantage of Ecuador's Shrimp Industry in the Global Market Using the Balassa Index for 2018–2022*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/10120169.pdf>

- Salazar, D., & Silva, R. (13 de 05 de 2021). *Recambio de agua, su efecto sobre características físicas-químicas y crecimiento en juveniles de tilapia roja*. Obtenido de EspamCiencia: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8278223.pdf>
- Sandoval, M. (04 de 2023). *Eficiencia energética: motores de combustión interna vs. motores eléctricos*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/387215090_Eficiencia_energetica_motores_de_combustion_interna_vs_motores_electricos_Energy_efficiency_internal_combustion_engines_vs_electric_motors
- Saniya, M., & Arkkakadavil, S. (06 de 2025). *Energy efficiency and ISO 50001:2018 implementation in seafood processing industries: A comprehensive analysis and strategic framework*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772783125000056>
- Scroggins, R., & Fry, J. (20 de 11 de 2022). *Renewable energy in fisheries and aquaculture: Case studies from the United States*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622037258>
- Sinaga, N. (08 de 2020). *Energy Efficiency in Pump System*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/338357800_Energy_Efficiency_in_Pump_System
- Tacon, A., & Cody, J. (05 de 08 de 2025). *Effect of culture system on the nutrition and growth performance of Pacific white shrimp Litopenaeus vannamei (Boone) fed different diets*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/227954932_Effect_of_culture_system_on_the_nutrition_and_growth_performance_of_Pacific_white_shrimp_Litopenaeus_vannamei_Boone_fed_different_diets
- Terreros, F. (02 de 2025). *Eficiencia productiva en la industria camaronera del Ecuador: influencia de factores tecnológicos y ambientales en su competitividad*. Obtenido de Ciencia Latina Revista: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9990470.pdf>
- Trianni, A., & Cagno, E. (10 de 2020). *Energy efficiency measures in electric motors systems: A novel classification highlighting specific implications in their adoption*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/336183482_Energy_efficiency_measures_in_electric_motors_systems_A_novel_classification_highlighting_specific_implications_in_their_adoption
- Velásquez, P., & Solorzano, J. (01 de 10 de 2023). *Characterization of water quality during freshwater culture of shrimp Litopenaeus vannamei insouthern Ecuador*. Obtenido de <https://portal.amelica.org/ameli/journal/198/1984644004/html/>
- Wang, X., & Liang, X. (06 de 2015). *Comparison of electrical and mechanical water pump performance in internal combustion engine*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/279174861_Comparison_of_electrical_and_mechanical_water_pump_performance_in_internal_combustion_engine
- Yin, Z., & Shi, L. (01 de 01 de 2023). *Pump Feature Construction and Electrical Energy Consumption Prediction Based on Feature Engineering and LightGBM Algorithm*.

Obtenido de MDPI: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/1/789>

Yusoff, F., & Umi, W. (05 de 2024). *Water quality management in aquaculture*. Obtenido de ResearchGate:
https://www.researchgate.net/publication/380643763_Water_quality_management_in_aquaculture

Zhang, T., & Lu, L. (11 de 11 de 2025). *Energy Conversion and Management Strategies for Electro-Hydraulic Hybrid Systems: A Review*. Obtenido de MDPI:
<https://www.mdpi.com/2071-1050/17/22/10074>



**Presidencia
de la República
del Ecuador**



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



SENESCYT

Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Morante Murillo Gregory Augusto**, con C.C: # **094307260-3** autor del trabajo de titulación: **Diseño de un sistema de bombeo eléctrico en una finca camaronera para mejorar la eficiencia energética del sistema productivo acuícola, ubicado en Sabana Grande – Vía a la Costa.** 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, 04 de marzo de 2026

EL AUTOR

f. _____
Morante Murillo Gregory Augusto
C.C: 0943072603



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TEMA Y SUBTEMA:	Diseño de un sistema de bombeo eléctrico en una finca camaronera para mejorar la eficiencia energética del sistema productivo acuícola, ubicado en Sabana Grande – Vía a la Costa.		
AUTOR(ES)	Morante Murillo Gregory Augusto		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Ing. Sánchez Bonilla Ronnie Alexander, Ms.C.		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
CARRERA:	Ingeniería en Electricidad		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero Eléctrico		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	04 de marzo de 2026	No. DE PÁGINAS:	92
ÁREAS TEMÁTICAS:	Acuicultura y producción camaronera, hidráulica y diseño de sistemas de bombeo, sostenibilidad e impacto ambiental.		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Bombeo eléctrico, eficiencia energética, acuicultura, sustentabilidad, análisis económico.		
RESUMEN/ABSTRACT:	La presente investigación desarrolla el diseño de un sistema de bombeo eléctrico en una finca camaronera ubicada en Sabana Grande – Vía a la Costa, con el propósito de mejorar la eficiencia energética del sistema productivo acuícola. El estudio parte del análisis técnico y energético del sistema de bombeo mecánico existente, el cual opera mediante motores diésel de alta potencia, generando elevados costos operativos y emisiones significativas de dióxido de carbono. Tras una revisión detallada de los datos y todos los cálculos hidráulicos y eléctricos, diseñamos un sistema alternativo alimentado por motores trifásicos de 250 kW con variadores de frecuencia. Esta configuración cumple con creces el requisito de renovar el 75 % del volumen de agua diariamente. También calculamos los costos y el ahorro, estimando un ahorro anual de aproximadamente \$313,200, lo que significa que la inversión se amortizaría en menos de dos años en un escenario de inversión moderado. Asimismo, el análisis ambiental evidenció la eliminación de aproximadamente 2.400 toneladas de CO₂ anuales generadas por el sistema diésel. Los resultados demuestran que la migración tecnológica es técnicamente viable, económicamente rentable y ambientalmente sostenible, contribuyendo a la modernización del sistema productivo acuícola y a la reducción de su huella energética.		
ADJUNTO PDF:	☒ SI	☐ NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593-978752596	E-mail: gregory.morante@cu.ucsg.edu.ec	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Ing. Ubilla González, Ricardo Xavier, MS.c Teléfono: +593-999528515 E-mail: ricardo.ubilla@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			