



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“Diseño de un Sistema Eléctrico de Potencia Híbrido para el Incremento de la Sostenibilidad, Confiabilidad y Eficiencia en una Granja Camaronera en la Zona Litoral”

TRABAJO DE TITULACION

Previo a la obtención del Título de:

Magister en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia

Presentado por:

DIETMAR ALOIS SANCHEZ MONTALBAN

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2024

DEDICATORIA

A mis padres

Con mucho amor y cariño

Le dedico todo mi esfuerzo

Y trabajo puesto para

la realización de esta tesis.

AGRADECIMIENTOS

Gracias Dios por darme una maravillosa familia y sabiduría para culminar mi maestría, dedico esta tesis a mis padres los cuales ha sido un pilar fundamental en mi vida, los cuales me han inculcados valores que me han ayudado a salir adelante en mi vida y mi carrera profesional; A mi madre Diana María Montalban Miranda por siempre apoyarme en todo lo que me he propuesto y estar a mi lado incondicionalmente; A mi padre Dietmar Wladimir Sánchez Sánchez por ser mi modelo a seguir como persona y como profesional, gracias a los dos por estar siempre conmigo en los momentos buenos y malos, por todo lo que me han brindado, vivo eternamente agradecido.

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

Fernando Arturo Vaca Urbano

PROFESOR REVISOR

Ángel Andrés Recalde Lino

TUTOR DEL TRABAJO DE TITULACION

DECLARACION EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponden conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; y doy mi consentimiento para que la ESPOI realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Dietmar Alois Sánchez Montalban

INDICE GENERAL

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTOS.....	II
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN.....	III
DECLARACION EXPRESA	IV
INDICE GENERAL.....	V
INDICE TABLAS	VII
INDICE DE FIGURAS	VIII
INDICE DE ECUACIONES	IX
CAPITULO 1	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 FORMULACIÓN DE PROBLEMA.....	2
1.3 OBJETIVO GENERAL	4
1.4 OBJETIVOS ESPECIFICOS	4
1.5 REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	4
1.6 METODOLOGIA	8
1.7 PRODUCCION DE CAMARON EN EL ECUADOR	10
1.8 COMPONENTES PRINCIPALES DE UNA CAMARONERA	13
1.9 INFRAESTRUCTURA DEL TENDIDO ELECTRICO.....	13
1.10 TIPOS DE CARGA	15
1.10.1 AIREACION ELECTRICA	15
1.10.2 BOMBEO DE AGUA.....	15
1.10.3 SERVICIOS GENERALES	15
1.11 TARIFAS kWh EN UNA FINCA CAMARONERA	16
1.12 COMPORTAMIENTO DE CARGA EN UNA FINCA CAMARONERA.....	17
1.12.1 OPERACIÓN DIURNA	17
1.12.2 OPERACIÓN NOCTURNA	17
1.12.3 CIRCUNSTANCIAS DE OPERACIÓN ESPECIALES.....	17
1.12.4 PESCA	17
1.12.5 RALEO.....	18
1.13 INNOVACION FINCAS CAMARONERAS	18
1.14 SOLUCIONES CON ENERGIAS RENOVABLES.....	19
CAPITULO 2	21
2.1 Dimensionamiento en sistemas remotos atendidos por redes radiales	21
2.2 Problema de confiabilidad.....	21

2.3	Incremento de eficiencia energética	22
2.4	Técnicas basadas en demanda máxima.....	23
2.5	Propuesta para el diseño de un sistema híbrido de una camaronera	24
2.6	Análisis de costo	25
2.7	Análisis de demanda segmentada por demanda horaria	25
2.8	Elementos disponibles en el mercado nacional	28
2.8.1	Diseño y dimensionamiento por potencia instalada.....	29
2.8.2	Propuesta de diseño por optimización.....	30
2.9	Modelo matemático	33
2.9.1	Nomenclatura.....	33
2.9.2	Relaciones de parámetros.....	42
2.9.3	Formulación inicial de problema MILP	44
CAPITULO 3		47
3.1	Configuraciones para un sistema híbrido energético.....	47
3.2	Sistema aislado alimentado por grupo electrógeno.....	48
3.2.1	Balance de Potencia	48
3.2.2	Consumo de combustible en grupo electrógeno	49
3.2.3	Relación potencia y combustible.....	49
3.2.4	Límite de potencia en grupo electrógeno	49
3.3	Sistema Alimentado por Red Eléctrica.....	50
3.3.1	Balance de potencia	50
3.3.2	Límite de cargabilidad de la red	50
3.3.3	Límites de potencia	50
3.4	Sistema híbrido energético completo.....	51
3.4.1	Balance de potencia 1	53
3.4.2	Balance de potencia 2	53
3.4.3	Área disponible para paneles PV.....	53
3.4.4	Selección número de paneles.....	54
3.4.5	Límite de potencia por panel.....	54
3.4.6	Restricciones auxiliares para linealización	54
CAPITULO 4		56
4.1	Resultados.....	56
4.2	Sistema alimentado por grupo electrógeno	56
4.3	Sistema alimentado red eléctrica	58
4.4	Sistema híbrido energético completo.....	59
4.4.1	Escenario 1 con red eléctrica.....	61

4.4.2	Escenario 2 modo autónomo (isla) con subsidio.....	63
CAPITULO 5		66
5.1	CONCLUSIONES.....	66
5.2	RECOMENDACIONES.....	69
REFERENCIAS.....		71

INDICE TABLAS

Tabla 1	Tarifa de bombeo de agua CNEL en Ecuador	16
Tabla 2	Nomenclatura de modelo matemático	33
Tabla 3	Parámetros de financiamiento.....	56
Tabla 4	Parámetros para grupo electrógeno	56
Tabla 5	Resultados anuales para grupo electrógeno	57
Tabla 6	Parámetros para red eléctrica.....	58
Tabla 7	Resultados anuales para grupo electrógeno.....	58
Tabla 8	Parámetros de panel solar PV	59
Tabla 9	Parámetros de inversor, transformador, panel PV, y batería	60
Tabla 10	Parámetros adicionales de baterías	60
Tabla 11	Escenario 1 sistema híbrido con red eléctrica.....	61
Tabla 12	Balance de potencia escenario 1 sistema híbrido	61
Tabla 13	Flujo económico de escenario 1 sistema híbrido	62
Tabla 14	Escenario 2 sistema híbrido autónomo con subsidio.....	63
Tabla 15	Resultados escenario 2 sistema híbrido autónomo con subsidio	64
Tabla 16	Flujo económico de escenario 2 sistema híbrido aislado con subsidio.....	64

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.....	11
Exportación de Camarón Ecuatoriano 2012-2023	11
Figura 2.....	11
Exportación de Camarón Ecuatoriano	11
Figura 3.....	12
Aireadores accionados por motores a combustión	12
Figura 4.....	12
Aireadores accionados por motores eléctricos.....	12
Figura 5.....	14
Línea de media tensión	14
Figura 6.....	14
Línea de media tensión en muro de camaronera	14
Figura 7.....	23
Estructura Panel Solar Flotante.....	23
Figura 8.....	24
Estructura Panel Solar Flotante (vista lateral).....	24
Figura 9.....	24
Estructura Panel Solar Flotante (instalación)	24
Figura 10.....	26
Curva de demanda de aireación eléctrica.....	26
Figura11.....	26
Aireación eléctrica en funcionamiento	26
Figura 12.....	27
Curva de demanda de bombeo de agua	27
Figura 13.....	27
Bombeo de agua en funcionamiento.....	27
Figura 14.....	28
Curva de demanda de servicios generales.....	28
Figura 15.....	28
Campamento en finca camaronera.....	28

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 VALOR TOTAL ANUAL.....	34
Ecuación 2 COSTO ANUAL PARA CADA COMPONENTE	35
Ecuación 3 COSTO TOAL DE INVERSION.....	36
Ecuación 4 COSTO INVERSION	36
Ecuación 5 COSTO PANELES SOLARES.....	37
Ecuación 6 COSTO BATERIAS.....	37
Ecuación 7 COSTO INVERSORES.....	38
Ecuación 8 COSTO TRANSFORMADORES	38
Ecuación 9 COSTO DE OPERACION FIJO	39
Ecuación 10 COSTO DE OPERACION VARIABLE.....	39
Ecuación 11 COSTO COMBUSTIBLE(DIESEL).....	40
Ecuación 12 COSTO EMISIONES	41
Ecuación 13 COSTO DEL KILOVATIO/HORA.....	41
Ecuación 14 NUMERO DE INVERSORES POR PANEL FOTOVOLTAICO.....	42
Ecuación 15 CAPACIDAD TOTAL EN PANELES FOTOVOLTAICOS(WATTS).....	42
Ecuación 16 CANTIDAD DE TRANSFORMADORES POR INVERSOR.....	43
Ecuación 17 RELACION ENTRE COMBUSTIBLE(GL) Y EMISIONES DE CO2(KG).....	43
Ecuación 18 RELACION ENTRE BTU Y COMBUSTIBLE (GL DE DIESEL)	44
Ecuación 19 MINIMIZACION CANTIDAD DE INVERSORES, TRANSFORMADORES, PANELES SOLARES Y BATERÍAS.....	45
Ecuación 20 DEMANDA GRUPO ELECTROGENO	48
Ecuación 21 BALANCE DE POTENCIA GE	48
Ecuación 22 CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN GRUPO ELECTRÓGENO.....	49
Ecuación 23 Relación potencia y combustible	49
Ecuación 24 LÍMITE DE POTENCIA EN GRUPO ELECTRÓGENO	49
Ecuación 25 OPTIMIZACION GE.....	49
Ecuación 26 DEMANDA RED.....	50
Ecuación 27 BALANCE DE POTENCIA RED	50
Ecuación 28 LIMITE DE CARGABILIDAD RED	50
Ecuación 29 CAPACIDAD INSTALADA SUBESTACION	51
Ecuación 30 CAPACIDAD INSTALADA RED.....	51
Ecuación 31 OPTIMIZACION RED	51
Ecuación 32 DEMANDA SISTEMA HIBRIDO	53
Ecuación 33 BALANCE POTENCIA 1	53

Ecuación 34 BALANCE POTENCIA 2	53
Ecuación 35 AREA DISPONIBLE PARA PANELES PV	54
Ecuación 36 SELECCION NUMERO DE PANALES	54
Ecuación 37 LIMITE DE POTENCIA POR PANEL	54
Ecuación 38 RESTRICCION 1	55
Ecuación 39 RESTRICCION 2	55
Ecuación 40 RESTRICCION 3	55
Ecuación 41 RESTRICCION 4	55
Ecuación 42 OPTIMIZACION SISTEMA HIBRIDO	55

CAPITULO 1

1.1 INTRODUCCIÓN

La transformación de un sistema de potencia tradicional a un sistema híbrido con energías no convencionales no es una idea nueva. Un sistema de potencia tradicional es suplido desde los grandes centros de generación a través de los puntos de entrega a nivel de transmisión hasta el consumo final en las cargas de los usuarios. El sistema de potencia híbrido en cambio permite la instalación de generación distribuida incluso en las instalaciones del usuario final, logrando un aumento de confiabilidad y eficiencia energética al reducir las pérdidas y tener energía alternativa en caso de cortes inesperados de energía eléctrica desde el sistema de transmisión o distribución [1].

La carga total instalada y el perfil de consumo de potencia son los parámetros principales en la operación y expansión del sistema de potencia tradicional asociado a un sistema de distribución eléctrico. Las redes radiales son las más analizadas dado su uso extendido en sistemas de potencia eléctricos reales. Similarmente, PV y los almacenamientos de energía han sido tecnologías que han sido exploradas extensamente en el contexto de la transformación de sistemas de potencia para el mejoramiento de la disponibilidad de energía o incremento de la confiabilidad del servicio eléctrico y mejora de la eficiencia energética al disminuir la dependencia en combustibles fósiles. La implementación de estas soluciones ha sido analizada desde el punto de vista de operación de la red eléctrica, es decir, el funcionamiento del sistema eléctrico.

Sin embargo, en el ambiente industrial camaronero el perfil de consumo energético es diferente y los ciclos operativos no coinciden con lo considerado para redes de distribución en el sistema de potencia. Es necesario realizar un estudio específico para cada caso de forma que el dimensionamiento de un sistema híbrido con generación distribuida pueda considerar todas las restricciones operativas, el comportamiento de la carga y la disponibilidad de tecnologías energéticas. Mediante el análisis del consumo, la obtención de un equivalente de la red eléctrica, y la aplicación de técnicas de optimización con

restricciones reales operativas del sistema específico del usuario, puede llevarse a cabo una búsqueda lógica y extensiva que permita encontrar el punto óptimo de dimensionamiento y operación energética operativa en el cual la inversión se hace rentable y la producción de camarón logre un nivel alto de sostenibilidad al usar tecnologías energéticas que no dependan del uso de combustibles fósiles.

En este trabajo se diseña y dimensiona un sistema híbrido con diferentes tecnologías energéticas para fincas camaroneras en la provincia del Guayas. El sistema híbrido de alimentación eléctrica puede contener un mixtura de potencia instalada de fotovoltaica (PV), generación a combustión interna, y almacenamiento de energía. En este contexto, se propone que la generación PV trabaje durante el día debido a que la carga de la finca camaronera es menor que en la noche, mientras que en la noche puede utilizarse energía almacenada en las baterías. Este sistema no pretende ser autónomo, más bien, permite flexibilizar la compra de energía de la red eléctrica y aumentar la disponibilidad de energía frente a cortes no programados de la red eléctrica. Es posible que se tome en consideración que la tarifa por kWh durante el día es mayor que en la noche como incentivo a la implementación de tales sistemas híbridos, de forma que la alta inversión inicial se justifique a lo largo del tiempo una vez amortizado el proyecto de generación con sus respectivas anualidades. Se espera asimismo que mediante el uso de la tecnología PV se alcance un ahorro de energía durante la jornada diurna dentro de finca camaronera.

1.2 FORMULACIÓN DE PROBLEMA

Ante el crecimiento exponencial del sector camaronero en los últimos años, el sector se ha visto en la necesidad de mejorar y automatizar sus procesos dentro de cada finca camaronera debido a la alta demanda del camarón ecuatoriano en el mundo [2].

Uno de los procesos que va evolucionando a pasos agigantados debido a la alta gama de servicios que se pueden implementar es la oxigenación de las piscinas de camarón mediante aireadores eléctricos [3], ya que el oxígeno es una de las variables más importantes en el desarrollo del animal desde su siembra (proceso

de ubicación de larvas de camarón por metro cuadrado de piscina) hasta su pesca (proceso de captura de camarón adulto listo para el consumo humano) [4].

Actualmente el sector camaronero está migrando de aireadores alimentados directamente por motores de combustión interna a aireadores eléctricos [5] ya que los aireadores eléctricos poseen mejores ventajas en comparación con sus contrapartes tales como:

- Alta eficiencia de transferencia de oxígeno (mg/L).
- No produce emisiones de CO₂ durante la operación del equipo porque no utilizar motores a combustión interna.
- No produce derrames de combustibles en las piscinas de camarón.
- Alta eficiencia energética.
- Menor mantenimiento debido a que poseen sistemas con componentes de mayor confiabilidad y duración.
- Menor riesgo para el personal que realiza la operación de encendido y apagado de los equipos.
- Mejor distribución de oxígeno dentro de las piscinas de camarón.

La inversión inicial para la transición de aireadores de combustión interna a aireadores eléctricos es fuerte, ya que se debe implementar una red de distribución eléctrica [6] la cual recorre los diferentes muros dentro de la finca camaronera. Este sistema puede ser alimentado por medio de una empresa externa proveedora del suministro eléctrico (empresa eléctrica) como también puede ser alimentada mediante grupos electrógenos los cuales proveen de la energía necesaria para el funcionamiento de los equipos dentro de piscinas de camarón ante una contingencia [6]. Ampliando esta idea, la carga total puede ser alimentada por un sistema híbrido complementario al grupo electrógeno que permita aumentar la disponibilidad de energía al mismo tiempo que disminuya el uso de combustibles fósiles y el costo de operación energético de las empresas camaroneras.

1.3 OBJETIVO GENERAL

En este trabajo, el objetivo general es el diseño de un sistema híbrido de potencia eléctrica de distribución dentro de las instalaciones de una camaronera que permita el incremento de la eficiencia y reducción del consumo de energía de la red convencional mediante la inclusión de energía no convencional que se adapte al ciclo operativo de la camaronera.

1.4 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Entre los objetivos específicos del proyecto se pueden detallar los siguientes.

- Estudio de la demanda mediante la recolección de datos de medición troncal y asignación de demanda particularizada mediante métodos de distribución de carga.
- Obtención de modelamiento matemático operativo de la camaronera considerando los equipos de aireación eléctrica y estaciones de bombeo de agua que permita el estudio de consumo de energía.
- Obtención de un modelo energético considerando las variaciones temporales y estacionales que permita verificar el impacto de las posibles combinaciones de energías no convencionales.
- Aplicación de un problema de optimización que incluya en sus restricciones los modelos energéticos obtenidos.
- Encontrar el punto óptimo de dimensionamiento de potencia instalada futuro del sistema de energía híbrido en donde la inversión de una generación PV sea rentable y se obtenga una amortización factible a la naturaleza del negocio de la inversión monetaria en el tiempo.
- Proveer de un proceso de dimensionamiento que ayude en la toma de decisión a los camaroneros del Litoral en invertir en generación PV mostrando todos los beneficios y ventajas operativas que la inversión conllevaría una vez que se amortice la inversión inicial.

1.5 REVISIÓN DE LA LITERATURA

La implementación de generación fotovoltaica (PV) en fincas camaroneras ayudaría a una independencia energética y sostenibilidad ambiental al aprovechar la radiación solar [7]. Más aún, la disponibilidad de energía limpia PV

podría también almacenarse en sistemas de almacenamiento de energía para utilizarse en momentos que no exista radiación solar, por ejemplo, durante las noches.

Se debe tener en consideración que la ubicación de las fincas camaroneras se encuentra alejadas de las redes principales de la empresa distribuidora de energía (empresas eléctricas) [4]. Esto conlleva a la necesidad de requerir la construcción de un segmento de red eléctrica expresa (usualmente una línea de distribución o subtransmisión dependiendo de la capacidad instalada) solamente para abastecer la demanda de la finca camaronera.

Una gran ventaja de la migración a energías renovables tanto en los equipos y sistemas industriales como en la matriz energética de una instalación industrial son los certificados nacionales e internacionales otorgados por organismos de control que certifican el cumplimiento en la reducción de los impactos adversos al ambiente y a las comunidades locales [7].

Como ejemplo tenemos los certificados nombrados a continuación:

- CERTIFICACION ASC
- CERTIFICACION PUNTO VERDE
- SUSTAINABLE SHRIMP PARTNERSHIP SSP
- BEST AQUACULTURE PRACTICE (BAP)
- GLOBAL G.A.P.

A continuación, una breve descripción de cada certificación anteriormente mencionada.

Certificación ASC

La certificación ASC (Aquaculture Stewardship Council) es una certificación internacional que se otorga a las granjas acuícolas que cumplen con estándares rigurosos de sostenibilidad ambiental y responsabilidad social. Creada por el WWF (World Wildlife Fund) y la IDH (Iniciativa para el Comercio Sostenible) para asegurar que la producción acuícola no tenga un impacto negativo significativo en el medio ambiente, las comunidades locales, y que los trabajadores sean tratados de manera justa [8].

CERTIFICACION PUNTO VERDE

El Ministerio del Ambiente otorga la Marca Institucional a toda actividad del desarrollo nacional que maximiza los recursos naturales demostrando un compromiso con la sostenibilidad y la responsabilidad ambiental en sus procesos de producción, demostrando cumplir más allá de la normativa legal para disminuir los efectos negativos en el medio ambiente, especialmente en los ecosistemas sensibles, y con ello mejorar la calidad de vida de nuestros ciudadanos [9].

SUSTAINABLE SHRIMP PARTNERSHIP SSP

El **Sustainable Shrimp Partnership (SSP)** es una iniciativa global que busca elevar los estándares de sostenibilidad y responsabilidad en la producción de camarones. SSP se centra en la producción de camarones de alta calidad, seguros para el consumo y cultivados con un impacto mínimo en el medio ambiente [10].

BEST AQUACULTURE PRACTICE (BAP)

La **certificación Best Aquaculture Practices (BAP)** es un programa global de certificación de sostenibilidad que se aplica a toda la cadena de valor de la acuicultura, incluyendo granjas, plantas de procesamiento, fábricas de alimentos y criaderos de peces y mariscos. La certificación BAP es reconocida internacionalmente y proporciona a los consumidores la confianza de que los productos acuícolas etiquetados con este sello han sido producidos de manera responsable en todas las etapas del proceso. Además, ayuda a las empresas a diferenciarse en el mercado al demostrar su compromiso con la sostenibilidad y la responsabilidad social [11].

GLOBAL G.A.P.

La certificación **GLOBAL G.A.P.** (Good Agricultural Practices, o Buenas Prácticas Agrícolas) es un estándar internacionalmente reconocido para la producción agrícola y acuícola, que asegura que los productos sean cultivados y procesados de manera segura, sostenible y respetuosa con el medio ambiente y los trabajadores [12].

Las certificaciones obtenidas por las fincas camaroneras le garantizan al comprador del producto a que el camarón sembrado en esas fincas es de mayor calidad y se vende a un mejor precio ya que el camarón es más atractivo local e internacionalmente si es producido con técnicas sustentables [13]. En el caso del uso de energía fotovoltaica (PV), desafortunadamente los métodos tradicionales quedan en desventaja porque la mayor carga ocurre durante la noche en las fincas camaroneras, por lo que esta técnica no ha sido explorada de forma suficiente de forma que sea rentable en la industria de producción del camarón [14].

La transformación de un sistema de potencia tradicional (sistema radial alimentado por una acometida de empresa eléctrica en el área de concesión) a un sistema híbrido con energías no convencionales no es una idea nueva en el contexto industrial y académico [15]. La carga total instalada y el perfil de consumo de potencia son los parámetros usualmente más importantes en el análisis de la expansión o transformación de un sistema de distribución típico radial de media tensión o subtransmisión. Las redes radiales han sido extensivamente analizadas incluso con la inclusión de generación distribuida PV con almacenamiento de energía [16].

No obstante, en el ambiente camaronero el perfil de consumo es diferente que en una red radial y los ciclos operativos no coinciden con lo analizado previamente [17], de forma que las consideraciones de expansión o repotenciación no pueden ser aplicadas y se necesita realizar un dimensionamiento específico en cada caso de acuerdo a las necesidades de cada industria. Mediante el análisis del consumo, la obtención de un equivalente de la red eléctrica, y la aplicación de técnicas de optimización [18], entre los principales datos y análisis, puede llevarse a cabo una búsqueda lógica y sistemática que permita encontrar el punto de óptimo de configuración de sistema híbrido de fuentes eléctricas en el cual la inversión se hace rentable y la producción de camarón logre un nivel alto de sostenibilidad [19].

De acuerdo con la experiencia de operación en camaroneras en el sector del litoral ecuatoriano (nivel ecuatorial) se propone que la generación PV funcione durante el día de forma que la carga de la finca camaronera la cual es menor

que en la noche sea suplida por PV y se aproveche el resto de energía en sistemas de almacenamiento. Para aumentar los incentivos en la implementación de tales sistemas, se debe tomar en consideración que la tarifa kWh durante el día es mayor que en la noche. Esto puede hacer que el sistema sea económicamente factible a lo largo del tiempo considerando las anualidades del proyecto de generación híbrido con PV. Con esta solución se estima llegar a un ahorro de energía durante la jornada diurna dentro de la finca camaronera.

Para el diseño de la planta fotovoltaica se puede considerar la ubicación de paneles solares a lo largo de los canales de reservorio de la finca camaronera [20]. Este espacio puede ser aprovechado eficientemente para ubicar los paneles solares y de esta forma no se tenga que proveer de espacio adicional o hacer un uso ineficiente del lote de la finca. Dicho en otras palabras, los paneles flotantes pueden ser de gran utilidad en zonas en donde no se cuente con el espacio en tierra suficiente para la implementación de la generación fotovoltaica [21], maximizando el área destinada para piscinas de camarón.

Para las cargas concentradas como las instalaciones eléctricas generales del campamento se puede considerar colocar los paneles solares sobre los techos de las oficinas [22] y habitaciones del campamento de la finca camaronera [23].

1.6 METODOLOGIA

Para llevar a cabo el diseño y dimensionamiento de un sistema de generación híbrido basado en generación fotovoltaica, el cual abastecerá la demanda instalada de una finca camaronera en la provincia del Guayas en el litoral ecuatoriano, se deben realizar los siguientes pasos,

1. Dimensionar las hectáreas (HA) útiles de la finca camaronera que se va a destinar para la instalación de PV
2. Con la localización obtenida, consecuentemente determinar los valores de radiación solar promedio en la locación de la finca camaronera.
3. Levantamiento de demanda eléctrica (perfil de consumo de potencia eléctrica)

El dimensionamiento del área (hectáreas) de una camaronera incluye una evaluación de disponibilidad de recursos acuíferos, disponibilidad de energía eléctrica, entre otros que no son parte del alcance de este trabajo. Como idea general, se toma en consideración las hectáreas favorables de acuerdo con el desarrollo y recomendaciones del sector incluyendo implantaciones actuales de fincas camaroneras existentes.

Una vez obtenida la localización de la finca, se procede a la adquisición de datos de irradiación solar de la provincia del Guayas. Estos datos pueden ser obtenidos y contrastados desde varias fuentes incluyendo la base meteorológica del NREL/NSRDB TMY [24], Atlas solar del Ecuador [25], INAHMI (Instituto Nacional de Meteorología) [26], Power Data Access Viewer de la NASA [27], entre los más utilizados profesional y académicamente.

Toda vez que la radiación en la localización específica ha sido obtenida, se procede a realizar el estudio de demanda eléctrica. La demanda eléctrica de la camaronera dependerá de las hectáreas promedio (superficie promedio). Los principales sistemas y componentes que afectaran en la demanda de energía eléctrica son,

- a) Sistemas de bombeo de agua,
- b) Sistemas de aireación
- c) Instalaciones eléctricas generales de alimentación de oficinas y equipos auxiliares de control en los campamentos,

Para sistemas industriales existentes, los datos de estos sistemas serán recolectados mediante un equipo de medición en la entrada de la línea que abastece la finca camaronera (acometida o punto de entrega). Por otro lado, para el bombeo eléctrico se tomará lectura de los datos de los arrancadores suaves de las estaciones de bombeo. Esto logra tener una granularidad en los datos necesarias para analizar las necesidades críticas de potencia eléctrica y poder plasmarlas en los modelos matemáticos de operación del sistema eléctrico de finca de camaronera. En los sistemas nuevos, es necesario realizar una proyección de demanda y operación de acuerdo con otros sistemas similares de forma que se cuente con un estimado de demanda.

Una vez obtenida todos los datos de superficie promedio, irradiación solar en la localización específica y demanda eléctrica de acuerdo con la instalación existente (estimación en el caso de construcciones nuevas) se puede proceder con el diseño y dimensionamiento de la generación fotovoltaica la cual será integrada al sistema eléctrico de potencia de la finca camaronera. Este diseño incluirá la búsqueda del lugar de la superficie útil idónea para la implementación de la generación PV. Como se mencionó anteriormente, se tiene como propuesta la implementación de paneles solares flotantes los cuales serían ubicados en el reservorio de la camaronera para ahorrar terreno y maximizar el uso de piscinas.

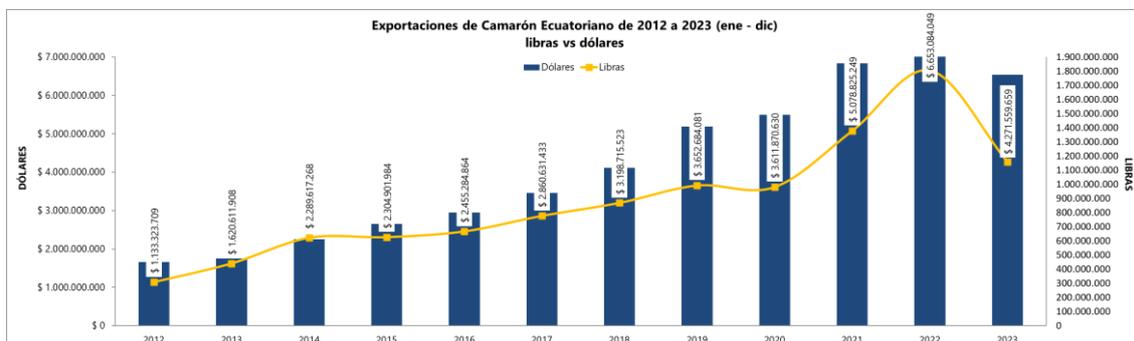
Se tomará en consideración que durante la operación diurna se utilizará generación fotovoltaica mientras que para la operación nocturna se utilizará generadores Diesel o sistemas de almacenamiento con baterías.

Con el modelo matemático y operativo de la red eléctrica, se realiza el análisis de la confiabilidad y eficiencia energética del sistema, realizando una corrida de flujo de potencia para constatar la correcta operación del sistema como caso base. Luego, se diseña y dimensiona el sistema energético híbrido a implementar a futuro. La solución híbrida puede ser comparada luego con el caso base de forma que se verifique el aumento de disponibilidad de energía eléctrica, es decir, el incremento de la confiabilidad, y el incremento de eficiencia energética al depender menos de combustibles fósiles por medio de la generación renovable PV y el almacenamiento de la energía.

1.7 PRODUCCION DE CAMARON EN EL ECUADOR

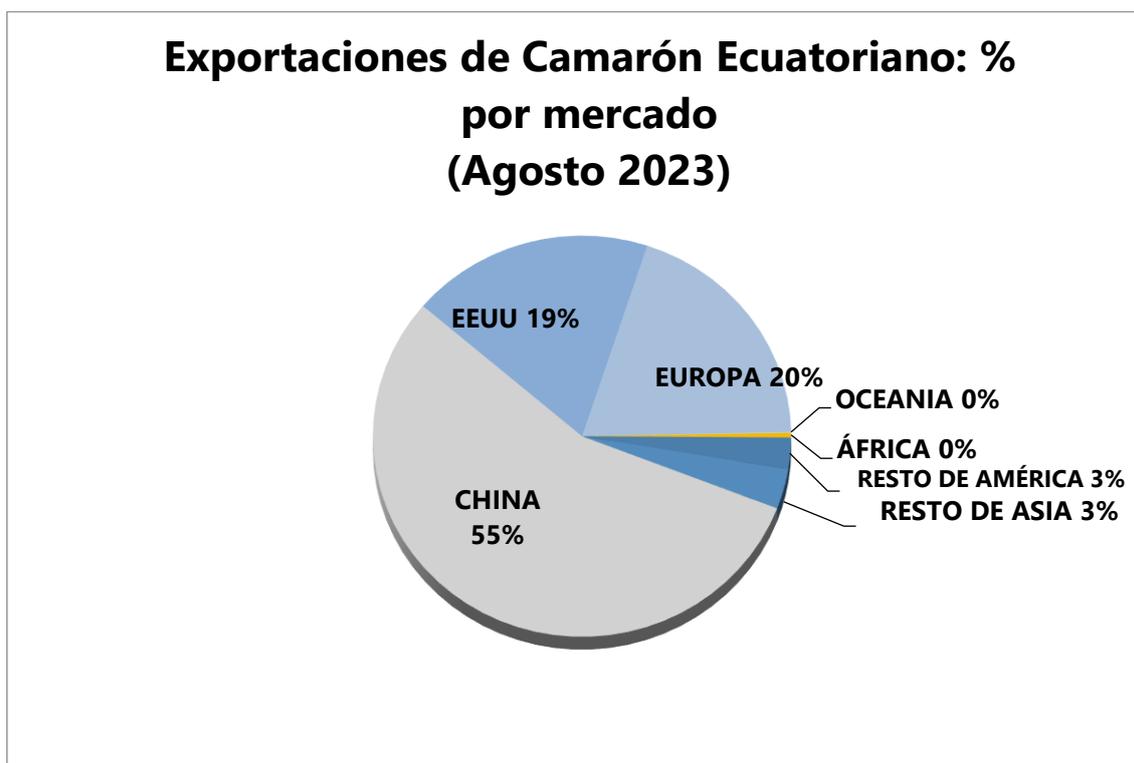
El camarón se ha producido en el Ecuador desde la década de 1960 y es uno de los pilares de la economía ecuatoriana de acuerdo con la Cámara Nacional de Acuicultura Ecuatoriana. Más aún, la producción de camarón en Ecuador se ha incrementado de manera exponencial en los últimos 10 años debido a la alta demanda de este crustáceo a nivel mundial, llevando al Ecuador a convertirse en el exportador número 1 del mundo en la actualidad con una cantidad de 1060 millones de toneladas exportadas en el año 2022 como se aprecia en la Figura 1 [28].

Figura 1 Exportación de Camarón Ecuatoriano 2012-2023



Los principales países a donde se exporta el camarón ecuatoriano son China con un 55%, Europa 20%, y EE. UU. 19% como se puede apreciar en la Figura 2 [28].

Figura 2 Exportación de Camarón Ecuatoriano



El incremento en la demanda de producción de este crustáceo ha llevado a las fincas camaroneras a innovar y migrar hacia nuevas tecnologías para ser más eficientes y amigables con el medio ambiente en los procesos de producción, de

forma que sean más competitivas en un mercado cada vez más creciente. Una de las migraciones más significativas ha sido la migración de tecnologías diésel (combustible fósil) a tecnologías que funcionan con energía eléctrica en los procesos de bombeo de agua y aireadores en las piscinas. En las Figura 3 y Figura 4 se observa un detalle gráfico de aireadores a combustible fósil y eléctricos respectivamente durante su funcionamiento regular en una piscina.

Figura 3 Aireadores accionados por motores a combustión



Figura 4 Aireadores accionados por motores eléctricos



El cambio a tecnología eléctrica ha permitido las siguientes ventajas en la operación de las camaroneras:

- reducir el consumo de diésel,
- evitar derrames de combustible dentro de las piscinas de camarón,
- Mejorar la competitividad al tener mayor controlabilidad del proceso de aireación
- Flexibilidad de operación al poder controlar de forma más detallada las necesidades de aireación de acuerdo con las condiciones actuales de la piscina y el crecimiento del camarón
- Mejora en la calidad del camarón, principalmente en sabor, peso, y salud de estos.

1.8 COMPONENTES PRINCIPALES DE UNA CAMARONERA

Dentro de una finca camaronera existen dos tipos principales de piscinas:

- Pre-cria o pre-engorde
- Piscina de Engorde

La pre-cria o en algunos casos también llamada pre-engorde es donde se recibe el camarón enviado desde laboratorio para su desarrollo y es transferido a las piscinas de engorde una vez hayan llegado a un peso entre 3 y 5 gramos.

Las piscinas de engorde sin embargo es donde el camarón pasa la mayor parte del tiempo hasta alcanzar el peso solicitado por la empacadora. El período de engorde puede llegar a durar alrededor de 90 días en promedio.

1.9 INFRAESTRUCTURA DEL TENDIDO ELECTRICO

Para realizar la implementación de estas nuevas tecnologías tales como la aireación y el bombeo de agua por medio de sistemas eléctricos es necesario realizar un tendido eléctrico de línea de distribución dentro del predio de la finca camaronera. La línea de distribución de media tensión recorrerá los muros principales de la misma hasta llegar por medio de ramales y derivaciones a la ubicación final de cada una de las cargas.

Usualmente para estas aplicaciones el tipo de carga más usado son los motores trifásicos, por lo que el tendido eléctrico es trifásico por lo general. En la Figura

5 y Figura 6 se puede observar en detalle el tendido de línea de distribución trifásica de media tensión dentro de una camaronera en el litoral ecuatoriano.

Figura 5 Línea de media tensión

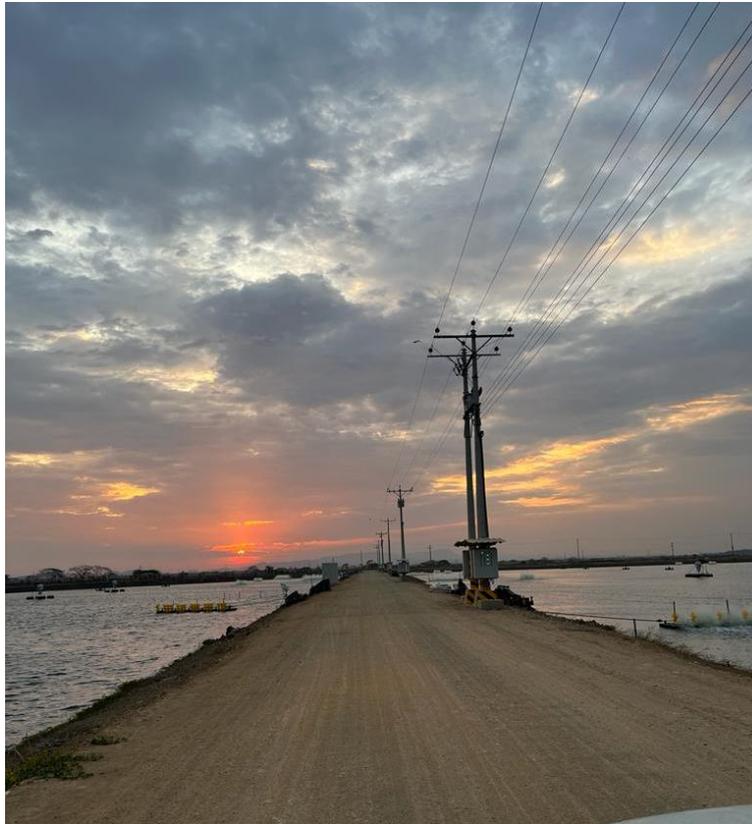


Figura 6 Línea de media tensión en muro de camaronera



1.10 TIPOS DE CARGA

Las principales cargas eléctricas dentro de una finca camaronera moderna son:

- Aireación Eléctrica
- Bombeo de Agua
- Servicios Generales

A continuación, se describen cada una de estas cargas eléctricas.

1.10.1 AIREACION ELECTRICA

El proceso de aireación de piscinas camaroneras es el encargado de oxigenar y dar movimiento al agua que se encuentra dentro de las piscinas de camarón rompiendo la tensión superficial para que el agua absorba oxígeno por medio de la salpicadura que se produce. Los equipos que realizan la aireación entran en operación usualmente en la noche cuando ya no hay luz solar para que de esta forma oxigene de manera directa el agua con un mínimo de evaporación. La aireación que funciona con energía eléctrica requiere de un motor trifásico acoplado mecánicamente a un mecanismo de aspas que produce movimientos de rotación de aspas que produce la ruptura de la tensión superficial mencionada.

1.10.2 BOMBEO DE AGUA

Durante el bombeo de agua se realiza el recambio de agua en los reservorios de la camaronera. El proceso de recambio es un reemplazo de agua existente por agua fresca proveniente de una fuente apropiada. El recambio de agua también ayuda a mantener oxigenada el agua dentro de las piscinas de camarón, ya que es agua limpia que aún no ha sido tratada con químicos adicionales.

1.10.3 SERVICIOS GENERALES

Se considera servicios generales todo el resto de consumo energético que se produce dentro del predio de la camaronera (campamento, en términos industriales). Estos equipos incluyen servicios auxiliares, comunicación, administración y operación, y otros varios. Los equipos que usualmente se encuentran son los siguientes:

- Administración y operación
 - Aires acondicionados
 - Refrigeradoras
 - Computadoras
 - Televisores
- Comunicación
 - Equipos de radiocomunicación
- Servicios auxiliares
 - Equipos de laboratorio
 - Equipos de control automático
 - Supervisión mediante video vigilancia.

1.11 TARIFAS kWh EN UNA FINCA CAMARONERA

El gobierno ecuatoriano, en apoyo al sector camaronero, ha implementado un plan de electrificación el cual cuenta con una inversión de \$200 millones para construcción de líneas de media tensión de distribución eléctrica y la configuración de una tarifa eléctrica reducida para el consumo eléctrico en camaroneras.

Actualmente las camaroneras que se encuentran servidas por la red pública de la empresa eléctrica y que tengan un nivel considerable de electrificación cuentan con una tarifa de consumo de energía eléctrica para el bombeo de agua el cual es una tarifa de Demanda Horario, es decir, la tarifa cambia con respecto al consumo durante diferentes bandas horarias. La tarifa actual para bombeo de agua se muestra en la **Tabla 1** Tarifa de bombeo de agua CNEL en Ecuador y establece dos bandas horarias.

Tabla 1 Tarifa de bombeo de agua CNEL en Ecuador

BOMBEO AGUA		
RANGO DE CONSUMO	DEMANDA (USD/kW-mes)	ENERGIA (USD/kWh)
08:00 hasta 22:00 horas	4,576	0,061
22:00 hasta 08:00 horas		0,049

1.12 COMPORTAMIENTO DE CARGA EN UNA FINCA CAMARONERA

Dentro de una finca camaronera siempre se están realizando actividades de producción ya sea durante el día como durante la noche, es decir, las actividades de la finca nunca se detienen durante la operación de producción normal. A continuación, se desglosa la operación y el comportamiento de la carga de consumo energético.

1.12.1 OPERACIÓN DIURNA

Durante el día, todos los sistemas están encendidos. Sin embargo, la carga más predominante durante el día es la del sistema de bombeo y la de servicios generales debido al trabajo de oficina que se realiza en el campamento.

1.12.2 OPERACIÓN NOCTURNA

Durante la noche la carga más predominante es la de aireación eléctrica ya que los motores entran en operación para oxigenar el agua ante la ausencia de luz solar (disminución de evaporación). De igual manera el sistema de bombeo y la carga de servicios generales es baja ya que durante la noche y madrugada no se realizan actividades de oficina y no se realiza un bombeo de agua significativo (en algunas ocasiones el bombeo es inexistente).

1.12.3 CIRCUNSTANCIAS DE OPERACIÓN ESPECIALES

Las circunstancias de operación especiales son aquellas que se dan de forma periódica durante períodos de tiempo más espaciados, por ejemplo, cuando se realiza la pesca de camarón. En operaciones de pesca de la producción, es necesario bajar aceleradamente el nivel de agua en el canal de pesca para pescar el camarón, por lo que se suele realizar el encendido total del sistema de bombeo y todos los equipos auxiliares asociados.

1.12.4 PESCA

En el procedimiento de pesca de camarón se vacía completamente la piscina en su totalidad, es decir, se seca la piscina para poder capturar todo el camarón. Durante la pesca, quedan fuera de funcionamiento los aireadores eléctricos.

1.12.5 RALEO

En este procedimiento se realiza la pesca de un porcentaje de camarón en la piscina ya sea por alguna de las siguientes dos razones: exceso de animal dentro de piscina, o por solicitud de la empacadora debido al peso requerido del camarón por parte del cliente. En la maniobra o proceso de raleo los aireadores eléctricos continúan funcionando después que culmina el raleo.

1.13 INNOVACION FINCAS CAMARONERAS

El siguiente paso en la innovación tecnológica dentro del sistema energético de una finca camaronera es la independencia energética [29]. Actualmente el sistema eléctrico dentro de fincas camaroneras es dependiente de la empresa proveedora del suministro eléctrico (empresa eléctrica) lo cual frena el crecimiento de la matriz energética dentro de finca camaronera. Consecuentemente, la finca está sujeta a la capacidad que le puede suministrar la empresa proveedora del suministro eléctrico así como también a la disponibilidad del suministro eléctrico (confiabilidad de la red de distribución de media tensión) [30]. Esta dependencia acarrea problemas técnicos de operación que pueden comprometer la calidad del camarón. Por ejemplo, las contingencias imprevistas en las redes de la empresa proveedora del suministro eléctrico pueden ser o no resueltas a la brevedad, de forma que existe una afectación importante en el camarón de las piscinas cuando se provoca una parada imprevista de los equipos de aireación eléctrica [31]. Esto provoca una disminución en los niveles de oxígeno en la piscina lo cual puede ser crítico en el crecimiento del camarón y en algunos casos extremos incluso provoca la muerte del animal por falta prolongada de oxígeno [17].

Por este motivo, las camaroneras han desplegado soluciones con grupos electrógenos y, en general, con generadores diésel, contribuyendo a la preparación contra contingencias en el suministro eléctrico regular proveniente de la empresa eléctrica, pero al costo de aumentar las emisiones, depender de un sistema de suministro de combustible, y producir un camarón que no es sustentable con el medio ambiente.

1.14 SOLUCIONES CON ENERGÍAS RENOVABLES

Actualmente el sector camaronero está optando por desplegar y complementar sus sistemas de energéticos actuales con fuentes de energía sustentables (energías renovables). Esta transición permite obtener certificaciones verdes tanto nacionales como internacionales, lo cual le ayuda en el momento de promocionar su producto a mejor precio en el exterior. Esto se debe a que las buenas prácticas industriales apetecidas por muchos clientes y consumidores exigen responsabilidad ambiental la adopción de tecnologías para incrementar la eficiencia en la producción.

Una de las fuentes de energía limpia y renovable que está siendo adoptada en sistemas comerciales y residenciales es la energía fotovoltaica (PV). Sin embargo, en el sector camaronero ecuatoriano la tecnología PV no ha generado un interés particular debido mayormente a los siguientes motivos:

- Despliegue de redes eléctricas de distribución (líneas de media tensión) para alimentar los predios camaroneros
- Tarifa eléctrica de bombeo con bandas horarias para promover la compra de energía eléctrica a la empresa eléctrica (expuesto anteriormente)
- La adopción de tecnologías nuevas requiere de experticia y experiencias pasadas que permitan la réplica y confianza en los nuevos usuarios que no están dispuestos a correr otros riesgos
- Falta de incentivos para la adopción de tecnologías, por ejemplo, por medio de retorno de impuesto a la renta, compras libres de impuestos al valor agregado, exenciones impositivas, tarifa eléctrica mejorada por exportación de energía excedente, entre otros.

En general, la adopción de nuevas tecnologías por parte del usuario también requiere que la empresa eléctrica domine la operación de redes eléctricas con flujos de potencia bidireccionales para poder aprovechar la energía excedente de los usuarios. En el mejor caso, debe diseñarse un plan de incentivos para que los inversionistas puedan invertir en el despliegue de soluciones basadas en PV para le permitan al usuario poder cumplir con las anualidades y obtenga beneficios económicos importantes.

La utilización de energía renovables como PV permiten la optimización del sistema de generación y el ahorro de energía y combustible, objetivos que no son necesariamente beneficiosos para las inversiones de la empresa eléctrica. Sin embargo, es posible tener un beneficio mutuo al desarrollar sistemas de generación híbridos que complementen el sistema distribución, permitiendo así que el usuario optimice su costo de energía y que las redes de la empresa eléctrica tengan mayor vida útil. La infraestructura de una camaronera permite la captura de radiación solar por medio de paneles flotantes de forma óptima debido a las extensas áreas de reservorio de agua.

Debido a que la mayor parte de la carga del sistema dentro de camaronera opera durante la noche es necesario la implementación de almacenamiento de energía para que la energía PV excedente se almacene y esté disponible durante la noche. En los procesos de producción nocturnos se utiliza la energía de las baterías de forma que se alimente una total o parcialmente la carga en el periodo de tiempo nocturno.

CAPITULO 2

2.1 Dimensionamiento en sistemas remotos atendidos por redes radiales

Las fincas camaroneras están situadas en zonas aledañas a las zonas rurales, lejos de los centros urbanos, en la costa del litoral ecuatoriano, alejadas de la red principal del sistema eléctrico (en muchas ocasiones no hay redes de distribución a media tensión o subtransmisión). Esta situación obliga a los usuarios a construir sus propias líneas de distribución (línea express) desde la red de distribución principal hasta los predios de la finca camaronera.

Por otro lado, existen fincas camaroneras que se encuentran en islas o islotes donde no llega la red eléctrica, por ejemplo, en el Golfo de Guayaquil en la provincia del Guayas. Estos sistemas han funcionado de forma autónoma con generación a diésel. En ambos casos, fincas en zonas rurales o en zonas insulares sin acceso a redes de distribución eléctrica, se puede optar por otros tipos de fuente de energía y sistemas híbridos tales como:

- Grupos electrógenos + generación PV
- Generación PV + almacenamiento de energía + grupos electrógenos
- Opciones anteriores con alimentación de empresa eléctrica

De esta forma, es necesario diseñar y dimensionar el sistema de generación de energía eléctrica híbrido y la distribución de potencia entre las fuentes de energía de forma que se minimice el costo total de la energía.

2.2 Problema de confiabilidad

Debido al tipo de distribución de media tensión en red radial que implementa CNEL (Corporación Nacional de Electricidad, empresa eléctrica que administra y opera el 60% del sistema nacional de distribución ecuatoriano) para alimentar las redes eléctricas de las fincas en los sectores camaroneros es muy susceptible a fallos y perturbaciones externas, la confiabilidad del suministro eléctrico puede ser en muchas ocasiones bajo. En otras palabras, pueden existir

problemas de interrupciones inesperadas y también problemas de calidad de energía debido a diversas causas:

- Choque de postes
- Líneas caídas por conductores rotos
- Fallas atmosféricas en épocas de invierno
- Racionamientos por períodos de estiaje o por fallas en el sistema de transmisión nacional
- Cortes de energía por mantenimientos correctivos.

Entre otros problemas ocasionados por la inseguridad nacional y el vandalismo el posible tener problemas de calidad de energía por el hurto de conductores y sistemas de puesta a tierra, sin contar con las acometidas ilegales y el uso indebido de la energía para fines privados.

Teniendo como consecuencia la caída del sistema eléctrico dentro de una finca camaronera después de un evento de contingencia, la principal causa es que el servicio eléctrico de la empresa eléctrica CNEL es muy susceptible a fallas o cortes de energía. Por este motivo es necesario tener equipos de respaldo de energía (fuente alternativa o almacenamiento de energía) ante estas contingencias para tener una mayor confiabilidad en el servicio eléctrico del sistema eléctrico interno de la finca para asegurar una producción estable y no se pierdan cuantiosas inversiones. De esta forma se obtiene una respuesta rápida de transferencia de energía ante la caída de alguna fuente de potencia, aumentando la confiabilidad al tener una disponibilidad de energía mayor. Si no hubiere tal transferencia se provocaría una desconexión generalizada de todos los equipos de aireación los cuales son los encargados de oxigenar el agua de las piscinas. Sin una respuesta rápida ante un corte de energía, los aireadores no trabajan y el camarón puede morir por falta de oxígeno.

2.3 Incremento de eficiencia energética

Por lo general los equipos de respaldo que responden ante una contingencia imprevista en las redes de distribución de la empresa eléctrica (CNEL) son grupos electrógenos a diésel. Estos generadores, al ser motores de combustión interna, poseen una baja eficiencia térmica y de generación, un alto consumo de

combustible, así como emisiones de CO₂. Esto ha promovido a que exista una lenta pero existente transición hacia nuevas fuentes de energía tales como la generación solar por paneles solares (PV). Esta fuente de energía es sustentable y mantiene el medio ambiente, además que no genera emisiones de CO₂.

La migración a estas nuevas tecnologías ayuda a la finca camaronera a obtener diversas certificaciones nacionales e internacionales debido al uso de fuentes energéticas sustentables como se expuso en el Capítulo 1.

2.4 Técnicas basadas en demanda máxima

En la geografía de una finca camaronera cada metro cuadrado (m²) de espejo de agua (piscinas, término utilizado en el sector camaronero) cuenta para la producción del camarón por lo que las únicas áreas de terreno sólido son destinadas a las estaciones de bombeo y el campamento. Así, se aprovecha al máximo los espejos de agua para la producción de camarón.

Teniendo en consideración esto, actualmente existen nuevas tecnologías para la implementación de paneles solares flotantes, lo cual ayuda a extender el límite en la cantidad de paneles solares a instalar debido al terreno existente ya que se contaría adicionalmente con paneles instalados en los canales de las fincas camaroneras. Una estructura ejemplo de panel solar flotante puede observarse en las Figuras 7, Figuras 8 y Figuras 9.

Figura 7 Estructura Panel Solar Flotante

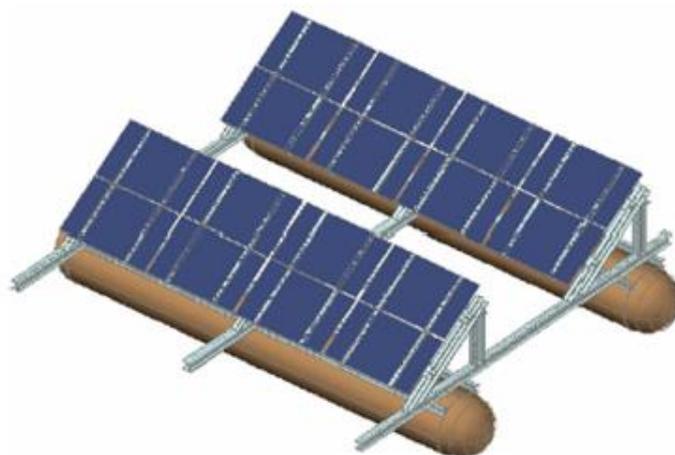


Figura 8 Estructura Panel Solar Flotante (vista lateral)

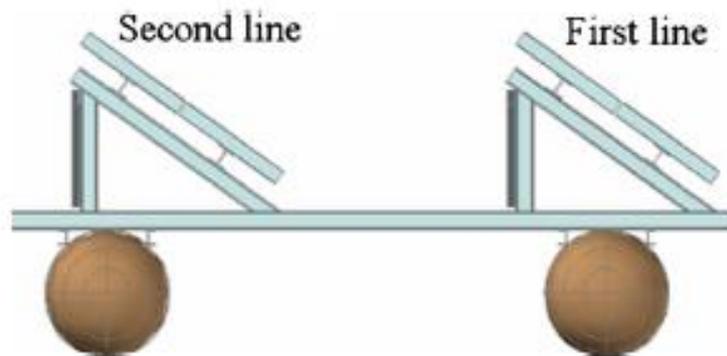


Figura 9 Estructura Panel Solar Flotante (instalación)



2.5 Propuesta para el diseño de un sistema híbrido de una camaronera

El sistema híbrido de alimentación eléctrica propuesto puede tener una combinación de fuentes de generación de acuerdo con lo siguiente.

- Grupos electrógenos + generación PV
- Generación PV + almacenamiento de energía + grupos electrógenos
- Opciones anteriores con alimentación de empresa eléctrica

Es posible tener combinaciones con otras energías renovables como eólica, pila de hidrógeno, etc., pero el despliegue de estas fuentes requiere de mayor disponibilidad de recurso eólico (que no siempre coincide con la mejor localización de una finca camaronera) o la existencia de un mercado consolidado de generación y distribución de hidrógeno. La producción de energía por medio de gas natural es posible, pero en el Ecuador el sector del gas natural está en desarrollo y no existe disponibilidad para venta particular, y las importaciones

estarían supeditadas a la existencia de permisos y cupos para el sector camaronero específicamente.

Dado estos antecedentes, se ha planteado el diseño de un sistema híbrido basado en generación fotovoltaica con paneles solares. En este estudio y propuesta se ha considerado las cargas críticas y los horarios de demanda máxima de cada tipo de carga, así como todas las restricciones operativas.

2.6 Análisis de costo

Para el dimensionamiento de la planta híbrida basada en sistema fotovoltaico se ha considerado los elementos principales que conforman una generación fotovoltaica tales como:

- Paneles fotovoltaicos
- Inversores de alimentación de energía AC a partir de energía DC de paneles fotovoltaicos. Un inversor permite agrupamiento serie-paralelo de un determinado número de paneles fotovoltaicos
- Baterías como elemento principal de un sistema de almacenamiento de energía eléctrica. Una combinación serie-paralelo puede alcanzar el voltaje y la corriente requerida.
- Transformadores de potencia para agrupamiento de cierto número de inversores.

Adicionalmente se pueden considerar baterías para el sistema de control, pero estas baterías no se incluyen en el sistema de energía de la camaronera porque tiene un propósito y uso específico a una potencia muy pequeña.

Para los elementos listados se ha procedido a la recopilación de información de costos de instalación y operación aproximados de cada equipo.

2.7 Análisis de demanda segmentada por demanda horaria

Una vez identificadas las cargas principales de una finca camaronera, es decir aireación eléctrica, bombeo de agua, Servicios generales, el siguiente paso es la obtención de las curvas de demanda horario para cada tipo de carga.

Se procedió a obtener una curva de demanda horario de cada tipo de carga. Las curvas de demanda se presentan en las Figuras 10 (para la aireación eléctrica),

Figura 12 (para el sistema de bombeo), y Figura 14 (para los servicios generales). Igualmente se observan fotografías de los componentes principales en funcionamiento en las Figura 11, Figura 13, y Figura 15.

Figura 10 Curva de demanda de aireación eléctrica

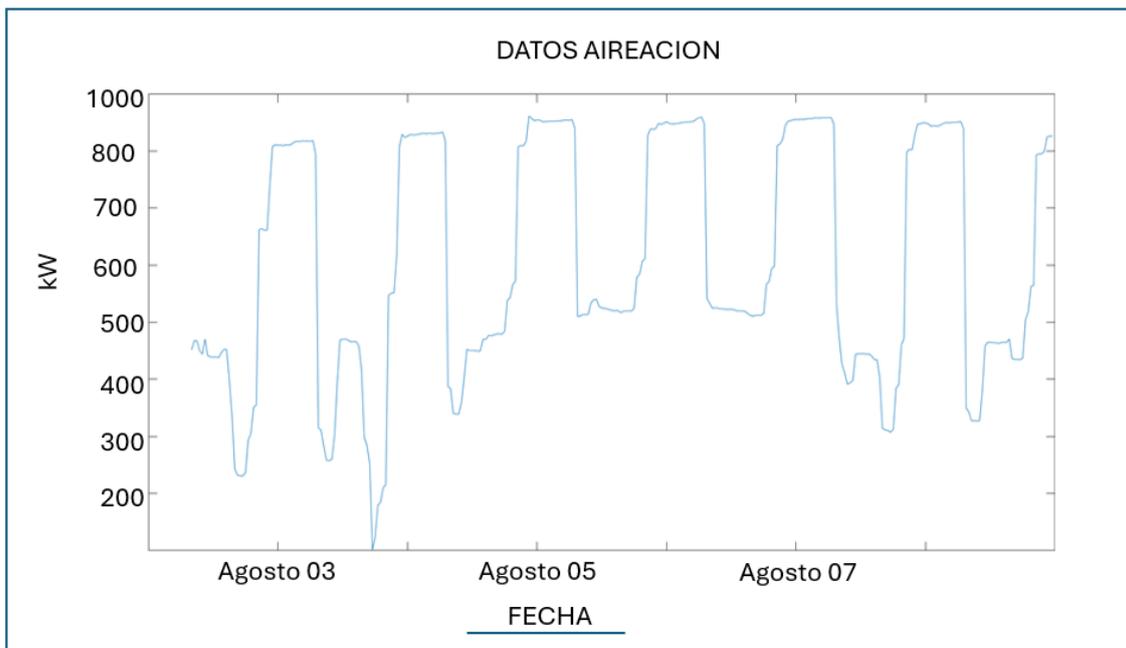


Figura 11 Aireación eléctrica en funcionamiento



Figura 12 Curva de demanda de bombeo de agua

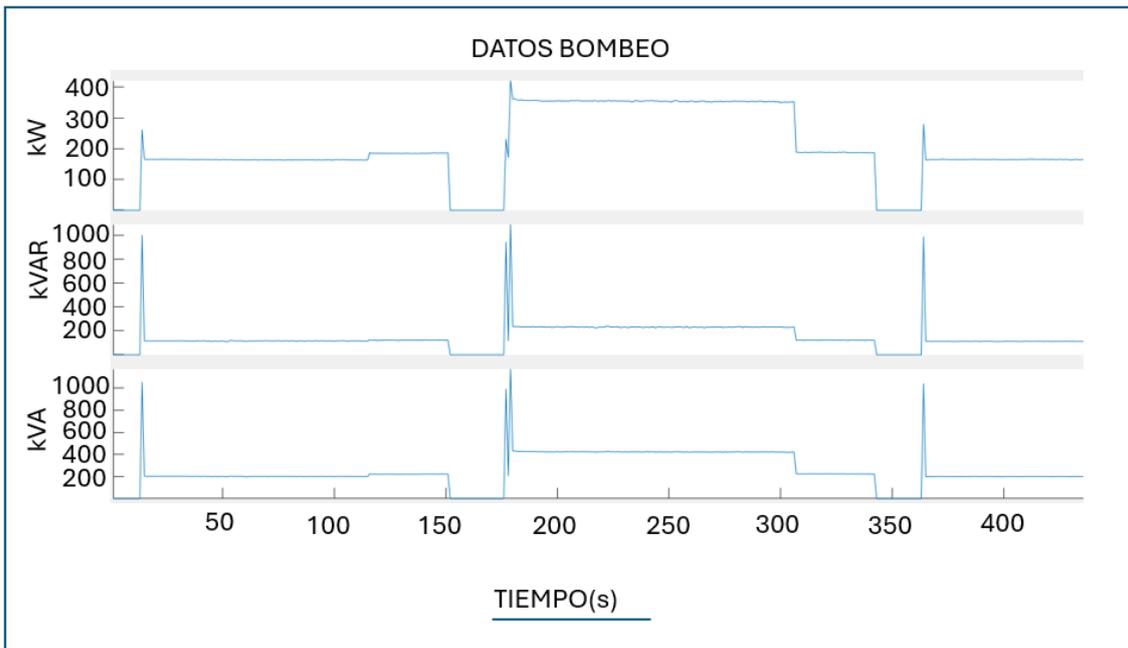


Figura 13 Bombeo de agua en funcionamiento



Figura 14 Curva de demanda de servicios generales

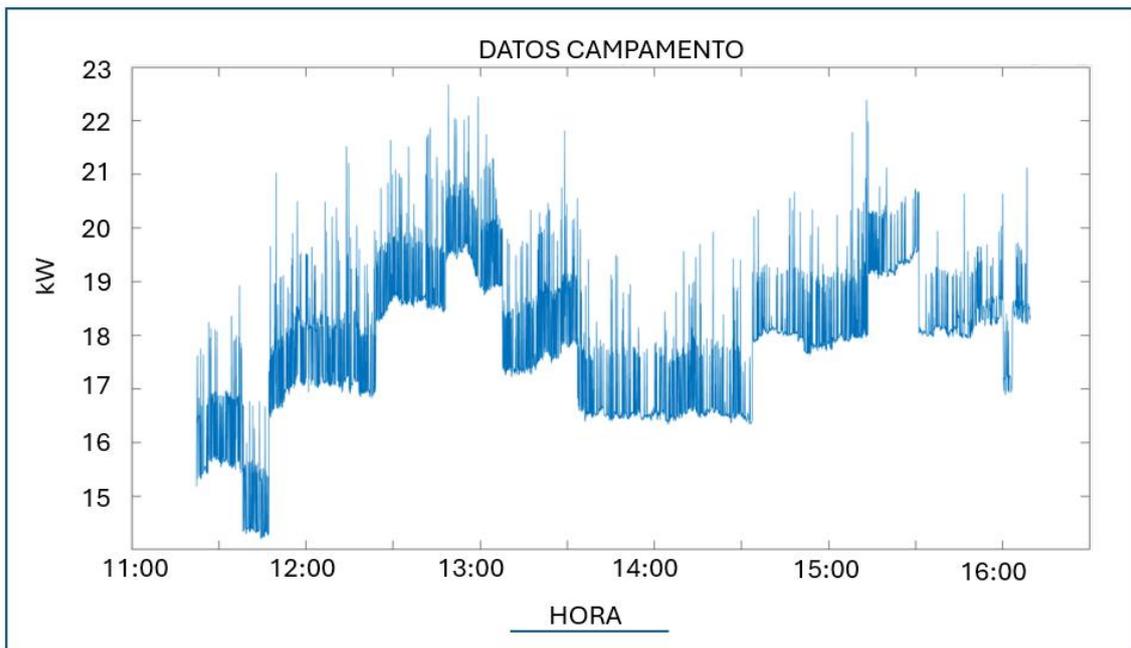


Figura 25 Campamento en finca camaronera



2.8 Elementos disponibles en el mercado nacional

Actualmente Ecuador es un mercado competitivo con gran variedad de marcas de equipos industriales. En el mercado existente también existen proveedores de soluciones de energías renovables incluyendo soluciones con energía solar fotovoltaica. Las principales aplicaciones son residenciales y generación de energía eléctrica en media tensión concentrada entre 1MW y 20MW.

Como generalmente los proyectos de generación renovable están enfocados a cargas comerciales y residenciales, no existe experiencia nacional en el mercado de producción acuícola (es posible encontrar algunas instalaciones en el área agrícola pero no directamente relacionada a la producción). Con este antecedente, el enfoque en el sector camaronero consiste en afrontar los restos en la adopción de nuevas tecnologías. Otros de las dificultades es la idea de que debe tenerse gran cantidad de terreno para ubicar paneles fotovoltaicos, sin embargo, esto no es una condición necesaria al tener disponibles las instalaciones flotantes.

2.8.1 Diseño y dimensionamiento por potencia instalada

El diseño de un sistema energético por potencia instalada en el contexto del presente trabajo significa realizar un dimensionamiento de acuerdo con la potencia instalada o el consumo máximo registrado en cualquier día del año. El diseñador debe definir un porcentaje de la potencia máxima que será atendida por las diferentes fuentes complementarias del sistema energético. Un análisis estadístico puede necesitarse para ver los escenarios de mayor ocurrencia y consecuentemente obtener una probabilidad de atender la demanda en casos de uso de energías renovables.

Para realizar el diseño y dimensionamiento de un sistema energético híbrido basado en generación fotovoltaica (PV) por potencia instalada para una finca camaronera se deben considerar los pasos listados a continuación.

- 1) Identificación de las hectáreas totales de la finca camaronera
- 2) Medición o estimación de la potencia instalada o consumo de la aireación eléctrica
- 3) Medición o estimación de la potencia instalada de bombeo de agua
- 4) Medición o estimación de la potencia instalada de servicios generales
- 5) Medición, obtención o estimación de la curva de demanda horaria total a partir de las mediciones o estimaciones de los consumos de aireación, bombeo de agua, y servicios generales.

- 6) Dimensionamiento de equipos generación fotovoltaica a partir del porcentaje de demanda que será atendido por el sistema energético basado en renovables.
- 7) Determinación de la ubicación de paneles solares flotantes para la estimación de la factibilidad del proyecto y la validación de suficiente área útil para radiación solar.
- 8) Realización de proyecto de prefactibilidad incluyendo estudios electromecánicos, eléctricos, energéticos, y de costos.

Estos pasos pueden ser utilizados en el caso de que el diseño esté basado en la definición de un porcentaje de demanda máxima que será atendido por el nuevo sistema energético.

2.8.2 Propuesta de diseño por optimización

El diseño por optimización está basado en modelos matemáticos y un objetivo que será minimizado o maximizado de acuerdo con el criterio del diseñador. En contraste con el diseño basado en la potencia instalada (sección anterior) en el cual se predetermina un porcentaje de la demanda para ser atendida por el sistema energético nuevo, el diseño por optimización permite encontrar la mejor combinación y distribución de potencia durante la operación con cualquier número de fuentes de generación en el sistema energético nuevo. Esta ventaja es decisiva al momento de considerar nuevas inversiones y permite encontrar la mejor respuesta posible. Sin embargo, cualquier propuesta por optimización necesita un modelo preciso del sistema energético y de la demanda de potencia, por lo que se realiza un trabajo adicional en la síntesis de este modelo y la medición o estimación de la demanda.

En el diseño de sistemas de energía, la optimización es una herramienta fundamental para mejorar la eficiencia y reducir costos. Los métodos de optimización más utilizados se dividen en tres categorías principales: métodos convexos, heurísticos y metaheurísticos. Los métodos convexos, como la programación lineal y cuadrática, son ampliamente utilizados debido a su capacidad para garantizar soluciones óptimas globales en problemas donde la función objetivo y las restricciones son convexas. En el contexto de sistemas de

energía, estos métodos pueden aplicarse para la optimización de redes de distribución, planificación de la generación y despacho económico, asegurando soluciones eficientes y factibles bajo ciertas condiciones. Sin embargo, estos métodos pueden resultar ineficaces cuando se enfrentan a problemas no convexos, que son comunes en el diseño de sistemas de energía debido a la presencia de múltiples mínimos locales y la naturaleza discreta de algunas variables.

En contraste, los métodos heurísticos y metaheurísticos, como los algoritmos genéticos, el recocido simulado (simulated annealing), y las colonias de hormiga (métodos basados en enjambres de partículas), son más flexibles y pueden manejar la no convexidad y la discreción de los problemas de optimización. Los métodos heurísticos proporcionan soluciones relativamente rápidas y razonablemente buenas en ciertos casos, pero sin garantizar la obtención de un óptimo global. Se utilizan mayormente y son útiles en problemas donde el tiempo de computación es una restricción importante (dependiendo de la estructura y complejidad del problema).

Por otro lado, los métodos metaheurísticos son más sofisticados y están diseñados para escapar de los mínimos locales y explorar de manera más exhaustiva el espacio de soluciones. Estos métodos son particularmente efectivos en la optimización de sistemas de energía complejos, como la ubicación óptima de dispositivos de almacenamiento de energía, la gestión de la demanda y la integración de fuentes de energía renovables. La eficiencia de los métodos metaheurísticos radica en su capacidad para balancear la exploración y explotación del espacio de búsqueda, incrementando las probabilidades de encontrar una solución cercana al óptimo global.

La elección del método de optimización adecuado depende de la naturaleza del problema y los requisitos específicos de precisión y tiempo de cálculo, con los métodos convexos ofreciendo soluciones exactas en problemas simples y los métodos heurísticos y metaheurísticos brindando flexibilidad y robustez en problemas más complejos y no convexos. En muchos casos, existen trade-offs o compromisos entre una aproximación del modelo (decrementando la precisión) pero incrementando la seguridad de la obtención de un óptimo global. Esto es especialmente posible con la técnica de programación mixta de enteros lineales.

La programación mixta de enteros lineales (Mixed Integer Linear Programming, MILP) es una técnica poderosa y ampliamente utilizada en el diseño de sistemas energéticos basados en energías renovables debido a su capacidad para manejar la combinación de variables continuas y discretas, lo que es esencial para representar decisiones prácticas, como la selección y dimensionamiento de componentes de energía renovable, así como la programación de operaciones (programación horaria, distribución de potencia horaria). Una de las ventajas más significativas de MILP es su capacidad para converger hacia el óptimo global, garantizando soluciones de alta calidad para problemas complejos de optimización extremadamente grandes (miles de restricciones y millones de variables). Aunque los sistemas energéticos a menudo presentan no linealidades intrínsecas, estas pueden ser aproximadas de manera efectiva utilizando técnicas de linealización dentro del marco de MILP. Esta aproximación permite capturar la esencia del comportamiento del sistema sin sacrificar la precisión significativamente, facilitando la toma de decisiones óptimas en la planificación y operación de sistemas energéticos que integran múltiples fuentes renovables.

Además, la disponibilidad de herramientas avanzadas como CPLEX y GUROBI ha revolucionado la aplicación de MILP en el diseño de sistemas energéticos. Estas herramientas están equipadas con algoritmos eficientes y robustos que permiten resolver problemas de MILP de gran escala con alta precisión y velocidad, lo que es crucial para abordar los desafíos contemporáneos en el sector energético. La utilización de CPLEX y GUROBI no solo ha facilitado la implementación práctica de MILP en la industria, sino que también ha impulsado significativamente la investigación académica. Numerosos estudios y proyectos de investigación han demostrado la eficacia de MILP en la optimización de sistemas energéticos renovables, abordando problemas como la planificación de la expansión de la red, la gestión óptima de recursos energéticos distribuidos, y la programación de operaciones en microrredes. Estas herramientas proporcionan a los investigadores y profesionales una plataforma robusta para modelar, simular y optimizar sistemas complejos, contribuyendo al avance del conocimiento y la implementación de soluciones sostenibles y eficientes en el sector energético.

2.9 Modelo matemático

El modelo matemático propuesto describe los aspectos operativos y energéticos principales para definir un entorno de producción y demanda eléctrica que permita realizar la búsqueda y encontrar la combinación óptima del sistema energético híbrido al mínimo costo como solución al sistema actual de alimentación eléctrica de la finca camaronera. A continuación, se define la nomenclatura utilizada en todas las expresiones y ecuaciones matemáticas del modelo del sistema híbrido energético.

2.9.1 Nomenclatura

En la presente nomenclatura se presentan los conjuntos, componentes, variables de selección y parámetros del modelo matemático del sistema híbrido energético que será utilizado en el diseño y dimensionamiento por optimización.

Tabla 2 Nomenclatura de modelo matemático

Conjuntos	
Cantidad de elementos	R
Elemento de un conjunto	r
Componentes	
Paneles fotovoltaicos	PV
Baterías	BATT
Inversor	INV
Transformador	XFRMR
Variables	
Cantidades de Elementos	
Número de paneles fotovoltaicos	n_{PV}
Número de inversores	n_{INV}
Número de transformadores	n_{XFRMR}
Número de baterías	n_{BATT}
Potencia y Energía	
Combustible (galón)	f_{fuel}
Potencia activa (kW)	P
Energía (kWh)	E

Parámetros	
Parámetros de tiempo	
Tiempo (intervalo en horas)	Δt ó t
Tiempo (período en años)	t_{year}
Tiempo (tiempo total de vida de proyecto)	T
Parámetros de costo	
Coefficiente de costo lineal	α
Otros parámetros	
Área por panel solar (m ² por panel PV)	s_{PV}
Potencia por panel solar (W)	p_{PV}
Irradiación solar por cada intervalo de tiempo	β_t

A continuación, se describen los costos asociados a la inversión, implementación, y operación de los componentes del sistema híbrido energético para finca camaronera.

COSTO TOTAL ANUAL

La ecuación (1) representa el costo anual total (c_{ann}) del proyecto a lo largo de su vida útil (T), desde $t_{year} = 1$ hasta T , para todos los componentes $r \in R$.

$$c_{ann} = \sum_{t_{year}=1}^T \sum_{r \in R} f_{t_{year},r} c_{inv,r} \quad (1)$$

Ecuación 1 VALOR TOTAL ANUAL

En la expresión (1), los parámetros involucrados son c_{ann} (costo anual total del proyecto), T (tiempo de vida del proyecto en años), R (conjunto de todos los elementos en el sistema, es decir, paneles fotovoltaicos, inversores, baterías, transformadores), r (cada elemento individual en el conjunto R), $f_{t_{year},r}$ (función que representa el costo anual asociado con el elemento r en el año t_{year}), y $c_{inv,r}$ (costo inicial de adquirir o instalar el elemento r). La ecuación significa que para cada año t_{year} desde el primer año hasta el último año T , y para cada elemento r en el conjunto R , se calcula el costo como el producto entre un factor de costo anual $f_{t_{year},r}$ y el costo inicial de inversión $c_{inv,r}$ del elemento r . Luego, todos los

costos se suman para obtener el costo anual total del proyecto c_{ann} para ese año específico t_{year} , y se suman todos los años del período T. En resumen, (1) es una sumatoria de costos anuales de cada elemento posible a instalarse considerando el tiempo de vida útil del proyecto de forma que se obtenga el costo anual total del proyecto. Los costos de cada año se denominan anualidades (como en cualquier proyección de amortización) y $f_{t_{year},r}$ podría considerarse como un factor de anualidad.

COSTO ANUAL PARA CADA COMPONENTE

La ecuación (2) representa el factor de costo anual (factor de anualidad) para el elemento r en el año t_{year} .

$$f_{t_{year},r} = \frac{(1+i)^{t_{year}i}}{(1+i)^{t_{year}} - 1} \quad (2)$$

Ecuación 2 COSTO ANUAL PARA CADA COMPONENTE

En la ecuación (2), $f_{t_{year},r}$ es el factor de costo anual para el elemento r en el año t_{year} , t_{year} es el año en el que se calcula el factor de costo anual, r es el elemento del sistema para el cual se calcula el factor de costo anual, i es la tasa de interés o tasa de descuento que se utiliza para calcular el valor presente de los costos y beneficios futuros considerados a valor presente neto.

La ecuación (2) se basa en la expresión matemática para calcular los pagos periódicos o anualidades de un préstamo o una inversión. Regularmente se conoce como la fórmula del valor presente neto de una anualidad. Se utiliza comúnmente en el sector financiero para calcular el monto de los pagos periódicos necesarios para amortizar un préstamo o calcular el valor presente neto de un flujo de efectivo. En resumen, (2) calcula el factor de costo anual para un elemento específico del sistema en un año determinado, teniendo en cuenta la tasa de interés y el tiempo transcurrido.

COSTO TOTAL DE INVERSION

La ecuación (3) presenta el costo total de inversión inicial $c_{inv,r}$ para todos los elementos del sistema R.

$$c_{inv} = \sum_{r \in R}^R c_{inv,r} \quad (3)$$

Ecuación 3 COSTO TOAL DE INVERSION

En la ecuación (3) c_{inv} es el costo total de inversión inicial para todos los elementos del sistema, R es el conjunto de todos los elementos en el sistema (por ejemplo, paneles fotovoltaicos, inversores, baterías, transformadores, etc.), r representa cada elemento individual en el conjunto R , y $c_{inv,r}$ es el costo inicial de adquirir o instalar el elemento r . Para cada elemento r en el conjunto R se suma el costo inicial de adquirir o instalar el elemento r , $c_{inv,r}$, junto con los costos de todos los demás elementos en el conjunto R . El resultado es el costo total de inversión inicial c_{inv} para todos los elementos del sistema. En resumen, esta ecuación calcula el costo total de inversión inicial sumando los costos iniciales de cada elemento del sistema.

COSTO INVERSIÓN

La ecuación (4) representa el costo total de inversión inicial para todos los componentes del sistema.

$$c_{inv} = c_{PV}(n_{PV}) + c_{BATT}(n_{BATT}) + c_{INV}(n_{INV}) + c_{XFRMR}(n_{XFRMR}) \quad (4)$$

Ecuación 4 COSTO INVERSION

En la ecuación (4) c_{inv} es el costo total de inversión inicial para todos los elementos del sistema, c_{PV} es el costo unitario de un panel fotovoltaico, n_{PV} es el número de paneles fotovoltaicos en el sistema, c_{BATT} es el costo unitario de una batería, n_{BATT} es el número de baterías en el sistema, c_{INV} es el costo unitario de un inversor, n_{INV} es el número de inversores en el sistema, c_{XFRMR} es el costo unitario de un transformador, y n_{XFRMR} es el número de transformadores en el sistema. En principio, se calcula el costo total de inversión inicial sumando el costo de cada componente multiplicado por su respectiva cantidad en el sistema, es decir, el costo de los paneles fotovoltaicos multiplicado por el número de paneles fotovoltaicos $c_{PV}(n_{PV})$, el costo de las baterías multiplicado por el número de baterías $c_{BATT}(n_{BATT})$, el costo de los inversores multiplicado por el número de inversores $c_{INV}(n_{INV})$, y el costo de los transformadores multiplicado por el número de transformadores $c_{XFRMR}(n_{XFRMR})$. La suma de todos estos costos da como resultado el costo total de inversión inicial c_{inv} para todos los

componentes del sistema. En resumen, (4) calcula el costo total de inversión inicial teniendo en cuenta los costos unitarios de cada componente y la cantidad de cada componente en el sistema.

COSTO PANELES SOLARES

La ecuación (5) representa el costo total de los paneles fotovoltaicos c_{PV} multiplicado por la cantidad de paneles fotovoltaicos n_{PV} .

$$c_{PV}(n_{PV}) = c_{u\ PV}n_{PV} \quad (5)$$

Ecuación 5 COSTO PANELES SOLARES

En la ecuación (5), $c_{PV}(n_{PV})$ es el costo total de los paneles fotovoltaicos (calculado como la multiplicación del costo unitario de un panel fotovoltaico $c_{u\ PV}$ por el número de paneles fotovoltaicos n_{PV}), $c_{u\ PV}$ es el costo unitario de un panel fotovoltaico, y n_{PV} es el número de paneles fotovoltaicos en el sistema. La ecuación (5) calcula el costo total de los paneles fotovoltaicos multiplicando el costo unitario de un panel fotovoltaico $c_{u\ PV}$ por el número de paneles fotovoltaicos en el sistema n_{PV} . El resultado es el costo total de los paneles fotovoltaicos $c_{PV}(n_{PV})$. En resumen, esta ecuación calcula el costo total de los paneles fotovoltaicos considerando el costo unitario de un panel fotovoltaico y la cantidad de paneles fotovoltaicos en el sistema.

COSTO BATERIAS

La ecuación (6) representa el costo total de las baterías c_{BATT} multiplicado por la cantidad de baterías n_{BATT} .

$$c_{BATT}(n_{BATT}) = c_{u\ BATT}n_{BATT} \quad (6)$$

Ecuación 6 COSTO BATERIAS

En (6), $c_{BATT}(n_{BATT})$ es el costo total de las baterías (multiplicación entre el costo unitario de una batería $c_{u\ BATT}$ por el número de baterías n_{BATT}), $c_{u\ BATT}$ es el costo unitario de una batería, n_{BATT} es el número de baterías en el sistema. La ecuación (6) se calcula el costo total de las baterías multiplicando el costo unitario de una batería $c_{u\ BATT}$ por el número de baterías en el sistema n_{BATT} . El resultado es el costo total de las baterías $c_{BATT}(n_{BATT})$. En resumen, esta ecuación calcula el costo total de las baterías considerando el costo unitario de una batería y la cantidad de baterías en el sistema.

COSTO INVERSORES

La ecuación (7) representa el costo total de los inversores c_{INV} .

$$c_{INV}(n_{INV}) = c_{u\ INV}n_{INV} \quad (7)$$

Ecuación 7 COSTO INVERSORES

En la ecuación (7), $c_{INV}(n_{INV})$ es el costo total de los inversores, calculado multiplicando el costo unitario de un inversor $c_{u\ INV}$ por el número de inversores n_{INV} , $c_{u\ INV}$ es el costo unitario de un inversor, y n_{INV} es el número de inversores en el sistema. En (7), se calcula el costo total de los inversores multiplicando el costo unitario de un inversor $c_{u\ INV}$ por el número de inversores en el sistema n_{INV} . El resultado es el costo total de los inversores $c_{INV}(n_{INV})$. En resumen, esta ecuación calcula el costo total de los inversores considerando el costo unitario de un inversor y la cantidad de inversores en el sistema.

COSTO TRANSFORMADOR

La ecuación (8) representa el costo total de los transformadores c_{XFRMR} .

$$c_{XFRMR}(n_{XFRMR}) = c_{u\ XFRMR}n_{XFRMR} \quad (8)$$

Ecuación 8 COSTO TRANSFORMADORES

En la ecuación (8), $c_{XFRMR}(n_{XFRMR})$ es el costo total de los transformadores, calculado multiplicando el costo unitario de un transformador $c_{u\ XFRMR}$ por el número de transformadores n_{XFRMR} , $c_{u\ XFRMR}$ es el costo unitario de un transformador, y n_{XFRMR} es el número de transformadores en el sistema. La ecuación se lee de la siguiente manera: primero, se calcula el costo total de los transformadores multiplicando el costo unitario de un transformador $c_{u\ XFRMR}$ por el número de transformadores en el sistema n_{XFRMR} , luego, el resultado es el costo total de los transformadores $c_{XFRMR}(n_{XFRMR})$. En resumen, esta ecuación calcula el costo total de los transformadores considerando el costo unitario de un transformador y la cantidad de transformadores en el sistema.

COSTO DE OPERACIÓN FIJO

Los costos de operación fijo representan los costos fijos incurridos en la operación, mantenimiento y administración del sistema híbrido energético, incluyendo salarios y servicios generales.

La ecuación (9) representa los costos fijos totales c_{fixed} durante el período de vida del proyecto T para todos los elementos del sistema R.

$$c_{fixed} = \sum_{t_{year}=1}^T \sum_{r \in R} \alpha_{FIX_r} c_r \quad (9)$$

Ecuación 9 COSTO DE OPERACION FIJO

En (9), c_{fixed} es el costo fijo total durante el período de vida del proyecto, T es el período de vida del proyecto en años, R es el conjunto de todos los elementos en el sistema (por ejemplo, paneles fotovoltaicos, inversores, baterías, transformadores, etc.), r representa cada elemento individual en el conjunto R, α_{FIX_r} es el factor de costo fijo asociado con el elemento r, y c_r es el costo unitario del elemento r. La ecuación se lee de la siguiente manera: para cada año t_{year} desde el primer año hasta el último año T, y para cada elemento r en el conjunto R, se multiplica el factor de costo fijo asociado con el elemento r (α_{FIX_r}) por el costo unitario del elemento r (c_r). Luego, todos estos productos se suman para obtener los costos fijos totales c_{fixed} para ese año específico. En resumen, esta ecuación calcula los costos fijos totales durante el período de vida del proyecto para todos los elementos del sistema, teniendo en cuenta el factor de costo fijo y el costo unitario de cada elemento.

COSTO DE OPERACIÓN VARIABLE

El costo de operación variable considera los daños que pueden llegar a ocurrir a los equipos de la planta fotovoltaica.

La ecuación (10) representa los costos variables totales c_{var} durante el período de vida del proyecto T para todos los elementos del sistema R.

$$c_{var} = \sum_{t_{year}=1}^T \sum_{r \in R} \alpha_{VAR_r} c_r \quad (10)$$

Ecuación 10 COSTO DE OPERACION VARIABLE

En la expresión (10), c_{var} es el costo variable total durante el período de vida del proyecto., T es el período de vida del proyecto en años, R es el conjunto de todos los elementos en el sistema (por ejemplo, paneles fotovoltaicos, inversores, baterías, transformadores, etc.), r representa cada elemento individual en el conjunto R , $\alpha_{VAR\ r}$ es el factor de costo variable asociado con el elemento r , y c_r es el costo unitario del elemento r . Para cada año t_{year} desde el primer año hasta el último año T , y para cada elemento r en el conjunto R , se multiplica el factor de costo variable asociado con el elemento r $\alpha_{VAR\ r}$ por el costo unitario del elemento r c_r . Todos estos productos se suman para obtener los costos variables totales c_{var} para ese año específico. En resumen, esta ecuación calcula los costos variables totales durante el período de vida del proyecto para todos los elementos del sistema, teniendo en cuenta el factor de costo variable y el costo unitario de cada elemento.

COSTO COMBUSTIBLE (DIESEL)

La ecuación (11) representa los costos totales de combustible c_{fuel} durante el período de vida del proyecto T .

$$c_{fuel} = \sum_{t_{year}=1}^T \alpha_{FUEL} f_{fuel} \quad (11)$$

Ecuación 11 COSTO COMBUSTIBLE(DIESEL)

En la expresión (11), c_{fuel} es el costo total de combustible durante el período de vida del proyecto, T es el período de vida del proyecto en años, α_{FUEL} es el factor de costo asociado con el combustible, y f_{fuel} es el consumo de combustible en galones en un año específico. La ecuación se lee de la siguiente manera, para cada año t_{year} desde el primer año hasta el último año T , se multiplica el factor de costo asociado con el combustible α_{FUEL} por el consumo de combustible en galones f_{fuel} en ese año específico. Todos los productos se suman para obtener los costos totales de combustible c_{fuel} durante todo el período de vida del proyecto. En resumen, esta ecuación calcula los costos totales de combustible durante el período de vida del proyecto, teniendo en cuenta el factor de costo asociado con el combustible y el consumo de combustible en cada año.

COSTO DE EMISIONES

La ecuación (12) representa los costos totales ambientales c_{environm} durante el período de vida del proyecto T.

$$c_{\text{environm}} = \sum_{t_{\text{year}}=1}^T \alpha_{\text{ENV}} \gamma_{\text{emission}} \quad (12)$$

Ecuación 12 COSTO EMISIONES

En la expresión (12), c_{environm} es el costo total ambiental durante el período de vida del proyecto, T es el período de vida del proyecto en años, α_{ENV} es el factor de costo asociado con el impacto ambiental, y γ_{emission} representa la emisión de contaminantes (o cualquier otro tipo de impacto ambiental) en un año específico. Para cada año t_{year} desde el primer año hasta el último año T, se multiplica el factor de costo asociado con el impacto ambiental α_{ENV} por la emisión de contaminantes γ_{emission} en ese año específico. Luego, todos los productos se suman para obtener los costos totales ambientales c_{environm} durante todo el período de vida del proyecto. En resumen, esta ecuación calcula los costos totales ambientales durante el período de vida del proyecto, teniendo en cuenta el factor de costo asociado con el impacto ambiental y las emisiones de contaminantes en cada año.

COSTO DEL KILOVATIO/HORA

La ecuación (13) representa los costos totales de electricidad α_{elec} durante un año específico t_{year} .

$$c_{\text{elec}} = \Delta t \sum_{\Delta t \in t_{\text{year}}}^{\alpha_{\text{elec}} P_{\text{GRID}}} \quad (13)$$

Ecuación 13 COSTO DEL KILOVATIO/HORA

En la expresión (13), α_{elec} es el costo total de electricidad para un año específico, Δt es el intervalo de tiempo en horas, t_{year} es el año específico para el cual se está calculando el costo de electricidad, α_{elec} es el factor de costo asociado con la electricidad, y P_{GRID} es la potencia suministrada por la red eléctrica. En (13), se multiplica el intervalo de tiempo en horas Δt por la suma de los costos de electricidad para cada intervalo de tiempo $\Delta t \in t_{\text{year}}$, luego el costo de

electricidad para cada intervalo de tiempo está determinado por el factor de costo asociado con la electricidad α_{elec} multiplicado por la potencia suministrada por la red eléctrica P_{GRID} . La suma de estos costos en todos los intervalos de tiempo durante el año específico da como resultado el costo total de electricidad c_{elec} para ese año. En resumen, esta ecuación calcula los costos totales de electricidad para un año específico considerando el factor de costo asociado con la electricidad y la potencia suministrada por la red eléctrica en cada intervalo de tiempo.

2.9.2 Relaciones de parámetros

NUMERO DE INVERSORES POR PANEL FOTOVOLTAICO

La ecuación (14) representa el número de inversores n_{INV} necesario en función del número de paneles fotovoltaicos n_{PV} .

$$n_{INV} = n_{PV}/20 \quad (14)$$

Ecuación 14 NUMERO DE INVERSORES POR PANEL FOTOVOLTAICO

En (14), n_{INV} es el número de inversores necesarios, n_{PV} es el número de paneles fotovoltaicos. En esta ecuación, se divide el número de paneles fotovoltaicos n_{PV} entre 20, el resultado de esta división es el número de inversores necesarios n_{INV} . Esta ecuación implica que se necesita un inversor por cada 20 paneles fotovoltaicos. Es una manera sencilla de estimar el número de inversores requeridos en función de la capacidad del sistema fotovoltaico. Sin embargo, la relación exacta puede variar según las especificaciones técnicas y el diseño del sistema (tipos de inversores disponibles en el mercado).

CAPACIDAD TOTAL EN PANELES FOTOVOLTAICOS (WATTS)

La ecuación (15) representa la potencia total generada por los paneles solares P_{PV} en función del número de paneles fotovoltaicos n_{PV} y la potencia por panel solar P_{PV} .

$$P_{PV} = p_{PV}n_{PV} \quad (15)$$

Ecuación 15 CAPACIDAD TOTAL EN PANELES FOTOVOLTAICOS(WATTS)

En (15), P_{PV} es la potencia total generada por los paneles solares, P_{PV} es la potencia por panel solar, y n_{PV} es el número de paneles fotovoltaicos. En (15), se multiplica la potencia por panel solar P_{PV} por el número de paneles fotovoltaicos n_{PV} , Luego el resultado de esta multiplicación es la potencia total generada por los paneles solares P_{PV} . En resumen, esta ecuación calcula la potencia total generada por los paneles solares multiplicando la potencia por panel solar por el número de paneles fotovoltaicos en el sistema. Es una forma de estimar la capacidad total del sistema fotovoltaico.

CANTIDAD DE TRANSFORMADORES POR INVERSOR

La ecuación (16) representa el número de transformadores n_{XFRMR} necesario en función del número de inversores n_{INV} .

$$n_{XFRMR} = n_{INV}/4 \quad (16)$$

Ecuación 16 CANTIDAD DE TRANSFORMADORES POR INVERSOR

En (16), n_{XFRMR} es el número de transformadores necesarios, n_{INV} es el número de inversores. La ecuación se interpreta de la siguiente manera. Primero, se divide el número de inversores n_{INV} entre 4. Luego, el resultado de esta división es el número de transformadores necesarios n_{XFRMR} . Esta ecuación implica que se necesita un transformador por cada 4 inversores. Es una manera sencilla de estimar el número de transformadores requeridos en función de la cantidad de inversores en el sistema. Sin embargo, la relación exacta puede variar dependiendo de las especificaciones técnicas y del diseño del sistema (otros tipos de transformadores de mayor o menor capacidad disponibles comercialmente).

RELACIÓN ENTRE COMBUSTIBLE (GL) Y EMISIONES DE CO2 (KG)

La ecuación (17) representa la cantidad de emisiones $\gamma_{emission}$ producidas por el consumo de combustible f_{fuel} .

$$\gamma_{emission} = 0.05f_{fuel} \quad (17)$$

Ecuación 17 RELACION ENTRE COMBUSTIBLE(GL) Y EMISIONES DE CO2(KG)

En (17), $\gamma_{emission}$ es la cantidad de emisiones producidas, f_{fuel} es el consumo de combustible en galones. La ecuación se lee de la siguiente manera. Primero, se

multiplica el consumo de combustible f_{fuel} por 0.05, luego el resultado de esta multiplicación es la cantidad de emisiones producidas $\gamma_{emission}$. En resumen, esta ecuación indica que, por cada galón de combustible, se producen 0.05 kg de emisiones, es decir, es una relación proporcional. En realidad, la relación entre combustible y emisiones puede ser más compleja o no lineal incluso, pero la relación lineal es una aproximación apropiada. En este caso, el factor de 0.05 es un coeficiente estimado y puede variar según las necesidades o la tecnología del generador a combustión interna.

RELACIÓN ENTRE BTU Y COMBUSTIBLE (GL DE DIESEL)

La ecuación (18) representa la cantidad de combustible f_{fuel} en galones que es equivalente a 0.138 millones de unidades térmicas británicas (MBTU).

$$1f_{fuel} = 0.138MBTU \quad (18)$$

Ecuación 18 RELACION ENTRE BTU Y COMBUSTIBLE (GL DE DIESEL)

En (18), f_{fuel} es la cantidad de combustible en galones, MBTU es la unidad térmica británica, que es una medida de energía. En (18), se establece que la cantidad de combustible f_{fuel} en galones es igual a 0.138 MBTU, siendo entonces una equivalencia entre un galón de combustible y la cantidad de energía contenida en MBTU (factor de conversión).

2.9.3 Formulación inicial de problema MILP

El objetivo principal de la optimización es minimizar el costo total del proyecto, incluyendo costos de instalación, operación y mantenimiento teniendo como restricciones el modelo energético de la red de la finca camaronera.

Para lograr el objetivo de optimización, es fundamental definir las reglas de operación del sistema. Esto incluye los costos de producción de energía, las emisiones de CO2 relacionadas con la operación de la planta, el costo del combustible utilizado si se utiliza la generación convencional, y los costos de operación fijos y variables. La disponibilidad de metros cuadrados para la instalación de paneles solares limita el espacio de búsqueda de la optimización. Estas limitaciones aseguran que el diseño y la operación del sistema de generación híbrido basado en paneles fotovoltaicos esté enmarcado en la

realidad operativa del sistema y se consideren aspectos económicos como medioambientales. De esta forma, se maximiza el rendimiento financiero y contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

La cantidad de inversores, transformadores, paneles solares y baterías necesarios para estructurar el sistema de generación híbrido se optimizan mediante el uso de Programación de Enteros Mixtos Lineales (Mixed Integer Linear Programming, MILP) debido a la estructura lineal del problema propuesto. En este contexto, se selecciona CPLEX Optimization Studio 12.9.0 versión académica para resolver el problema de optimización planteado. La formulación del problema sería como sigue,

$$\begin{aligned} & \min_{n_{PV}, n_{INV}, n_{XFRMR}, n_{BATT}} && (1) && (19) \\ & \text{subject to} && (2) \text{ to } (13) \\ & && (14) \text{ to } (18) \text{ (equivalencias)} \end{aligned}$$

Ecuación 19 MINIMIZACION CANTIDAD DE INVERSORES, TRANSFORMADORES, PANELES SOLARES Y BATERÍAS

En el problema mostrado en (19), la optimización busca valores óptimos de número de paneles, inversores, transformadores, y baterías para sistema de almacenamiento. El objetivo es distribuir de forma óptima (equilibrio óptimo) el suministro de energía solar, los grupos electrógenos y el consumo de energía eléctrica desde el suministro de la red eléctrica. El algoritmo de optimización tiene como objetivo asignar eficientemente los recursos disponibles para reducir tanto los costos de instalación inicial como los costos operativos a lo largo del tiempo.

La implementación del sistema híbrido energético a través del programa CPLEX no solo busca reducir los costos, sino también optimizar el número de elementos necesarios para garantizar un rendimiento óptimo y una gestión eficiente de la energía. Esto implica examinar minuciosamente la capacidad de producción de cada componente y cómo interactúan entre sí para maximizar la eficiencia del sistema en su conjunto. Se debe garantizar un suministro continuo y estable al equilibrar la contribución de las fuentes de energía renovable con la capacidad de respaldo proporcionada por los grupos electrógenos y la red eléctrica. Además, esto reduce los costos de infraestructura y mantenimiento. La integración de algoritmos de optimización en el proceso de diseño y planificación

permite tomar decisiones informadas que cumplen con los requisitos energéticos específicos y promueven la sostenibilidad del sistema en el largo plazo.

Como se ha mencionado, la evaluación de varios escenarios y limitaciones operativas es parte de este proceso. Esto incluye, por ejemplo, la capacidad máxima de generación, la disponibilidad de recursos y las variaciones en la demanda. Al lograr un equilibrio energético ideal, se garantiza un suministro confiable y sostenible, lo que reduce la dependencia de fuentes no renovables y los costos asociados. En este sentido, en el problema (19) haría falta la definición de las restricciones operativas como balance de potencia, demandas horarias, entre otras. Estas restricciones adicionales serán presentadas en el capítulo siguiente de acuerdo con los diferentes escenarios de configuración del sistema híbrido energético.

CAPITULO 3

3.1 Configuraciones para un sistema híbrido energético

En la formulación de los problemas de optimización para el diseño y dimensionamiento del sistema híbrido energético se consideran las siguientes configuraciones.

- Sistema aislado alimentado por grupo electrógeno
 - No existen redes de distribución eléctrica en la zona de finca camaronera, por lo que la única fuente de energía son los grupos electrógenos que consumen diésel.
- Sistema alimentado por red eléctrica (empresa eléctrica) únicamente
 - Existen redes de distribución eléctrica en la zona de finca camaronera, por lo que se alimenta con energía eléctrica a la tarifa determinada por la regulación nacional.
- Sistema alimentado por red eléctrica + grupos electrógenos + sistema fotovoltaico con almacenamiento de energía por baterías
 - Este sistema representa el sistema híbrido energético al que se desea optimizar para encontrar la configuración óptima entre consumo de energía eléctrica de la red de distribución, generación por diésel por los grupos electrógenos, y utilización de energía fotovoltaica para uso diurno y almacenamiento de energía.

Entre las consideraciones generales para todas las configuraciones está la discretización del perfil de demanda de la finca camaronera.

La demanda presentada en la Figura 10 se ha dividido en 6 intervalos de tiempo de 4 horas cada uno de forma que se analiza la demanda de todo un día promedio de 24 horas trabajo en la finca camaronera. Esta división permite la obtención de un diseño de sistema híbrido energético conservador tal que la validez y futura implementación soportará un crecimiento porcentual pequeño sin necesidad de extender el proyecto. Lógicamente, para crecimiento más significativos, el sistema híbrido energético tiene que ampliarse correspondientemente.

A continuación, se describen los problemas de optimización para resolver las configuraciones de sistemas híbridos energéticos anteriormente detallados

3.2 Sistema aislado alimentado por grupo electrógeno

Se ha considerado un sistema eléctrico de potencia (SEP) de una finca camaronera aislado en el cual su única fuente de energía es un grupo electrógeno (generador diésel accionando un generador eléctrico). Esta configuración es la que comúnmente se encuentra en islas e islotes que no cuentan con electrificación rural.

Este problema considera los costos de instalación, los costos de operación y mantenimientos fijos y variables en la instalación y puesta en marcha del grupo electrógeno. Entre los parámetros utilizados están los costos de combustible de acuerdo con el precio de venta internacional, la relación potencia/combustible (kW/gl), los kg de emisión por cada galón de combustible, la penalización económica por cada kg de emisión, la potencia máxima disponible del grupo electrógeno (kW), y la potencia máxima de demanda (kW).

Considerando la demanda máxima, se ha procedido a obtener un vector de cargabilidades en por unidad como se muestra en (20).

$$\text{demanda}_{\text{electrogeno}} = [0.8, 0.8, 0.2, 0.1, 0.8, 0.8] \quad (20)$$

Ecuación 20 DEMANDA GRUPO ELECTROGENO

A continuación, se describen el resto de las restricciones matemáticas correspondientes al modelo.

3.2.1 Balance de Potencia

La potencia del generador debe ser igual a la potencia de la carga en cada intervalo de tiempo.

$$P_{ng_GEN}[td] = Pload[td] * Ploadmax \quad \forall td \quad (21)$$

Ecuación 21 BALANCE DE POTENCIA GE

3.2.2 Consumo de combustible en grupo electrógeno

Se define como la sumatoria del combustible utilizado para abastecer la carga en cada intervalo de tiempo. Esta sumatoria no debe exceder el límite de uso diario de combustible disponible en los tanques físicos de la finca camaronera.

$$\sum_{td \in T_{day}} ffuel[td] \leq \text{max_gallon} \quad (22)$$

Ecuación 22 CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN GRUPO ELECTRÓGENO

3.2.3 Relación potencia y combustible

La relación de potencia y combustible se expresa por medio de una relación proporcional al flujo de combustible utilizado para obtener un determina potencia en kW.

$$P_{ng_GEN}[td] = P_{fuel_ratio} * (1/(24/Tday)) * ffuel[td] \quad \forall td \quad (23)$$

Ecuación 23 Relación potencia y combustible

3.2.4 Límite de potencia en grupo electrógeno

En esta expresión se limita la potencia de generación del grupo electrógeno con respecto a su potencia máxima (límite de cargabilidad).

$$P_{GEN}[td] \leq P_{genmax} \quad \forall td \quad (24)$$

Ecuación 24 LÍMITE DE POTENCIA EN GRUPO ELECTRÓGENO

El problema de optimización para el sistema de generación con grupo electrógeno como única fuente de generación (sistema eléctrico aislado) puede entonces plantearse como en (25).

$$\begin{aligned} & \min_{n_{PV}, n_{INV}, n_{XFRMR}, n_{BATT}} \quad (1) & (25) \\ & \text{subject to (2) to (13)} \\ & \quad (14) \text{ to } (18) \text{ (equivalencias)} \\ & \quad (21) \text{ to } (25) \text{ (config, aislada)} \\ & \quad (20) \text{ (demanda)} \end{aligned}$$

Ecuación 25 OPTIMIZACION GE

3.3 Sistema Alimentado por Red Eléctrica

Se ha considerado un SEP en el cual su única fuente de energía proviene de la red eléctrica de la empresa eléctrica (en el caso ecuatoriano CNEL). Como se ha mencionado en el Capítulo 1 y Capítulo 2 de este trabajo, es necesario que el propietario de la finca despliegue una línea de media tensión o subtransmisión hasta el punto de conexión con la red existente.

En este problema se ha considerado los siguientes parámetros, costo instalación de línea por km, Costo fijo de operación y mantenimiento por km, costo variable de operación y mantenimiento por km, costo de subestación eléctrica (en casos de fincas camaroneras de mediana y gran capacidad), capacidad de subestación eléctrica (kW), costo de energía eléctrica considerando tarifa especial, y longitud de línea (km).

Considerando la demanda máxima, se ha procedido a obtener el vector de cargabilidades en por unidad como se muestra en (26).

$$\text{demanda}_{\text{red}} = [0.8, 0.8, 0.2, 0.1, 0.8, 0.8] \quad (26)$$

Ecuación 26 DEMANDA RED

A continuación, se describen el resto de las restricciones matemáticas correspondientes al modelo.

3.3.1 Balance de potencia

La potencia de la red debe ser igual a la potencia de la carga en cada uno de los intervalos de tiempo dentro del período de estudio (un día promedio de trabajo).

$$P_{\text{ng_GRID}}[\text{td}] = P_{\text{load}}[\text{td}] * P_{\text{loadmax}} \quad \forall \text{td} \quad (27)$$

Ecuación 27 BALANCE DE POTENCIA RED

3.3.2 Límite de cargabilidad de la red

En esta restricción se limita la potencia consumida de la red eléctrica con respecto al límite de cargabilidad de la subestación de la finca camaronera.

$$P_{\text{GRID}}[\text{td}] \leq S_{\text{Ecapacity}} \quad \forall \text{td} \quad (28)$$

Ecuación 28 LIMITE DE CARGABILIDAD RED

3.3.3 Límites de potencia

En las expresiones (29) y (30) se indica que la capacidad instalada de la subestación de la finca camaronera debe ser mayor que la demanda suplida por la red eléctrica. Asimismo, en todo intervalo de tiempo debe haber un consumo de demanda eléctrica.

$$P_{GRID[td]} - P_{ng_GRID[td]} \leq SEcapacity \quad \forall td \quad (29)$$

Ecuación 29 CAPACIDAD INSTALADA SUBESTACION

$$P_{ng_GRID[td]} - P_{GRID[td]} \geq 0 \quad \forall td \quad (30)$$

Ecuación 30 CAPACIDAD INSTALADA RED

El problema de optimización para el sistema alimentado por la red de distribución de la empresa eléctrica puede entonces plantearse como en (31).

$$\begin{aligned} & \min_{n_{PV}, n_{INV}, n_{XFRMR}, n_{BATT}} \quad (1) & (31) \\ & \text{subject to (2) to (13)} \\ & \quad (14) \text{ to (18) (equivalencias)} \\ & \quad (27) \text{ to (30) (config. red eléctrica)} \\ & \quad (26) \text{ (demanda)} \end{aligned}$$

Ecuación 31 OPTIMIZACION RED

3.4 Sistema híbrido energético completo

Se ha considerado un SEP que está alimentado por un sistema híbrido de energía compuesto por grupo electrógeno, red eléctrica, paneles solares fotovoltaicos, y almacenamiento de energía por medio de baterías.

Un sistema híbrido energético compuesto por paneles solares, almacenamiento de energía con baterías, alimentación de energía eléctrica pública y un grupo generador a diésel ofrece una combinación de ventajas que pueden mejorar la eficiencia energética, la resiliencia y la sostenibilidad de una instalación. La integración de paneles solares permite aprovechar la energía solar, una fuente de energía renovable y abundante, lo que reduce la dependencia de combustibles fósiles y disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero. El almacenamiento de energía con baterías proporciona una solución para la intermitencia de la energía solar, almacenando el exceso de energía generada

durante las horas de sol para su uso posterior, lo que mejora la estabilidad del suministro energético y reduce la necesidad de recurrir a fuentes de energía no renovables durante los picos de demanda o en ausencia de luz solar.

Por otro lado, la conexión a la red eléctrica pública asegura un suministro continuo de energía, complementando las fuentes renovables y actuando como respaldo en caso de insuficiencia de renovables. Esta conexión permite aprovechar tarifas eléctricas más bajas durante las horas de menor demanda, optimizando los costos operativos. Por otro lado, la inclusión de un grupo generador a diésel ofrece una capa adicional de seguridad energética, garantizando un suministro de energía fiable durante situaciones de emergencia o fallos en la red eléctrica. Aunque los generadores a diésel son menos sostenibles, su uso ocasional en un sistema híbrido puede ser estratégico para mantener la operatividad de la instalación en todas las circunstancias.

En conjunto, este tipo de sistema híbrido proporciona una solución flexible y robusta, combinando fuentes de energía renovable con opciones tradicionales y de almacenamiento para maximizar la eficiencia, minimizar los costos y garantizar un suministro energético continuo y confiable.

En este problema se han considerado los siguientes parámetros para el grupo electrógeno: costo de combustible (USD/gal), potencia máxima generada (kW), kg de emisión de CO₂ por galón de combustible utilizado, y USD de penalización por cada kg de emisión. Con respecto a la red eléctrica, se considera el costo de la energía eléctrica. Por otro lado, con respecto al sistema fotovoltaico se considera el área disponible para instalación de paneles solares, el punto de radiación límite (kc), el punto de radiación estándar, la eficiencia nominal del panel, el número máximo de paneles, la energía inicial de las baterías, el número máximo de baterías, la potencia instalada, y el nivel de radiación durante los intervalos de tiempo. Las variables para los paneles fotovoltaicos incluyen costo de instalación por panel, el costo fijo, el costo variable, la capacidad en kW, y los metros cuadrados por panel solar. Para el componente de almacenamiento de energía por baterías se consideran los principales parámetros como el costo de instalación por batería, costos fijos y costos variables por operación y mantenimiento, la capacidad en kWh, la potencia de carga y descarga y los intervalos de tiempo donde suceden, la potencia máxima de carga y descarga,

el voltaje mínimo (en p.u.) y voltaje máximo (en p.u.) de operación. En cuanto a los inversores, se incluyen los parámetros de costo de instalación por inversor, costos fijos y costos variables de operación y mantenimiento, y la capacidad (kW). Finalmente, los parámetros de transformador incluyen costo de transformador, costos fijos y costos variables de operación y mantenimiento, así como la capacidad (kW).

Considerando la demanda máxima, se ha procedido a obtener el vector de cargabilidades en por unidad como se muestra en (26).

$$\text{demanda}_{\text{híbrido}} = [0.8, 0.8, 0.2, 0.1, 0.8, 0.8] \quad (32)$$

Ecuación 32 DEMANDA SISTEMA HIBRIDO

3.4.1 Balance de potencia 1

La sumatoria de las potencias de cada fuente energética del sistema híbrido energético debe ser igual a la potencia de la carga en cada intervalo de tiempo.

$$P_{\text{grid[td]}} + P_{\text{gen[td]}} + P_{\text{nb}_{\text{BATT[td]}}} + P_{\text{nb}_{\text{PV[td]}}} = \text{Pload[td]} * \text{Ploadmax} \quad \forall \text{td} \quad (33)$$

Ecuación 33 BALANCE POTENCIA 1

Esta restricción se cumple para cada intervalo de tiempo excepto en los intervalos de tiempo donde no hay irradiación solar.

3.4.2 Balance de potencia 2

La sumatoria de las potencias de cada fuente energética del sistema híbrido energético debe ser igual a la potencia de la carga en cada intervalo de tiempo. Esta restricción se cumple para los intervalos de tiempo en los cuales la irradiación solar es inexistente, de forma que $P_{\text{nb}_{\text{PV[td]}}} = 0$

$$P_{\text{grid[td]}} + P_{\text{gen[td]}} + P_{\text{-nb}_{\text{-PV[td]}}} = \text{Pload[td]} * \text{Ploadmax} \quad (34)$$

Ecuación 34 BALANCE POTENCIA 2

3.4.3 Área disponible para paneles PV

La restricción en (35) involucra que el área a utilizar para implementación de paneles solares fotovoltaicos no debe sobrepasar el límite de superficie disponible para paneles solares. En este caso, el límite es el área útil de canales de agua en las fincas camaroneras en los cuales se utiliza paneles solares flotantes para optimizar el espacio disponible.

$$\sum_{np \in \text{no}_{PV}} (\text{pv. area}) (np) (x_{PV[pv][np]}) \leq S_{\text{max}} \quad (35)$$

Ecuación 35 AREA DISPONIBLE PARA PANELES PV

3.4.4 Selección número de paneles

La restricción en (36) indica que se debe seleccionar solamente un determinado número entero de paneles solares, es decir, si es necesario que el sistema híbrido contenga paneles solares, entonces debe seleccionarse un solo número entero de paneles, por ejemplo, 25 paneles solares. Esta restricción está declarada como selección binaria, pero representa la acción de escoger un número entero de una lista predeterminada. Esto se realiza de esta forma porque la potencia total de los paneles dependería de la multiplicación de dos variables: el número de paneles, y la potencia de los paneles. Entonces, se linealiza el producto de dos variables como un producto de una variable binaria y una variable continua, para la cual existen restricciones auxiliares adicionales y se puede resolver en MILP.

$$\sum_{np \in \text{no}_{PV}} x_{PV[pv][np]} \leq 1 \quad (36)$$

Ecuación 36 SELECCION NUMERO DE PANALES

3.4.5 Límite de potencia por panel

La restricción (37) representa una producción solar fotovoltaica (generada) limitada por la potencia obtenida de la irradiación disponible.

$$P_{pv}[td] \leq P_{pv}[td] \quad (37)$$

Ecuación 37 LIMITE DE POTENCIA POR PANEL

3.4.6 Restricciones auxiliares para linealización

Las restricciones (38) a (41) representan las restricciones auxiliares para la linealización de las restricciones no lineales de los productos de variables enteras y flotantes para los paneles solares fotovoltaicos. La restricción (38) indica que la potencia total fotovoltaica debe permanecer menor o igual a la potencia disponible por radiación solar considerando el número de paneles solares. En la restricción (40) la idea de la restricción (38) se complementa al tener una forma matemática de ubicar valores fortuitos en caso de no tener potencia disponible en algún intervalo de tiempo o no escoger paneles solares,

es decir, asigna valores aleatorios que permiten cumplir con una relación matemática sin comprometer la convergencia de la optimización.

$$P_{nb_PV}[td] \leq \sum_{np \in \text{no_PV}} P_{pv}[td] * np * x_{PV}[pv][np] \quad (38)$$

Ecuación 38 RESTRICCIÓN 1

$$P_{nb_PV}[td] \geq 0 \quad (39)$$

Ecuación 39 RESTRICCIÓN 2

$$P_{pv}[td] - P_{nb_PV}[td] \leq \sum_{np \in \text{no_PV}} P_{pv}[td] * np * (1 - x_{PV}[pv][np]) \quad (40)$$

Ecuación 40 RESTRICCIÓN 3

$$P_{nb_PV}[td] - P_{pv}[td] \geq 0 \quad (41)$$

Ecuación 41 RESTRICCIÓN 4

El problema de optimización para el sistema híbrido energético con paneles solares, almacenamiento de energía por baterías, grupo electrógeno y alimentación de red eléctrica puede plantearse como en (42).

$$\begin{aligned} & \min_{n_{PV}, n_{INV}, n_{XFRMR}, n_{BATT}} \quad (1) & (42) \\ & \text{subject to (2) to (13)} \\ & \quad (14) \text{ to (18) (equivalencias)} \\ & \quad (33) \text{ to (41) (sistema híbrido)} \\ & \quad (32) \text{ (demanda)} \end{aligned}$$

Ecuación 42 OPTIMIZACION SISTEMA HIBRIDO

CAPITULO 4

4.1 Resultados

En esta sección se presentan los resultados para las configuraciones del sistema híbrido energético descrito anteriormente por sus modelos de optimización matemática. Estos resultados fueron evaluados para una camaronera de 100 Ha. El período de vida útil del proyecto es de 10 años en todos los casos.

Tabla 3 Parámetros de financiamiento

Parámetros	Valores
Tasa de interés anual	7%
Tasa de inflación anual	3%

4.2 Sistema alimentado por grupo electrógeno

El problema de optimización a resolver es el descrito en (25). Los parámetros utilizados en este problema de optimización se muestran en la Tabla 2. El período de vida útil del proyecto es de 10 años.

Tabla 4 Parámetros para grupo electrógeno

Parámetros	Valores
Costo Instalación generador (\$ 275.000 en 10 años)	\$ 27,500
Costo Fijo anual	\$ 2,500
Costo Variable anual	\$ 500
Costo Combustible (USD/gal)	\$ 3.58
Potencia Max generada (kW)	1000 kW
Relación Potencia/ Combustible (kW/gal)	20 kW/gal
Kg de emisión / galón de combustible	0.05 kg/gal
USD penalización por kg de emisión	\$ 3.5/kg
Potencia máxima de demanda eléctrica	935.12 kW

El perfil de demanda eléctrica (kW) de un día de trabajo típico para esta configuración es la siguiente.

[748.09, 748.09, 748.09, 187.024, 93.512, 748.0, 748.09]

Habiendo configurado los parámetros en el problema de optimización, se determina que el costo total en 10 años de un sistema alimentado por grupo electrógeno para la demanda eléctrica considerada es de **\$9,391,071.48** Los resultados óptimos de esta configuración se expanden como sigue.

Tabla 5 Resultados anuales para grupo electrógeno

Año	Costos de inversión	Costos fijos	Costos variables
1	\$ 56.925,00	\$ 2.575,00	\$ 515,00
2	\$ 42.710,00	\$ 2.652,30	\$ 530,50
3	\$ 37.978,90	\$ 2.731,80	\$ 546,40
4	\$ 35.618,80	\$ 2.813,80	\$ 562,80
5	\$ 34.207,00	\$ 2.898,20	\$ 579,60
6	\$ 33.269,40	\$ 2.985,10	\$ 597,00
7	\$ 32.602,70	\$ 3.074,70	\$ 614,90
8	\$ 32.105,40	\$ 3.166,90	\$ 633,40
9	\$ 31.720,90	\$ 3.261,90	\$ 652,40
10	\$ 31.415,40	\$ 3.359,80	\$ 672,00
Totales	\$368.553,50	\$29.519,50	\$5.904,00

El consumo de combustible en galones para cada periodo del día es el siguiente,

[37.4048 37.4048 9.3512 4.6756 37.4048 37.4048]

El costo total de combustible es \$ 856,900

El costo ambiental por emisiones de combustible es \$ 41,812

4.3 Sistema alimentado red eléctrica

El problema de optimización a resolver es el descrito en (31). Los parámetros utilizados en este problema de optimización se muestran en la Tabla 3.

Tabla 6 Parámetros para red eléctrica

Parámetros	Valores
Costo instalación/km (línea 69kV)	\$ 65,000
Costo fijo/km (línea 69kV)	\$ 1,000
Costo variable/km (línea 69kV)	\$ 2,500
Costo subestación (69kV/13.8kV/220V)	\$1,000,000
Capacidad subestación (kW)	1000 kW
Costo energía eléctrica	\$ 0.061
Longitud de línea media tensión promedio (km)	5 km
Potencia requerida subestación (kW)	935.12 kW

El perfil de demanda eléctrica (kW) de un día de trabajo típico para esta configuración es la siguiente.

[748.09, 748.09, 748.09, 187.024, 93.512, 748.0, 748.09]

Habiendo configurado los parámetros en el problema de optimización, se determina que el costo total en 10 años de un sistema alimentado por grupo electrógeno para la demanda eléctrica considerada es de **\$5,308,050.90**. Los resultados óptimos de esta configuración se expanden como sigue.

Tabla 7 Resultados anuales para grupo electrógeno

Año	Costos de inversión	Costos fijos	Costos variables
1	\$ 274.275,00	\$ 515,00	\$ 12.875,00
2	\$ 205.784,70	\$ 5.304,50	\$ 13.261,30
3	\$ 182.989,30	\$ 5.463,60	\$ 13.659,10
4	\$ 171.617,70	\$ 5.627,50	\$ 14.068,90
5	\$ 164.815,50	\$ 5.796,40	\$ 14.490,90

6	\$ 160.297,90	\$ 5.970,30	\$ 14.925,70
7	\$ 157.085,80	\$ 6.149,40	\$ 15.373,40
8	\$ 154.689,50	\$ 6.333,90	\$ 15.834,60
9	\$ 152.837,00	\$ 6.523,90	\$ 16.309,70
10	\$ 151.365,00	\$ 6.719,60	\$ 16.799,00
Totales	\$1.775.757,40	\$54.404,10	\$147.597,60

El consumo de es el mismo que el de la demanda,

[748.09, 748.09, 748.09, 187.024, 93.512, 748.0, 748.09]

El costo total por compra de energía eléctrica es \$ 332,570

No existen costos por emisiones de combustible en este problema.

4.4 Sistema híbrido energético completo

Para la optimización del sistema híbrido energético completo se consideran los siguientes parámetros. Para los parámetros del panel solar fotovoltaico se consideran los parámetros mostrados en la tabla siguiente.

Tabla 8 Parámetros de panel solar PV

Punto de radiación límite (K_c)	500
Punto de radiación estándar (W/m^2)	1000
Eficiencia nominal del panel	0.16

El área máxima disponible para instalación de paneles solares en la finca camaronera es de 15000 m². El número máximo de paneles posibles que se consideran en el problema es de 2000 unidades. Los parámetros de costo para el inversor tipo, transformador tipo, panel PV y batería para almacenamiento de energía se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 9 Parámetros de inversor, transformador, panel PV, y batería

	Inversor	Transformador	Panel PV	Batería
Costo equipo	\$ 2,000	\$ 35,000	\$ 800	\$ 2,500
Costo fijo	\$ 960	\$ 1,800	\$ 10	\$ 1,000
Costo variable	\$ 1,800	\$ 15,000	\$ 150	\$ 1,500
Capacidad (kW)	0.3	1500	0.66	5 kWh

El panel solar considerado tiene una superficie de 3.2 m² por panel fotovoltaico. La eficiencia nominal del panel es de 0.16 y es utilizada para calcular la energía disponible con respecto a la radiación solar disponible como energía renovable solar. Adicionalmente se definen los parámetros operativos de la batería considerada para el sistema de almacenamiento. Estos parámetros incluyen eficiencia de carga, eficiencia de descarga, potencia máxima de carga, potencia máxima de descarga, energía mínima y energía máxima de operación.

Tabla 10 Parámetros adicionales de baterías

Eficiencia de descarga y carga	0.9, 0.8
Energía inicial de batería	0.95
P _{maxch} (kW), P _{maxdch} (kW)	10, 15
E _{min} (p.u.), E _{max} (p.u.)	0.15, 0.95

Finalmente, los datos de irradiación en la zona del litoral ecuatoriano donde se ha considerado que se ubica la finca camaronera han sido obtenidos de DATA ACCESS VIEWER de la página de la NASA.

[0, 500, 700, 750, 650, 0] en W/m²

La localización exacta de la finca camaronera no puede ser compartido en este trabajo por confidencialidad. Sin embargo, los datos presentados son representativos de la zona del litoral ecuatoriano, de forma que podrían ser utilizados en otros sitios como aproximación inicial.

En la optimización del sistema híbrido energético se consideran los siguientes escenarios de optimización.

- Escenario 1, conexión con red eléctrica, combustible sin subsidio, red eléctrica con incentivo.
- Escenario 2, modo isla. Sin conexión a red eléctrica

4.4.1 Escenario 1 con red eléctrica

En este escenario, el sistema no es autónomo, sino que funciona conectado a la red eléctrica. El costo de la energía eléctrica considerado es de \$ 3.5/kWh. La tabla adjunta se muestran los valores de los parámetros ingresados en el análisis de optimización.

Tabla 11 Escenario 1 sistema híbrido con red eléctrica

Parámetros	Valores
Costo Combustible (USD/gl)	\$ 3.5865
Potencia Max generador (kW)	50 kW
Kg de emisión / galón de combustible	0.05 kg/gl
USD penalización por kg de emisión	\$ 3.5/kg
Costo energía eléctrica	\$3.5 USD/kWh

Como solución óptima se obtuvo un total de, 644 paneles, 23 inversores, 1 transformadores y un total de 49 baterías para almacenamiento de energía.

El balance de potencia diaria (6 intervalos de tiempo de 4 horas cada uno) se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 12 Balance de potencia escenario 1 sistema híbrido

Perfil de demanda (p.u.)	Red Eléctrica (kW)	Grupo Electrónico (kW)	Baterías (kW)	PV (kW)	TOTAL (kW)
0.8	690.58	50	7.51	0	748.09
0.8	701.59	50	-37.5	34	748.09
0.2	51.91	50	37.5	47.6	187.02
0.1	0.02	50	-7.51	51	93.51

0.8	653.89	50	0	44.20	748.09
0.8	0	13.09	735	0	748.09

En este escenario se obtiene un costo óptimo total de **\$ 119,588,215.54**. Los resultados óptimos de esta configuración se expanden como sigue.

Tabla 13 Flujo económico de escenario 1 sistema híbrido

Año	Costos de inversión	Costos fijos	Costos variables
1	\$ 1.487.709,00	\$ 81.699,60	\$ 23.329,50
2	\$ 1.116.207,07	\$ 84.150,59	\$ 24.029,39
3	\$ 992.561,83	\$ 86.675,11	\$ 24.750,27
4	\$ 930.880,45	\$ 89.275,36	\$ 25.492,77
5	\$ 893.984,24	\$ 91.953,62	\$ 26.257,56
6	\$ 869.480,24	\$ 94.712,23	\$ 27.045,28
7	\$ 852.057,10	\$ 97.553,60	\$ 27.856,64
8	\$ 839.059,08	\$ 100.480,20	\$ 28.692,34
9	\$ 829.010,73	\$ 103.494,61	\$ 29.553,11
10	\$ 821.026,71	\$ 106.599,45	\$ 30.439,71
Totales	\$ 9.631.976,45	\$ 936.594,35	\$ 267.446,57

El costo de la energía anual eléctrica es de **\$ 10,803,000** En este escenario, no sería necesario instalar baterías para almacenamiento de energía salvo que por confiabilidad se necesite tener un respaldo en caso de desconexión no programada en la red eléctrica. La razón es que las baterías se cargan con la misma energía de la red eléctrica, de forma que además de suplir la carga, la red eléctrica debe mantener cargadas las baterías. En la Tabla 11 se muestra que al final del día, la batería tiene una descarga de 735 kW, pero esta energía tiene que ser recuperada nuevamente durante el siguiente día, de forma que el costo de energía eléctrica aumenta por la carga de las baterías. Si se impusiera una restricción de que las baterías tienen finalizar el día con la misma carga con la

que empezaron, entonces el sistema no tendría beneficio de invertir en sistema de almacenamiento por baterías salvo que en el objetivo de optimización se tuviera una penalización por corte imprevisto de energía eléctrica y también se modelara la probabilidad de desconexión imprevista de acuerdo con los datos de confiabilidad de la red eléctrica.

4.4.2 Escenario 2 modo autónomo (isla) con subsidio

En este escenario, el sistema es autónomo, es decir no funciona conectado a la red eléctrica. Aunque los usuarios optarían por poner sólo grupo electrógeno, tendrían un gasto de penalización por uso excesivo de combustible por liberación de emisiones al medioambiente. Por esta razón se verían incentivados a complementar su sistema con paneles solares fotovoltaicos. La tabla adjunta se muestran los valores de los parámetros ingresados en el análisis de optimización. En la tabla adjunta se muestran los valores de los parámetros ingresados en el análisis de optimización.

Tabla 14 Escenario 2 sistema híbrido autónomo con subsidio

Parámetros	Valores
Costo combustible (USD/gl)	\$3.5865
Potencia máxima generada (kW)	720 kW
Kg de emisión / galón de combustible	0.05 kg/gl
USD penalización por kg de emisión	\$ 3.5/kg

Finalmente, los datos de irradiación en la zona del litoral ecuatoriano donde se ha considerado que se ubica la finca camaronera han sido obtenidos de DATA ACCESS VIEWER de la página de la NASA.

[0, 500, 700, 750, 650, 0] en W/m²

Al igual que lo expresado en el inicio del capítulo, la localización exacta de la finca camaronera no puede ser compartido en este trabajo por confidencialidad. Sin embargo, los datos presentados son representativos de la zona del litoral ecuatoriano, de forma que podrían ser utilizados en otros sitios como aproximación inicial.

Como solución óptima se obtuvo un total de, 411 paneles, 15 inversores, 1 transformador, y 140 baterías. El balance de potencia en los 6 intervalos de tiempo en el período de un día típico de trabajo quedó con la disposición mostrada abajo.

Tabla 15 Resultados escenario 2 sistema híbrido autónomo con subsidio

Perfil de carga (p.u.)	Red Eléctrica	Grupo Electrónico	Baterías	Paneles	TOTAL (kW)
0.8	0	720	28.09	0	748.09
0.8	0	719.95	6.43	21.70	748.09
0.2	0	156.64	0	30.38	187.02
0.1	0	95.49	-34.53	32.55	93.51
0.8	0	719.88	0	28.21	748.09
0.8	0	0	748.09	0	748.09

El costo total del proyecto en el período de vida útil de 10 años es de **\$19,676,255.91** Los resultados óptimos de esta configuración se expanden como sigue.

Tabla 16 Flujo económico de escenario 2 sistema híbrido aislado con subsidio

Año	Costos de inversión	Costos fijos	Costos variables
1	\$ 1.539.666,00	\$ 165.119,30	\$ 32.305,95
2	\$ 1.155.189,67	\$ 170.072,88	\$ 33.275,13
3	\$ 1.027.226,23	\$ 175.175,07	\$ 34.273,38
4	\$ 963.390,67	\$ 180.430,32	\$ 35.301,58
5	\$ 925.205,90	\$ 185.843,23	\$ 36.360,63
6	\$ 899.846,12	\$ 191.418,52	\$ 37.451,45
7	\$ 881.814,48	\$ 197.161,08	\$ 38.574,99
8	\$ 868.362,52	\$ 203.075,91	\$ 39.732,24
9	\$ 857.963,24	\$ 209.168,19	\$ 40.924,21
10	\$ 849.700,39	\$ 215.443,23	\$ 42.151,94
Totales	\$ 9.968.365,22	\$ 1.892.907,73	\$ 370.351,51

El costo anual de combustible es de \$68,882, mientras que el costo anual de penalización por emisiones medioambientales por uso de energía fósil es de \$3,361.1. Al igual que en el escenario 1, el sistema de almacenamiento por baterías no tiene un aporte significativo sino en el último intervalo de tiempo. En este intervalo, la potencia de descarga alcanza los 748.09 kW sin dejar a la batería por debajo de su límite de energía mínimo. Sin embargo, esta energía tiene que ser recuperada del grupo electrógeno al siguiente día, de forma que los costos de energía se incrementan por un porcentaje correspondiente a los 748.09 kW. El problema de optimización puede incluir una restricción de forma que la energía del almacenamiento de energía al principio del día sea igual al final del día, de forma que el sistema de almacenamiento asegure su período de carga y descarga diario. En este contexto, se ha observado que el sistema de almacenamiento no es requerido sino se utiliza un incentivo adicional que le permita a sus costos competir con el costo de producción de energía por combustible fósil o por uso de energía eléctrica de la red de la empresa eléctrica. En general, en países como el Ecuador donde la energía hidroeléctrica es relativamente económica, es el precio de la energía eléctrica es tal que los costos de otras tecnologías no son competitivos sin tener un esquema de incentivos apropiado. Esto ha sido también demostrado en las optimizaciones realizadas en los escenarios 1 y 2.

CAPITULO 5

5.1 CONCLUSIONES

Este trabajo ha contribuido a explorar el largo debate acerca de la viabilidad en la migración hacia fuentes de energía renovable basados en sistema fotovoltaicos en las fincas camaroneras del litoral ecuatoriano. El modelo que se ha propuesto ha descrito la operación energética de los componentes y los parámetros de costos de soluciones comerciales disponibles en el mercado ecuatoriano. En complemento a los paneles solares fotovoltaicos se propone también la utilización de almacenamiento de energía por baterías considerando un modelo de carga típico de finca camaronera. Este modelo típico de demanda tiene demanda pico durante la noche y madrugada, mientras que la demanda durante el día es baja. La demanda máxima se origina por la operación continua de los aireadores durante la noche mientras en el día la demanda de aireadores es baja. El sistema propuesto se ha denominado sistema híbrido energético y constituye la combinación de varias fuentes energéticas, paneles fotovoltaicos como energía renovable, almacenamiento de energía por medio de baterías, grupo electrógeno alimentado por diésel, y alimentación por red eléctrica en casos donde esté disponible alimentación por medio de líneas de media tensión o subtransmisión. Dada la operación de la finca camaronera, es posible tener paneles fotovoltaicos alimentando la demanda y almacenando el exceso de energía solar en las baterías durante el día, y poder tener disponible la energía almacenada durante la noche donde ocurre la demanda máxima.

El sistema híbrido energético ha sido modelado con ecuaciones matemáticas lineales de forma que se ha propuesto el diseño y dimensionamiento de un sistema híbrido energético como un problema de optimización de enteros lineales mixtos (Mixed Integer Linear Programming) que ha sido resuelto por medio de CPLEX Optimization Studio 12.9.0 versión académica. Este problema resuelve para la cantidad de elementos y la potencia de operación de un día típico de trabajo de finca camaronera. Adicionalmente se minimizan los costos de inversión, operación y mantenimiento en todo el horizonte de vida útil que ha sido propuesto de 10 años para el sistema híbrido energético. El problema de

optimización permite encontrar una solución global óptima que se ajuste a las restricciones operativas de cada componente según las especificaciones técnicas de los elementos disponibles comercialmente en el ambiente ecuatoriano. La idea es que, al tener un sistema híbrido energético, se aumente la confiabilidad y la eficiencia energética en el consumo de energía en el sector productivo camaronero.

En este contexto, los resultados han demostrado que la mejor opción es conectarse a la red eléctrica y ser abastecido por la red eléctrica debido a su bajo costo por kWh. Esto puede explicarse en el sentido de que el costo de la energía eléctrica en Ecuador (mayormente hidroeléctrica) es mucho más competitivo que los costos de otros componentes para el sistema híbrido energético. En segundo lugar, la opción de grupos electrógenos es una mejor opción en caso de que el sistema se encuentre en isla o no se tenga acceso a la red eléctrica pública. En esta opción se tiene un sistema autónomo consumiendo combustible fósil, el cual es la segunda fuente de energía más económica después de la eléctrica de la red pública. En este sentido, se ha encontrado que aún sin el subsidio a los combustibles, esta fuente de energía es más económica que la energía renovable. Entonces, es necesario contar con un sistema de subsidios o incentivos para permitir que los productores camaroneros puedan invertir en sistemas híbridos, es decir, que vean los beneficios y ventajas económicas claras para desplegar la tecnología. En todo caso, sería necesario también tener un sistema de penalización para las emisiones medioambientales asociada a la tarifa eléctrica, de forma que se genere un incentivo al ahorro y a la migración a tecnologías basadas en energías renovables.

En la implementación de tales sistemas, este trabajo pone en consideración el cambio en la matriz energética de las camaroneras con la implementación de paneles fotovoltaicos flotantes en los canales de reservorio de estas, para tener un mejor aprovechamiento de los canales en caso de no poseer el terreno suficiente para la implementación del sistema fotovoltaico. Esta tecnología existe y puede ser una alternativa viable en ambientes acuícolas. A continuación, se resumen los puntos más importantes encontrados en este trabajo.

- La recolección de datos mediante la medición troncal ha sido de gran ayuda para encontrar el perfil de demanda de una finca camaronera y tener una caracterización precisa del consumo de energía en la producción típica durante un día representativo.
- Una comprensión detallada de la distribución radial de las estaciones de bombeo y los equipos de aireación ha sido posible gracias al modelamiento equivalente de la red eléctrica. Con el fin de establecer una base sólida para la planificación y la expansión de la infraestructura eléctrica en el futuro, este modelo ha sido fundamental para anticipar el aumento de la demanda en la camaronera.
- Para evaluar el impacto de diversas combinaciones de energías no convencionales y energía renovable, se ha demostrado que el desarrollo de un modelo energético muestra grandes posibilidades para combinar fuentes de energía renovable, reducir la dependencia de fuentes de energía tradicionales y maximizar el uso de recursos. Todo esto siempre y cuando existan los subsidios e incentivos para hacer que las nuevas tecnologías sean competitivas.
- Por otro lado, se han encontrado soluciones óptimas para la administración y distribución de energía en la camaronera mediante el uso de métodos de optimización que combinan los modelos energéticos creados. Este método basado en optimización ha asegurado que las decisiones tomadas tengan como objetivo maximizar la eficiencia energética y reducir los costos operativos y de mantenimiento.
- Debido al comportamiento de la carga en el cual la demanda más alta ocurre durante la noche mientras que en el día solo trabajan los servicios generales, no es significativo o ventajoso económicamente viable migrar a un sistema basado en fotovoltaico en las condiciones actuales de costo de energías en el Ecuador.
- El alto costo de las baterías actualmente deja el almacenamiento de energía como una opción no competitiva frente al precio de los combustibles fósiles o la tarifa de red eléctrica los cuales son mucho más baratos y accesibles como tecnología madura en sistemas industriales.

- De forma general, se debe considerar como fuente principal o primera opción de energía la red eléctrica pública debido a su bajo valor de kWh. Sin embargo, es posible que esta opción no pueda darse por la falta de electrificación de las zonas en el Ecuador.
- En caso de utilizar el modelo autónomo o isla y no tener acceso a la red pública, la energía fotovoltaica es una muy buena opción siempre y cuando el sistema a ser alimentado trabaje durante el día, en caso contrario se debe considerar otra fuente de energía de respaldo como grupo electrógeno.
- Finalmente, enfatizando los beneficios económicos y ambientales de invertir en generación PV, la investigación ha brindado una guía clara y detallada para los camaroneros del litoral ecuatoriano. Se ha demostrado que los beneficios incluyen una mayor estabilidad energética lo cual contribuye al desarrollo sostenible del sector camaronero.

5.2 RECOMENDACIONES

- El diseño y dimensionamiento basado en optimización puede considerarse también en una industria en donde su pico de carga sea durante el día para aprovechar al máximo la potencia generada por los paneles fotovoltaicos. De otra forma, es necesario incluir modelos de confiabilidad de la red eléctrica por medio de la disponibilidad de la red eléctrica y datos de tasas de falla para justificar la inversión en nueva tecnología y no incurrir en pérdidas millonarias por interrupción de procesos productivos.
- Si se desea migrar a un sistema basado en energía fotovoltaica, se debe considerar otra fuente de energía en caso de días de baja radiación solar para poder suplir la carga faltante y cargar las baterías en el caso de utilización de almacenamiento de energía. La fuente más económica es el grupo electrógeno, sin embargo, mientras no exista una política de penalización por emisiones no va a ser atractivo invertir en nuevas tecnologías. Se recomienda generar una política de penalización por emisiones que permita a los usuarios invertir progresivamente en

tecnología sin tener el problema de altos costos de producción que deje su producto sin competitividad en el mercado.

- El modelo linealizado ha permitido generar una optimización de enteros mixtos lineal. Sin embargo, existen otros procesos que pueden ser detallados y no necesariamente sean lineales, de forma que se recomienda extender el estudio a un detalle mayor. Se recomienda también incrementar los intervalos de tiempo para tener una precisión más alta en el consumo de tiempo, es decir, utilizar intervalos de tiempo más pequeños.

REFERENCIAS

- [1] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, and W. D'haeseleer, "Distributed generation: definition, benefits and issues," *Energy Policy*, vol. 33, no. 6, pp. 787–798, Apr. 2005, doi: 10.1016/j.enpol.2003.10.004.
- [2] Á. N. Gonzabay-Crespin, H. A. Vite-Cevallos, V. J. Garzón-Montealegre, and P. F. Quizhpe-Cordero, "Analysis of shrimp production in Ecuador for export to the European Union in the 2015-2020 period," vol. 6, no. 9, 2021.
- [3] L. Herrera, G. Solorzano, N. Pozo, and M. Pozo, "A Photovoltaic Renewable Energy as an Alternative to the Conventional Diesel System to Pump Water in Shrimp Farms of Ecuador," in *2018 International Conference on Information Systems and Computer Science (INCISCOS)*, Quito, Ecuador: IEEE, Nov. 2018, pp. 143–149. doi: 10.1109/INCISCOS.2018.00028.
- [4] J.-P. Pesantez, A. Ríos-Villacorta, and J. González-Redrován, "Integración de Sistemas Solares Fotovoltaicos en el Sector Camaronero Intensivo y Extensivo del Ecuador: Caso de Estudio en la Provincia de El Oro," *Rev. Politécnica*, vol. 47, no. 2, pp. 7–16, Apr. 2021, doi: 10.33333/rp.vol47n2.01.
- [5] J. Sarmiento-Carrillo, J. E. Torres, and M. A. Torres, "PROPOSAL OF AN ELECTRIC TECHNICAL MODEL FOR THE IMPROVEMENT OF EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY IN SHRIMP PRODUCTION," in *CIREDE 2021 - The 26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, , Online Conference: Institution of Engineering and Technology, 2021, pp. 2334–2338. doi: 10.1049/icp.2021.1903.
- [6] A. Askarzadeh, "Distribution generation by photovoltaic and diesel generator systems: Energy management and size optimization by a new approach for a stand-alone application," *Energy*, vol. 122, pp. 542–551, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.01.105.
- [7] N. T. Nguyen and R. Matsushashi, "An Optimal Design on Sustainable Energy Systems for Shrimp Farms," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 165543–165558, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2952923.
- [8] T. Cao, "ASC Certification and Accreditation Requirements (CAR)".
- [9] "PUNTO VERDE – Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica." Accessed: Aug. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.ambiente.gob.ec/punto-verde-sector-productivo-y-de-servicios/>
- [10] "What is SSP," SSP. Accessed: Aug. 12, 2024. [Online]. Available: <https://sustainableshrimppartnership.org/what-is-ssp/>

- [11] “BAP - Best Aquaculture Practices,” Peru. Accessed: Aug. 12, 2024. [Online]. Available: <https://peru.controlunion.com/es/programas-de-certificacion/bap-best-aquaculture-practices>
- [12] G. Certification, “Certificación ISO 9001 - Sistemas de Gestión de Calidad,” Global Standards. Accessed: Aug. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.globalstd.com/certificacion/global-gap>
- [13] W. D. Kellogg, M. H. Nehrir, G. Venkataramanan, and V. Gerez, “Generation unit sizing and cost analysis for stand-alone wind, photovoltaic, and hybrid wind/PV systems,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 13, no. 1, pp. 70–75, Mar. 1998, doi: 10.1109/60.658206.
- [14] L. Hernández-Callejo, S. Gallardo-Saavedra, and V. Alonso-Gómez, “A review of photovoltaic systems: Design, operation and maintenance,” *Sol. Energy*, vol. 188, pp. 426–440, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.06.017.
- [15] P. Derewonko and J. M. Pearce, “Optimizing design of household scale hybrid solar photovoltaic + combined heat and power systems for Ontario,” in *2009 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Philadelphia, PA, USA: IEEE, Jun. 2009, pp. 001274–001279. doi: 10.1109/PVSC.2009.5411247.
- [16] T. Khatib, A. Mohamed, and K. Sopian, “A review of photovoltaic systems size optimization techniques,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 22, pp. 454–465, Jun. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.02.023.
- [17] “guia_manejo_camaroneras.pdf.”
- [18] B. Hu, Y. Gu, S. Liu, T. Wang, F. Qu, and P. Li, “Evaluation for distributed photovoltaic generation system efficiency,” in *2017 2nd International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*, Chengdu: IEEE, Sep. 2017, pp. 839–844. doi: 10.1109/ICPRE.2017.8390652.
- [19] A. Kumar, M. Rizwan, and U. Nangia, “Optimal Sizing of Renewable Energy Resources in a Microgrid for a Distributed Generation System,” in *2019 International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISAECT)*, Rome, Italy: IEEE, Nov. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/ISAECT47714.2019.9069731.
- [20] R. Cazzaniga and M. Rosa-Clot, “The booming of floating PV,” *Sol. Energy*, vol. 219, pp. 3–10, May 2021, doi: 10.1016/j.solener.2020.09.057.
- [21] S. Gorjian, H. Sharon, H. Ebadi, K. Kant, F. B. Scavo, and G. M. Tina, “Recent technical advancements, economics and environmental impacts of floating photovoltaic solar energy conversion systems,” *J. Clean. Prod.*, vol. 278, p. 124285, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124285.

- [22] J. Chen *et al.*, “Design of a 10kW Rural Residential Roof Photovoltaic Power Generation System,” in *2022 4th International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing (ICMSP)*, Hangzhou, China: IEEE, Jul. 2022, pp. 289–292. doi: 10.1109/ICMSP55950.2022.9859138.
- [23] L. Wang, S. Xu, Y. Gong, J. Ning, X. Zhang, and Y. Zhao, “High resolution photovoltaic power generation potential assessments of rooftop in China,” *Energy Rep.*, vol. 8, pp. 14545–14553, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.10.396.
- [24] “NSRDB.” Accessed: Aug. 12, 2024. [Online]. Available: <https://nsrdb.nrel.gov/>
- [25] “cg00041.pdf.” Accessed: Aug. 12, 2024. [Online]. Available: <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00041.pdf>
- [26] “Trámites y servicios | Ecuador - Guía Oficial de Trámites y Servicios.” Accessed: Aug. 12, 2024. [Online]. Available: https://www.gob.ec/tramites/buscar?search_api_fulltext=hidrolog%C3%A1Da
- [27] “POWER | DAV.” Accessed: Aug. 12, 2024. [Online]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- [28] “Estadísticas - Cámara Nacional de Acuicultura.” Accessed: Aug. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.cna-ecuador.com/estadisticas/>
- [29] T. T. E. Vo, H. Ko, J.-H. Huh, and N. Park, “Overview of Solar Energy for Aquaculture: The Potential and Future Trends,” *Energies*, vol. 14, no. 21, p. 6923, Oct. 2021, doi: 10.3390/en14216923.
- [30] N. N. Tien, V. T. T. B. Chau, and P. V. Hoan, “Optimal microgrid design and operation for sustainable shrimp farming,” presented at the INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIOMEDICAL ENGINEERING (ICoBE 2021), Perlis, Malaysia, 2023, p. 070005. doi: 10.1063/5.0110433.
- [31] A. A. Recalde and M. S. Alvarez-Alvarado, “Design optimization for reliability improvement in microgrids with wind – tidal – photovoltaic generation,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 188, p. 106540, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106540.