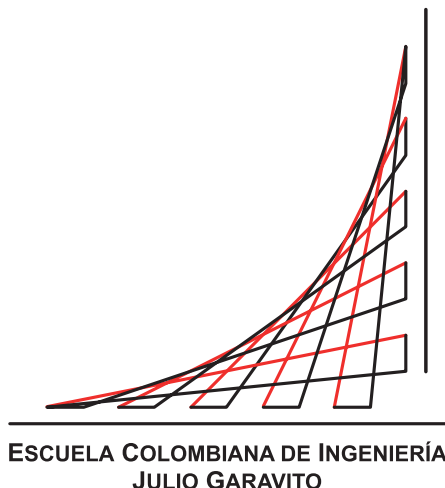


Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito  
Maestría en Ingeniería Eléctrica



# Planificación energética ISO 50001 en una granja piscícola continental

Autor:

Javier Humberto Narváez Cuenca

Director:

Iván Camilo Durán Tovar

Bogotá D.C, Colombia

Mayo 14, 2021



Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito  
Maestría en Ingeniería Eléctrica

# Planificación energética ISO 50001 en una granja piscícola continental

**Javier Humberto Narváez Cuenca**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Magíster en Ingeniería Eléctrica**

con énfasis en:

**Recursos energéticos**

Director:

Iván Camilo Durán Tovar, (PhD, MsC)

Grupo de Investigación:

Modelación Estratégica de Energía y Potencia

Bogotá D.C, Colombia

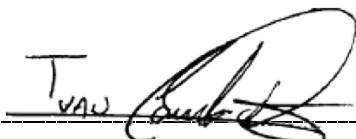
Mayo 14, 2021



# Aceptación del Jurado

---

El Trabajo de grado de Maestría titulado **Planificación energética ISO 50001 en una granja piscícola continental**, presentado por **Javier Humberto Narváez Cuenca**, cumple con los requisitos establecidos por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito para optar al título de Magister en Ingeniería Eléctrica con énfasis en recursos energéticos.



Director: Iván Camilo Durán Tovar, (PhD, Msc).

DocuSigned by:



F0FB66A75A654A5...

Jurado: Francisco Javier Andrade Rodríguez, (MSc.)



Jurado: Daniel José González Trisancho, (MSc.)

Bogotá D.C, Colombia  
Septiembre 09, 2021



*Dedico el interés, esfuerzo y cariño que invertí en este trabajo de grado, a todos los animales de cultivo que deben sacrificar sus vidas enteras para alimentar la raza humana.*





# Agradecimientos

---

Agradezco a las personas que me brindaron su apoyo para alcanzar este logro que me llena de satisfacción: la ingeniera Paula Ríos, no solamente por sus excelentes recomendaciones en cuanto a la planeación programática de la maestría, sino que sus palabras me motivaron en momentos oportunos; ingeniero Iván Camilo Durán, por su paciencia, experiencia y dedicación en la dirección del trabajo de grado; Agustín por sus observaciones eficaces para enfocar el camino a seguir en el trabajo de grado; todos y cada uno de los profesores que me dieron clases; ingenieros Hugo Iván Forero, Javier Ruiz, Daniel González, ingeniera Emmy Ruiz, porque da seguridad luchar por un título de tamaño exigencia, cuando se siente el respaldo de un equipo técnico y humano tan valioso; a todos y cada uno de los compañeros con los que compartí clases, por la ayuda mutua; Éder, Juan, Daniel, Andrea; mi amigo Oswaldo Castillo, por darme ánimo siempre; todos y cada uno de los integrantes de la gran familia Escuela Colombiana de Ingeniería, incluyendo a Johanna Hurtado por su cordialidad y preseteza; mi amigo Carlos Polanía por poner a disposición la dinámica de San Francisco Fish, y claro está, a Vicente por sus ayudas con las mediciones en la piscícola y su aguante a la preguntadera; doña Cecilia por sus atenciones y hospitalidad durante mi estancia en Bogotá; ingeniero Gustavo Zúñiga, porque gracias a él pude sobrellevar la exigencia académica con la exigencia laboral; y por supuesto, las personas que siempre me brindan soporte espiritual; mi esposa Belén, mi hija Isa, mi hijo David, mi hermana Chía, mi hermano Andrés con Antone-lla, Mamá y Papá, mis sobrinos y sobrinas: Dani, Marti, Nico y Juan. Bendiciones y gracias totales.



# Resumen

---

La acuicultura es una alternativa de importancia mundial para garantizar la seguridad alimentaria, mientras contribuye a reducir la pesca excesiva en mares y ríos. La piscicultura continental se lleva a cabo en estanques artificiales normalmente construidos en zonas rurales. En este tipo de piscicultura, la renovación del agua es restringida por razones de tipo ambiental, para evitar que las sustancias tóxicas producidas por la degradación de los alimentos y los desechos biológicos de los peces, lleguen a los ríos. Debido a estas condiciones de estanqueidad, se utiliza aireación mecánica con motores eléctricos, principalmente para mantener los estanques en niveles de oxígeno requeridos para la crianza sana de los peces. La demanda de energía eléctrica por este uso, representa el segundo mayor costo, después de la alimentación, razón por la cual es necesario mejorar la eficiencia energética de las granjas piscícolas.

La ISO 50001 es la norma internacional que especifica los requisitos para sistemas de gestión de la energía (SGEn), dirigida a organizaciones en general. Su proceso base es la planificación energética, con la que se identifican los usos de la energía y se analizan opciones para mejorar su desempeño. El presente trabajo consiste en el desarrollo de una planificación energética, en la granja piscícola San Francisco Fish SAS, ubicada en el Huila, dedicada a la crianza de la tilapia nilótica. La planificación está enfocada en la caracterización de la demanda de energía durante los ciclos productivos. Incluye la estimación de los ahorros potenciales basados en la reducción de los tiempos de operación de la aireación mecánica. Por otra parte, se hace la evaluación técnica y económica a dos instalaciones fotovoltaicas de diferentes capacidades, en atención al interés que existe en la región por implementar fuentes de energías renovables. El trabajo pretende contribuir a generar alternativas de sistemas de gestión de la energía para las piscícolas, sirviendo como fuente de consulta para la toma de decisiones respecto a planes de acción en materia energética adecuados para esta industria, que permita mejorar la competitividad, en línea con las directrices mundiales de lograr altos estándares de productividad sostenible.



# Abstract

---

Aquaculture is an alternative of global importance to guarantee food security, helping to reduce excessive fishing in seas and rivers. Inland fish farming is carried out in artificial ponds normally built in rural areas. In this type of fish farming, the renewal of the water is restricted for environment issues, to avoid that the toxic substances produced by the degradation of the food and the biological waste of the fish, reach the rivers. Due to these conditions, mechanical aeration with electric motors is needed, mainly to maintain the ponds at the oxygen levels required for healthy fish rearing. The demand for electrical energy for this use represents the second highest cost, after feeding, which is why it is necessary to improve the energy efficiency of fish farms.

ISO 50001 is the international standard that specifies the requirements for energy management systems (EnMS), aimed at organizations in general. Its core process is energy planning, with which energy uses are identified and options are analyzed to improve its performance. The present work consists of the development of an energy planning, in the San Francisco Fish SAS farm, located in Huila, dedicated to the growing of the nilotic tilapia. Planning is focused on energy demand during production cycles. Includes estimation of potential savings based on reduction of mechanical aeration operating times. On the other hand, a technical and economic evaluation is made of two photovoltaic installations of different capacities, in view of the interest that exists in the region to implement renewable energy sources. The work aims to contribute to generating alternatives for energy management systems for fish farms, serving as a source of consultation for decision-making regarding action plans in energy matters appropriate for this industry, which allows improving competitiveness, in line with the global guidelines for achieving high standards of sustainable productivity.



# Contenido

---

Agradecimientos . . . . .	III
Resumen . . . . .	VI
Abstract . . . . .	VIII
Contenido . . . . .	IX
Lista de figuras . . . . .	XII
Lista de tablas . . . . .	XIII
Lista de símbolos . . . . .	XV
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del problema . . . . .	1
1.2. Estado del arte . . . . .	3
1.2.1. Eficiencia y gestión de la energía . . . . .	3
1.2.2. Actualidad de la piscicultura . . . . .	6
1.2.3. Brechas tecnológicas en agricultura . . . . .	9
1.3. Objetivos . . . . .	10
1.3.1. Objetivo general . . . . .	10
1.3.2. Objetivos específicos . . . . .	11
1.4. Organización del documento . . . . .	11
<b>2. Marco teórico</b>	<b>13</b>
2.1. Sistemas de gestión de la energía ISO 50001 . . . . .	13
2.2. Calidad del agua en la piscicultura . . . . .	16
2.3. Factores que influyen en los niveles de OD . . . . .	17
2.4. Dinámica de OD en un estanque . . . . .	19
2.5. Sensores para medición de OD . . . . .	23
2.6. Aireación mecánica (AM) . . . . .	25
2.7. Prueba a aireadores . . . . .	27
2.8. Evaluación fotovoltaica . . . . .	29
2.9. Evaluación económica . . . . .	32

<b>3. Metodología</b>	<b>35</b>
3.1. Liderazgo y contexto de la organización . . . . .	36
3.2. Revisión energética . . . . .	42
3.2.1. Descripción de instalaciones eléctricas . . . . .	42
3.2.2. Uso y consumo de energía en la actualidad . . . . .	43
3.2.3. Consumo de energía en el pasado . . . . .	48
3.2.4. Uso significativo de la energía (USE) . . . . .	49
3.3. IDEn y LBEn . . . . .	51
3.4. Oportunidades de mejoramiento . . . . .	54
3.5. Planeación para la recopilación de datos . . . . .	56
<b>4. Análisis de resultados</b>	<b>59</b>
4.1. Simulación de la variación diaria de OD . . . . .	59
4.2. Ahorros potenciales en aireación mecánica . . . . .	62
4.3. Prueba a aireador tipo splash . . . . .	65
4.4. Evaluación fotovoltaica . . . . .	68
4.4.1. Cálculos preliminares . . . . .	68
4.4.2. Configuración del campo solar . . . . .	69
4.4.3. Resultados obtenidos . . . . .	71
<b>5. Conclusiones</b>	<b>77</b>
5.1. Conclusiones generales . . . . .	77
5.2. Aportes . . . . .	81
5.3. Trabajos futuros . . . . .	81
<b>Referencias</b>	<b>83</b>
<b>6. Anexos</b>	<b>87</b>



# Lista de Figuras

---

1.1. Progreso de certificaciones ISO . . . . .	6
1.2. Evolución de la producción mundial de la pesca de captura . . . . .	7
1.3. Producción acuícola en Colombia 2010 - 2019 . . . . .	8
1.4. Producción acuícola en Colombia 2009 - 2018 . . . . .	10
2.1. Ciclo PHVA en ISO 50001 . . . . .	14
2.2. Esquema de proceso Planificación Energética . . . . .	15
2.3. Esquema de OD en un estanque piscícola. . . . .	20
2.4. Curva de OD para densidades bajas de fitoplancton. . . . .	21
2.5. Sensores para medición OD . . . . .	24
2.7. Curva típica tensión-corriente de una célula fotovoltaica . . . . .	30
2.8. Irradiación global diaria media en Colombia. . . . .	33
2.9. Irradiancia global horizontal mensual en Neiva. . . . .	33
3.1. Planificación energética en SFF. . . . .	36
3.2. Granja piscícola San Francisco Fish (SFF) . . . . .	38
3.3. Actividad de pesca en SFF. . . . .	39
3.4. Criterio para activación de aireación mecánica. . . . .	41
3.5. Transformador de 112.5 kVA y generador diésel de 100 kVA . . . . .	43
3.6. Esquema de las cargas que componen la demanda en SFF . . . . .	44
3.7. Medición de aireación mecánica en SFF . . . . .	46
3.8. Usos de la energía. . . . .	50
3.9. IDEn definidos en ciclo de alevinaje . . . . .	52
3.10.IDEn definidos en ciclo de engorde . . . . .	53
3.11.Línea de base 100 para ciclo de alevinaje . . . . .	54
3.12.Línea de base 100 para ciclo de engorde . . . . .	54
3.13.Medición de OD en SFF . . . . .	55
3.14.Sistemas de medición continua de OD . . . . .	56

4.1. Diagrama de flujo para simulación de OD diario en estanques. . . . .	60
4.2. Dinámica de OD durante un día típico . . . . .	61
4.3. Dinámica de OD durante un día típico . . . . .	62
4.4. Ahorros potenciales . . . . .	65
4.5. Energía en SFF con sistema fotovoltaico, alternativa No 1 . . . . .	73
4.6. Energía en SFF con sistema fotovoltaico, alternativa No 2 . . . . .	73
4.7. Potencias en SFF con sistema fotovoltaico, alternativa No 1 . . . . .	74
4.8. Potencias en SFF con sistema fotovoltaico, alternativa No 2 . . . . .	75

# Lista de tablas

---

1.1.	Principales medidas de EE y sus potenciales en la industria colombiana . . .	4
1.2.	Principales medidas de EE y sus potenciales en fuerza motriz colombiana . .	5
1.3.	Clasificación de acuicultores en Colombia según resolución 1607 de 2019 . . .	7
1.4.	producción piscícola en Colombia . . . . .	8
2.1.	Curva de OD para densidades bajas de fitoplancton. . . . .	22
3.1.	Características de los estanques de SFF. . . . .	40
3.2.	Energía consumida estimada por concepto de iluminación. . . . .	44
3.3.	Estimación de consumo de energía por concepto de cargas menores. . . . .	45
3.4.	Estimación de consumo de energía en la unidad residencial . . . . .	45
3.5.	Demanda de energía por concepto de grúa de pesca. . . . .	45
3.6.	Índices de consumo en ciclo de alevinaje . . . . .	47
3.7.	Índices de consumo en ciclo de engorde . . . . .	47
3.8.	Consumos históricos de energía . . . . .	48
3.9.	Registro de la producción en SFF durante período 2017 - 2019. . . . .	49
3.10.	Estimación de Consumos históricos por cada tipo de carga . . . . .	49
3.11.	IDEn definidos para la planificación energética en SFF . . . . .	51
3.12.	Datos registrados durante un ciclo de alevinaje . . . . .	58
3.13.	Datos registrados durante un ciclo de engorde . . . . .	58
4.1.	Datos utilizados en simulaciones con Octave. . . . .	61
4.2.	Índices de consumo en ciclo de alevinaje con monitoreo de OD . . . . .	63
4.3.	Índices de consumo en ciclo de engorde con monitoreo de OD . . . . .	63
4.4.	Probabilidad de días despejados . . . . .	64
4.5.	Ahorros potenciales. . . . .	64
4.6.	Resultados de prueba realizada a desempeño de aireador de 2 hp en SFF. . .	66
4.7.	Logaritmo natural de déficit en los puntos con 10 % y 70 % de saturación . .	67
4.8.	Cálculos preliminares de campo solar . . . . .	69

<b>4.9.</b> Módulo fotovoltaico utilizado en evaluación FV en SFF . . . . .	70
<b>4.10.</b> Inversores utilizados en evaluación FV en SFF . . . . .	71
<b>4.11.</b> Parámetros técnicos de instalaciones FV en SFF . . . . .	71
<b>4.12.</b> Resultados de análisis técnico de potencial fotovoltaico en SFF . . . . .	72
<b>6.1.</b> Datos financieros para evaluaciones económicas . . . . .	87
<b>6.2.</b> Rendimiento de combustible para generador diésel de 100 kW . . . . .	88

# Lista de abreviaturas

---

## **Entidades y programas sectoriales:**

---

<b>AIE</b>	Agencia internacional de la energía.
<b>AUNAP</b>	Autoridad nacional de acuicultura y pesca.
<b>DOE</b>	US Department of Energy.
<b>FAO</b>	Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura.
<b>IDEAM</b>	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia.
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization.
<b>MADR</b>	Ministerio de agricultura y desarrollo rural de Colombia.
<b>MME</b>	Ministerio de minas y energía de Colombia.
<b>ODS</b>	Son los 17 objetivos de desarrollo sostenible para 2030, adoptados por los Estados Miembros de las Naciones Unidas en 2015.
<b>PAI</b>	Plan indicativo de eficiencia energética 2017-2020 de Colombia.
<b>SFF</b>	Granja piscícola San Francisco Fish SAS, en donde se realiza el caso de estudio del presente trabajo de grado.
<b>UPME</b>	Unidad de planeación minero energética de Colombia.

**Definiciones:**

---

<b>AAE</b>	Actual aeration efficiency.
<b>AM</b>	Aireación mecánica.
<b>AOTR</b>	Actual oxygen transfer rate.
<b>CEM</b>	Contract Energy Management.
<b>EE</b>	Eficiencia energética.
<b>GEI</b>	Gases de efecto invernadero.
<b>HSP</b>	Hora solar pico.
<b>IE</b>	Índice de consumo.
<b>IDEn</b>	Indicador de desempeño energético.
<b>LBEn</b>	Línea de base energética.
<b>OD</b>	Oxígeno disuelto.
<b>PHVA</b>	Ciclo Planear-Hacer-Verificar-Actuar, utilizado en los sistemas de gestión.
<b>PIB</b>	Producto interno bruto.
<b>PPD</b>	Profundidad de descarga de las baterías para sistemas fotovoltaicos.
<b>PR</b>	Performance ratio para instalaciones fotovoltaicas.
<b>SAE</b>	Standard aeration efficiency.
<b>SCADA</b>	Supervisory control and data acquisition.
<b>SGEn</b>	Sistema de gestión de la energía.
<b>SOTR</b>	Standard oxygen transfer rate.
<b>STC</b>	Standard Test Conditions, para módulos fotovoltaicos.
<b>TIR</b>	Tasa interna de retorno.
<b>TONC</b>	Temperatura normal de operación para las celdas fotovoltaicas.
<b>UIE</b>	Uso significativo de la energía.
<b>VAN</b>	Valor actual neto.

---

## Capítulo 1

# Introducción

---

Ya es ampliamente conocida por la sociedad en general, la necesidad de construir una matriz energética sostenible, es decir, conformada por fuentes de energía que no afecten el medio ambiente, de la forma como lo hacen las que están basadas en combustibles fósiles, que se han venido utilizando hace más de un siglo. Es importante señalar que la característica de sostenibilidad requiere la reducción del desperdicio en el consumo de la energía, que aplicado al sector productivo, conlleva también a la competitividad. Actualmente, los sistemas de gestión de la energía (SGEn) se han erigido para que las organizaciones utilicen la energía de forma inteligente. Se encuentra que éstos son una herramienta adecuada para ser aplicada en la piscicultura, con el fin de lograr mejoras en los procesos productivos que contribuyan de manera simultánea a generar empleo, riqueza, producir nutrientes de calidad a las personas y al cuidado del medio ambiente. El desarrollo de la planificación energética para una granja piscícola ubicada en el Valle del Alto Magdalena, pretende sumarse a los aportes que se están dando desde diferentes sectores, para adoptar una cultura de la eficiencia, de tal forma que la misma palabra, adquiera el significado de la unión entre competitividad y sostenibilidad.

### 1.1. Planteamiento del problema

Se estima que la actual población mundial, pase de 7.713 millones de personas, a 8.548 millones en el año 2030 y a 9.735 millones en el 2050 [1], situación que generará un incremento proporcional en la demanda de alimentos. La piscicultura es una actividad que está llamada a contribuir en gran medida, a satisfacer la demanda alimentaria proyectada, y para lograrlo, es indispensable que se desarrolle en condiciones de sostenibilidad. El departamento del Huila se ha posicionado como el principal productor de tilapia nilótica en Colombia, producto de la explotación acuícola de la hidroeléctrica Betania. Debido a que los volúmenes productivos excedieron la capacidad medioambiental de la represa, los acuicultores debieron emprender proyectos en granjas piscícolas, las cuales tienen limitaciones en el uso del agua, y consecuentemente, mayor demanda de energía para mantener en los estanques las

condiciones biológicas saludables requeridas por los peces. La piscicultura continental utiliza motores eléctricos, ya sea para impulsar equipos que agitan el agua en la superficie, llamados comúnmente aireadores, o para operar otro tipo de equipos que de manera directa, generan burbujas en los estanques, denominados blowers.

Con los movimientos que produce en los estanques, la aireación mecánica contribuye a mitigar muchas de las afectaciones que deterioran la calidad del agua, pero finalmente el factor que determina la operación de aireadores o blowers, es el nivel de oxígeno disuelto. Los incrementos de las tarifas de energía eléctrica durante los últimos años, están golpeando la competitividad, y en algunos casos la misma viabilidad de las granjas piscícolas. Debido a ello, los piscicultores han ido implementando mecanismos de ahorro en consumos, buscando minimizar el tiempo requerido de aireación mecánica. Para ello, se realizan mediciones instantáneas del nivel de OD en los estanques y si se encuentra que están cerca o por debajo del límite mínimo permitido, se procede a poner en funcionamiento los equipos de aireación. La experticia de los piscicultores ayuda a que se conozca con un buen grado de aproximación, las horas en que se presentan los puntos críticos, así como el tiempo requerido para que los estanques alcancen un punto adecuado de recuperación por cuenta de la aireación mecánica. En algunos casos, este proceso se realiza mediante el uso de sensores y controladores lógicos programables (PLCs), aunque en la mayoría de granjas, se hace de forma manual, haciendo un barrido de mediciones en cada uno de los estanques. Evidentemente, esta es una buena medida para conseguir ahorros, mejor cuando se realiza con sistemas de control automáticos, sin embargo, en cualquier caso, no es usual que se correlacionen las mediciones de OD con las de consumo de energía en un estanque específico, razón por la cual se dificulta la implementación de planes de acción efectivos en procura de mejorar el desempeño energético.

Las principales causas de tal dificultad son: 1) El requerimiento de oxígeno en los estanques depende dinámicamente del comportamiento poblacional de los peces a lo largo de un ciclo productivo; 2) La cantidad neta de oxígeno generada por el fitoplancton presente en los estanques, varía con las condiciones climatológicas, especialmente la luz solar; 3) No se cuenta con medición de la energía consumida por proceso productivo; 4) No se disponen de procesos sistemáticos para hacer seguimiento al desempeño energético. Como consecuencia, todos estos factores favorecen el desconocimiento de la caracterización del consumo, ocasionando que la infraestructura eléctrica no se dimensione adecuadamente, pero sobre todo, que se carezca de información predictiva y se desconozcan las eficiencias en las granjas piscícolas. Podría concluirse que estas falencias tienen como causa raíz, el bajo o nulo aprovechamiento de las tecnologías digitales que se disponen en el mercado hoy día, para medición, supervisión y control de procesos productivos. Para revertir esta situación, es necesario que las granjas piscícolas hagan parte de la transformación urgente que se requiere en el sistema alimentario,



integrando en sus procesos las innovaciones y tecnologías digitales actuales, buscando estar alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible para 2030 (ODS) [2].

Por su parte, en sintonía con la preocupación global en materia de eficiencia energética, con el interés de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, así como los costos de la energía, la ISO dispuso en el año 2011, la primera edición de la norma internacional ISO 50001, actualizada en el 2018, que especifica los requisitos para establecer, implementar, mantener y mejorar un Sistema de Gestión de la Energía en las organizaciones. La norma está diseñada para todo tipo de organizaciones, y en términos generales presenta aquello que se debe hacer, pero deja libertad sobre el cómo hacerlo. Tal razón, motivó a trazar una propuesta para el sector piscicultor, sobre la consideración de la eficiencia energética como recurso fundamental, que utilice las tecnologías de comunicación digital actuales, para acopiar y manejar los datos correspondientes a las mediciones pertinentes al análisis de la dinámica propia del proceso productivo piscícola, entendiendo que debe ser la que señale las directrices referentes al uso de la energía. Así, la planificación propuesta parte de la pregunta: ¿es posible desarrollar la planificación energética en el contexto de un sistema de gestión ISO 50001 en una granja piscícola continental, a partir de la construcción de los perfiles de la demanda?

## 1.2. Estado del arte

La revisión del estado del arte para el desarrollo de la planificación energética en una organización, permite conocer el contexto y proyección de las actividades que ésta ejecuta, así como la actualidad de las tecnologías aplicables, para establecer un proceso eficiente en sí mismo, eficaz, perdurable en el tiempo y que tenga alto grado de adaptabilidad a los cambios tecnológicos que suceden cada vez con mayor velocidad.

### 1.2.1. Eficiencia y gestión de la energía

Como consecuencia de la primera y segunda crisis del petróleo en los años 70, la gestión de la energía comenzó a evolucionar como disciplina independiente. En la década del 80, gracias al impulso brindado por los computadores, se introdujeron mecanismos de monitoreo, metas e indicadores de desempeño energético. En esta época también se desarrolló el modelo de contratos de gestión de la energía (CEM, por sus siglas en inglés), basados no solamente en reducción general de costos sino en mejoramiento de la eficiencia energética [3]. Durante el período de 1993-2000, la gestión de la energía tuvo un declive, afectada tanto por la baja de los precios de la energía como por los recortes corporativos. En la primera década del presente milenio, la agenda del cambio climático hizo que la energía adquiriera relevancia,

hasta que después del 2010, creció el reconocimiento del importante papel que desempeña la eficiencia energética, para lograr las metas de mitigación del calentamiento global [4].

La Agencia Internacional de la Energía (IEA, por sus siglas en inglés), establece que las medidas de eficiencia energética realizadas han tenido gran impacto en la economía mundial, estimando que la energía utilizada en el 2017 hubiese sido 12% mayor, de no ser por las mejoras en eficiencia aplicadas desde el año 2000, de tal manera que está en el corazón de su agenda de modernización y le otorga el reconocimiento de recurso energético principal (first fuel). Así mismo, proyecta que en un escenario en el cual se aplicaran al sector industrial todas las medidas disponibles en esta materia, desde ahora hasta el 2040, el valor agregado por cada unidad de energía podría duplicarse [5] [6]. Por su parte, el gobierno colombiano, en procura de contribuir con la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), con la que se comprometió en la COP21, a través del Ministerio de Minas y Energía (MME) y la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), basado en información y análisis de los dos sectores de consumo prioritario (transporte e industria), desarrolló el Plan Indicativo de Eficiencia Energética 2017- 2020 (PAI), identificando las características de consumo (energéticos, tecnologías, procesos, prácticas operacionales, etc.) y las propuestas de eficiencia energética (EE) más costo efectivas, esperando obtener resultados positivos en el corto y mediano plazo [7].

Entre las diferentes acciones y medidas sectoriales para dar cumplimiento a sus metas, en lo referente a cómo los usuarios utilizan la energía, el PAI estipula información importante respecto a los actuales potenciales de aplicación y de mejoramiento de EE. En las tablas 1.1 y 1.2, se muestran los potenciales referentes a la utilización de la energía eléctrica, que atañen a la industria piscícola.

**Tabla 1.1:** Principales medidas de EE y sus potenciales en la industria colombiana

*Fuente: UPME, Plan de acción indicativo de eficiencia energética 2017-2022.*

Medida	Potencial	
	Aplicación	Ahorro
Buenas prácticas en instalaciones eléctricas	40 %	3 %
Calidad de la energía, distorsión armónica, energía reactiva	40 %	3 %

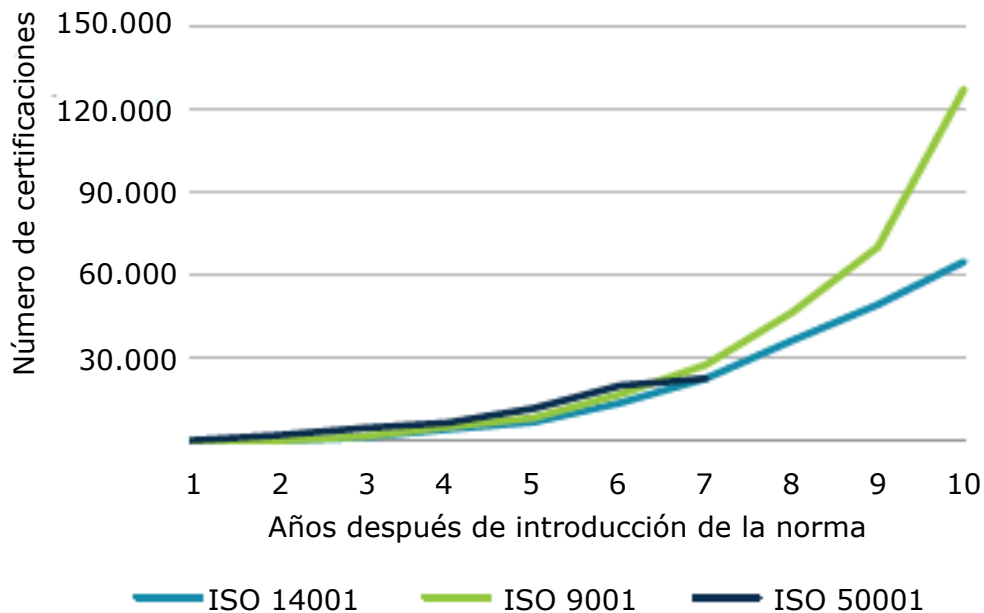
**Tabla 1.2:** Principales medidas de EE y sus potenciales en fuerza motriz colombiana*Fuente: UPME, Plan de acción indicativo de eficiencia energética 2017-2022.*

Medida	Potencial	
	Aplicación	Ahorro
Buenas prácticas en compra, instalación y O&M de motores	60 %	10 %
Sustitución de motores de eficiencia estándar, por otros de alta eficiencia	80 %	15 %
Instalación de VDF	50 %	30 %

Organizaciones europeas reportan ahorros energéticos de 26 % en promedio, luego de la implementación de SGEN ISO 50001 [8]. En estados Unidos, estudios realizados con datos de organizaciones industriales que hacen parte del programa Superior Energy Performance (SEP) del US Department of Energy (DOE), le atribuyen a los SGEN ahorros energéticos promedio del 11,1 % después del segundo año de implementación, y ahorros en costos del 10 %. [9].

La importancia de ISO 50001 ha incrementado desde su primera publicación en el año 2011. Al final del 2017, había registradas cerca de 23.000 certificaciones en el mundo, 13 % más que en el 2016, siendo Alemania el país con mayor cantidad de organizaciones certificadas. La tasa de implementación de los SGEN basados en la norma, según el número de certificados cada año durante los primeros siete años, se comportó de una manera similar a las de otros sistemas de gestión. La figura 1.1 muestra que en el año número 10 después de haber sido publicadas, la ISO 14001 tenía alrededor de 60.000 certificaciones y la ISO 9001 tenía alrededor de 120.000 [10]. Sin embargo, en el año 2018 se reportaron 18.059 certificaciones ISO 50.0001 [11]. Esta disminución podría deberse a que la norma fue revisada y actualizada ese mismo año. Las políticas que propendan por la adopción de SGEN y otras medidas de eficiencia serán esenciales, particularmente en los sectores menos energético intensivos, en donde existen altos potenciales de ahorro [10] .

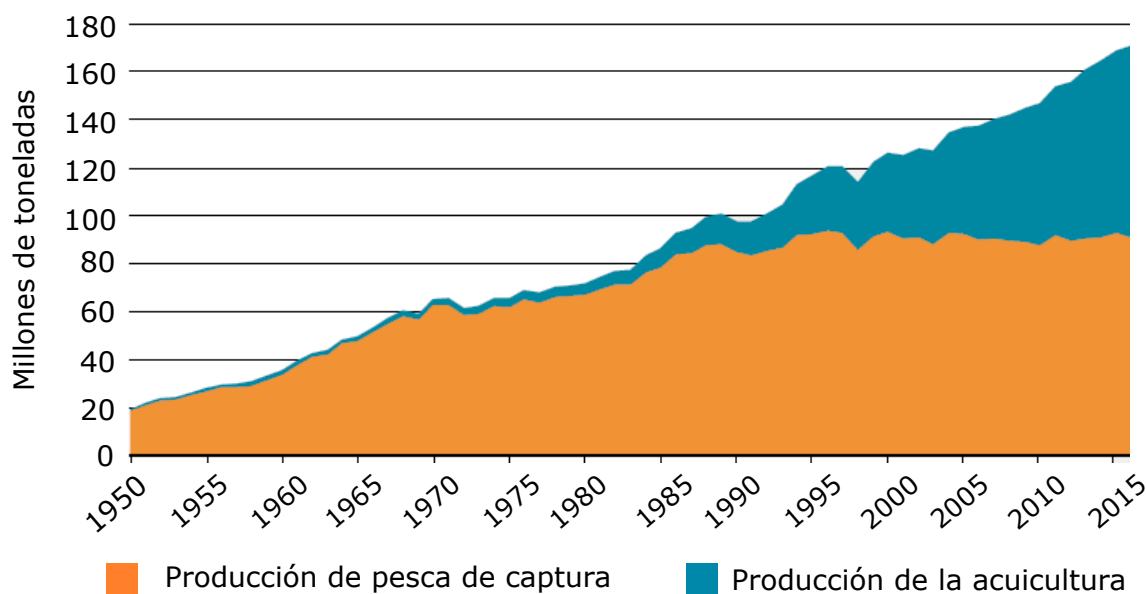
Aunque al final del 2019 en el mundo había 50 certificaciones ISO 50001 registradas en el sector agrícola, gran parte de ellas en Dinamarca y Alemania, en Colombia apenas había 16 en total, ninguna en el sector agrícola [12]. Se espera que aumenten en los próximos años debido a los incentivos previstos en la ley 1715 de 2014 del Ministerio de Minas y Energía, y por las directrices estipuladas en el *plan de acción indicativo de eficiencia energética 2017 – 2022* de la UPME.



**Figura 1.1:** Progreso de certificaciones ISO 50001 comparado con el de otros sistemas de gestión.  
*Fuente: Energy International Agency, Energy Efficiency: Analysis and Outlooks to 2040, 2018.*

### 1.2.2. Actualidad de la piscicultura

La acuicultura se dedica al cultivo de organismos acuáticos, mediante técnicas adecuadas y controladas [13]. Pueden ser crustáceos, como el camarón, moluscos o peces. En el mundo, desde 1961, el crecimiento de consumo de pescado, ha duplicado al crecimiento de la población. En el año 2016, el consumo per cápita de pescado llegó a 20,3 kg; de las 171 millones de toneladas de producción pesquera, el 47 % fue aportado por la acuicultura [14]. La figura 1.2 muestra las producciones de pesca de captura y acuicultura desde el año 1950, en la cual se evidencia que a finales del siglo pasado, se presenta un aplanamiento marcado en la curva del comportamiento de la pesca de captura, coincidiendo con el crecimiento de la acuicultura en general.



**Figura 1.2:** Evolución de la producción mundial de la pesca de captura y la acuicultura.  
Fuente: FAO, *El estado mundial de la pesca y la acuicultura*, 2018.

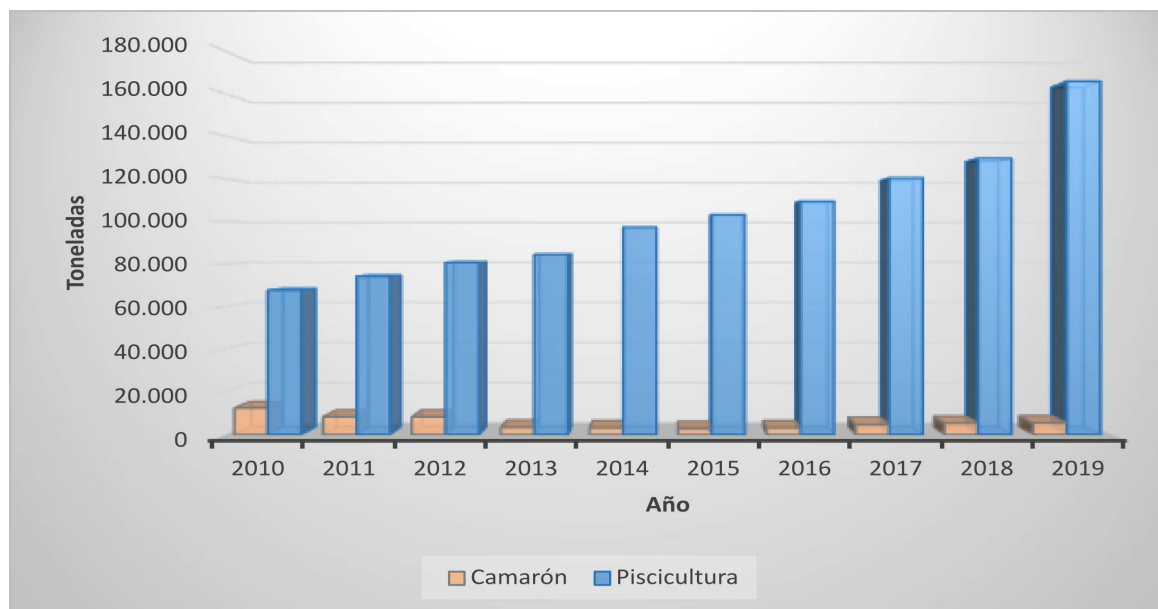
La piscicultura trata exclusivamente del cultivo de peces. Esta actividad se lleva a cabo mediante encerramientos tipo jaulas, en cuerpos de agua de uso público, como como el mar, represas y ríos; también se desarrolla en tierra firme, utilizando estanques de tierra, piedra-cemento, concreto o geomembranas [15]. La piscicultura que se realiza en estanques en tierra firme, comunmente es denominada continental. En Colombia, la AUNAP ((Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca) clasifica a las organizaciones piscícolas de acuerdo a la tabla 1.3

**Tabla 1.3:** Clasificación de acuicultores en Colombia según resolución 1607 de 2019

Tipo de acuicultor	Producción [Ton]	Espejo de agua [ha]
De subsistencia	< 10	< 0,65
Pequeño	10,1 - 22	0,65 - 1,5
Mediano	22,1 - 240	1,51 - 15
Grande	> 240	> 15

La figura 1.3 muestra el comportamiento de la producción de pescado y camarón durante estos últimos años, en donde se observa cómo la industria acuícola colombiana ha venido creciendo sostenidamente durante la última década. Las cifras sectoriales presentadas por

el Ministerio de Agricultura, estipulan que en el periodo 2010-2019 la producción aumentó 113 %, pasando de 80.255 a 171.026 toneladas entre tilapia, trucha, cachama, otras especies nativas y camarón, generando 51.308 empleos directos y 153.921 indirectos, con una participación del 0,19 % del PIB nacional y 2,88 % del PIB agropecuario.



**Figura 1.3:** Producción acuícola en Colombia 2010 - 2019.

*Fuente: Ministerio de agricultura, Cadena de la acuicultura, 2019.*

Como muestra la tabla 1.4, las especies más cultivadas en el país, por cuenta de la piscicultura continental, son la tilapia y la trucha, aunque en menor medida, también la cachama [16].

**Tabla 1.4:** Porcentajes por especies, de producción piscícola en Colombia (2019)

*Fuente: Ministerio de agricultura, Cadena de la acuicultura, 2019.*

Especie	Producción
Tilapia	58 %
Trucha	16 %
Cachama	19 %
Otras especies	7 %

El desarrollo óptimo de la trucha se da en aguas frías, con temperaturas entre 14°C y 16°C. Las tilapias, o mojarra, se producen mejor en aguas con temperaturas entre 25°C y 30°C. Éstas son resistentes a condiciones adversas como bajos niveles de oxígeno disuelto y

salinidad. En Colombia se cultivan dos especies de tilapias: la tilapia roja (*Oreochromis mossambicus*) que es muy apetecida en el mercado nacional, y la tilapia plateada (*Oreochromis niloticus*), de la cual se obtienen filetes de mayor tamaño y más homogéneos, lo cual es un requerimiento importante para la exportación.

Como todas las actividades humanas hoy en día, para que la piscicultura sea una actividad socialmente viable y económicamente rentable, sus procesos deben estar enfocados en los conceptos de eficiencia en general, así como en los estándares modernos de sostenibilidad. La piscicultura continental tiene importantes restricciones en el uso del agua. Por una parte, ya que ésta normalmente proviene de ríos o quebradas, las autoridades competentes limitan los volúmenes de captación; por otra, como el agua residual de la piscicultura queda fuertemente contaminada, existen controles que requieren tratamientos químicos antes de ser vertida nuevamente a los afluentes naturales. Toda vez que los procesos de recuperación de la calidad del agua implican costos adicionales, los piscicultores deben tratar de minimizar los volúmenes de agua utilizados.

### **1.2.3. Brechas tecnológicas en agricultura**

Las innovaciones tecnológicas están creando grandes oportunidades para el mejoramiento de la eficiencia energética. En Colombia, desde finales del milenio pasado, se comenzó a implementar tecnología de automatización y de sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). En las fábricas de procesamiento de bebidas y alimentos, por ejemplo, o en las plantas del sector hidrocarburos, entre otros, hoy día las operaciones no podrían imaginarse siquiera, sin la utilización de sensores electrónicos, el control mediante interfaces hombre-máquina, ni computadores y tecnología de comunicación para disponer de la información digital correspondiente a los procesos productivos. Por el contrario, en la generalidad del sector agrícola, el aprovechamiento de tecnologías disponibles para conseguir operaciones más eficientes, es muy bajo.

De cara al futuro, la urgencia por la sostenibilidad global, obliga a que la agricultura sea repensada para revertir esta situación. Es así que la FAO, sostiene que durante este decenio que comienza, se vislumbra una “revolución agrícola digital” en el contexto de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, para aprovechar el potencial que tiene la agricultura de satisfacer necesidades de la población, alimentarias, de empleo, de generación de riqueza y cuidado del medio ambiente. Las innovaciones y tecnologías digitales pueden ser parte de la solución. La denominada “cuarta revolución industrial” (Industria 4.0), que integra tecnologías como de la cadena de bloques, Internet de las cosas, inteligencia artificial y realidad inmersiva, ofrece oportunidades para integrar a los agricultores en un sistema digital, que permita monitorear

las cadenas de valor en tiempo real y de forma hiperconectada, con capacidad de hacer gestión más detallada y precisa [2].

Para el caso concreto de la piscicultura, se presenta entonces la oportunidad de integrar las actuales tecnologías de medición de la energía y de los diferentes parámetros de calidad del agua en los estanques, con tecnologías de comunicaciones para acceso remoto de información. Utilizándolas en el marco de la norma ISO 50001 junto a adecuados métodos de análisis de información, es posible configurar sistemas de gestión altamente estandarizados, compactos y de fácil implementación. La figura 1.4, ilustra un esquema de SGEEn integrado a las tecnologías actuales.



**Figura 1.4:** Esquema propuesto de SGEEn.

*Fuente: Elaboración propia.*

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo general

Desarrollar la planificación energética en el contexto de un sistema de gestión ISO 50001:2018, en una granja piscícola continental localizada en el valle del Alto Magdalena.



### 1.3.2. Objetivos específicos

- (a) Identificar la relación de la cantidad de energía requerida en el proceso productivo, con la variable más significativa que provoca su consumo, para construir el perfil de la demanda energética de un ciclo productivo completo.
- (b) Evaluar el aporte a las variables significativas que realizan los equipos utilizados en el proceso productivo, en función de sus demandas de energía, para hacer seguimiento a sus eficiencias.
- (c) Revisar económicamente los recursos energéticos convencionales existentes y el potencial de implementación de generación fotovoltaica para establecer la forma más conveniente de atención de la demanda.

## 1.4. Organización del documento

El presente trabajo está motivado por los objetivos expuestos al final del capítulo 1, con base en el problema planteado en su inicio. A lo largo de este capítulo introductorio, también se describe la actualidad local y global de la piscicultura, así como de la eficiencia energética vista como recurso de sostenibilidad, dado que en el problema convergen los intereses de la primera, con las facultades de la segunda. En el capítulo 2, denominado **marco teórico** se presentan y se describen de manera puntual, los conceptos que serán necesarios para la estructuración, recopilación de la información y desarrollo de la planificación energética en una granja piscícola continental de tilapia nilótica. En el capítulo 3, denominado **metodología**, se desarrolla la planificación energética de la granja piscícola San Francisco SAS (SFF), delineada metodológicamente por los requerimientos estipulados en la norma ISO 50001. En el capítulo 4, **Análisis de resultados** se desarrollan los cálculos para estimar los ahorros potenciales en el consumo de energía, que finalmente es uno de los objetivos mayores de los sistemas de gestión de la energía. Incluye la proyección de reducciones en los tiempos de operación de la aireación mecánica mediante la simulación del comportamiento diario del oxígeno disuelto en los estanques piscícolas, así como la evaluación del desempeño energético de los aireadores tipo splash utilizados en SFF. En este capítulo también se analiza el potencial fotovoltaico como recurso energético para aprovechar en la piscícola. En el capítulo 5, se presentan las conclusiones como soporte de los planes de acción resultantes de la planificación energética desarrollada, algunas recomendaciones y sugerencias de trabajos futuros que puedan utilizar este documento como insumo. Los resultados de las evaluaciones económicas realizadas a los sistemas analizados para el mejoramiento del desempeño energético SFF, se presentan al final, en la sección **Anexos**.



---

## Capítulo 2

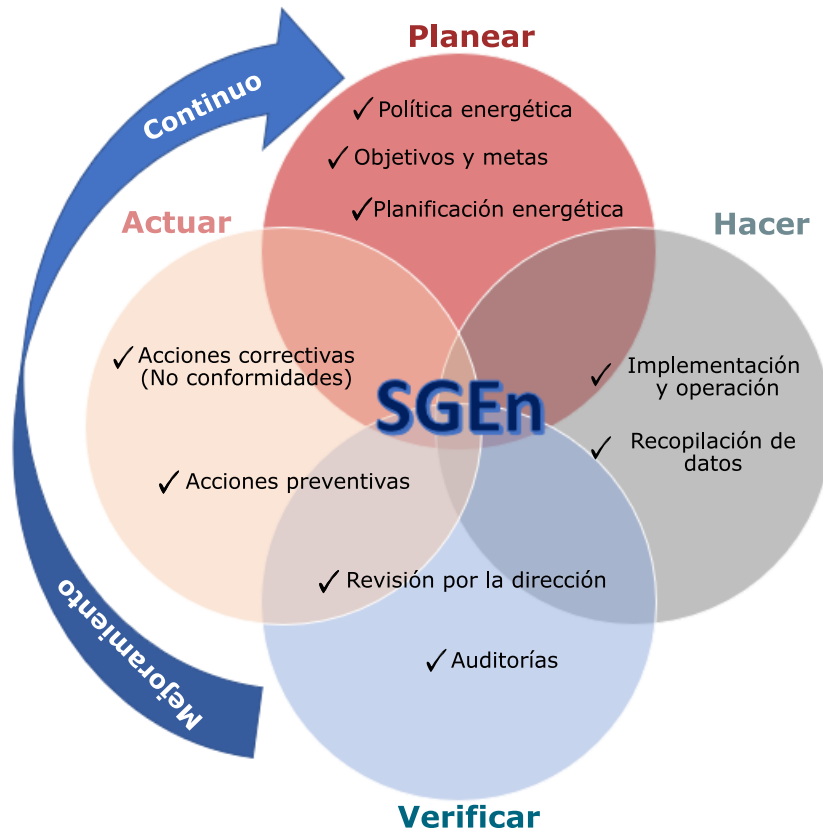
# Marco teórico

---

La razón de ser de los sistemas de gestión de la energía ISO 50001 es lograr mejorar la eficiencia energética de las organizaciones. Su objetivo no se limita a realizar una descripción detallada del uso que éstas hacen de la energía, sino que deben identificar formas de mejorar el desempeño energético en general y establecer metas viables. Debido a esto, a la hora de emprender el diseño de un SGEN ISO 50001, es crucial el conocimiento de los conceptos involucrados en los procesos de la organizaciones que implican consumos de energía, para integrarlos adecuadamente con los requisitos estipulados en la norma, con el fin de darles cumplimiento y conseguir mejoras reales y significativas. En este capítulo se dan a conocer los conceptos que tienen que ver con los SGEN ISO 50001, con la eficiencia energética y con la piscicultura, para llevar a cabo la planificación energética en una granja piscícola continental.

### 2.1. Sistemas de gestión de la energía ISO 50001

La norma ISO 50001 es el documento que especifica los requisitos para un SGEN de una organización, que le permiten establecer los sistemas y procesos necesarios para mejorar continuamente la eficiencia en el uso de la energía, en aras de la competitividad y reducción de GEI. Ésta define un sistema de gestión de la energía, como el conjunto de elementos de una organización interrelacionados para establecer la política energética, con objetivos y metas energéticas, así como los planes de acción y los procesos para darle cumplimiento [17]. Como muestra el esquema en la Fig. 2.1, la norma está basada en el modelo PHVA (Planear - Hacer - Verificar - Actuar), utilizado en los estándares ISO 9001 e ISO 14001 para los sistemas de gestión de la calidad y ambiental, respectivamente, ampliamente conocidas por la industria y el comercio colombianos, lo cual favorece su implementación en el país.



**Figura 2.1:** Esquema de SGEn ISO 50001 en ciclo PHVA.  
*Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC-ISO 50001 (Primera actualización).*

La Norma provee un marco de referencia a las organizaciones para [18]:

- Desarrollar sus políticas de eficiencia energética.
- Fijar las metas y objetivos para dar cumplimiento a las políticas establecidas.
- Manejo de la información para la toma de decisiones pertinentes al uso de la energía.
- Medición y revisión de los resultados.
- Mejoramiento continuo.

Sus características básicas son [17]:

- “Especifica los requisitos para establecer, implementar, mantener y mejorar un SGEn, con el propósito de permitir a una organización contar con un enfoque sistemático para alcanzar mejoras continuas en su desempeño, incluyendo la eficiencia energética, el uso y el consumo de la energía”.

- “Se aplica a todas las variables que afectan al desempeño energético que puedan ser controladas por la organización y sobre las que pueda tener influencia”.
- “Es aplicable a organizaciones de todo tipo y tamaño, independientemente de sus condiciones geográficas, culturales o sociales”.
- “No establece requisitos absolutos del desempeño energético, más allá de los compromisos establecidos en la política energética de la organización y de su obligación de cumplir con los requisitos legales aplicables”.

El proceso medular de un SGEN ISO 50001 es la Planificación Energética, toda vez que en él se procesa la información referente al uso que la organización hace de la energía, con el propósito de diagnosticar su desempeño y obtener planes de acción que conlleven a la eficiencia. Se puede describir como el conjunto de actividades que conforman un proceso, que toma como entrada las condiciones actuales del uso de la energía en una organización, y las transforma en planes de acción para mejorar su desempeño energético, como se muestra en el esquema de la Fig. 2.2.



**Figura 2.2:** Esquema de proceso Planificación Energética

*Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC-ISO 50001 (Primera actualización).*

Aunque el significado de “Eficiencia Energética” puede considerarse intuitivo, una definición que goza de bastante aceptación es la del Lawrence Berkeley National Laboratory : “utilizar menos energía en la prestación de igual servicio” [19]. La Directiva de Eficiencia Energética de la Unión Europea la considera como la relación entre el resultado en desempeño, bienes, servicios o energía, a una cantidad determinada de energía de entrada. Usar la energía de una manera eficiente implica reducir su demanda, para obtener menores costos de consumo, reducir las emisiones de GEI y otros contaminantes, bajar los requerimientos de inversiones en infraestructura y aumentar la seguridad energética de la sociedad en general [20].

Un indicador conveniente a la hora de analizar el desempeño energético de un sistema productivo, es la intensidad energética. que es la relación entre la energía consumida y la producción. Los países lo utilizan con frecuencia en este sentido, como indicador de eficiencia energética, ya que los datos requeridos para calcular el consumo total de energía y el producto interno bruto, están a la mano [21]. Sin embargo, en el caso de los países, se debe tener cuidado al citarlo como valor representativo de la eficiencia, ya que el consumo de energía también es

afectado por otras variables como transporte y confort. Aplicado a las organizaciones, esta relación puede ser interesante cuando se puedan hacer mediciones o estimaciones ajustadas a la producción.

## 2.2. Calidad del agua en la piscicultura

Sin dejar de lado el hecho de que la piscicultura es una actividad que se realiza con motivos económicos, es fundamental tener presente que se está tratando con seres vivos, y ésta por sí sola, es una razón de suficiente peso para utilizar agua con la calidad requerida por los peces para una vida sana. Ahora, desde el punto de vista económico, también se requiere mantener los estanques con buena calidad de agua, ya que favorece el crecimiento, permite mejores tasas de conversión y reduce los riesgos de enfermedades, así como los índices de mortalidad. Los parámetros del agua más relevantes a los cuales se les hace seguimiento en los estanques de agua son el oxígeno disuelto (OD), temperatura, nitrógeno, PH, alcalinidad y dióxido de carbono ( $CO_2$ )

El oxígeno disuelto es considerado el parámetro del agua más importante en la piscicultura. De hecho, después de la comida que los peces requieren, la disponibilidad de oxígeno es el siguiente factor limitante en esta actividad, ya que es al mismo tiempo, un factor clave para la respiración aeróbica y relativamente escaso disuelto en el agua. Para su respiración, los peces requieren oxígeno en estado gaseoso  $O_2$ , el cual no es fácilmente soluble en agua. Aunque el oxígeno aporta cerca del 90 % a la masa de la molécula de agua, está fuertemente enlazado al hidrógeno y no disponible para la respiración, razón por la cual los animales acuáticos requieren gran cantidad de energía para tomar el oxígeno del agua. En general, los peces crecen más rápido y son más sanos, en presencia de concentraciones de oxígeno superiores al mínimo requerido por cada especie.

Los peces están clasificados como poiquilotérmicos o animales de sangre fría, es decir, que adaptan las temperaturas de sus cuerpos a la del entorno. Así, cada especie tiene una temperatura de referencia a la cual sus procesos vitales son óptimos, y un rango límite, por fuera del cual no pueden sobrevivir. Dentro de este rango de supervivencia, a medida que aumenta la temperatura, las tasas de metabolismo y de conversión de comida también crecen, hasta que alcanzan un punto óptimo, después del cual desmejoran [22].

El nitrógeno es un nutriente esencial, que se encuentra en la dieta alimenticia de los peces. Sin embargo, lo requieren en cantidades pequeñas, por lo cual, el excedente se expulsa en las excreciones y la orina. La descomposición del nitrógeno produce otras sustancias de alto gra-

do de toxicidad, como son el amonio, el nitrito y el nitrato, fácilmente solubles en agua. Estas son sustancias que se deben controlar en los estanques para garantizar la vida sana de los peces, y así mismo evitar que se viertan a los afluentes, para el cuidado del medio ambiente. [22].

Exposición a valores extremos de pH pueden ser mortales para los peces, pero sus efectos indirectos son muy importantes en la piscicultura. El pH controla la solubilidad en el agua de otras sustancias como el amonio y el nitrito. El pH óptimo para la mayoría de peces de agua dulce está en el rango 6,5 – 9,0. La concentración de alcalinidad está relacionada con el pH y dióxido de carbono presentes en el agua. Para mantener niveles de pH en el rango 7,0 – 7,4 y concentraciones de  $CO_2$  menores a 15 mg/L, se requiere una concentración alcalina entre 70 mg/L y 190 mg/L. En la piscicultura, la mayor parte del dióxido de carbono es generada por la respiración animal y descomposición de la materia orgánica, con un pequeño porcentaje proveniente del intercambio con la atmósfera. La exposición a concentraciones altas de  $CO_2$ , reduce la tolerancia de los peces a bajas concentraciones de oxígeno disuelto [22].

### 2.3. Factores que influyen en los niveles de OD

El problema que se presenta, es que la tasa de consumo de oxígeno debido a las actividades biológicas que tienen lugar en los estanques, es mayor que la tasa de recuperación por medio del intercambio químico con la atmósfera. Por esta razón, las fuentes naturales de oxígeno se deben complementar, utilizando aireación mecánica [23]. La dinámica del oxígeno disuelto en los estanques, depende de procesos que están influenciados por muchas variables físicas, químicas y biológicas, que la hacen realmente compleja. En menor medida, la interacción aire-agua aporta oxígeno y en la sedimentación se presentan consumos del mismo orden. Gracias al fitoplancton, el proceso que mayores aportes de oxígeno netos realiza es la fotosíntesis, y la respiración de los peces es el que más consume. [23].

El intercambio de oxígeno entre el aire de la atmósfera y el agua en un estanque, se presenta cuando el nivel de oxígeno del agua difiere de su punto de saturación, debido a gradientes de presión en la interfaz aire-agua. En el caso de subsaturación, la atmósfera transfiere oxígeno hacia el estanque (aireación); cuando el agua está sobresaturada, la transferencia ocurre en sentido contrario (degasificación). Si el agua se encuentra en su punto de saturación, la tensión del oxígeno es igual en ambos medios, de tal manera que no se presenta intercambio. Debido a que este proceso ocurre en la delgada interfaz aire-agua, si el estanque se encuentra en estado estático, solamente la pequeña porción de agua presente en la superficie tiene acceso al intercambio de oxígeno. Naturalmente, el viento ayuda a crear turbulencias que incrementan la cantidad de agua en contacto con la atmósfera, produciendo una mayor transferencia. Sin embargo, las velocidades del viento típicas en las granjas piscícolas son

relativamente bajas, de tal manera que la variación de oxígeno en los estanques debida a la interacción aire-agua, es baja comparada con la que se presenta por cuenta de la respiración animal o el aporte neto de oxígeno que realiza el fitoplancton. Boyd y Teichert-Coddington [24] desarrollaron la siguiente ecuación **2.1** para estimar la tasa intercambio de oxígeno en función del viento:

$$WRR = (0,153X - 0,127) \cdot \frac{C_s - C_p}{9,07} \cdot 1,024^{(T-20)} \cdot \alpha \quad (2.1)$$

En donde:

WRR= tasa de intercambio de oxígeno aire agua en la superficie debida al viento [ $gO_2 / m^2 h$ ].

X= velocidad del viento a 3 m de la superficie [ $m/h$ ].

$C_s$ = oxígeno disuelto en el aire [ $mg/L$ ].

$C_p$ = oxígeno disuelto en el agua [ $mg/L$ ].

T= temperatura del agua [ $^{\circ}C$ ].

$\alpha$ = factor de corrección por efectos de la turbidez del agua; valor de 0,92 es típico para estanques de acuicultura.

9,07= nivel de saturación de OD en el agua, en condiciones estándar [ $mg/L$ ].

El consumo por sedimentación consiste en el oxígeno requerido en los procesos de descomposición de la materia orgánica, oxidación de las sustancias inorgánicas y en la respiración de los microinvertebrados que habitan en el lodo. Es una variable difícil de estimar. Por medio de mediciones locales, se han encontrado valores en el rango 50 – 125 [ $mg O_2/m^2h$ ] en estanques de agua fresca [23].

Por su parte, la tasa de consumo de oxígeno que corresponde a los peces, depende de la especie, el tamaño, temperatura del agua, actividad, tiempo relativo a la alimentación y a la misma concentración de oxígeno disuelto. Respecto a la actividad física, Farmer y Beamish (1969), encontraron que la tasa de consumo por parte de la Tilapia es de 220 [ $mg O_2/(kg.h)$ ] forzada a nadar a velocidad de 30 [ $cm/s$ ], y de 460 [ $mg O_2/(kg.h)$ ] a velocidad de 60 [ $cm/s$ ]; en la mayoría de peces, la tasa de consumo se duplica cuando la temperatura del agua se aumenta en  $10^{\circ}C$ . Con la ecuación **2.2**, Schroeder (1975) desarrolló una fórmula general en función del tamaño, que aunque aproximada, es útil para determinar el consumo de los peces, a temperaturas en el rango  $20-30^{\circ}C$ , en donde  $W$  es la masa de un pez dada en  $g$  [23].

$$Consumo\ de\ oxigeno = W^{0,82} [mg\ O_2/h] \quad (2.2)$$

Estudios realizados en diferentes poblaciones de tilapia nilótica, muestran que su crecimiento es función de variables propias del ambiente en donde viven. Así, bajo condiciones



de cultivo, el comportamiento del crecimiento queda determinado por la proporción sexual, densidad de siembra, sistemas de cultivo, alimentación, temperatura y calidad del agua. [25] La curva de crecimiento de la tilapia está representado por una curva en forma de “S”, indicando que durante la etapa temprana de vida, crece lentamente; luego sigue un período en donde la tasa de crecimiento aumenta hasta alcanzar un punto máximo, después del cual la tilapia sigue creciendo con velocidad decreciente y asintóticamente hasta que llega a su mayor tamaño. Tradicionalmente se utilizan modelos no lineales para describir la curva de crecimiento de la tilapia en función de su edad, incluida la de Gompertz, descrito por la ecuación **2.3** [26], donde  $M$  = estimación de la biomasa de la tilapia en [g] a la edad  $t$  [semanas];  $A$  = biomasa en la edad adulta;  $B$  = crecimiento relativo en el punto de inflexión [g/día] por gramo de biomasa;  $C$  = edad en el punto de inflexión [semanas];  $e$  = número de Euler.

$$M = A \cdot e^{-e^{B(t-c)}} [g] \quad (2.3)$$

Por su parte, las investigaciones consistentemente identifican el metabolismo del plancton como el factor que más afecta la variación del oxígeno disuelto en los estanques de piscicultura. Con las cantidades de fitoplancton usualmente encontradas en los estanques de granjas piscícolas, mediante la fotosíntesis, es la mayor fuente de oxígeno disuelto, así como el mayor consumidor, toda vez que también requiere de oxígeno para subsistir [23]. La luz solar es el factor que regula la producción de oxígeno por una determinada población de fitoplancton. La intensidad de la luz decrece rápidamente, una vez que penetra el agua, inclusive si es pura. Este decrecimiento es mayor en estanques piscícolas, ya que los sólidos en suspensión presentes, reflejan y absorben luz. De esta manera, el fitoplancton produce menos oxígeno a mayor profundidad. Esta condición contribuye en gran medida a la estratificación del agua en los estanques. Ahora, la densidad del fitoplancton determina la cantidad de su producción neta de oxígeno [27].

## 2.4. Dinámica de OD en un estanque

Por una parte, la principal fuente de oxígeno es el generado por el fitoplancton, a través de la fotosíntesis. En menor medida también son aportantes de oxígeno, el viento que está en contacto con la superficie del estanque, y el agua fresca de recambio. Por otra parte, los factores que consumen oxígeno son la respiración de la población de peces, y en las noches, la respiración del mismo fitoplancton. En menor medida, procesos de oxidación y bacterias en el sedimento, también consumen oxígeno. En la figura **2.3** se representan las fuentes de oxígeno, y los agentes que lo consumen.



**Figura 2.3:** Factores que contribuyen con las variaciones de OD en un estanque de piscicultura continental. Fuente: Boyd C. y Lichtkoppler F., *Water quality managment in Fish culture*, 1979.

La energía necesaria para la aireación mecánica se podría reducir si se evita la operación de los aireadores cuando el nivel de OD es superior al mínimo límite requerido. No se ha evidenciado beneficios adicionales para los peces cuando el OD es superior a 5 [mg/L]. Para estimar este ahorro potencial, se requiere construir las curvas de OD a lo largo del día, para todo el ciclo reproductivo.

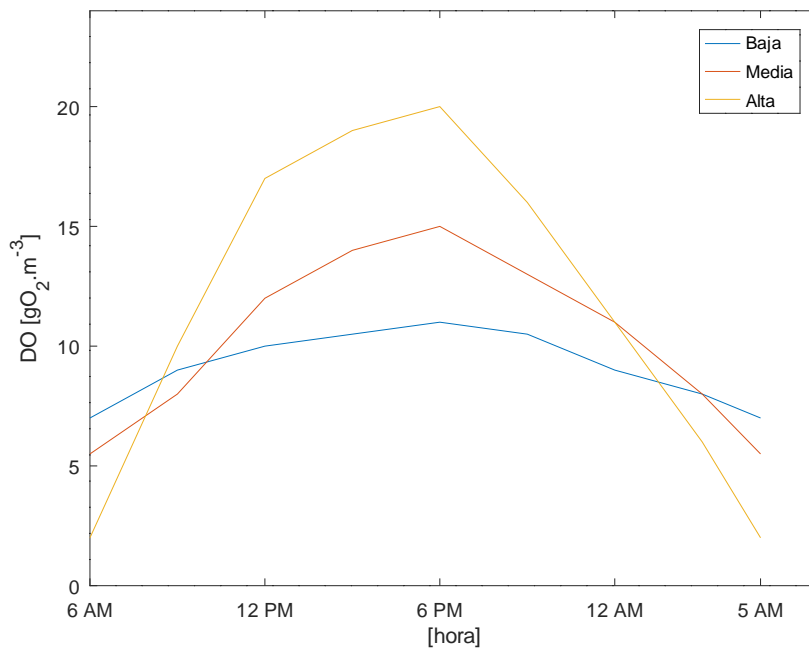
En condiciones de estanqueidad total, es decir, sin que se lleve a cabo el proceso de recambio de agua, la curva de  $OD_i(t)$  en un intervalo de tiempo determinado, queda definido por la siguiente ecuación 2.4:

$$OD_i(t) = OD_F(t) + OD_V(t) - OD_S(t) - OD_{Bn}(t) \quad (2.4)$$

Donde, para cada instante  $t$ ,  $OD_F$  es el oxígeno disuelto neto generado por el fitoplancton,  $OD_V$  el que aporta el viento,  $OD_S$  el consumido por el sedimento, y  $OD_{Bn}$  el que consumen los peces de acuerdo a la masa corporal en la semana  $n$ . Cada componente de la ecuación está dado en unidades de masa de  $O_2$  sobre volumen.

Wilkins y Piedrahíta [28], compararon dos modelos que estiman la producción de oxígeno por el fitoplancton en estanques de acuicultura: uno analítico, basado en ecuaciones de Baumer y Uhlmann (1983); y otro empírico, desarrollado por Boyd et Al. (1978) y Romaine y Boyd (1979). Ambos modelos mostraron que la producción neta de oxígeno es máxima, para cantidades intermedias de fitoplancton, 250 [mg/m<sup>3</sup>] de clorofila-a, aportando de 8 a 10 [g/m<sup>3</sup>] de oxígeno al día. Cuando los niveles son bajos, las tasas de fotosíntesis por unidad de biomasa son altas debido a que hay recursos como nutrientes inorgánicos y la cantidad de luz es mayor, sin embargo, hay poco fitoplancton para desarrollar fotosíntesis. Por otra parte, cuando los niveles son altos, en concentraciones de clorofila-a en rangos de 300 – 600 [mg/L],

los nutrientes disponibles son menores y debido a la turbidez del agua, hay menos luz a profundidades cercanas a la superficie. En la figura 2.4 y la tabla 2.1 muestran las variaciones de las concentraciones de OD en estanques con diferentes densidades de fitoplancton durante un período de 24 horas. Las concentraciones de OD son menores empezando la mañana y su valor se va incrementando gradualmente hasta un máximo que ocurre al final de la tarde y luego decrece durante la noche. Las variaciones son mayores en estanques con alta densidad de fitoplancton, que en estanques con desidades bajas [27].



**Figura 2.4:** Curva de OD para densidades bajas de fitoplancton.

*Fuente: Boyd C. y Tucker C., Pond aquaculture water quality management, 1998.*

Utilizando hoja de cálculo, se tiene que la tendencia de la curva para un nivel medio de fitoplacton sigue la ecuación 2.5 con  $R^2 = 0,9514$ .

$$OD_{fvs}(t) = -0,028t^2 + 0,64t + 7,15 \quad (2.5)$$

El análisis considera la variación de OD en el estanque por cuenta de los recambios de agua diarios, en donde hay diferencia en los niveles de OD entre las cantidades de agua entrantes y salientes. La variación de la masa de oxígeno  $O(t)$  queda definida por la siguiente ecuación 2.6:

**Tabla 2.1:** Curvas de OD producido por diferentes densidades de fitoplancton en  $[gO_2/m^3]$ .

Hora [h]	Densidad de fitoplancton		
	Baja	Media	Alta
0	7	5	2
3	8	8	10
6	9	12	16
9	10	14	18
12	11	15	20
15	10	13	14
18	9	11	11
21	8	8	7

$$\frac{dO(t)}{dt} = Q_e \cdot DO_e - Q_s \cdot DO(t) + V_k \cdot \frac{dDO_i(t)}{dt} \quad (2.6)$$

Donde  $O(t)$  es la cantidad de oxígeno en el instante  $t$ , expresado en  $[gO_2]$ ; con el oxígeno disuelto dado en  $[mg O_2/L]$ ,  $DO_e$  es el del agua que entra,  $DO(t)$  es el resultante de la mezcla del agua nueva con la que yace en el estanque antes del recambio, y  $DO_i(t)$  es el que se mantiene en el estanque afectado por fitoplancton, viento, sedimento y respiración de los peces, determinado por la ecuación 2.4;  $Q_e$  y  $Q_s$  son los caudales de entrada y salida, respectivamente;  $V_k$  es el volumen del estanque dado en  $[m^3]$ , que permanece constante.

Ya que durante el recambio, el caudal de entrada es igual al de salida, haciendo  $Q_e = Q_s = Q$ , la ecuación 2.6 queda como:

$$\frac{dO(t)}{dt} = Q \cdot DO_e + V_k \cdot \frac{dDO_i(t)}{dt} - Q \cdot DO(t) \quad (2.7)$$

Por otra parte, se tiene que para todo instante  $t$ , la cantidad de oxígeno en el estanque es igual al producto del OD, por el volumen del estanque. Entonces,

$$O(t) = DO(t) \cdot V_k \quad (2.8)$$

Derivando, y teniendo en cuenta que  $V_k$  es constante,

$$\frac{dO(t)}{dt} = V_k \cdot \frac{dDO(t)}{dt} \quad (2.9)$$

Igualando las ecuaciones **2.7** y **2.9**, se obtiene la ecuación **2.10**, en donde  $\frac{dDO_i(t)}{dt}$  es la tasa de cambio del OD en el estanque por los demás factores diferentes al recambio.

$$\frac{dDO(t)}{dt} + \frac{Q}{V_k} \cdot DO(t) = \frac{Q \cdot DO_e}{V_k} + \frac{dDO_i(t)}{dt} \quad (2.10)$$

## 2.5. Sensores para medición de OD

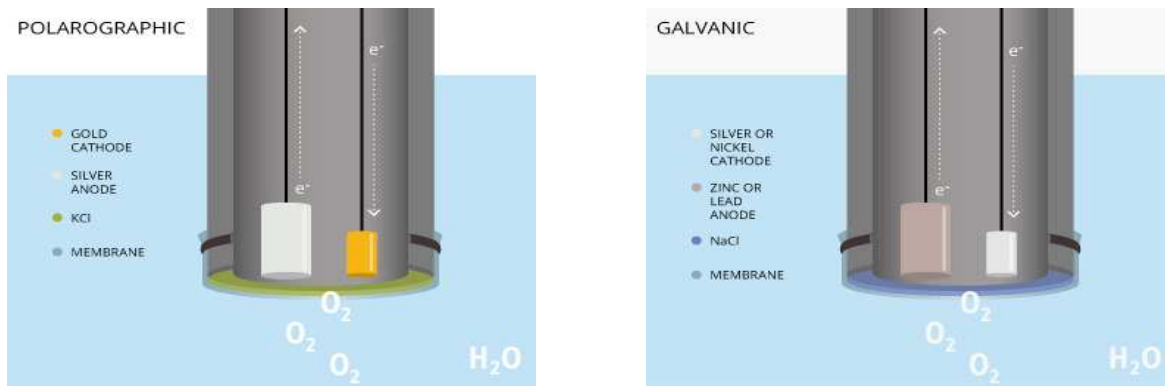
Tomando la definición de sensor como un dispositivo que recibe un estímulo físico de entrada y devuelve una señal eléctrica como salida [29], un sensor de OD sumergido en un estanque de agua proporciona información acerca de la cantidad de oxígeno presente, mediante señales de tipo eléctrico que pueden ser codificadas y fácilmente leídas en un display, o que pueden ser llevadas por cables hacia otros equipos de adquisición y almacenamiento de datos. Su objetivo es medir el OD presente en los estanques en determinado instante. Actualmente son usuales dos tipos de sensores: electroquímicos y ópticos. Los primeros, a su vez, se dividen en polarográficos y galvánicos. En la figura **2.5** se ilustran los diferentes tipos de sensores.

### 1. Sensor polarográfico:

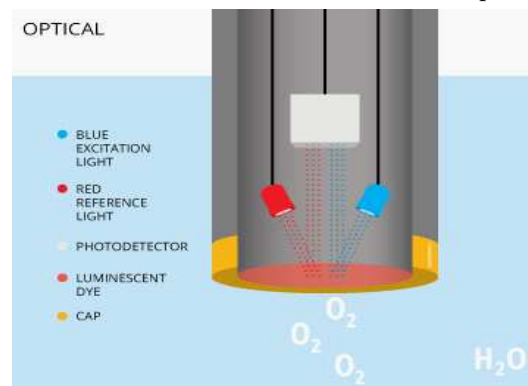
Consiste en un ánodo de plata y un cátodo de metal noble, usualmente platino, sumergido en una solución de cloruro de potasio. Los electrodos y el electrolito quedan separados del agua de muestra por una membrana de teflón semi-impermeable. Cuando el instrumento se enciende, después de un tiempo aproximado de 5 a 60 minutos, el electrodo se polariza por una tensión constante entre 0,4 V y 1,2 V, entre ánodo y cátodo. Cuando se hacen mediciones, el oxígeno del electrolito se difunde a través de la membrana, de manera proporcional a la presión del oxígeno del agua. El OD del electrolito se reduce y es consumido en el cátodo. Esta reacción produce una corriente directamente relacionada con la concentración de oxígeno. A mayor oxígeno que atraviese la membrana, mayor es la corriente en los electrodos. Ésta es una reacción de dos partes: la oxidación en el ánodo y la reducción del OD. [30].

### 2. Sensor galvánico:

En este sensor, el electrodo está conformado por metales disimilares. En presencia de la solución electrolítica, se genera una diferencia de potencial que debe ser al menos



(a) Sensor OD con fuente de alimentación externa, (b) Sistema de medición OD en caja con protección integrado con registrador de datos. contra intemperie.



(c) Sistema de medición OD en balsa para ubicar en punto deseado.

**Figura 2.5:** Tres tipos de sensores para medición de OD en estanques. Fuente: *Measuring dissolved oxygen*, FONDRIST Environmental Learning Center, <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/measurements/measuring-water-quality/dissolved-oxygen-sensors-and-methods/>

de 0,5 V; de esta forma el electrodo se autopolariza sin necesidad de una fuente de voltaje externa. Sigue el mismo principio de funcionamiento del sensor polarográfico y la reacción electroquímica es similar. Usualmente el ánodo es de zinc, plomo o algún otro metal activo, mientras que el cátodo es de un metal noble como la plata. La solución electrolítica puede ser hidróxido de sodio, cloruro de sodio u otra solución inerte. Este tipo de sensor actualmente es el más común en el mercado de la piscicultura [30].

### 3. Sensor óptico:

Mide la interacción entre el oxígeno y ciertos colorantes luminiscentes. Cuando se exponen a luz azul, estos colorantes se excitan (electrones ganan energía) y emiten luz hasta

que los electrones retornan hasta su estado normal de energía. Cuando hay presencia de oxígeno disuelto en el agua, las longitudes de onda de retorno son alteradas por la reacción de los colorantes con las moléculas de oxígeno. El efecto medido es inversamente proporcional a la presión parcial del oxígeno.

Están hechos con una membrana semi permeable, diodo emisor de luz (LED) y foto detector. Algunos emiten también luz roja de referencia para garantizar la precisión. La luz roja no causa luminiscencia, pero es reflejada en el colorante; la intensidad de la luz azul es inversamente proporcional a la cantidad de oxígeno disuelto. Mientras el oxígeno atraviesa una membrana, interactúa con el colorante, limitando la intensidad de la luz azul, la cual es medida por el foto detector. [30].

## 2.6. Aireación mecánica (AM)

En la piscicultura, los niveles de OD decaen a valores críticos durante los noches y también en días nublados, ya que el mayor proveedor de oxígeno a los estanques, que es el fitoplancton, en ausencia de radiación solar, cesa de producir oxígeno, quedando la interacción aire-agua como único aportante. Sin embargo, el viento típico es incapaz de sostener el ritmo de consumo de los peces, sumado al del mismo fitoplacton y a los procesos de oxidación presentes en la sedimentación. Por otra parte, el OD aportado por los recambios también es insuficiente, ya que la cantidad de agua disponible para este proceso, es muy baja comparada con los volúmenes de los estanques. Por las razones anteriores, se hace necesario transferir oxígeno a los estanques por medio de aireación mecánica.

La aireación mecánica es el sistema más utilizado en la piscicultura, para mitigar los déficits de OD en los estanques. Consiste en mover el agua para hacerla circular al interior de los estanques, con el objeto de que una mayor cantidad de agua llegue a la superficie, para recibir oxígeno del aire. La recirculación también ayuda a reducir la estratificación del agua y así conseguir calidad de agua más homogénea en los estanques. Existen dos categorías generales de aireadores utilizados en la piscicultura: 1) Los tipo splash, que empujan el agua hacia la superficie para que tenga contacto con la atmósfera; 2) Los generadores de burbujas (Bubbler o burbujeantes, que introducen aire al interior del estanque [31].

Los tres tipos de aireadores splash más utilizados son el de bomba vertical, los rociadores y los de paletas. *El aireador de bomba vertical* está compuesto por un impeler conectado a un motor eléctrico por medio de un eje vertical. Las potencias típicas de estos motores son de 2 hp o menos, con velocidades nominales que oscilan entre 1.750-3.450 rpm. Normalmente el motor queda ubicado sobre la superficie, soportado por un flotador, que se debe anclar en



(a) Aireador tipo splash de bomba vertical.



(b) Aireador tipo blower.

por lo menos dos puntos, para evitar la rotación del aireador [32]. Estos aireadores tienden a recircular el agua a su alrededor, razón por la cual su zona de influencia es limitada. Dependiendo del área de los estanques, se deben utilizar múltiples aireadores ubicados de tal manera que sus zonas de influencia no se superpongan [31]. En la figura 2.6a se ilustra este tipo de aireador. *Los aireadores rociadores* consisten en bombas de alta presión, movidas por motores eléctricos y en algunos casos, por tractores. Empujan el agua de los estanques al aire, a través de boquillas o tubos con orificios. Para ampliar sus efectos, se pueden utilizar manifolds[32]. Causan flujos horizontales en los estanques y fuertes corrientes, aunque se presentan grandes pérdidas de presión de cabeza, debido a la resistencia que presentan los orificios pequeños [31]. *El aireador de paletas* consiste en un arreglo de paletas a manera de propeler, con longitudes entre 2 y 10 pulgadas, movido por un motor eléctrico a través de un eje horizontal. Las paletas giran verticalmente respecto a los estanques, empujando el agua al aire y creando recirculaciones. Las velocidades de rotación son bajas, entre 70 y 120 rpm. Las paletas se sumergen a profundidades entre 3 y 6 pulgadas. Este tipo de aireadores son comunes en estanques grandes y generalmente son más eficientes que otros tipos de aireadores tipo splash[32][31].

También son utilizados aireadores burbujeantes, como la *las bombas de aspiración* que se componen por un propeler sumergido, conectado a un eje con carcasa hueca, movido por un motor a velocidades hasta de 3.450 rpm, aprovechando el principio de Venturi. Como resultado del vacío por la velocidad del agua movida por impeler, el aire que entra desde la atmósfera a través del eje, se mezcla con el agua creando burbujas que permiten la difusión de oxígeno. Toda la unidad se monta sobre un sistema de flotación, en donde se puede ajustar el ángulo de entrada del eje, así como la profundidad de inmersión. Se deben tomar precauciones para no dañar peces pequeños. Estos aireadores pueden ser altamente eficientes[32][31]. Por su parte, *los aireadores difusores de aire* emplean un compresor (Blower) que transfiere aire



al agua, a través de redes de tubería con diámetro pequeño (tubing), y boquillas de difusión distribuidas en el fondo de los estanques. Pequeñas burbujas se desprenden de las boquillas, que viajan buscando la superficie, facilitando el proceso de difusión de oxígeno aire-agua, y produciendo pequeñas corrientes de recirculación. Este sistema debe contar con múltiples puntos de difusión, para mantener homogeneidad de la calidad del agua[31]. En la figura 2.6b se aprecia un aireador difusor de aire. Éstos tienen la desventaja de bajo desempeño en estanques de poca profundidad, como los típicos de la piscicultura, ya que las burbujas tienen la oportunidad de viajar trayectos cortos y tampoco generan flujos; además, requiere inversiones importantes en tubing para poder cubrir la totalidad del área en estanques grandes [33].

## 2.7. Prueba a aireadores

De acuerdo a Boyd y Tucker [34], la ecuación 2.11 determina la tasa de transferencia estándar de oxígeno para un aireador mecánico (SOTR, por sus siglas en inglés), y se define como la masa de oxígeno por unidad de tiempo, que el equipo puede transferir a un cuerpo de agua, en condiciones normalizadas. Éstas son: temperatura= 20 [°C], presión= 1 [atm], nivel de OD =0 [mg/L] y agua limpia.

$$SOTR = K_L a_{20} \cdot C_{s20} \cdot V \quad [kg \ O_2 \cdot h^{-1}] \quad (2.11)$$

donde  $K_L a_{20}$  es el coeficiente de transferencia a 20 [°C], en [ $h^{-1}$ ],  $C_{s20}$  es el valor de saturación de OD en las condiciones estándar en [mg/L], y  $V$  es el volumen del cuerpo de agua en [ $m^3$ ].

La eficiencia estándar de aireación (SAE, por sus siglas en inglés), se puede calcular dividiendo  $SOTR$  por la energía  $E$  consumida por el motor.

$$SAE = \frac{SOTR}{E} \quad [kg \ O_2 / kWh] \quad (2.12)$$

Ya que las condiciones presentes en los estanques de piscicultura, normalmente difieren a las condiciones estándar, se requiere calcular la tasa de transferencia real (AOTR, por sus siglas en inglés), ajustando el valor de SOTR, así:

$$AOTR = SOTR \cdot \frac{(C_s - C_p)}{9,07} \cdot (1,024)^{T-20} \cdot \alpha \quad [kg \ O_2 / h] \quad (2.13)$$

donde  $C_s$  es el punto de saturación del agua del estanque en [mg/L] a la temperatura  $T$  en [°C],  $C_p$  es la concentración de OD en [mg/L] a la temperatura  $T$  en [°C],  $\alpha$  es la relación

$K_L a_{20}$  del agua limpia, sobre  $K_L a_{20}$  del agua propia del estanque, como se expresa en la ecuación **2.14**:

$$\alpha = \frac{(K_L a_{20}) \text{ agua de prueba}}{(K_L a_{20}) \text{ agua limpia}} \quad (2.14)$$

La eficiencia real de aireación (AAE, por sus siglas en inglés), es la relación entre la  $AOTR$  y la energía  $E$  consumida por el motor del aireador, como se muestra en la siguiente ecuación **2.15**.

$$AAE = \frac{AOTR}{E} \quad [kg \ O_2/kWh] \quad (2.15)$$

A continuación se describen los pasos del método comúnmente utilizado para obtener la pendiente de la curva  $K_L a_T$  respecto al tiempo:

El aireador se debe colocar en un tanque con agua limpia y *salinidad* = 0 ppt (partes por trillón estadounidense -  $10^{12}$ ), con profundidad en el rango 1,0 – 1,5 [m], de tal manera que la relación potencia-volumen no exceda 0,1 [ $kW/m^3$ ]. El agua se debe desoxigenar a 0 [ $mg \ O_2/L$ ], con una solución de cloruro de cobalto concentrada en el rango 0,05 – 0,1 [ $mg/L$ ] y sulfito de sodio entre 8 – 10 [ $mg/L$ ]. El propio aireador es utilizado para mezclar la solución con el agua del tanque, y mientras éste opera, se realizan entre 8 y 10 mediciones de OD, igualmente espaciadas, desde niveles cercanos al 0 % y 80 % del nivel de saturación. Con la mediciones registradas, se calcula el déficit de OD de acuerdo a la siguiente ecuación **2.16**:

$$\text{Déficit OD} = C_s - C_m \quad [mg \ O_2.L^{-1}] \quad (2.16)$$

donde  $C_s$  es el valor de saturación de OD en [ $mg \ O_2/L$ ] y  $C_m$  es el valor medido de OD, en [ $mg \ O_2/L$ ]. Graficando la curva, se localizan los puntos para 10 % y 70 % de saturación de OD, con los cuales se determina  $K_L a_T$ , con la ecuación **2.17**:

$$K_L a_T = \frac{\ln(\text{Déficit DO})_{10} - \ln(\text{Déficit DO})_{70}}{(t_{10} - t_{70})/60} \quad (2.17)$$

donde  $(\text{Déficit DO})_{10}$  es el déficit de OD a 10 % del valor de saturación en , [ $mg \ O_2/L$ ],  $(\text{Déficit DO})_{70}$  es el déficit de OD a 70 % del valor de saturación en , [ $mg \ O_2/L$ ],  $t_{10}$  es el

tiempo en que OD alcanza el 10% de saturación dado en *minutos*, y  $t_{70}$  es el tiempo en que OD alcanza el 70% de saturación dado en *minutos*.

$K_L a_T$  puede ser ajustado para la temperatura estándar de 20 [°C], utilizando la siguiente ecuación **2.18**:

$$K_L a_{20} = \frac{(K_L a_T)}{1,024^{T-20}} \quad [h^{-1}] \quad (2.18)$$

donde  $T$  es la temperatura del agua durante la medición, dada en [°C]. Una vez hallado el coeficiente de transferencia para condiciones estándar, para calcular  $SOTR$ ,  $SAE$ ,  $OTR$  y  $AE$ , se reemplaza en las ecuaciones **2.11**, **2.12**, **2.13** y **2.15**, respectivamente.

El coeficiente de transferencia del agua de prueba se ajusta a la base de condiciones, así:

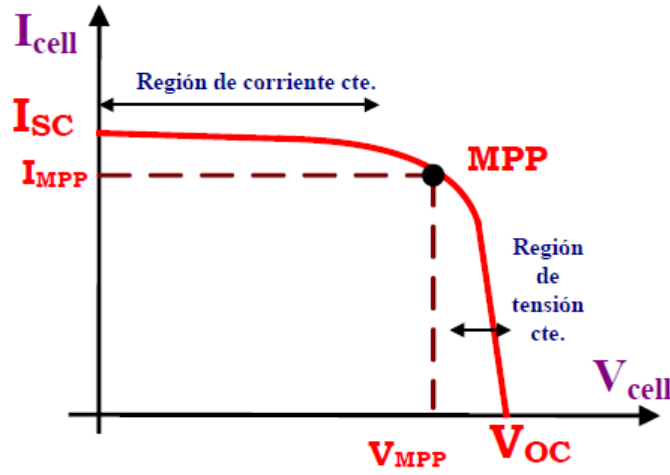
$$K_L a'_{20} = \frac{(K_L a_{20})}{\alpha} \quad [h^{-1}] \quad (2.19)$$

donde  $K_L a'_{20}$  es el  $K_L a_{20}$  ajustado.

## 2.8. Evaluación fotovoltaica

Lo que se conoce en el mercado como un panel solar, es un módulo conformado por un conjunto de células construidas a partir de material semiconductor, que convierten la energía solar incidente, en energía eléctrica. El silicio es el semiconductor más utilizado para aplicaciones residenciales, comerciales o industriales. Ya que una célula convierte relativamente baja potencia para este tipo de aplicaciones, se hace necesario agrupar un conjunto de ellas, conectadas en serie-paralelo, por medio de un cable plano de cobre estañado, para conformar un módulo compacto de mayor capacidad. Actualmente son usuales en el mercado módulos de 60 o 72 células, que manejan potencias pico hasta de 420 W<sub>DC</sub>. La figura **2.7** muestra la curva típica de tensión-corriente, en donde los ejes  $I_{cell}$  y  $V_{cell}$  representan respectivamente la corriente y tensión de la celda,  $I_{SC}$  la corriente de cortocircuito,  $V_{OC}$  la tensión de circuito abierto,  $P_{MPP}$  el punto de máxima potencia, con  $I_{MPP}$  y  $V_{MPP}$  representando respectivamente la corriente y tensión en el punto de máxima potencia.

Debido a que los parámetros eléctricos de un módulo, como son tensión, corriente y potencia, dependen de las condiciones ambientales de operación, las especificaciones técnicas proporcionadas por los fabricantes están dadas para condiciones estándar de prueba (STC,



**Figura 2.7:** Curva típica tensión-corriente de una célula fotovoltaica.

*Fuente: Introducción a la energía solar fotovoltaica, Universidad Politécnica de Valencia, 2014.*

por sus siglas en inglés), establecidas por las regulaciones internacionales EN61215, cuyos valores son:

- Irradiancia = 1.000  $W_{DC}$ .
- Temperatura de la célula = 25°C.
- Masa de aire = 1,5.

Con la ecuación 2.20 se calcula la temperatura de la célula para una temperatura ambiente e irradiancia determinadas.

$$T_{cell} = T_{amb} + (TONC - 20) \cdot \frac{E}{800} \quad (2.20)$$

En donde  $T_{cell}$  es la temperatura de la célula,  $T_{amb}$  es la temperatura ambiente,  $E$  es la irradiancia y  $TONC$  es la temperatura normal de operación, que es un parámetro constructivo especificado por cada fabricante en la ficha técnica del módulo. Así, los parámetros eléctricos de la célula se calculan con las siguientes ecuaciones.

$$I_{SC\ T_{cell}} = I_{SC\ STC} + \alpha \cdot (T_{cell} - 25) \quad (2.21)$$

$$V_{OC\ T_{cell}} = V_{OC\ STC} + \beta \cdot (T_{cell} - 25) \quad (2.22)$$

$$P_{T_{cell}\ Ex} = P_{STC} \cdot [1 + \gamma \cdot (T_{cell} - 25)] \cdot \frac{E_x}{E_{STC}} \quad (2.23)$$

En donde  $T_{\text{cell}}$  es la temperatura de la célula,  $E_x$  es la irradiancia,  $I_{\text{SC } T_{\text{cell}}}$  y  $V_{\text{OC } T_{\text{cell}}}$  son respectivamente la corriente de cortocircuito y tensión de circuito abierto a la temperatura  $T_{\text{cell}}$ , y  $P_{T_{\text{cell}} E_x}$  es la potencia de la célula a temperatura  $T_{\text{cell}}$  e irradiancia  $E_x$  [35].

Es el conjunto de todos los módulos utilizados por un sistema fotovoltaico determinado. La energía que puede generar, se calcula utilizando el concepto de horas solares pico (HSP), que es el tiempo equivalente dado en horas, durante el cual una irradiación de 1.000 W/m<sup>2</sup> incide sobre el plano de los módulos. Utilizando valores medios, una proyección de la generación diaria de energía se calcula utilizando la siguiente ecuación **2.24**:

$$E_D = P_{\text{FV}} \cdot \text{HSP} \cdot \text{PR} \quad (2.24)$$

En donde  $E_D$  es la energía generada por el campo solar en un día,  $P_{\text{FV}}$  es la potencia pico del campo solar, HSP son las horas solares pico y PR es el factor de rendimiento, que tiene en cuenta las pérdidas de energía causadas por diferentes factores, como: afectación de la temperatura sobre los módulos, sombreado y suciedad en las células, calor en los conductores, disparidad en los parámetros eléctricos de los módulos, así como por su inclinación y orientación; también contempla las pérdidas debidas a las ineficiencias presentes en otros elementos del sistema como son los inversores y baterías. De evaluaciones fotovoltaicas previas, se conoce que PR está alrededor de 0,7 para proyectos que utilizan inversores y bancos de baterías.

En aplicaciones comunes, se requiere transformar la energía de tipo continuo generada por el campo solar, a energía alterna. Esta función la realiza el inversor, por medio de electrónica de potencia. En Colombia se requiere que la frecuencia de operación sea igual a 60 Hz. Sus parámetros principales se definen a continuación:

- Máxima potencia DC: Es la máxima capacidad de potencia continua a la entrada del inversor.
- Potencia AC nominal: Es el valor nominal de la potencia de corriente alterna a la salida del inversor.

Un campo fotovoltaico es capaz de entregar energía eléctrica únicamente durante las horas del día en que hay luz. Además, la potencia generada no es constante y se presentan momentos en donde es inferior o superior a la demanda. A causa de estas condiciones, se requiere almacenar energía para poderla utilizar en la cantidad y tiempo adecuados. Aunque la tecnología de baterías está avanzando rápidamente, hoy día siguen siendo comunes las de tipo electroquímico (plomo ácido, níquel cadmio, etc). También se están volviendo comunes

las de tipo gel. El dimensionamiento del banco de baterías se calcula utilizando la ecuación **2.25**:

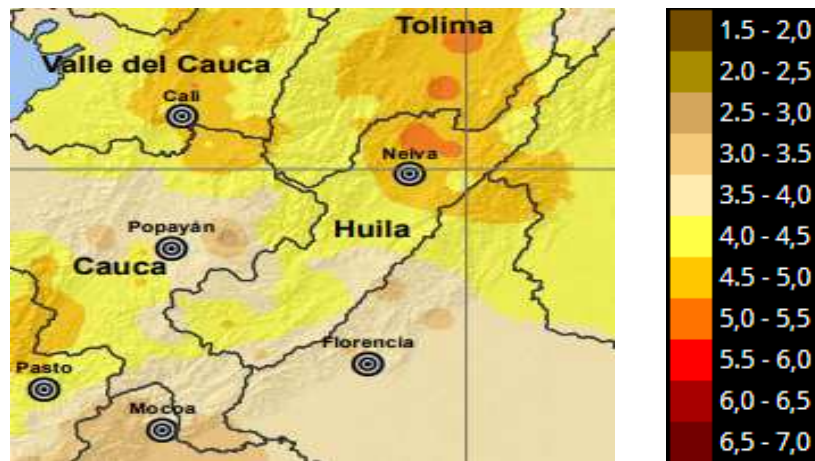
$$E_{\text{bat}} = \frac{E_{\text{AC}}}{\eta_{\text{inv}} \cdot PDD} \cdot \text{tiempo de autonomía} \quad (2.25)$$

En donde  $E_{\text{bat}}$  es la capacidad de la batería,  $E_{\text{AC}}$  es la demanda diaria de las cargas de corriente alterna,  $\eta_{\text{inv}}$  es la eficiencia del inversor, PDD es la máxima profundidad de descarga de la batería para mantener la vida útil de diseño y el tiempo de autonomía equivale al número de días continuos que requieren disponibilidad de energía.

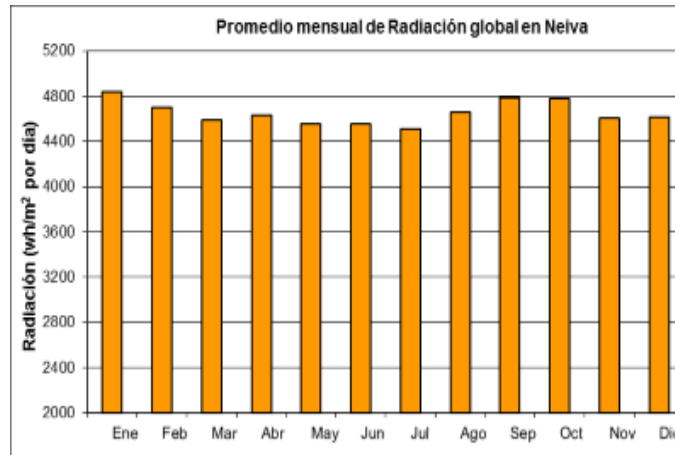
*La radiación solar* es la potencia procedente del Sol en forma de ondas electromagnéticas, de tal forma que varía dependiendo de la posición relativa de un determinado lugar respecto al Sol y de las condiciones climáticas puntuales. En una superficie perpendicular al Sol en el exterior de la atmósfera es aproximadamente de  $1.367 \text{ W/m}^2$ . En la superficie de la Tierra, se consiguen valores alrededor de  $1000 \text{ W/m}^2$ . La irradiación sobre una superficie es el valor de la energía entregada por la radiación en un determinado tiempo, habitualmente tomado en un día. En el SI se mide en  $\text{J/m}^2$ , pero en el sector eléctrico es común referirse en  $\text{kWh/m}^2$  y en proyectos fotovoltaicos es habitual darla en HSP. Existen sistemas electro mecánicos para lograr que los módulos fotovoltaicos se muevan buscando que la radiación les llegue perpendicularmente el mayor tiempo posible, con el objetivo de maximizar la producción de energía eléctrica, aunque se ha visto que los sistemas actuales no ofrecen mayores beneficios en comparación al costo. Por lo tanto, dependiendo del lugar, se procura instalar los módulos orientados e inclinados con ángulos que durante el año produzcan la mayor cantidad de energía posible. En su página Web, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), dispone del Atlas de Radiación Solar de Colombia. Allí están disponibles los valores mensuales y anual, de la Irradiación Global Horizontal de todas las regiones del país. En la Fig.2.8 y Fig.2.9 se muestra la representación gráfica del valor anual para el departamento del Huila y los valores mensuales correspondientes a la ciudad de Neiva.

## 2.9. Evaluación económica

Es uno de los criterios de análisis más utilizados para evaluar proyectos de inversión. Consiste en comparar la suma de los flujos de efectivo de una cantidad  $n$  de años futuros, actualizados en el año cero en que se considera el desembolso del valor de la inversión. Con la ecuación **2.26** se calcula el VAN para un proyecto, dado en valor monetario, en donde A



**Figura 2.8:** Irradiación global diaria media en Colombia. *Fuente:* Atlas iterativo de radiación solar del IDEAM (<http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>)



**Figura 2.9:** Irradiancia global horizontal mensual en Neiva. *Fuente:* Atlas iterativo de radiación solar del IDEAM (<http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>)

es la inversión realizada en el año 0 y  $k$  es la tasa de descuento [36].

$$VAN = -A + \sum_{n=1}^N \frac{Q_n}{(1+k)^n} \quad (2.26)$$

El cálculo del VAN considera el valor del dinero mediante una selección adecuada de  $k$ , que puede ser la tasa de recuperación mínima atractiva (TREMA), lo cual tiene como ventajas que es fácil de establecer y que en ella se pueden incluir otros factores como la tasa de inflación [37]. Para la toma de decisiones, si el VAN es positivo, quiere decir que el proyecto es atractivo, ya que la suma proyectada de flujos de efectivo son mayores que los costos de inversión. Por el contrario, si es negativo, significa que el proyecto daría pérdidas

en el período considerado. La inversión se considera financieramente indiferente si su VAN es igual a cero.

Matemáticamente, la TIR se define como la tasa a la cual el VAN es igual a cero. De esta manera, se calcula mediante la ecuación **2.27**, en donde  $A$  es la inversión realizada en el año 0,  $n$  es el número de años del período considerado en la evaluación y  $k_{TIR}$  es la TIR [36].

$$-A + \sum_{n=1}^N \frac{Q_n}{(1 + k_{TIR})^n} = 0 \quad (2.27)$$

Conceptualmente, la TIR representa la “tasa de interés que se gana sobre el saldo no recuperado de una inversión, de tal modo que el saldo al final de la vida de la propuesta es cero” [37]. El proyecto se considerará rentable si  $k_{TIR} > k$ ; al compararse dos proyectos, se debería seleccionar aquel que tenga mayor  $k_{TIR}$ .

Es el tiempo  $n$  dado en años, en el cual la sumatoria de flujos de efectivo en la ecuación del VAN es igual a la inversión. Significa que en ese tiempo se recupera la inversión teniendo en cuenta la tasa de recuperación mínima atractiva. Es evidente que entre menor sea este tiempo, el proyecto es más atractivo.



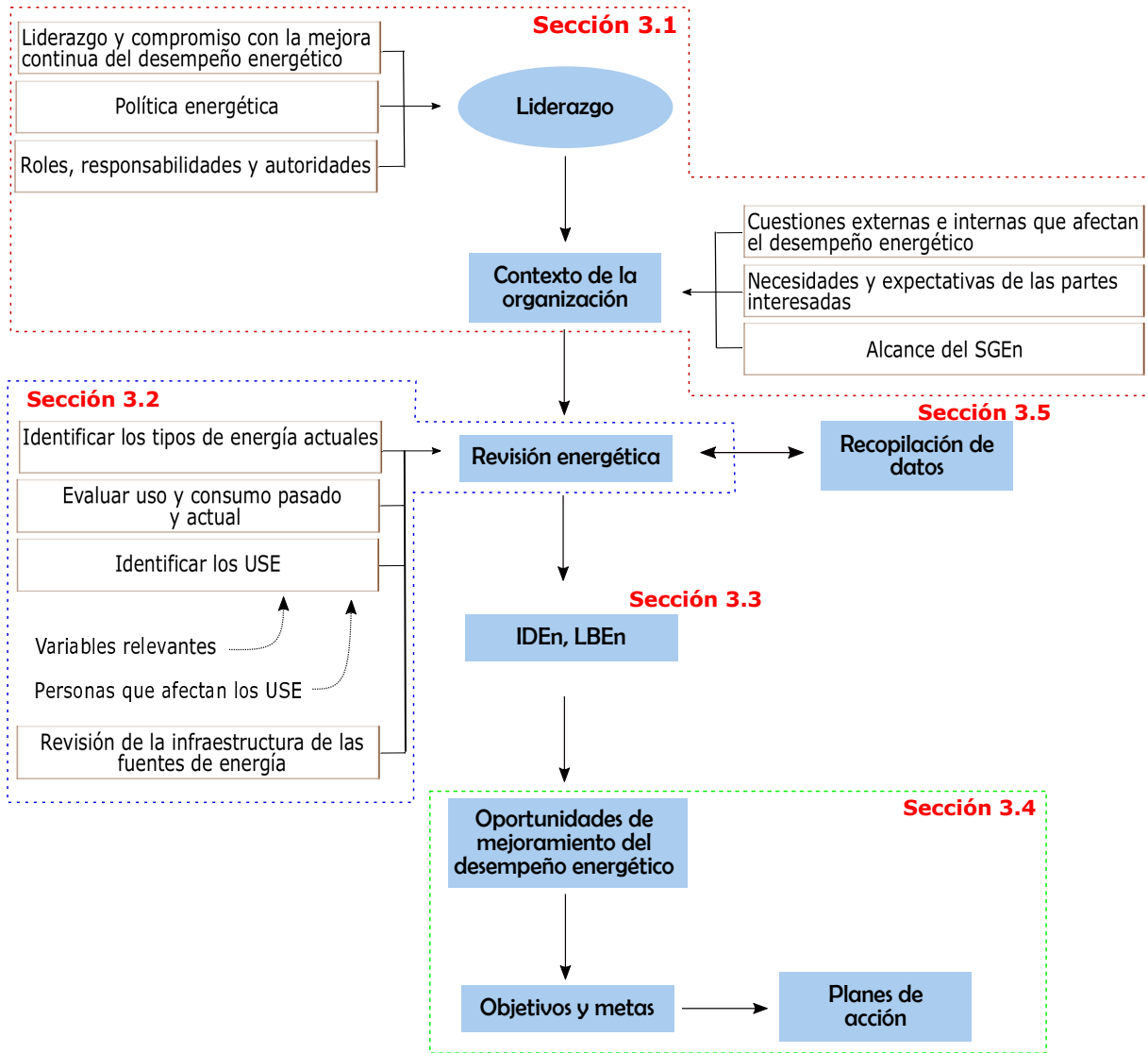
---

## Capítulo 3

# Metodología

---

La ISO 50001, al ser pensada para cualquier tipo de organización, brinda libertad sobre la forma de construir un SGE<sub>n</sub>, en el sentido de que es la organización la que en el proceso de planificación, define su desempeño energético, fija sus propias metas energéticas y también la forma de demostrar su cumplimiento con la mejora del desempeño definido. Por lo tanto, es indispensable que los esfuerzos invertidos en la planificación, se canalicen para conseguir SGE<sub>n</sub> acordes a los tamaños y contextos de las organizaciones, con las premisas de que sean realizables y realistas, considerando los recursos materiales y humanos disponibles; también, que su implementación y mantenimiento sean eficientes en sí mismos, tratando de evitar que la eficiencia energética perseguida por la norma, se logre en detrimento de la eficiencia administrativa o de otras índoles. De esta manera, la estructuración de los requisitos estipulados en la ISO 50001 y el modelo PHVA constituyen el marco metodológico de la planificación energética desarrollada en SFF. Por su parte, la dinámica de los procesos productivos que se llevan a cabo, así como los criterios de operación que se manejan y el “saber hacer” de la piscícola, dieron las pautas para la construcción de los procedimientos que se consideraron más adecuados a la organización en el corto plazo. El diagrama de flujo ilustrado en la figura **3.1**, presenta la metodología seguida. En las secciones del presente capítulo se explican cada uno de sus componentes, de acuerdo a las agrupaciones representadas en el diagrama. La revisión energética se enfocó en la caracterización de la demanda para cada uno de los tipos de procesos productivos, alevinaje y engorde, para determinar sus desempeños actuales en términos de energía consumida por unidad de producción, es decir, de intensidad energética.



**Figura 3.1:** Diagrama de flujo que describe la metodología para el desarrollo de la planificación energética en SFF. Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC-ISO 50001 (Primera actualización).

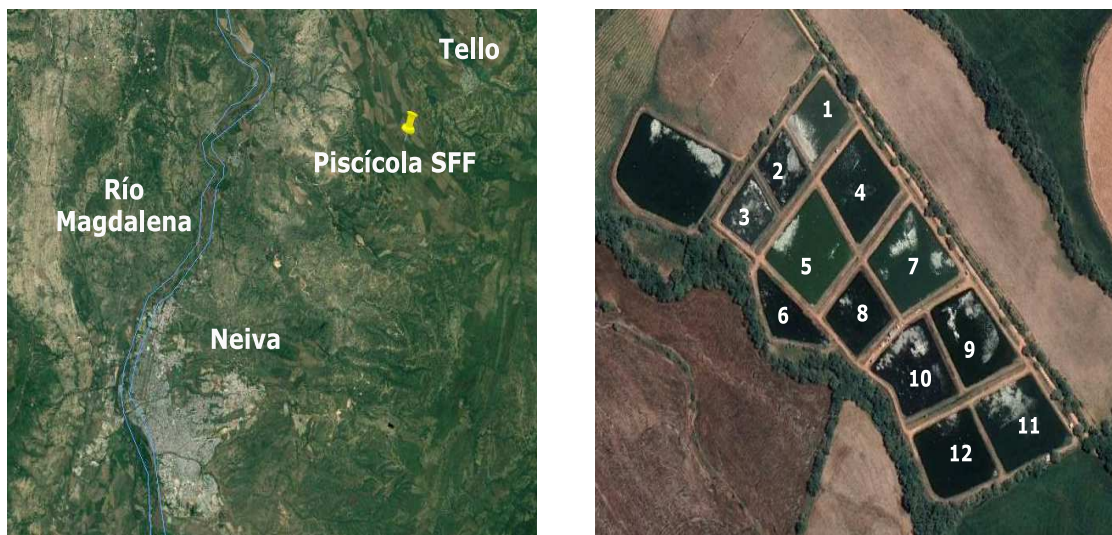
### 3.1. Liderazgo y contexto de la organización

La decisión de adoptar un SGEN, denota la existencia de liderazgo organizacional y que la alta dirección tiene en cuenta la necesidad de estar alineada con las directrices globales de sostenibilidad. En el apartado 5.1 la norma requiere además que la alta dirección demuestre su compromiso para mejorar el desempeño energético. Es fundamental que las organizaciones adopten los SGEN interiorizando la importancia de ser eficientes en la producción, para reducir las emisiones de GEI en procura de mantener empresas sostenibles, teniendo presente

que los esfuerzos que se realicen en esta dirección, aumentan la competitividad. Conviene reconocer que aunque las organizaciones en general, poco a poco se está dando cuenta de este fundamento, también es cierto que todavía una gran proporción de dirigentes se interesan en la adopción de los SGEN, solamente ante las posibilidades de reducción de costos, lo cual conlleva a un obstáculo grande a la hora de tomar la decisión estratégica de implementarlos: en un primer momento, se desconocen tanto los costos asociados a los planes de acción, así como una estimación cuantitativa aproximada de los ahorros potenciales. Esta incertidumbre, en la mayoría de los casos hace que los dirigentes declinen sus intenciones de embarcarse en un SGEN. Para el caso de la granja piscícola SFF, se propuso entonces, como alternativa a esta disyuntiva, iniciar con una planificación energética que proporcione luces acerca de la evaluación financiera para un emprendimiento de este tipo. Sobre esta base, la dirigencia de SFF fundamentó su compromiso con las actividades necesarias, incluyendo poner a disposición la información requerida. El desarrollo de la planificación energética en SFF se inicia con la política organizacional de intentar mejorar su desempeño energético, buscando aumentar su competitividad empresarial.

La planificación requiere que se comprenda el contexto de la organización y también sus expectativas respecto al mejoramiento del uso de la energía. Para esto, es indispensable una reunión de apertura con la alta dirección y con el equipo que se designe para los menesteres energéticos. En SFF, el operador principal fue el indicado para esta responsabilidad, ya que es él quien controla la totalidad de las actividades operativas que se llevan a cabo. La reunión se hizo en la propia piscícola, recorriendo todas las instalaciones. En este espacio se aprovechó al máximo para intercambiar la información que se consideró pertinente, como la siguiente: a) Descripción de los procesos productivos y las condiciones normales de operación; b) Los factores internos y externos, que están o no bajo el control de la organización, que afectan el desempeño energético; c) Descripción de los requisitos estipulados por la norma ISO 50001 para la planificación energética, las actividades requeridas para su desarrollo y los objetivos del trabajo de grado; d) Teniendo en cuenta que las expectativas de la organización, tienen que ver en gran medida con la determinación de oportunidades de mejora en el desempeño, se hace claridad que dentro del alcance de la planificación energética a desarrollar, en ningún momento se incluyen revisiones ni intenciones de cambio a los fundamentos de los procesos productivos; que el alcance abarca la revisión y evaluación de los equipos utilizados, los elementos que tienen que ver con la infraestructura de suministro de la energía y el control de su uso. En esta reunión también se informa que se requerirán varias visitas para recopilar datos de producción y de la energía consumida. Queda estipulado que el canal de comunicación para coordinar las visitas técnicas se hacen con el operador.

Ubicada en la vereda Mesa del Trapiche, en zona rural del municipio de Tello -Huila-, a 30 km de Neiva, la granja piscícola San Francisco Fish SAS (SFF), inició operaciones en el mes de mayo de 2016. En la figura 3.2 se muestra una toma aérea de sus instalaciones y localización. Allí se llevan a cabo actividades propias de la piscicultura de la especie *tilapia nilótica*, desarrollando dos tipos de proceso: alevinaje y engorde. Para sus actividades, SFF emplea a un operador principal que está a cargo de otras 5 personas que desempeñan labores de alimentación de los peces, pesca y mantenimiento general. Desde las primeras visitas técnicas para el desarrollo de la planificación energética, quedó de manifiesto que el personal empleado es de la región, y tiene un fuerte sentido de pertenencia con la piscícola, por lo cual se incluye de forma directa en las partes interesadas de la organización, ya que allí tienen una fuente de empleo. Para lograr un SGEN eficaz, es fundamental que las mismas personas encargadas de su implementación y mantenimiento, adquieran la cultura de la eficiencia energética. Además del propietario de SFF, quien en este caso es la alta dirección de la organización, y los funcionarios, en esta etapa todavía no se han involucrado más partes directamente interesadas en el SGEN de la piscícola. No obstante, más adelante bien puede ser parte de este grupo, el gremio piscícola del Huila ayudando a crear vínculos intergremiales con organismos financieros y de consultoría, en busca de mejorar la competitividad del sector en el mercado nacional.



**Figura 3.2:** Granja piscícola San Francisco Fish (SFF).

*Fuente: Imágenes capturadas con Google Earth.*

Los procesos de alevinaje tienen una duración aproximada de 7 semanas y se llevan a cabo en estanques con mayor infraestructura que los de engorde, recubiertos con mallas de nailon para proteger la producción, ya que cuando los peces están muy pequeños, son más

vulnerables a las aves de presa. Los peces con biomásas en el rango de 3-5 g, se depositan en un estanque y se crían hasta que alcanzan biomásas alrededor de 30 g, para luego ser trasladados a otro estanque en donde entran al proceso de engorde o se venden a otras piscícolas. A diferencia de los procesos de alevinaje, en los cuales la duración de los ciclos se ajustan a la programación, en los procesos de engorde existen mayores oscilaciones en los tiempos planeados, ocasionadas por las condiciones del mercado. No obstante, se busca que estos ciclos sean desarrollados hasta obtener peces con biomásas entre 500 g y 600 g, ya que el objetivo de la producción es el mercado nacional, en el que su venta se dificulta para producciones con biomásas mayores.

El proceso termina con la pesca, que se hace de manera artesanal. El procedimiento consiste en que 5 personas ingresan al estanque para manipular una red que abarca completamente uno de sus lados, y se realizan barridos de tal manera que se cubre la totalidad del área del estanque. Los peces acorralados son dirigidos a una jaula de pesca en donde se ubica otra red en la cual los peces son capturados; finalmente una grúa con motor eléctrico, iza la red para depositar los peces a un camión cisterna. Al final, los cubículos del camión se condenan con sellos para el control del transporte de la producción hasta las comercializadoras. La figura 3.3 ilustra la actividad de pesca.



(a) Barrido de estanque con redes.



(b) Izaje de la producción a camión cisterna.

**Figura 3.3:** Actividad de pesca en SFF.

El área total de las instalaciones de la piscícola es de 120.198 m<sup>2</sup>. Actualmente dispone de 11 estanques de producción, construidos en tierra; además tiene un estanque adicional, utilizado como sumidero de las aguas residuales. En la Tabla 3.1 se especifican las dimensiones principales de todos los estanques. Principalmente para utilizar en las actividades de agricultura y ganadería, la vereda Mesa del Trapiche cuenta con un distrito de riego cuya fuente es el río Fortalecillas, afluente del río Magdalena. Uno de los canales pasa frente a la piscícola y desde allí, por gravedad, utilizando un tubo de 10" de diámetro y 30 m de lon-

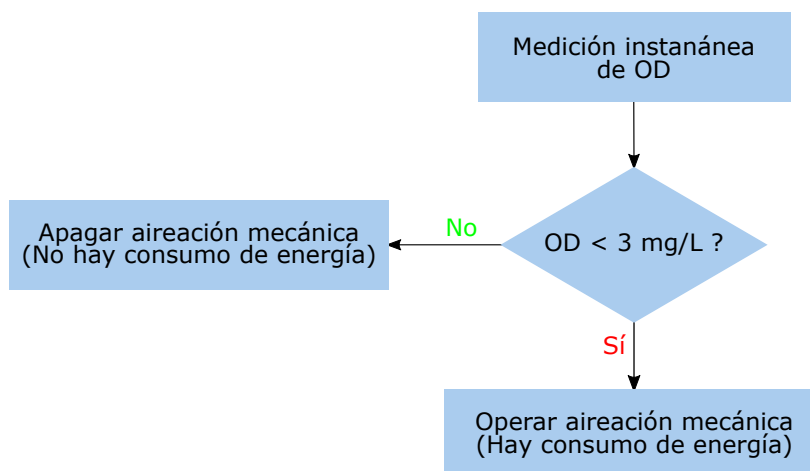
gitud, se suministra el agua requerida para sus respectivos procesos productivos. Las aguas residuales deben depositarse en el sumidero, en donde se realiza un proceso de decantación antes de ser vertidas nuevamente al canal del distrito de riego.

**Tabla 3.1:** Características de los estanques de SFF.

No	Tipo	Área [m <sup>2</sup> ]	Volumen [m <sup>3</sup> ]
1	Producción	5.657,23	10.183,01
2	Producción	4.340,37	7.812,67
3	Producción	4.160,52	7.488,94
4	Producción	9.320,30	16.776,54
5	Producción	9.858,23	17.744,81
6	Sumidero	5.360,39	9.648,70
7	Producción	9.685,91	17.434,64
8	Producción	5.795,57	10.432,03
9	Producción	8.875,24	15.975,43
10	Producción	9.217,58	16.591,64
11	Producción	10.024,81	18.044,66
12	Producción	8.411,44	15.140,59
Área total de la piscícola [m <sup>2</sup> ]		90.707,59	
Área total productiva [m <sup>2</sup> ]		120.198,00	
Porcentaje de área productiva		75,47 %	

Los estanques de la piscicultura continental, son sistemas dinámicos muy complejos, en los cuales interactúan un conjunto de variables, cada una las cuales depende de otras. Es así como por ejemplo, el ritmo de crecimiento de los peces depende de los parámetros de la calidad del agua, los que a su vez dependen del fitoplancton presente en el estanque, que es función de las condiciones biológicas que éste ofrece, y del propio comportamiento poblacional de los peces. Por lo tanto, se dificulta llevar un control riguroso a todas las variables involucradas, pero la experiencia de la industria ha contribuido a establecer controles simplificados que por ahora han resultado ser muy prácticos. Para contribuir a la desgasificación de sustancias nocivas y lograr mejores parámetros de calidad de agua, tanto en los estanques de alevinaje como en los de engorde, se hacen recambios de agua diarios, con duraciones aproximadas de 12 horas. Consisten en verter agua de suministro y al mismo tiempo sacar agua residual, que es dirigida al estanque sumidero. Todos los estanques cuentan con 2 ductos de 6" de diámetro en la entrada y 1 de 8" de diámetro en la salida. Para mantener la cantidad de oxígeno requerida, se utiliza la aireación mecánica durante los tiempos en que sus valores bajan a niveles críticos. De esta manera, la variable que determina su funcionamiento es el oxígeno disuelto; si el valor medido en un determinado estanque es menor a 3 [mg/L],

entonces se activa la aireación mecánica, como se muestra en la Fig. 3.4.



**Figura 3.4:** Criterio para activación de aireación mecánica.

La AM es el uso principal que se le da a la energía eléctrica. Se estima que el costo asociado al consumo de energía en este uso, puede ser el segundo de mayor peso en los costos totales de la producción piscícola, después de la alimentación de los peces. La causa raíz de que en la piscicultura continental la AM sea un componente fundamental, es la limitación en el uso del agua, que en el sector rural del Huila, es regulado por la entidad gubernamental regional Corporación Autónoma del Alto Magdalena (CAM). SFF actualmente tiene autorizado un suministro de agua de 18 [L/s] y uno de los riesgos externos de la piscícola es que en el futuro, debido al recrudecimiento de los efectos del calentamiento global, la restricción del uso del agua aumente. También hacen parte de este tipo de riesgos, la volubilidad de la tarifa de energía eléctrica por *kWh*, que en el año 2019 tuvo un incremento de 16,7% y en el 2021 de 9,7% respecto a sus años anteriores; y los factores del clima que inciden en la producción de OD por cuenta del fitoplancton, pueden verse afectados por el cambio climático que el mundo está experimentando. Otros riesgos de tipo interno, que están bajo el control de la organización, son los cortes de energía en las redes de Electrohuila y pérdidas de producción representadas por muertes de los peces debido a inadecuado control en la operación de los aireadores. Para mitigar los primeros, se dispone del generador de emergencia, y para los segundos, los funcionarios de la piscícola deben estar haciendo mediciones de OD, especialmente en las noches y días nublados.

## 3.2. Revisión energética

Para desarrollar la revisión energética, en el *apartado 6.3* la norma requiere que la organización debe: a) Analizar el uso y consumo de energía con base en la medición y otros datos, identificando los tipos de energía actuales y haciendo una evaluación de los usos y consumos pasados y presentes; b) Con base en el análisis, identificar los usos significativos de la energía (USE), determinando para cada uno de ellos, las variables relevantes y el desempeño energético actual e identificando las personas bajo su control que influyen en cada USE. Una vez revisado y analizado el contexto de la organización, se consideró viable llevar a cabo la revisión energética con la información disponible. Se encontró que en SFF los procesos productivos son desarrollados con criterios definidos, determinados por los objetivos comerciales de la dirección, como son las densidades de siembra, los tamaños iniciales de los peces, sus tamaños finales proyectados, la duración de los ciclos productivos, la potencia instalada requerida para aireación mecánica, así como los horarios proyectados para su utilización.

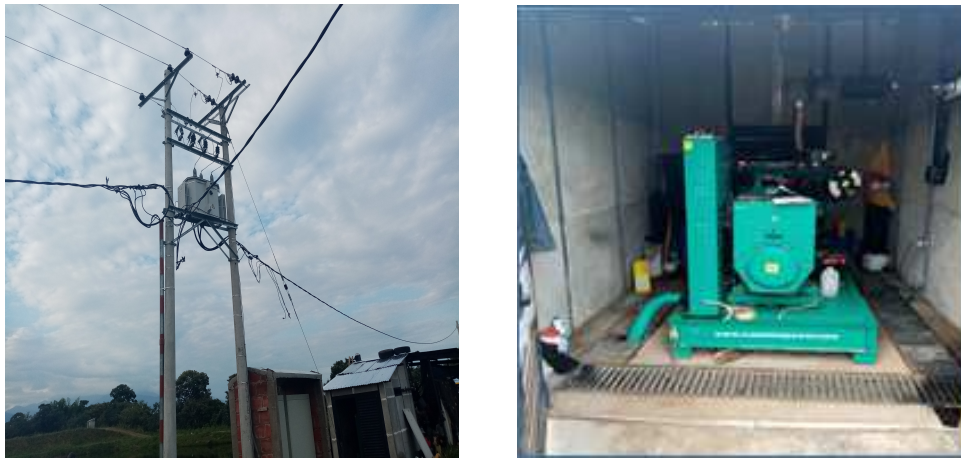
De acuerdo con la caracterización de los procesos productivos, se tiene que el producto final obtenido en la crianza de peces, está representado en la biomasa final que alcanzan hasta cuando se realiza la pesca. Se puede identificar que este proceso demanda energía de tipo químico, contenida en el alimento requerido por los peces y en los parámetros del agua, especialmente el oxígeno disuelto que necesitan para respirar sanamente. Considerando que la norma no permite la exclusión de ningún tipo de energía dentro del alcance y los límites del SGEN, es importante indicar que las interacciones energéticas de tipos químico y biológico entre los nutrientes alimenticios, los parámetros de la calidad del agua y el comportamiento biológico de los peces, no se incluyen en el alcance, porque no están bajo la autoridad de la organización. En este aspecto, el control de la operación se limita a suministrar cantidades de alimento sugeridas por proveedores reconocidos en el mercado en las horas indicadas, de acuerdo a la etapa de crecimiento de los peces, bajo la supervisión de veterinarios consultores y procurar conservar los parámetros de calidad de agua recomendados. El tipo de energía a considerar en el alcance del SGEN, es la eléctrica, ampliamente utilizada para la aireación mecánica de los estanques, ya que ésta actúa sobre la variable relevante OD, y hay pleno control de su utilización por parte de la organización. Los límites del SGEN se circunscriben a las instalaciones de la piscícola en donde se llevan a cabo los procesos productivos.

### 3.2.1. Descripción de instalaciones eléctricas

Se realizó una inspección general a la infraestructura eléctrica verificando los planos disponibles. Las instalaciones eléctricas de SFF cuentan con certificación RETIE expedida en el



mes de junio del año 2016. Éstas disponen de un transformador trifásico 13.2 kV / 220 V-127 V de 112.5 kVA montado en estructura tipo poste, ubicado aproximadamente en el centro de la piscícola, buscando obtener valores de regulación aceptables en los ramales de distribución de baja tensión que van hacia diferentes direcciones de la piscícola. La alimentación primaria del transformador es por medio de red aérea de aproximadamente 120 m en conductor ACSR No 1/0 AWG desde las redes de Electrohuila a 13.2 kV que pasan al frente de la entrada a la piscícola. Se dispone también de un generador diésel de emergencia de 100 kVA controlado por medio de transferencia automática.



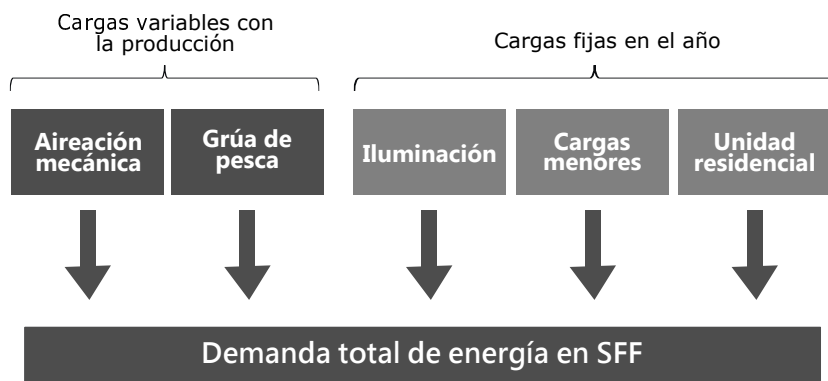
**Figura 3.5:** Transformador de 112.5 kVA y generador diésel de 100 kVA

Junto a la estructura del transformador, se ubican tres tableros de uso exterior: a) Un tablero con medición semidirecta de la energía suministrada por Electrohuila; b) Un tablero con transferencia automática; c) Un tablero de distribución con interruptor general con protección diferencial. El tablero de distribución tiene las salidas con sus respectivas protecciones para tres circuitos ramales trifásicos a 220 V que distribuyen la energía hacia las diferentes cargas por medio de red aérea en cable de aluminio trenzado. Cerca de los lagos, fijados en poste, se dispone de tableros tipo exterior que albergan las salidas protegidas con guardamotores (grupos de hasta 5 salidas), para la alimentación de cada uno de los motores de los aireadores. Cada aireador utiliza cable multiconductor 4 x No 12 AWG que lleva las tres fases y el conductor de puesta a tierra conectado a la carcasa, conectado al sistema de puesta a tierra de las instalaciones.

### 3.2.2. Uso y consumo de energía en la actualidad

En SFF, la energía eléctrica se usa exclusivamente para actividades relacionadas con la producción piscícola, ya sean operativas o administrativas. La identificación de las cargas

instaladas, así como sus condiciones de operación, se realizó mediante descripción del operador de la piscícola. Luego, los parámetros nominales de las cargas fueron verificados midiendo con analizador de redes y una pinza voltiamperimétrica UT-233 de la marca UNI-T que tiene funcionalidad de medición de energía para períodos cortos. En la figura 3.6 se muestran las cargas que componen la demanda.



**Figura 3.6:** Esquema de las cargas que componen la demanda en SFF

Los consumos de tipo administrativo son causados por la iluminación, cargas menores para actividades de mantenimiento y una unidad de vivienda al interior de la piscícola, en donde reside el operador y su familia. Por motivos de seguridad, se utilizan reflectores convenientemente ubicados en los postes que están distribuidos en el área de los estanques, que ayudan al vigilante nocturno a supervisar. Se utilizan 12 reflectores tipo LED, desde las 6:00 p.m. hasta las 6:00 a.m. En la tabla 3.2 se presentan los consumos estimados por concepto de iluminación. Para labores de mantenimiento, ocasionalmente son empleadas herramientas eléctricas entre las cuales se tiene un soldador de 2,5 kW y pulidoras de 800 W. Su utilización es aleatoria, así que para efectos de calcular el consumo de la piscícola, según estimativos del operador de SFF, se consideró una carga instalada de 2 kW funcionando 15 minutos diarios en promedio como se muestra en la tabla 3.3. En cuanto al consumo de la vivienda, éste es acorde a la demanda típica de una unidad residencial de la zona rural; su consumos estimados se presentan en la tabla 3.4.

**Tabla 3.2:** Energía consumida estimada por concepto de iluminación.

Tipo de carga	Potencia [kW]	Tiempo de Operación día [h]	Energía consumida [kWh]		
			[Día]	[Mes]	[Año]
Iluminación	1,68	12	20,16	613,2	7.358,4

**Tabla 3.3:** Estimación de consumo de energía por concepto de cargas menores.

Descripción	Potencia [kW]	Operación día [h]	Consumo de energía [kWh]		
			[Día]	[Mes]	[Año]
Equipos eléctricos menores	2,00	0,15	0,30	9,00	108,00

**Tabla 3.4:** Estimación de consumo de energía en la unidad residencial

Descripción	Consumo de energía [kWh]		
	[Día]	[Mes]	[Año]
Unidad residencial	5,86	178,09	2.137,08

Los tipos de consumo que varían según la producción, son la grúa de pesca y la AM. Para el proceso de pesca, se utiliza una grúa instalada en un planchón que puede ser halada mediante tractor. Ésta debe alzar la red con los peces capturados hasta una diferencia de altura aproximada de 3 m, desde la superficie del estanque hasta las compuertas de los cubículos de un camión cisterna que se parquea sobre la vía de acceso. El motor utilizado por la grúa es de 3 hp. Durante una actividad de pesca, se midió la energía consumida mientras se cargaba un camión cisterna y de acuerdo a la biomasa izada se calculó el factor de consumo de la grúa, como se presenta en la tabla 3.5.

**Tabla 3.5:** Demanda de energía por concepto de grúa de pesca.

Consumo [kWh]	Biomasa izada [kg]	Factor de consumo [kWh/kg]
3,5	3.600	0,001

La AM se realiza por medio de aireadores tipo splash, con capacidades de 2 hp, cuya cantidad depende del tamaño del estanque, densidad de siembra y etapa del proceso productivo. Midiendo las corrientes de operación a cinco aireadores en un estanque, se verificó que sus potencias varían desde 1,48 kW a 1,79 kW con factores de potencia de 0,7. Para compensar la energía reactiva aportada por cada aireador, se dispone de un banco de condensadores en el barraje principal. En la figura 3.7 se muestra la medición realizada en 30 aireadores que se pusieron en funcionamiento en un momento determinado. La potencia registrada fue de

45,3 kW resultando una potencia promedio de 1,51 kW por aireador, utilizada en los cálculos realizados. Se evidenció en el momento de la medición que el factor de potencia total estaba en 0,78 debido a que el banco de condensadores estaba presentando una anomalía respecto a su desempeño normal.



**Figura 3.7:** Medición de 30 aireadores de 2 hp operando en SFF con analizador de redes, en barraje principal de tablero de distribución

A lo largo del día, el operador hace mediciones a los niveles de oxígeno disuelto en todos los estanques, de tal manera que si se acercan a un valor límite mínimo, los aireadores se ponen en operación. Aunque se sabe que la tilapia nilótica es capaz de sobrevivir con niveles de oxígeno disuelto de 2  $[mg O_2/L]$  durante períodos de hasta 8 horas, en SFF el valor crítico para poner en funcionamiento la aireación mecánica es de 3  $[mg O_2/L]$ , ya que se necesita tiempo para la recuperación del OD. Debido a que no existe submedición dedicada a la AM, utilizando los criterios de operación, la estimación de la demanda total de la piscícola por este concepto, se realizó calculando el *índice de consumo (IC)* para cada tipo de proceso, es decir, el consumo promedio de energía en un período sobre la producción promedio en el mismo período [38]. Para la estimación de la biomasa presente en cada semana, se tuvo en cuenta los datos de crecimiento registrados en un ciclo de alevinaje y en otro de engorde, presentados en la sección 3.5. En la tabla 3.6 se presentan los datos estimados para un ciclo de alevinaje, considerando su desarrollo en el estanque No 3 con 300.000 alevinos iniciales, densidad de siembra de 72,1  $pez/m^2$  y tasa de supervivencia de 80 %. En la tabla 3.7 se presentan los datos correspondientes a un ciclo de engorde, teniendo en cuenta su desarrollo en el estanque No 5 con 87.000 peces iniciales, densidad de siembra de 8,8  $pez/m^2$  y tasa de supervivencia de 90 %. Para el cálculo de las biomásas estimadas, las tasas de supervivencia se consideraron constantes durante toda la duración de los ciclos.

**Tabla 3.6:** Estimación de índices de consumo en un ciclo de alevinaje utilizando los criterios de operación.

Semana	Biomasa [kg]	Cantidad de aireadores	Tiempo semanal [h]	Energía semanal [kWh]	Energía acumulada [kWh]	Índice de consumo [kWh/kg]
1	1.832	1	84	127	127	0,069
2	2.687	1	84	127	254	0,094
3	4.101	2	84	254	507	0,124
4	5.580	2	84	254	761	0,136
5	6.661	3	84	381	1.142	0,171
6	7.457	3	84	381	1.522	0,204
7	8.160	3	84	381	1.903	0,233

**Tabla 3.7:** Estimación de índices de consumo en un ciclo de engorde utilizando los criterios de operación.

Semana	Biomasa [kg]	Cantidad de aireadores	Tiempo semanal [h]	Energía semanal [kWh]	Energía acumulada [kWh]	Índice de consumo [kWh/kg]
1	5.616	2	84	254	254	0,045
2	7.664	2	84	254	507	0,066
3	9.428	2	84	254	761	0,081
4	10.750	3	84	381	1.142	0,106
5	11.902	3	84	381	1.522	0,128
6	13.140	3	84	381	1.903	0,145
7	14.250	3	84	381	2.283	0,160
8	15.044	4	84	507	2.790	0,185
9	15.889	4	84	507	3.298	0,208
10	17.173	4	84	507	3.805	0,222
11	18.826	4	84	507	4.313	0,229
12	20.678	5	84	634	4.947	0,239
13	22.616	5	84	634	5.581	0,247
14	24.528	6	84	761	6.342	0,259
15	26.258	6	84	761	7.103	0,271
16	27.785	6	84	761	7.864	0,283
17	29.672	7	84	888	8.752	0,295
18	32.350	7	84	888	9.640	0,298
19	35.189	8	84	1.015	10.655	0,303
20	37.446	8	84	1.015	11.669	0,312
21	38.937	9	84	1.142	12.811	0,329
22	39.807	9	84	1.142	13.952	0,351
23	40.960	9	84	1.142	15.094	0,369
24	43.181	9	84	1.142	16.236	0,376
25	45.830	10	84	1.268	17.504	0,382

La cantidad de aireadores dispuestos en cada etapa de los ciclos de producción, está dada por el criterio adoptado en SFF, según el cual en los procesos de alevinaje se requiere 1 aireador de 2 hp por cada 3,0 *toneladas* de biomasa presente en los estanques y 4,8 *toneladas* en los de engorde. Con el fin de mitigar los riesgos de mortalidad de peces por falta de oxígeno, la aireación mecánica es utilizada todos los días en los ciclos de alevinaje; en los de engorde normalmente se requiere desde que los peces adquieren biomasa de 50 g. Los aireadores comienzan a funcionar en el rango de las 6:00 PM - 8:00 PM, y se apagan en el rango de 6:00 AM-8:00 AM. Por lo general, a medida que avanzan los procesos productivos, los aireadores deben ponerse en funcionamiento cada vez más temprano y apagarse un poco más tarde en las mañanas. En ocasiones la AM también debe funcionar durante el día, cuando la nubosidad es alta.

### 3.2.3. Consumo de energía en el pasado

Para evaluar el consumo de energía pasado, por la misma razón de que en la piscícola actualmente no existe submedición, se recurre a la facturación efectuada por el operador de red (OR). La conexión de las instalaciones eléctricas de SFF a la Electrificadora del Huila SA ESP (Electrohuila), está registrada desde octubre del año 2016. La reconstrucción del historial de consumos mensuales, se realizó con los recibos de facturación y con archivo solicitado a Electrohuila. En la tabla **3.8** se presentan los totales anuales de energía facturada, así como la estimación del consumo total en la piscícola, considerando que las veces que hubo cortes en el suministro a través de la red externa, se operó con el generador diésel de respaldo. Debido a que su horómetro no está en funcionamiento, el cálculo de la energía aportada por el generador, se realizó estimando un factor de 90 % en la confiabilidad de las redes de Electrohuila.

**Tabla 3.8:** Consumos históricos de energía

Año	Facturado por Electrohuila			Estimado con generador		Estimado total	
	Total año [kWh]	Promedio mes [kWh]	Promedio mes fp	Total año [kWh]	Promedio mes [kWh]	Total año [kWh]	Promedio mes [kWh]
2017	105.000,00	8.750,00	0,94	11.666,67	972,22	116.666,67	9.722,22
2018	60.240,00	5.020,00	0,97	6.693,33	557,78	66.933,33	5.577,78
2019	101.700,00	8.475,00	0,92	11.300,00	1.883,33	113.000,00	18.833,33

Tomando la información histórica de la biomasa cosechada en cada proceso durante el período 2017-2019, presentada en la tabla **3.9**, para estimar la demanda por concepto de grúa de pesca se utilizó el factor de consumo presentado en la tabla **3.5**; para la AM se tomaron los índices de consumo al final de cada ciclo estimados en las tablas **3.6** y **3.7**,

y para las cargas fijas se utilizaron los valores calculados en la subsección **3.2.2**. En la tabla **3.10** se muestran los valores así estimados, encontrándose que los resultados finales son aceptablemente aproximados a los obtenidos en la tabla **3.8** para los años 2017 y 2019 aunque difieren considerablemente con los del 2018.

**Tabla 3.9:** Registro de la producción en SFF durante período 2017 - 2019.

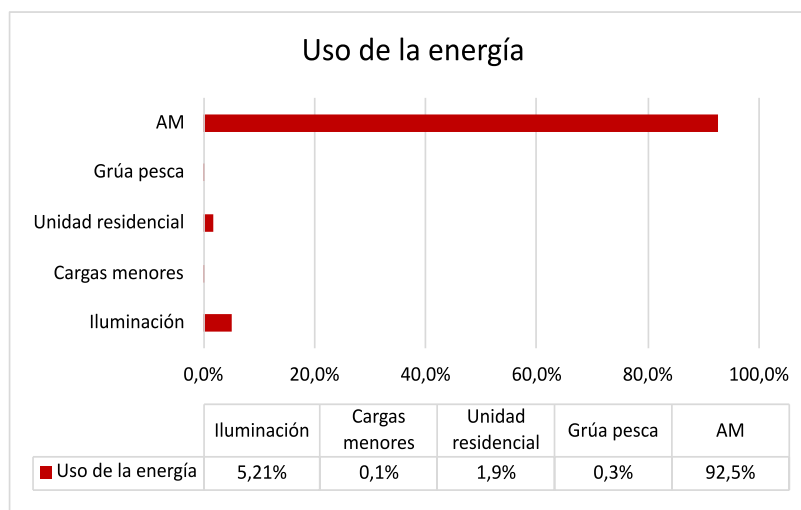
Proceso	2017	2018	2019	2020
Alevinaje	4.410	74.406	171.686	250.502
Engorde	266.740	197.970	206.420	671.130

**Tabla 3.10:** Estimación de Consumos históricos por cada tipo de carga

Tipo de carga	Factor [kWh/kg]	2017	2018	2019	Total
Iluminación	-	7.358	5.184	5.184	17.726
Cargas menores	-	108	108	108	324
Unidad residencial	-	2.137	2.137	2.137	6.411
Grúa pesca	0,001	271	272	378	922
<b>AM</b>		<b>102.922</b>	<b>92.961</b>	<b>118.855</b>	<b>314.739</b>
Alevinaje	0,233	1.028	17.337	40.003	58.367
Engorde	0,382	101.895	75.625	78.852	256.372
<b>Total</b>		<b>112.796</b>	<b>100.663</b>	<b>126.662</b>	<b>340.121</b>

### 3.2.4. Uso significativo de la energía (USE)

La norma requiere en el *apartado 6.2b*, que mediante el análisis, se identifiquen los usos significativos de la energía (USE) en la organización. Ésta los define como aquellos cuyo consumo tienen un peso importante en relación con la energía total consumida, y en consecuencia, incrementar su eficiencia, tiene el potencial de mejorar sustancialmente el desempeño energético de la organización [17]. En el caso de SFF, es evidente que la AM es por mucho el uso de la energía que demanda el mayor consumo, representado con el 92,5% del total de energía utilizada durante el período analizado 2017-2019, como se muestra en la figura **3.8**. Si bien, es importante estar haciendo seguimiento a los consumos menores para mantenerlos controlados, se tiene que vale la pena realizar evaluaciones y análisis de mayor profundidad al uso que se hace de la energía en la AM, con el fin de mejorar su desempeño.



**Figura 3.8:** Usos principales de la energía eléctrica en SFF, de acuerdo a la producción y a los consumos de energía registrados en el período 2017 - 2019.

Reconociendo la AM como el USE de la piscícola y en razón a que el comportamiento del OD es el parámetro de mayor impacto en el consumo de energía asociado a dicho uso, se determina el OD como la variable relevante, que es controlada de dos formas por la operación: una de tipo cualitativo, haciendo recambios diarios de agua en procura de que los estanques no alcancen a tomar colores verdosos. Esta condición operativa se mantiene constante y con rigor en la piscícola; y otra de tipo cuantitativo mediante la recuperación de oxígeno activando el funcionamiento de la AM. La potencia instalada requerida en aireadores y sus tiempos de operación se verifica de acuerdo a la tasa de respiración de los peces y a su población. La biomasa de los peces se monitorea mediante muestreos quincenales y la población se estima considerando una tasa de supervivencia fija a lo largo de los ciclos productivos, tomando tasas típicas que han resultado de la experiencia. No obstante, a manera de indicador de la mortalidad, diariamente se registra la cantidad de peces muertos que salen a flote, sin que este dato por sí solo provea la información precisa de la mortalidad total, ya que también existe depredación por parte de aves y de los mismos peces. El AOTR también es un factor que influye de manera fundamental en el desempeño energético de la AM, pero como es inherente a los aireadores utilizados en SFF, éste se considera como un factor estático que hay que tener en cuenta. En la sección 4.3 se presenta el procedimiento para calcular la AOTR de los aireadores. Las personas que influyen en el consumo de energía por la AM, son el operador y el vigilante nocturno, ya que como se describió en la subsección 3.2.2, son ellos los responsables de encender y apagar los aireadores. Por su parte, la alta dirección es la responsable del AOTR de los aireadores mediante su compra y propiciando condiciones de revisión y mantenimiento.



### 3.3. IDEn y LBEEn

Los indicadores de desempeño energético (IDEn), son unidades o medidas del desempeño energético que la organización debe definir en su SGEN, acorde a los procesos productivos y apropiados para hacerles seguimiento. Con el criterio de conseguir un compromiso de equilibrio entre eficacia y practicidad del SGEN, se definió un solo indicador por cada uno de los dos tipos de proceso. En la tabla 3.11 se describen los IDEn que se determinaron para SFF. Para cada uno de los indicadores descritos, la energía consumida es la que registrada por los medidores instalados en los tableros dedicados al estanque y al período correspondiente a dicho ciclo.

**Tabla 3.11:** IDEn definidos para la planificación energética en SFF

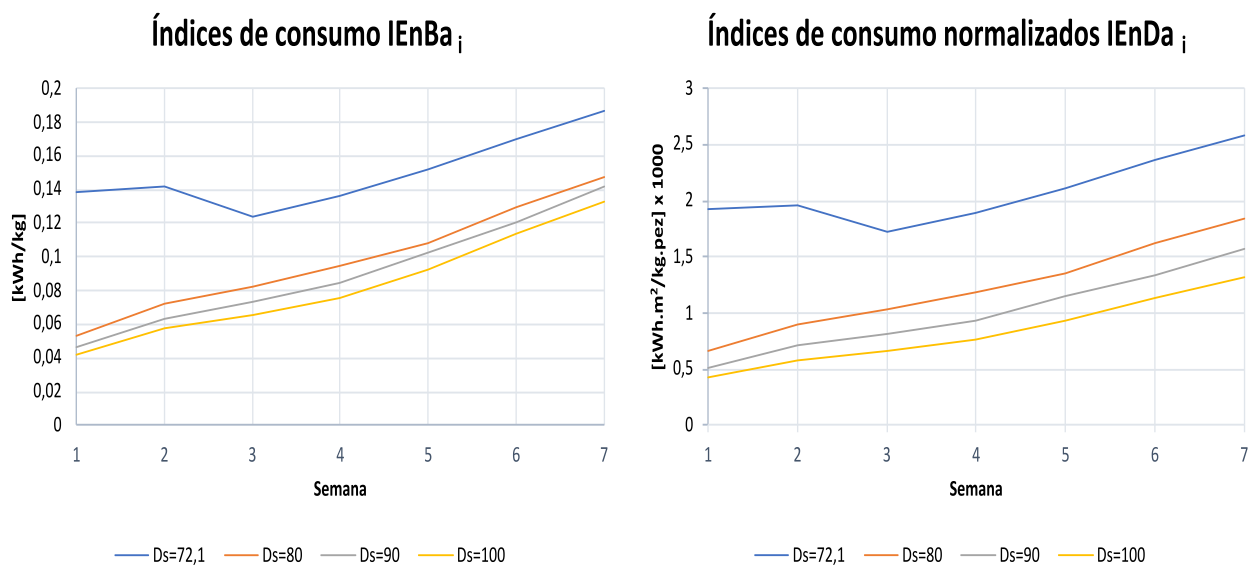
IDEn	Descripción
$IE nBa_i = \frac{Ea_i}{Ba_i}$	Índice de consumo energético en ciclo de alevinaje: es la relación entre la energía eléctrica consumida en un ciclo productivo de alevinaje $i$ , $Ea_i$ , y la producción de biomasa en ese mismo ciclo $Ba_i$ . Sus unidades están dadas en [kWh/kg].
$IE nBe_i = \frac{Ee_i}{Be_i}$	Índice de consumo energético en ciclo de engorde: es la relación entre la energía eléctrica consumida en un ciclo productivo de engorde $i$ , $Ea_i$ , y la producción de biomasa en ese mismo ciclo $Ba_i$ . Sus unidades están dadas en [kWh/kg].
$IE nDa_i = \frac{Ea_i}{Da_i}$	Índice de consumo energético normalizado en ciclo de engorde: se obtiene al dividir $IE nBa_i$ , entre la densidad de siembra correspondiente a ese mismo ciclo $Da_i$ . Sus unidades están dadas en [ $Wh.m^2/kg.pcz$ ].
$IE nDe_i = \frac{Ee_i}{De_i}$	Índice de consumo energético normalizado en ciclo de engorde: se obtiene al dividir $IE nBe_i$ , entre la densidad de siembra correspondiente a ese mismo ciclo $De_i$ . Sus unidades están dadas en [ $Wh.m^2/kg.pcz$ ].

Como el requerimiento de energía eléctrica asociado a la AM depende de la etapa de crecimiento de los peces, y debido a que siempre hay producciones que van en etapas distintas en los diferentes estanques, por lo cual sus tasas de consumo de oxígeno también difieren, no son recomendables IDEn que abarquen más de un estanque. Adicionalmente, las condiciones que se presentan en cada ciclo productivo se pueden considerar particulares debido a las múltiples variables involucradas, como las climáticas, o tipos de comida, factores biológicos propios de la procedencia de los alevinos sembrados, enfermedades o tasas de supervivencia no esperadas, entre otras. Así, para el desarrollo de la planificación energética se consideran apropiados IDEn por ciclo, para cada tipo de proceso productivo.

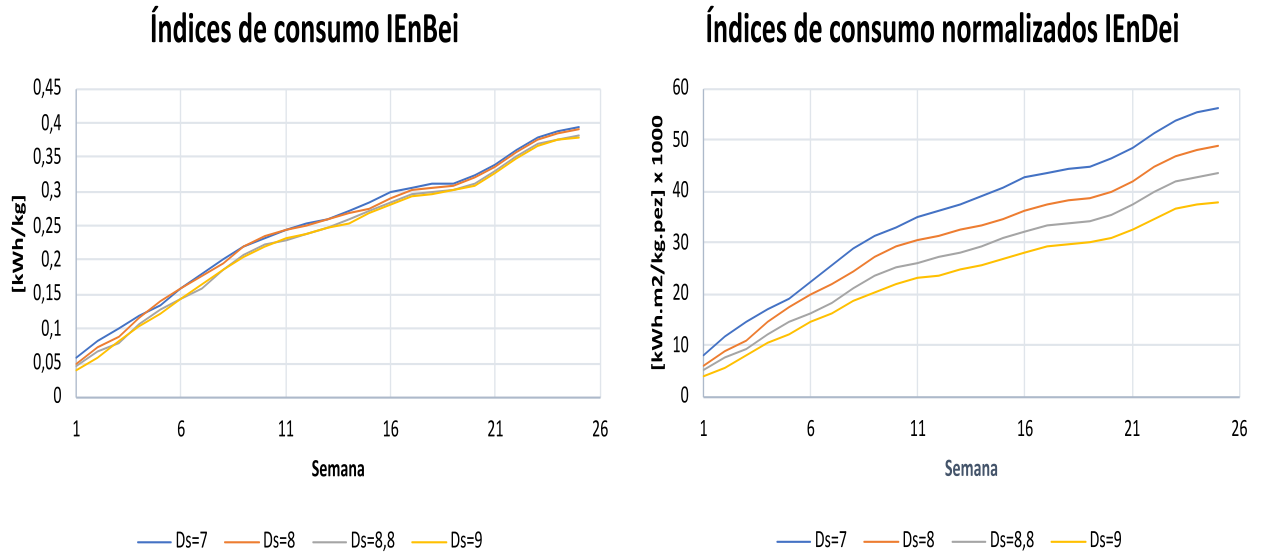
Para poder hacer seguimiento al desempeño energético de la AM mediante los indicadores definidos, se requiere establecer una línea base por cada USE, como lo estipula la norma. Ésta

será la herramienta de comparación de las variaciones ocurridas en el desempeño, de acuerdo a los resultados obtenidos en las revisiones energéticas [17]. Las LBE<sub>n</sub> se construyen con valores de los IDEn calculados en condiciones específicas, que se toman como referencia para comparar el antes y después, de medidas tomadas o cambios importantes en las condiciones operativas. En las gráficas 3.9 y 3.10 se representan las curvas que describen las LBE<sub>n</sub> para los IDEn definidos; en las tablas de Anexo 6 y Anexo 7 se muestran los valores de  $IEnBa_i$  y  $IEnBe_i$  para las densidades de siembra analizadas. Cuando existen variables relevantes que puedan afectar la equivalencia de las condiciones específicas en dos períodos que estén siendo objeto de comparación, la organización debe efectuar una normalización de las LBE<sub>n</sub>. Para ello, se puede utilizar las variables relevantes que no son controlables [38].

Como los IDEn definidos dependen de una determinada densidad de siembra que puede variar en los diferentes ciclos, se decidió normalizarlos dividiéndolos por el valor de la densidad de siembra y multiplicándolos por 1000, de tal manera que los IDEn normalizados están dados en unidades de  $[Wh.m^2/kg.pez]$ . En razón a que en SFF se sigue buscando densidades de siembra que resulten óptimas financieramente, se estimaron valores para cada uno de los IDEn en rangos de densidades de siembra que son usuales en la piscícola. Sin embargo todas las curvas representadas corresponden a un mismo desempeño energético determinado por los criterios de operación actuales, con los que fueron calculadas.



**Figura 3.9:** LBE<sub>n</sub> para los IDEn definidos, que equivalen a un mismo desempeño energético con diferentes valores de Ds en ciclos de alevinaje



**Figura 3.10:** LBE<sub>n</sub> para los IDEn definidos, que equivalen a un mismo desempeño energético con diferentes valores de Ds en ciclos de engorde

Se tiene que los valores de los indicadores aumentan a medida que los procesos productivos avanzan en el tiempo, ya que el consumo de energía aumenta a una tasa mayor que la de crecimiento de la biomasa. Por otra parte, también se observa que las curvas se desplazan hacia arriba a medida que crecen las densidades de siembra, ya que mayores poblaciones de peces requieren mayores cantidades de oxígeno, y en consecuencia, mayor cantidad de aireadores operando. Debido a que los demás usos de la energía en SFF diferentes a la AM no se consideraron USE, para ellos no se requiere determinar LBE<sub>n</sub>. Sin embargo, cuando se deban realizar proyecciones de consumo de energía, se pueden tomar los valores de consumos fijos y variables estimados en la subsección **3.2.2**.

Es conveniente establecer una línea base que tome como referencia el valor 100 para hacer un seguimiento más efectivo a los IDEn definidos. Las líneas en base 100 evitan que los valores calculados con las mediciones registradas, se conviertan en simples cifras asociadas al SGE<sub>n</sub>, permitiendo identificar inmediatamente si el desempeño evaluado ha sido positivo o negativo, y de esta manera conocer la efectividad de los planes de acción implementados. Las mediciones de los IDEn posteriores a la implementación de acciones de mejora, deben ser menores a 100 para demostrar cumplimiento con la norma en lo referente al mejoramiento del desempeño energético, es decir, las mediciones futuras deben estar por debajo de la línea base. En las gráficas **3.11** y **3.12** se presentan las líneas de base 100 de los IDEn establecidos. En el **Anexo 8** se presentan las tablas con los valores de  $IEnBa_i(100)$  y  $IEnBei(100)$ .

### Línea de Base 100 - Proceso de Alevinaje

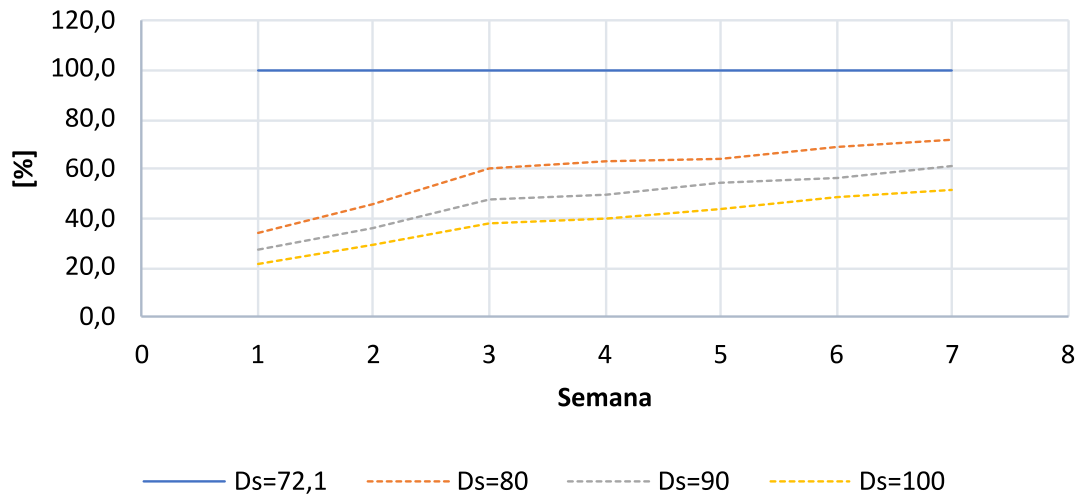


Figura 3.11: Línea de base 100 establecida para desempeño energético de ciclo de alevinaje

### Línea de Base 100 - Proceso de Engorde

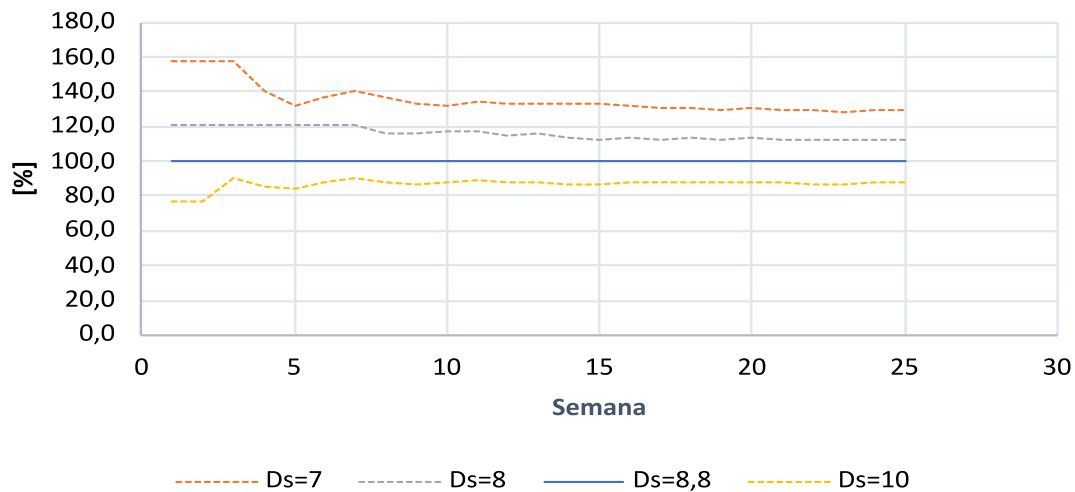


Figura 3.12: Línea de base 100 establecida para desempeño energético de ciclo de engorde

## 3.4. Oportunidades de mejoramiento

Se considera acertado que los esfuerzos para lograr mejoras en la eficiencia energética se deben concentrar en la AM, ya que representa el mayor uso que se hace de la energía eléctrica

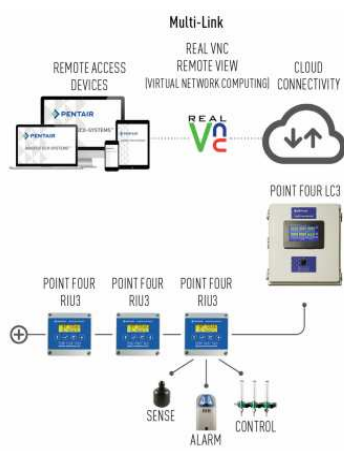
en SFF. Para ello, es preciso analizar las variables relevantes identificadas que mayor impacto tienen en este USE. Resulta fundamental tener en cuenta que las mediciones actuales que se realizan a los niveles de OD en los estanques, pueden estar siendo afectadas en su precisión por diferentes factores, ya que las condiciones del agua en un punto específico son susceptibles de cambios entre los momentos de medición, por el movimiento de los peces, los recambios de agua, la lluvia o el viento. En la figura 3.13, se muestra el equipo con referencia Ecosense OD200A del fabricante YSI, que se utiliza en la operación diaria de SFF y a un funcionario llevando a cabo la actividad de medición, para lo cual utiliza una vara a manera de caña de pescar con el objeto de ganar mayor alcance con el cable, que está debidamente marcado para lograr que la sonda se sumerja a 40 cm de profundidad. De todas maneras, los dos metros de longitud del cable, limitan la zona accequible para medir. Se identifica que podrían conseguirse mejoras en la medición, si se implementara monitoreo automático y en intervalos de tiempo aceptablemente reducidos. Así, aunque el punto de medición seguiría siendo estático, se obtendrían tendencias más ajustadas del comportamiento del OD a lo largo del día.



**Figura 3.13:** Medición manual e instantánea de OD en los estanques de SFF

Haciendo un sondeo de mercado en el sector de la piscicultura en Colombia, se encuentran disponibles equipos de marcas reconocidas como Pentair, YSI y Hanna, que permiten supervisión continua, así como generar registros históricos mediante aplicaciones dedicadas con software de supervisión. También es posible utilizar sondas de medición conectadas físicamente a dispositivos de comunicaciones inalámbricos, que utilizan tecnología satelital o GPRS para hacer llegar los datos a Internet, que pueden ser visualizados en equipos periféricos, como PCs o teléfonos inteligentes. Gracias a la baja potencia requerida por las sondas de medición y los dispositivos de comunicaciones, es viable utilizar módulos fotovoltaicos para suministrarles energía y evitar cableados. En la figura 3.14 se muestran sistemas de medición

continua de OD, disponibles en el mercado.



**Figura 3.14:** Sistemas de medición continua de OD

Por otra parte, es importante evaluar el desempeño de los aireadores tipo splash actualmente utilizados, que en su mayoría son construidos en talleres locales, lo cual servirá para dos cosas principales: 1) Contrastar los resultados con la información de desempeño proveída por fabricantes de marcas reconocidas en el mercado para este tipo de aireadores; 2) Evaluar los criterios con los que actualmente se calcula la cantidad de aireadores requeridos. En la sección 4.3 se exponen los resultados del cálculo de AOTR en uno de los aireadores de SFF. Aunque se observa que su desempeño es menor comparado con otros de marcas reconocidas, por lo cual hay una oportunidad de mejora, el reemplazo de todos los aireadores queda descartado en el corto plazo por la dirección de SFF, debido a que requeriría un capital de inversión significativo. De acuerdo a los precios en el mercado para sistemas de monitoreo continuo de OD, se opta por explorar la alternativa de lograr reducciones de tiempos de operación de los aireadores. En la sección 4.1 se desarrolla la simulación analítica del comportamiento del OD para poder estimar los potenciales de ahorro. Tomando el año 2019 como referencia, de la tabla 3.10 se toma los valores utilizados en las evaluaciones económicas a un sistema de monitoreo continuo de OD, presentadas en los **Anexos 2 y 3**.

### 3.5. Planeación para la recopilación de datos

Hacer seguimiento a los IDEn definidos para el desarrollo de la planificación energética en SFF, requiere que en cada ciclo productivo se mida la energía consumida y se registre la producción. Para ello, es necesario que se implemente submedición en cada uno de los tableros de arrancadores y que desde un mismo tablero no se alimenten aireadores de estanques

distintos. Considerando que quincenalmente se hacen mediciones muestrales de la biomasa de los peces, en los mismos períodos se deberá registrar la energía consumida en los tableros asociados al ciclo productivo. En un formato único para determinado ciclo, deberá apuntarse el consumo de energía, biomasa de la muestra de peces, estimación de la población de acuerdo al factor de supervivencia observado. Estos datos también deberán ser registrados en caso de un evento especial en el ciclo que afecte el consumo de energía, como por ejemplo una pesca parcial o picos de mortalidad. Este formato en su encabezado deberá contener la información correspondiente a la fecha de inicio, densidad de siembra, cantidad de peces sembrados, y al final, también deberá registrarse la biomasa obtenida en la pesca. Los valores que se registren al final de cada ciclo, serán los utilizados para el cálculo de los IDEn definidos. Con el objeto de obtener mayor información para futuros análisis, al mismo tiempo se debe apuntar el valor del consumo de energía contabilizado en el medidor principal, utilizando otro formato exclusivo para este medidor.

Las biomasa utilizadas para el establecimiento de las líneas base asociadas a los IDEn definidos para cada uno de los tipos de proceso productivo, fueron las que se presentan en las tablas **3.12** y **3.13**, registradas en ciclos completos de alevinaje y engorde, respectivamente. Como las mediciones de biomasa por lo general fueron tomadas quincenalmente, en el **Anexo 9** se presentan los datos de interpolación realizados para determinar los valores de las biomasa en la totalidad de las semanas que duraron los ciclos. Considerando la biomasa total de 8.160 kg en alevinaje, producto de 300.000 peces de siembra con tasa de supervivencia de 80 %, y 46.197 kg en engorde, producto de 87.000 peces sembrados y 90 % de tasa de supervivencia, se tiene que los IDEn para esos ciclos fueron  $IEnBa_i = 0,310 [kWh/kg]$  y  $IEnBe_i = 0,357 [kWh/kg]$ , de acuerdo a la energía total consumida en cada uno. De esta manera se tiene que en el primer caso el resultado obtenido representa un 33 % por encima de la línea base establecida, y en el segundo caso, 6,5 % por debajo.

Revisando los datos de la energía consumida en cada semana, es evidente que difieren de los proyectados en las tablas **3.6** y **3.7**, lo cual quiere decir que hubo desviaciones respecto a los criterios de operación estipulados. Es importante conocer las causas de tales desviaciones, que posiblemente pudieron obedecer a menor producción de oxígeno por el fitoplancton en días nublados, por ejemplo; sin embargo, actualmente no es posible hacer seguimiento al comportamiento diario del OD ya que no se cuenta con la tecnología requerida.

**Tabla 3.12:** Datos registrados durante un ciclo de alevinaje desarrollado en el estanque No 3, con  $D_s=72,1$  [pez/m<sup>2</sup>]

Semana			Biomasa [kg/pez]	Energía semanal [kWh]	Energía acumulada [kWh]
No	Fecha inicial	Fecha inicial			
2	03-07-20	09-07-20	9,5	238,67	365,9
4	17-07-20	23-07-20	21,0	374,17	1.075,9
6	31-07-20	06-08-20	30,0	491,41	2.032,4
7	07-08-20	11-08-20	34,0	497,42	2.529,8

**Tabla 3.13:** Datos registrados durante un ciclo de engorde desarrollado en el estanque No 3, con  $D_s=72,1$  [pez/m<sup>2</sup>]

Semana			Biomasa [kg/pez]	Energía semanal [kWh]	Energía acumulada [kWh]
No	Fecha inicial	Fecha inicial			
1	24-08-20	30-08-20	65,0	195,2	195,2
3	07-09-20	13-09-20	110,0	221,9	650,2
5	21-09-20	27-09-20	140,0	322,5	1.217,9
7	05-10-20	11-10-20	169,0	377,8	1.969,3
9	19-10-20	25-10-20	190,0	519,5	2.972,2
11	02-11-20	08-11-20	227,0	543,2	4.082,3
13	16-11-20	22-11-20	275,0	609,5	5.301,9
15	30-11-20	06-12-20	322,0	630,8	6.557,4
17	14-12-20	20-12-20	367,0	783,4	8.115,2
19	28-12-20	03-01-21	439,0	922,6	9.799,9
21	11-01-21	17-01-21	490,0	1.055,6	11.810,9
23	25-01-21	31-01-21	520,0	1.070,3	13.964,6
25	08-02-21	14-02-21	590,0	1.408,4	16.495,2



---

## Capítulo 4

# Análisis de resultados

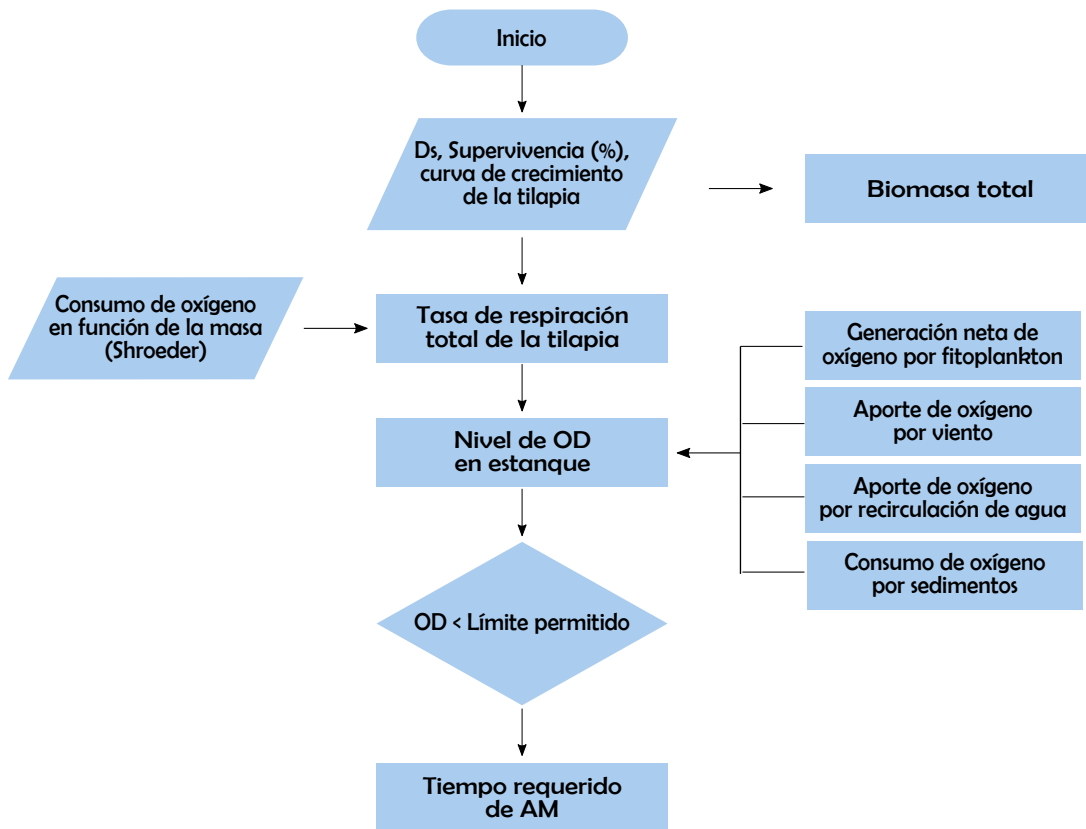
---

A partir de la información recopilada en el marco teórico respecto a los factores que aportan y consumen oxígeno, así como de las condiciones operativas señaladas por la revisión energética y las mediciones realizadas en un ciclo representativo de alevinaje y otro de engorde, en el presente capítulo se realizan los análisis para lograr mejoras en el desempeño energético de la organización, mediante la reducción del tiempo de operación de los aireadores. Para ello, se simula el comportamiento del OD a lo largo de un día típico, para cada semana en ambos tipos de proceso productivo, alevinaje y engorde, con el fin de proyectar los perfiles de la demanda aplicando las reducciones potenciales en el consumo, y se comparan con los perfiles actuales de consumo. También se presentan los resultados de la evaluación del desempeño energético de los aireadores tipo splash que utiliza SFF, con el objetivo de revisar los requerimientos actuales de AM, tanto en cantidad de aireadores como en tiempos de operación. Así mismo, se incluye la evaluación del potencial fotovoltaico con el fin de analizar posibles inversiones en este tipo de tecnología, considerando la existencia de alimentación de energía eléctrica desde las redes públicas de distribución.

### 4.1. Simulación de la variación diaria de OD

La figura 4.1 ilustra la metodología para el desarrollo de la simulación: con la densidad de siembra  $D_s$  y manteniendo constante la tasa de supervivencia a lo largo del ciclo productivo, se calcula la población de peces en cada etapa; de aquí, por un lado, con la curva de crecimiento de la tilapia propia en SFF se obtiene la biomasa total presente en los estanques, y por otro lado, de acuerdo a la tasa de consumo de oxígeno de un pez, dada por Shroeder en la ecuación 2.2, se calcula la tasa de consumo de oxígeno total para cada etapa de crecimiento. Resolviendo la ecuación 2.10 se obtiene la hora del día en la que el nivel de OD corta la recta horizontal que representa el límite mínimo permitido. Dado que en SFF se tiene el criterio de que el agua de los estanques no adquieran colores muy verdosos, se hacen recambios diarios. Esta práctica ayuda a eliminar sedimentación y también ocasiona

que las poblaciones de fitoplancton no crezcan demasiado en los estanques. Por tal motivo en la simulación se utiliza la curva definida en la ecuación 2.5 que describe el aporte neto de oxígeno para densidades bajas de fitoplancton, típico para días despejados. En el caso de los caudales de recambio, éstos fueron medidos tanto en la entrada como en la salida, constatando que son aproximadamente iguales y que tienen un valor cercano  $10 \text{ l}^3/\text{min}$ , es decir,  $36 \text{ m}^3/\text{h}$ .

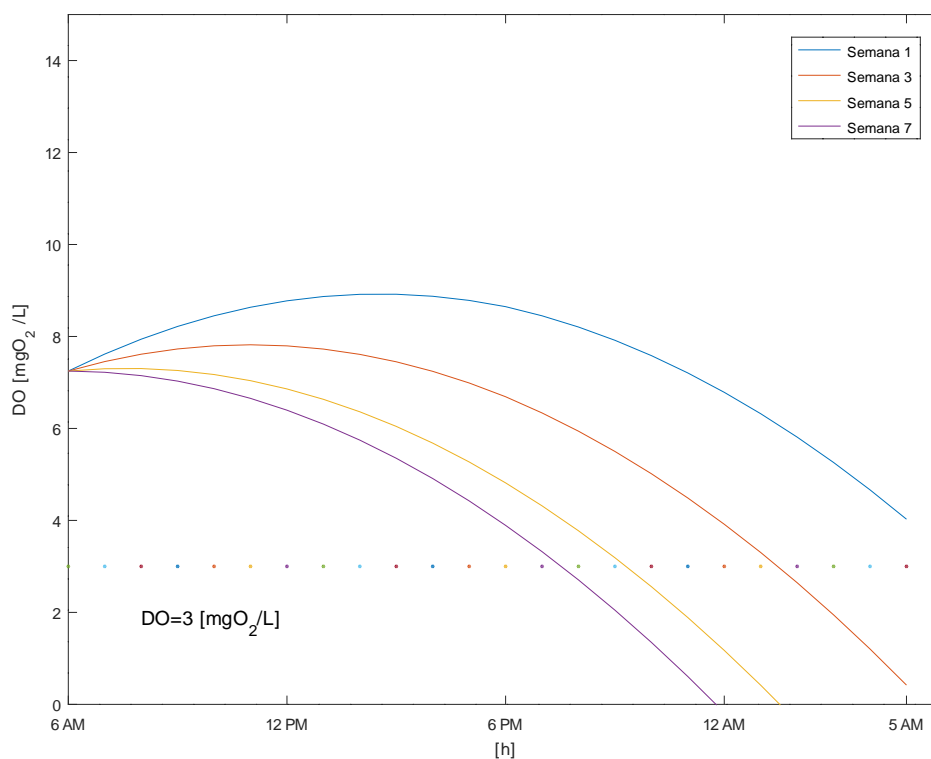


**Figura 4.1:** Diagrama de flujo para simulación de OD diario en estanques para el desarrollo de la planificación energética en SFF.

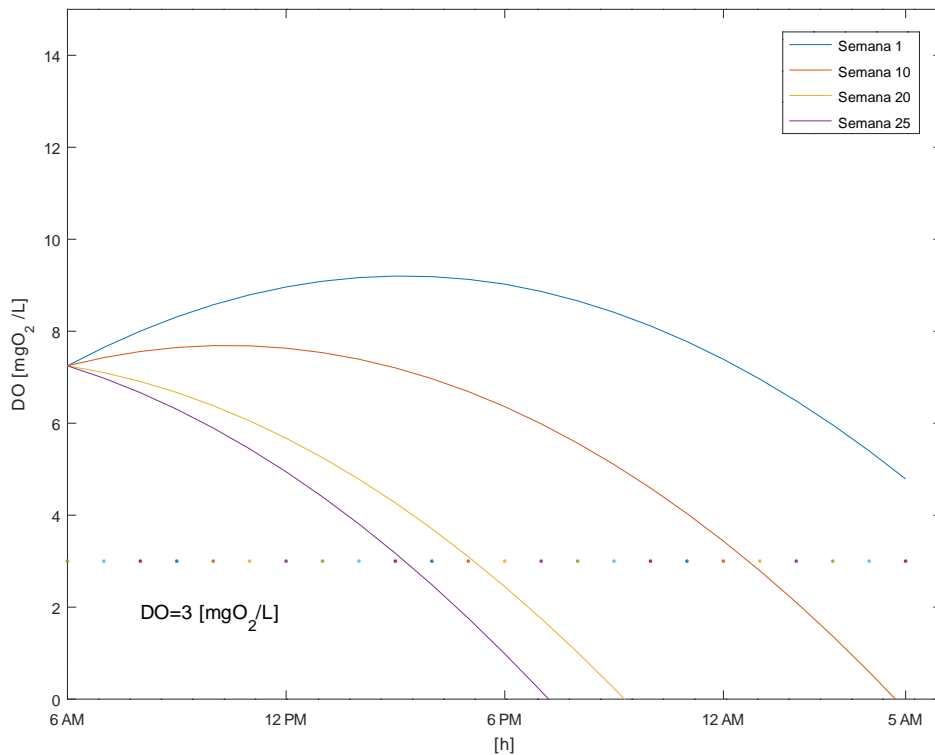
Utilizando GNU Octave se realizan simulaciones de la dinámica del OD en un día típico, con los datos relacionados en la tabla 4.1, que corresponden a las condiciones de operaciones usuales en la piscícola. En la figura 4.2 se muestran las curvas resultantes de la dinámica de OD para un día típico en el proceso de alevinaje. En la Fig. figura 4.3 se muestran las correspondientes curvas para el proceso de engorde.

**Tabla 4.1:** Datos utilizados en simulaciones con GNU Octave de dinámica de OD en un día típico.

Parámetro	Unidad	Valor
Densidad de siembra P. Alevinaje	[pez/m <sup>2</sup> ]	72,1-100,0
Densidad de siembra P. Engorde	[pez/m <sup>2</sup> ]	7,0-10,0
Profundidad promedio de estanque	[m]	1,8
Caudal de recambio	[m <sup>3</sup> /h]	36
Temperatura de estanque	[C]	29
Presión atmosférica en Tello	[atm]	0,9968
OD agua de suministro	[mg O <sub>2</sub> /L ]	5
Inicio de recambio	[Hora]	6:00 PM
Final de recambio	[Hora]	6:00AM
Densidad de fitoplancton	-	Baja



**Figura 4.2:** Dinámica de OD durante un día típico, para diferentes semanas en el proceso de alevinaje. Fuente: Gráfica realizada con Octave.



**Figura 4.3:** Dinámica de OD durante un día típico, para diferentes semanas en el proceso de engorde. *Fuente: Gráfica realizada con Octave.*

## 4.2. Ahorros potenciales en aireación mecánica

El cálculo de los ahorros potenciales en el consumo de energía por concepto de AM, en primera instancia contempla que, aunque los criterios actuales en SFF para tiempo requerido de AM en los estanques son producto de la experiencia, la medición manual e instantánea no permite asegurar que los aireadores se utilicen en momentos en que los niveles de OD son suficientes, lo cual redundaría en desperdicio de energía. En el **Anexo 11** se presentan los tiempos estimados con las simulaciones para los rangos de densidades de siembra analizados, que se podrían conseguir mediante la implementación de un sistema de monitoreo continuo de OD en cada estanque. En las tablas **4.2** y **4.3** se presentan los índices de consumo para el proceso de alevinaje y de engorde, respectivamente, calculando la energía consumida con los tiempos reducidos, manteniendo los demás criterios de operación con los cuales se estableció la línea base presentados en las tablas **3.6** y **3.7**.

**Tabla 4.2:** Estimación de índices de consumo en un ciclo de alevinaje utilizando los tiempos de operación reducidos con monitoreo continuo de OD.

Semana	Biomasa [kg]	Cantidad de aireadores	Tiempo semanal [h]	Energía semanal [kWh]	Energía acumulada [kWh]	Índice de consumo [kWh/kg]
1	5.418	1	7,6	23	23	0,004
2	7.947	1	21,9	33	56	0,007
3	12.129	2	42,9	130	185	0,015
4	16.502	2	61,0	184	370	0,022
5	19.698	3	72,2	327	697	0,035
6	22.054	3	79,2	359	1.056	0,048
7	24.132	3	84,6	383	1.439	0,060

**Tabla 4.3:** Estimación de índices de consumo en un ciclo de engorde utilizando los tiempos de operación reducidos con monitoreo continuo de OD.

Semana	Biomasa [kg]	Cantidad de aireadores	Tiempo semanal [h]	Energía semanal [kWh]	Energía acumulada [kWh]	Índice de consumo [kWh/kg]
1	5.616	2	0	0	0	0,000
2	7.664	2	9	29	29	0,004
3	9.428	2	17	53	81	0,009
4	10.750	3	23	105	186	0,017
5	11.902	3	28	127	313	0,026
6	13.140	3	33	149	462	0,035
7	14.250	3	37	168	630	0,044
8	15.044	4	40	242	873	0,058
9	15.889	4	43	261	1.133	0,071
10	17.173	4	48	288	1.421	0,083
11	18.826	4	53	322	1.744	0,093
12	20.678	5	59	448	2.191	0,106
13	22.616	5	65	492	2.684	0,119
14	24.528	6	71	641	3.325	0,136
15	26.258	6	75	683	4.008	0,153
16	27.785	6	79	719	4.727	0,170
17	29.672	7	84	888	5.615	0,189
18	32.350	7	90	953	6.568	0,203
19	35.189	8	96	1.161	7.729	0,220
20	37.446	8	100	1.213	8.942	0,239
21	38.937	9	103	1.401	10.343	0,266
22	39.807	9	105	1.421	11.764	0,296
23	40.960	9	106	1.447	13.210	0,323
24	43.181	9	110	1.494	14.705	0,341
25	45.830	10	114	1.719	16.423	0,358

No obstante, las reducciones de tiempo calculadas, han sido obtenidas considerando la curva de aporte neto de OD por el fitoplancton, en días despejados, razón por la cual es

necesario aplicar un factor de corrección que contemple los días nublados, durante los cuales el aporte del fitoplacton es menor, y en consecuencia, el potencial de reducir los tiempos de funcionamiento de los aireadores. Para ello, se recurrió a la información metereológica disponible en The POWER Project (NASA Prediction Of Worldwide Energy Resorces), tomando en cada mes, la cantidad de días totalmente despejados o parcialmente nublados, de acuerdo a las probabilidades de ocurrencia presentadas en la tabla 4.4. Así, se estima que en el año hay 121 días en los cuales es factible la reducción de tiempo de operación de los aireadores, y por ende, el ahorro en el consumo de energía proyectado, se restringe a un 33,2 %.

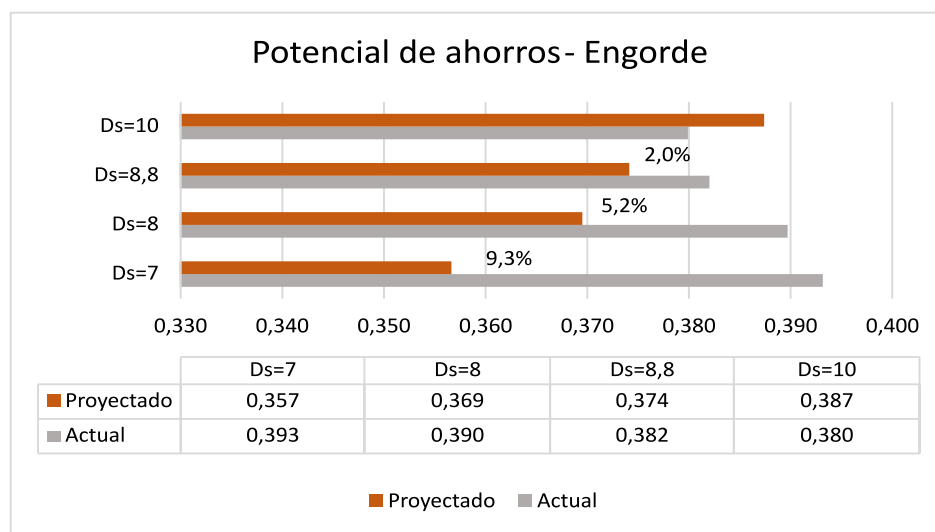
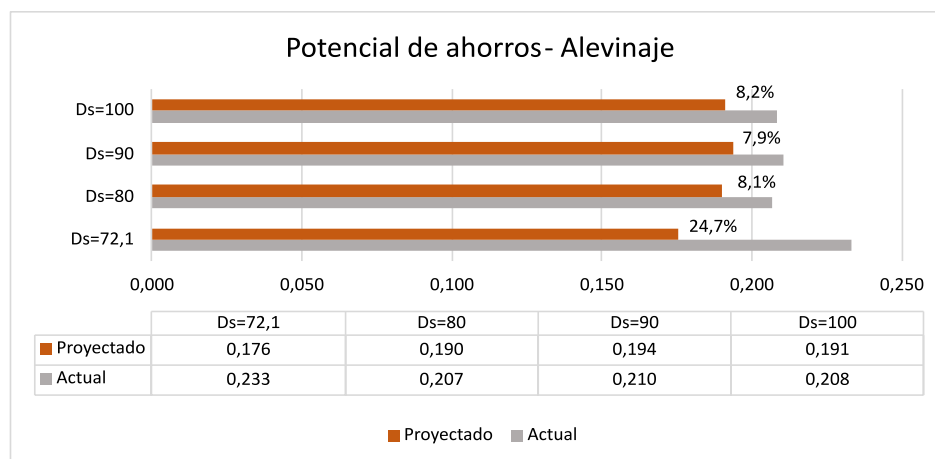
**Tabla 4.4:** Probabilidad de días despejados

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Total de días	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
Días despejados y parcialmente nublados	18	10	10	9	7	9	10	10	8	7	9	14	121
Probabilidad de días despejados y parcialmente nublados	58,3 %	37,2 %	33,6 %	30,8 %	23,2 %	31,1 %	35,5 %	33,9 %	28,8 %	25,7 %	33,2 %	46,2 %	33,2 %

En la tabla 4.5 se muestran los índices de consumo actuales y los proyectados, para las diferentes densidades en cada uno de los tipos de proceso productivo. En la fila 4 se presenta la reducción final de tiempos proyectada, teniendo en cuenta los días despejados en el año, en los cuales tienen efecto los planes de acción establecidos. Se tiene que a medida que las densidades de siembra son mayores, la oportunidad de reducir tiempos de operación respecto a los actuales, es cada vez menor, ya que a medida que aumenta la biomasa total en los estanques, los peces consumen más rápidamente el oxígeno producido por el fitoplancton. Incluso, para el proceso de engorde se evidencia que es conveniente revisar los criterios de operación actuales para densidades de siembra cercanos a 10 [*pez/m<sup>2</sup>*]. En la figura 4.4 se muestran los valores actuales índices de consumo y sus respectivos valores proyectados.

**Tabla 4.5:** Ahorros potenciales.

No	Parámetro	Alevinaje				Engorde			
		Ds=72,1	Ds=80	Ds=90	Ds=100	Ds=7	Ds=8	Ds=8,8	Ds=10
1	Índice de consumo proyectado	0,060	0,156	0,160	0,157	0,283	0,329	0,358	0,402
2	Potencial de reducción de tiempo en AM	74,4 %	24,4 %	23,7 %	24,7 %	28,1 %	15,7 %	6,2 %	-5,9 %
3	Potencial de reducción anual de tiempo en AM	24,7 %	8,1 %	7,9 %	8,2 %	9,3 %	5,2 %	2,0 %	-2,0 %
4	Índice de consumo actual	0,233	0,207	0,210	0,208	0,393	0,390	0,382	0,380
5	Índice de consumo proyectado total	0,176	0,190	0,194	0,191	0,357	0,369	0,374	0,387
6	Reducción proyectada del índice de consumo	24,7 %	8,1 %	7,9 %	8,2 %	9,3 %	5,2 %	2,0 %	-2,0 %



**Figura 4.4:** Ahorros potenciales

### 4.3. Prueba a aireador tipo splash

En un estanque de producción, una vez el OD llegó a niveles cercanos a cero, se hicieron mediciones en el área de influencia de un aireador splash de 2 hp de fabricación local, que es el tipo de aireador más utilizado en SFF; se tomaron 15 mediciones de OD, temperatura y energía en intervalos de 1 minuto. La energía consumida por el aireador durante la prueba fue de 0,42 [kWh], medida con el analizador de redes. En tabla 4.6 se muestran los datos correspondientes a la prueba realizada.

Para determinar el nivel de saturación del agua en las condiciones de la prueba, se tuvo en cuenta que la temperatura promedio fue de 27 [°C]. Considerando que el nivel de saturación

**Tabla 4.6:** Resultados de prueba realizada a desempeño de aireador tipo splash de 2 hp utilizado en SFF.

Tiempo [h]	OD [mg O <sub>2</sub> /L]	Saturación OD	Déficit OD [mg O <sub>2</sub> /L]	ln(Déficit OD)
0	0,1	1,3 %	7,59	2,03
1	0,31	4,0 %	7,38	2,00
2	0,92	12,0 %	6,77	1,91
3	1,75	22,8 %	5,94	1,78
4	2,54	33,0 %	5,15	1,64
5	3,17	41,2 %	4,52	1,51
6	3,61	47,0 %	4,08	1,41
7	4,18	54,4 %	3,51	1,26
8	4,55	59,2 %	3,14	1,14
9	4,94	64,3 %	2,75	1,01
10	5,23	68,0 %	2,46	0,90
11	5,5	71,5 %	2,19	0,78
12	5,75	74,8 %	1,94	0,66
13	5,98	77,8 %	1,71	0,54
14	6,14	79,9 %	1,55	0,44
15	6,27	81,6 %	1,42	0,35

del agua  $C_s$  para agua limpia a dicha temperatura es de 7,95 [mg/L]. y que la presión atmosférica en la zona de SFF es de 0,997 [atm], el nivel de saturación a esta presión se ajustó proporcionalmente, así:

$$C_s \text{ Test} = 7,95 \cdot 0,997$$

$$C_s \text{ Test} = 7,69$$

Se observa cómo el nivel de OD crece y consecuentemente el déficit arranca desde un valor igual en magnitud a  $C_s \text{ Test}$  y decrece tendiendo a 1, acorde a su definición. Mientras tanto, la variación del logaritmo natural del déficit se comporta como una línea recta con pendiente negativa. Definiendo la ecuación de esta recta como  $y = mx + b$ , en donde  $y$  representa el logaritmo natural del déficit de OD,  $x$  es el tiempo entre 0 y 15 minutos, que es el intervalo de duración de la prueba,  $m$  es la pendiente de la recta y  $b$  el valor en donde corta el eje, y aplicando regresión lineal con el método de los mínimos cuadrados se determinó que la variación del logaritmo natural del déficit de OD se ajusta a siguiente la recta:



$$y = -0,119x + 2,10$$

Calculando el logaritmo natural a los valores del déficit en los niveles de saturación de 10 % y 70 %, se puede interpolar en la recta para obtener los correspondientes tiempos. Los resultados se muestran en la siguiente tabla **4.7**, resaltados en negrilla:

**Tabla 4.7:** Logaritmo natural de déficit en los puntos con 10 % y 70 % de saturación

Saturación OD [%]	4	<b>10</b>	12	68	<b>70</b>	71,5
Ln(Déficit DO)	1,98	<b>1,93</b>	1,86	0,91	<b>0,84</b>	0,79
Tiempo [min]	1	<b>1,41</b>	2	10	<b>10,64</b>	11

Reemplazando los valores obtenidos en la ecuación **2.17**, se calcula el coeficiente de tasa actual de transferencia, así:

$$K_{LaT} = \frac{1,93 - 0,84}{(10,64 - 1,41)/60} \quad [h^{-1}]$$

$$K_{LaT} = 7,086 \quad [h^{-1}]$$

Ahora, se calcula el coeficiente de transferencia estándar, de acuerdo a la ecuación **2.18**:

$$K_{La20} = \frac{7,086}{1,024^7} \quad [h^{-1}]$$

$$K_{La20} = 6,0 \quad [h^{-1}]$$

Teniendo el coeficiente estándar de transferencia, se puede calcular el SOTR utilizando la ecuación **2.11**:

$$SOTR = 6,0 \cdot 7,69 \cdot 78 \quad [(kg \ O_2) \cdot h^{-1}]$$

$$SOTR = 3,6 \quad [(kg \ O_2) \cdot h^{-1}]$$

Después, dividiendo en la ecuación **2.12** por la energía consumida registrada en la prueba, se obtiene el valor de la SAE:

$$SAE = \frac{3,6 \ kg \cdot O_2 \cdot h^{-1}}{2,76 \ kW}$$

$$SAE = 1,30 \quad [(kg \ O_2) \cdot (kW h)^{-1}]$$

## 4.4. Evaluación fotovoltaica

Los análisis correspondientes a la opción de implementar un sistema fotovoltaico en SFF, fueron realizados utilizando la versión 29.02.2020 de System Advisor Model (SAM), desarrollado por The National Renewable Energy Laboratory (NREL), del departamento de energía de los Estados Unidos. SAM es un software libre de código abierto, útil para evaluaciones técnico económicas en proyectos fotovoltaicos residenciales, comerciales, industriales y de alta concentración, además de otros sistemas de energía renovable. Todos los códigos fuente y demás herramientas requeridas por SAM, se pueden encontrar en el repositorio público de SAM GitHub. Los datos climatológicos utilizados son los del archivo 1207983\_3.05\_-75.14\_tmy-2018, suministrado por la base de datos de NREL. Para descargarlo, se ingresaron las coordenadas geográficas de latitud 3,043119 y longitud -75,169764, que corresponden a la ubicación del transformador existente en SFF. El archivo es de tipo TMY (Typical Meteorological Year), actualizado al año 2018. Los archivos TMY son creados concatenando 12 meses típicos resultantes de análisis estadísticos, a partir de los datos meteorológicos correspondientes a un área específica, recogidos de estaciones satelitales para un conjunto de años [39]. La base de datos NREL en su página WEB señala que la información multianual de la que dispone, está organizada por cuadrículas terrestres de 4 km por 4 km. Es decir que el archivo TMY utilizado contiene la información meteorológica disponible por NREL para una zona de 4 km<sup>2</sup>, dentro de la cual se encuentra SFF.

El tipo de instalación tenida en cuenta en los análisis, es híbrida, ya que actualmente SFF dispone de suministro de energía a través de las redes públicas y tiene generador diésel de respaldo. Debido a que por su operación, la piscícola demanda energía principalmente en la noche, se requiere de banco de baterías, con la posibilidad de exportar los excedentes, utilizando medidor bidireccional, tal como lo permite la resolución 30 del 2018 de la CREG. Ya que las redes de distribución de baja tensión de SFF son propias y no están conectadas a ninguna otra red de baja tensión del operador de red (OR), la energía exportada sería entregada al circuito de media tensión de Electrohuila, a través del transformador 13.2 kV/227-120 V, existente.

### 4.4.1. Cálculos preliminares

Antes de utilizar el software, con el fin de tener una referencia de partida para el análisis de los cálculos que se obtengan, es recomendable hacer un cálculo preliminar de la cantidad de módulos requeridos. Esto se puede realizar despejando  $P_{FV}$  de la ecuación **2.24**, con PR

$=0,7$  (factor de rendimiento típico para sistemas FV con baterías) y  $HSP=4,5$  ( Valor crítico que se presenta en al mes de julio, de acuerdo a datos del IDEAM). Con la ecuación **2.25** se calcula la capacidad energética de la batería en [kWh], tomando 1 día de autonomía y considerando un valor de 75 % de profundidad de descarga de las baterías. Aunque de los datos meteorológicos del IDEAM se tiene que en la zona en donde está ubicada SFF, se presentan 4 días consecutivos en condiciones de nubosidad, se optó por un solo día de autonomía, ya que la inversión económica en baterías incrementa demasiado los costos por cada día de autonomía y considerando que el sistema, al ser híbrido, tendría el respaldo de la red de Electrohuila y de la planta diésel de 100 kW existente. Para mejorar el desempeño de los inversores, se buscó obtener una relación  $W_{DC}/W_{AC} = 1,2$ , así que la potencia AC proyectada de los inversores, se tiene dividiendo por este factor la potencia DC del campo solar. Se consideraron dos sistemas fotovoltaicos: la *Alternativa No 1* con campo solar diseñado para que la producción de energía por parte del sistema fotovoltaico sea aproximada a la demanda anual, tomando como referencia el año 2019 que fue de 113.000 [kWh], ya que la dirección de SFF considera que durante este año la organización se ajustó a los niveles de producción esperados en el futuro, de acuerdo a la capacidad económica y las proyecciones comerciales actuales; y en razón a que un sistema fotovoltaico con capacidad de atender la totalidad de la demanda anual de la piscícola pudiese requerir un capital de inversión elevado para los recursos actuales de SFF, se tuvo en cuenta también la *Alternativa No 2* con capacidad de potencia menor al 15 % del transformador existente, ya que su capital de inversión lo hace más viable, y además permite acceder al proceso de conexión simplificado estipulado por la resolución CREG 030 de 2018. Los resultados se presentan en la tabla **4.8**.

**Tabla 4.8:** Cálculos preliminares de campo solar

Sistema fotovoltaico	Energía proyectada		Cálculos preliminares		
	Anual	Día	Campo solar Mín	Potencia de salida	Capacidad de batería
	[kW.h]	[kW.h]	[kW <sub>DC</sub> ]	[kW <sub>AC</sub> ]	[kW.h]
Alternativa No 1	113.000	309,6	98,3	81,9	619
Alternativa No 2	57.485,5	157,5	20,25	16,8	315

#### 4.4.2. Configuración del campo solar

SAM dispone en su base datos de una amplia gama con referencias de módulos fotovoltaicos, inversores y baterías, de múltiples fabricantes representativos en el mercado. En el

presente trabajo se optó por el módulo JKM400M-72L con capacidad de 400 W STC de tipo monocristalino, del fabricante Jinko Solar, debido a que hoy día es comunmente ofrecido por los proveedores, su potencia nominal es de las más altas que actualmente se están manejando y la eficiencia de 20,85% es muy buena respecto a las que se encuentran en el mercado. En la tabla 4.9 se muestran sus características técnicas.

**Tabla 4.9:** Módulo fotovoltaico JKM400M-72L de Jinko solar utilizado en evaluación de potencial FV en SFF

Parámetro	Valor
Cantidad de células	72
Tipo	Si Monocristalino
Área del panel [m <sup>2</sup> ]	1,92
Temperatura nominal de operación [T°C]	45,6
Máxima potencia nominal STC [W <sub>DC</sub> ]	400,32
Eficiencia [%]	20,85
Tensión V <sub>OC</sub> [\$/kW <sub>DC</sub> ]	49,8
Corriente I <sub>SC</sub> [A]	10,4
Tensión V <sub>PMP</sub> [\$/kW <sub>DC</sub> ]	41,7
Corriente I <sub>PMP</sub> [A]	9,6
Coefficiente de temperatura para V <sub>OC</sub> [V/°C]	-0,155
Coefficiente de temperatura para I <sub>SC</sub> [A/°C]	0,007
Coefficiente de temperatura para P <sub>PMP</sub> [%/°C]	-0,406

SAM también cuenta en su base datos con variadas referencias de inversores de fabricantes reconocidos en el mercado. En la alternativa No 1, se opta por utilizar 2 inversores de 36 [kW<sub>AC</sub>] del fabricante Chint, y se obtiene una potencia total disponible de salida de 72 [kW<sub>AC</sub>], con una relación  $kW_{DC}/kW_{AC} = 1,25$ . Para la alternativa No 2, se seleccionó un inversor también de la marca Chint, de 36 [kW<sub>AC</sub>]. De las fichas técnicas correspondientes, se verifica la tensión  $V_{OC}$  del tipo de módulo fotovoltaico y la máxima tensión DC de entrada en los inversores, para determinar la cantidad máxima de módulos en serie que se pueden conectar en un ramal, y en consecuencia, la cantidad requerida de ramales en paralelo para cada sistema evaluado. Con una determinada configuración seleccionada, se pueden ir realizando simulaciones parciales hasta encontrar la configuración deseada para el sistema fotovoltaico proyectado. Para las dos alternativas evaluadas, se consideró un ángulo de inclinación de los módulos de 30° y asimuth de 180°, es decir, orientados hacia el Sur. En la tabla 4.11 se muestran los datos de diseño para las dos alternativas planteadas.

**Tabla 4.10:** Parámetros técnicos de los inversores utilizados en evaluación de potencial FV en SFF

Parámetro	Alternativa 1	Alternativa 2
Referencia	CPS SCA25KTL	CPS SCA14KTL
Marca	Chint	Chint
Máxima potencia [ $\$/kW_{AC}$ ]	25,4	14
Máxima potencia [ $\$/kW_{DC}$ ]	26,4	14,67
Potencia durante operación [ $\$/W_{DC}$ ]	79	38,1
Potencia durante la noche [ $\$/W_{DC}$ ]	7,6	4,2
Tensión nominal [ $\$/V_{AC}$ ]	208	208
Tensión máxima [ $\$/V_{AC}$ ]	850	540
Corriente máxima [ $\$/A_{DC}$ ]	45,96	38,1
Tensión mínima MPPT [ $\$/V_{DC}$ ]	480	300
Tensión nominal [ $\$/V_{DC}$ ]	575	385
Tensión máxima MPPT [ $\$/V_{DC}$ ]	850	540

**Tabla 4.11:** Parámetros técnicos de instalaciones FV en SFF para diferentes niveles de demanda

Parámetro	Alternativa 1	Alternativa 2
Cantidad de módulos	240	44
Cantidad de ramales en paralelo	16	4
Cantidad de módulos por ramal	15	11
Área de los módulos [ $m^2$ ]	460,8	84,5
Área de ocupación [ $m^2$ ]	677,4	143,7
Inversores [kW]	3 x 25.432	1 x 14.000
Potencia DC instalada [kW]	96.077	17.614
Potencia AC instalada [kW]	76.296	14.000
DC/AC ratio	1,26	1,26
Baterías - Capacidad [kWh]	650	120
Baterías - Potencia [kW]	60	60

#### 4.4.3. Resultados obtenidos

En ambas alternativas evaluadas, se tomó como referencia, la demanda de energía del año 2019. Para obtener resultados más detallados respecto al desempeño del sistema fotovoltaico, es preferible suministrar a SAM el perfil horario de la demanda a lo largo de un año completo. Para esto es necesario generar un archivo en hoja de cálculo, con los 8.760 valores correspondientes al consumo en cada hora del año. El archivo se guarda como tipo CSV y se ingresa en el software en la sección correspondiente a la carga. El perfil de la demanda diaria se construyó de acuerdo a los usos de la energía descritos en la sección 3.2.2. Como consecuencia de la planeación de la producción, por motivos financieros y capacidad operativa, se

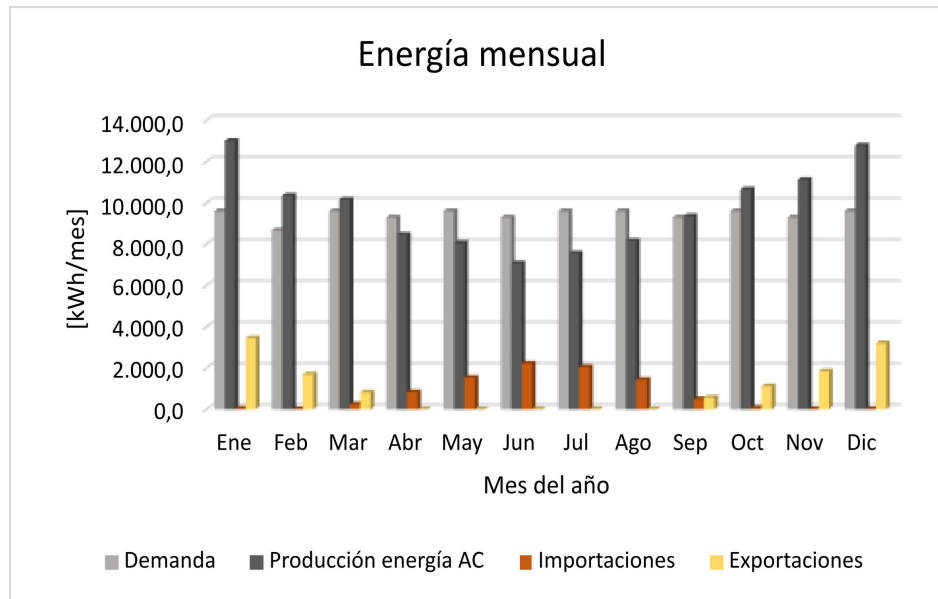
busca que la producción se mantenga continua durante todo el tiempo, lo que evita que haya sincronismo total en los ciclos productivos, de tal forma que en los estanques habrán ciclos con diferentes requerimientos de potencia en AM. Como el motor de la grúa de pesca y los equipos menores no tienen un horario fijo de funcionamiento, para incluirlos en el perfil de carga diario, se consideró que ambas operan durante una hora a las 9 AM. En la tabla 4.12 se muestra el resumen de los resultados principales para las dos alternativas consideradas.

**Tabla 4.12:** Resultados de análisis técnico de potencial fotovoltaico en SFF

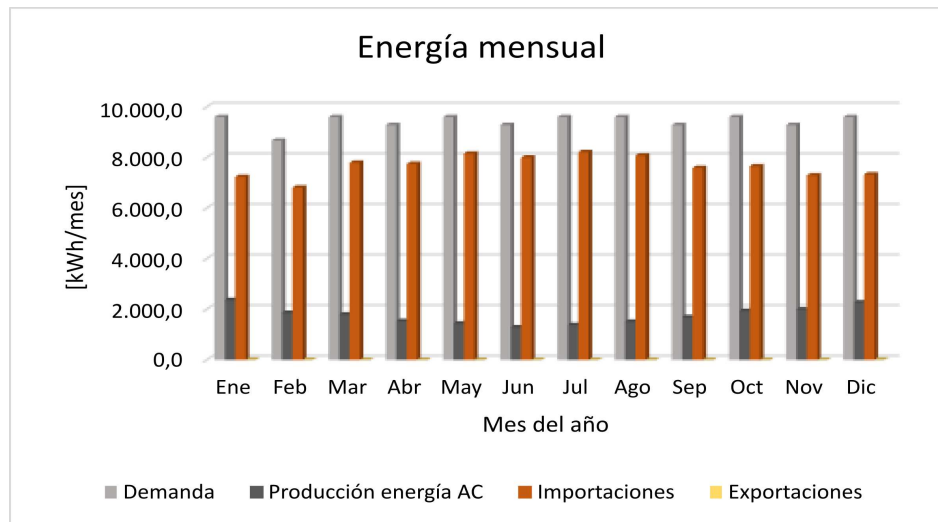
Parámetro	Alternativa No 1	Alternativa No 2
Factor de desempeño (PR)	0,70	0,70
A batería, desde sistema FV	113.261,5	22.368,9
A red, desde sistema FV	12.666,1	15,6
A carga, desde sistema FV	690,8	680,5
A carga, desde batería	103.454,0	20.392,3
A carga, desde red	8.855,2	91.927,2
Energía DC	132.540,1	24.299,0
Energía AC	116.710,1	21.069,6
Rendimiento batería	0,91	0,91
Energía importada	9.953,97	91.946,0
Energía exportada	12.666,15	98,8
Desde sistema FV, a carga	104.044,05	21.054,0

Se observa que los PR son similares en ambos escenarios simulados y sus valores son acordes con el PR típico actual para instalaciones con baterías, evidenciando que en los sistemas fotovoltaicos que requieren acumulación de energía, el factor de rendimiento queda afectado en gran medida por el hecho de que después, no se puede aprovechar toda la producción fotovoltaica debido a ineficiencias propias de las baterías. En las figuras 4.7 y 4.8 se muestran los valores proyectados de intercambio de energía con la red externa, de acuerdo a la generación y la demanda. La información sobre el comportamiento estacional de la irradiancia mensual en la ciudad de Neiva suministrada por el IDEAM en la figura 2.9, se ve reflejada en los resultados de la producción de energía AC, que muestran valores menores en la mitad del año respecto a los meses finales e iniciales, siendo junio el mes crítico. Probando otras simulaciones con SAM en la misma ubicación geográfica, variando el ángulo de inclinación de los módulos para 0°, 10°, 20° 30° y 40°, se tiene que la máxima producción fotovoltaica ocurre en 10°, pero se recomienda dejarlos en 30° ya que sin inclinación rápidamente se acumula polvo en los módulos provocando disminución en el PR del sistema.

Como el campo solar de la alternativa No 1 se configuró para que la producción fotovoltaica estuviese ajustada a la demanda anual de la piscícola, se tiene que como en los meses



**Figura 4.5:** Balances de energía en SFF con sistema fotovoltaico de tipo híbrido, con campo solar de 96 kW<sub>DC</sub>

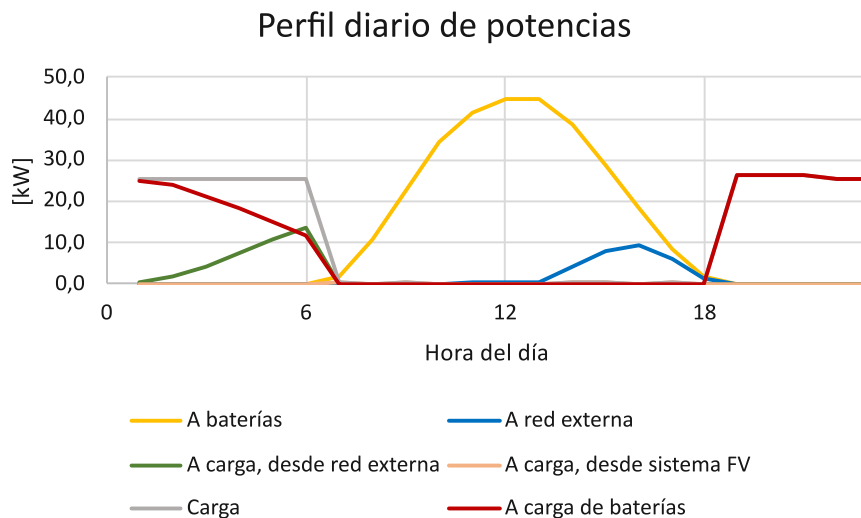


**Figura 4.6:** Balances de energía en SFF con sistema fotovoltaico de tipo híbrido, con campo solar de 17,6 kW<sub>DC</sub>

de menor irradiancia la energía generada no es suficiente para atender toda la demanda, es necesario tomar el faltante de la red externa; sin embargo, estas importaciones luego son compensadas en los meses iniciales y finales del año, cuando la generación fotovoltaica supera la demanda. En la alternativa No 2, se observa que la producción de energía propia solamente tiene capacidad parcial de atención de la demanda, razón por la cual durante todos los meses

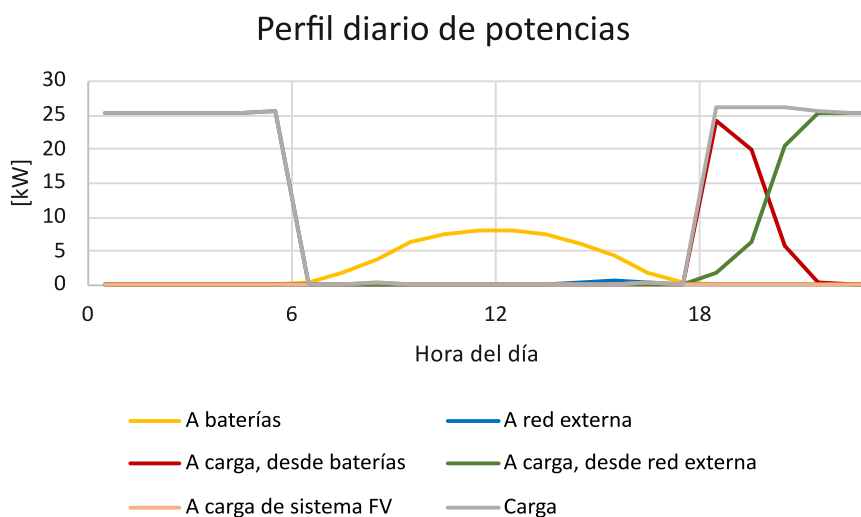
se debe importar gran parte de la energía requerida, y no hay ninguna disponibilidad de excedentes.

En las figuras 4.7 y 4.8 se muestran los perfiles diarios de las potencias para ambas alternativas y en los **Anexos 12 y 13**, se presentan los respectivos valores. Se observa que como en SFF la demanda es predominantemente nocturna, la utilización de la energía proveniente del sistema fotovoltaico antes de que que pase por las baterías, representada en la curvas *A carga, desde sistema FV*, es poco significativa. Esta condición reduce la viabilidad financiera del potencial fotovoltaico en SFF, ya que casi la totalidad de la energía producida queda afectada por las ineficiencias del proceso de acumulación. En la alternativa No 1, la generación de energía durante gran parte del día es enviada a las baterías hasta que en horas de la tarde éstas van alcanzando su nivel de carga, de tal forma que van quedando excedentes para enviar a la red externa. Luego en la noche, cuando se activa la demanda, es atendida en su totalidad desde las baterías hasta las horas de la madrugada, cuando éstas comienzan a descargarse y se requiere así importar la energía faltante desde la red externa. En la alternativa No 2, se observa que la curva de la demanda coincide con la energía importada desde la red externa; solamente iniciando la noche cuando se encienden los aireadores y la iluminación, la demanda es atendida parcialmente desde las baterías durante las primeras horas, en razón a la baja capacidad del campo solar en relación con el requerimiento total de la demanda.



**Figura 4.7:** Perfil diario de potencias en SFF con sistema fotovoltaico de tipo híbrido, con campo solar de  $96 \text{ kW}_{DC}$





**Figura 4.8:** Perfil diario de potencias en SFF con sistema fotovoltaico de tipo híbrido, con campo solar de  $17,6 \text{ kW}_{DC}$

Aunque SAM permite hacer la evaluación económica a cada proyecto, ingresando los costos respectivos por cada concepto requerido, en el presente trabajo se utilizaron los resultados obtenidos de tipo técnico, para hacer los análisis económicos en hoja de cálculo aparte, con el fin de tener mayor flexibilidad para incluir condiciones financieras acordes a la realidad del país, como por ejemplo, el incentivo tributario otorgado por la ley 1715 de 2014. Se realizaron cálculos considerando 5, 10 y 25 años, teniendo en cuenta que los inversionistas se inclinan por proyectos de mediano plazo. En los **Anexos 4** y **5** se presentan las evaluaciones económicas correspondientes a las Alternativa 1 y 2, con los datos considerados en el **Anexo 1**.



---

## Capítulo 5

# Conclusiones

---

### 5.1. Conclusiones generales

En la granja piscícola SFF ubicada en el municipio de Tello (Huila), en la que se cultiva tilapia nilótica, se desarrolló la planificación energética basada en la norma ISO 50001, con el objetivo de encontrar mecanismos que permitan reducir los costos asociados al consumo de energía, causado principalmente por la utilización de aireación mecánica en los estanques de producción, que funciona con motores eléctricos. Esta iniciativa se originó atendiendo a la necesidad que hoy día tienen las organizaciones, de adoptar un rol activo sobre sus propios requerimientos energéticos, en consecuencia con los cambios de paradigmas que están aconteciendo a nivel global respecto a la gestión de la energía, con el propósito de que los aparatos productivos sean competitivos, al mismo tiempo que sostenibles. Mediante la construcción de las líneas base de los indicadores de desempeño definidos en la planificación energética desarrollada, se obtuvo la caracterización de la demanda, que permitirá hacer proyecciones en consumos de acuerdo a la producción planeada, así como hacerles seguimiento.

Se identificó la AM como el uso más significativo que se hace de la energía en SFF. Por una parte, mediante el cálculo de los índices de consumo en cada ciclo productivo, se determinó el perfil de la demanda causada por este uso, y por otra, se llevaron a cabo análisis orientados a encontrar mecanismos que permitan consumir menos energía manteniendo los niveles de producción sin introducir riesgos adicionales asociados al desarrollo sano de los peces. La primera parte se realizó partiendo de los criterios actuales para definir las cantidad de aireadores requeridos en los estanques, y sus tiempos de operación; la segunda, recurriendo a simulaciones analíticas del comportamiento diario del OD en cada una de las semanas que duran los ciclos productivos, teniendo en cuenta las tasas de respiración de los peces de acuerdo a las biomásas que van adquiriendo, y la generación neta de oxígeno por parte del fitoplancton. Como resultado de ambas actividades, se obtuvo el potencial que existe en la piscícola para mejorar su desempeño energético.

La planificación energética también determinó que se podrían conseguir ahorros en consumos, mejorando los valores de AOTR en la AM. La evaluación al desempeño energético de uno de los aireadores tipo splash de 2 hp utilizado en SFF, fabricado en talleres locales, arrojó que su AOTR es menor a los ofrecidos en catálogos por fabricantes con presencia internacional. No obstante, como este parámetro es inherente a cada aireador, mejorar los AOTR implicaría altos costos de capital para sustituir todos los equipos existentes por otros de mejor tecnología. De todas maneras, para que la alta dirección de la organización tome la decisión de llevar a cabo planes de acción en tal sentido, primero se debe verificar la evaluación del AOTR ofrecido, en las condiciones de operación de la piscícola.

Aunque en SFF existe suministro de energía eléctrica por medio de las redes de distribución pública y cuenta con un generador diésel de respaldo, se evaluó la alternativa de instalar un sistema fotovoltaico, debido al interés de la alta dirección de SFF hacia esta tecnología, motivado en gran parte por la tendencia al alza de las tarifas del kWh y por intenciones de alineamiento con las directrices globales de utilizar energías renovables. El potencial fotovoltaico no resultó atractivo desde el punto de vista económico, porque la naturaleza predominantemente nocturna de la demanda, requiere de baterías para almacenamiento. Esta condición incrementa el monto del capital de inversión, los flujos anuales por concepto de operación y mantenimiento, además de las ineficiencias inherentes al proceso de carga y descarga de las baterías. Un sistema sin almacenamiento de energía, carecería de sentido, ya que la mayor parte de la demanda habría que tomarla de las redes de distribución y casi toda la energía fotovoltaica producida se intercambiaría como excedentes, debiéndose pagar los costos de comercialización y distribución estipulados por la regulación actual de comercio de energía para autogeneradores de pequeña escala.

Lograr mejoras en el desempeño de la AM, producirá impactos significativos en el aumento de la eficiencia energética de la piscícola. El método actual de medición manual e instantánea de OD, no permite el aseguramiento de la operación de los aireadores estrictamente cuando es necesario y la cantidad de mediciones diarias queda limitada por la disponibilidad del recurso humano, que también debe atender muchas otras actividades. Por lo tanto, se dificulta el seguimiento de las variaciones del OD, ya que pocas mediciones distanciadas en el tiempo, quedan afectadas por variaciones en la homogeneidad del agua que no se pueden controlar, entre los instantes de cada medida. Los planes de acción resultantes de la planificación energética en SFF, están basados en el aprovechamiento de mejores tecnologías actualmente disponibles en el mercado para la medición del OD.

Como resultado de las simulaciones analíticas de la variación diaria del OD, considerando los volúmenes productivos y criterios de operación actuales en SFF, así como el crecimiento de la biomasa verificada en un ciclo de alevinaje con  $72,1 \text{ pez}/m^2$  sembrados, y en otro de engorde con  $8,8 \text{ pez}/m^2$ , se tiene que podrían conseguirse ahorros en el consumo de energía eléctrica en los procesos de alevinaje, desde  $8,2\%$  en ciclos con densidades de siembra de  $100 \text{ pez}/m^2$  hasta de  $24,7\%$  en ciclos con densidades de siembra de  $72,1 \text{ pez}/m^2$ . En los procesos de engorde las reducciones no se encontraron significativas para densidades de siembra iguales o mayores a  $8,8 \text{ pez}/m^2$ , aunque mejoran hasta valores de  $5,2\%$  y  $9,3\%$  para densidades de siembra de  $8 \text{ pez}/m^2$  y  $7 \text{ pez}/m^2$ , respectivamente. El potencial de reducciones de tiempo de AM se reduce a medida que aumentan las densidades de siembra, ya que en poblaciones mayores, los tiempos requeridos de AM superan los considerados para las densidades de siembra que actualmente se manejan en SFF.

En razón a que las simulaciones analíticas se realizaron suponiendo un mismo comportamiento del crecimiento de la biomasa con diferentes valores de las densidades de siembra, y considerando las observaciones hechas por el personal operativo de la piscícola, en el sentido de que es posible que el crecimiento de la biomasa disminuya cuando se aumenta el tamaño de las poblaciones, cabe suponer que en ese caso, los índices de consumo de energía sean menores a los obtenidos en las simulaciones; sin embargo, incluso en ese caso, también se debe tener en cuenta que la cantidad de aireadores y sus tiempos de operación así mismo se reducirían, ya que el requerimiento de oxígeno de los peces depende sus biomazas.

La tecnología disponible actualmente en el mercado, ofrece sistemas de medición capaces de registrar medidas en intervalos de 5 minutos o menos, que permitirían construir con mucho mayor precisión las tendencias del comportamiento del OD durante todos los días de los ciclos de producción, facilitando ajustes en los tiempos de operación de los aireadores, buscando que el consumo de energía se efectúe estrictamente cuando es requerido. Se realizó la evaluación técnica y económica a un sistema de monitoreo continuo de OD, que incluye una estación de monitoreo en cada uno de los 11 estanques de producción. Cada estación consiste en una sonda de medición de OD y otra de temperatura, que deben sumergirse en el agua. Los datos registrados son subidos a la nube y administrados en una plataforma WEB accesible en PC o teléfono inteligente. Manteniendo la densidad de siembra para alevinaje en  $72,1 \text{ pez}/m^2$  y la de engorde en  $7,0 \text{ pez}/m^2$ , la TIR obtenida a 10 años es de  $5,61\%$  y tiempo de retorno de inversión de 9,1 años. Evidentemente, se conseguirían mayores ahorros anuales si se aumenta la proporción de producción de alevinaje sobre la de engorde.

De todas maneras, la medición continua del OD también permitiría revisar el criterio del

cálculo de la cantidad de aireadores en las diferentes etapas de los procesos productivos, ya que el requerimiento de oxígeno por parte de una determinada población de peces es igual a la tasa de respiración de uno de sus individuos en función de su biomasa, multiplicada por la cantidad total de peces, de tal manera que dicha tasa de respiración en sí misma varía a lo largo de los ciclos. En cuanto a los recambios de agua, se encontró que su influjo sobre el comportamiento del OD, es poco significativo, ya que los volúmenes de recambio son demasiado pequeños en comparación con los de los estanques.

El sistema fotovoltaico considerado para la evaluación técnica y económica es de tipo híbrido, contemplando que la energía generada prioritariamente sea utilizada para atender las cargas presentes en la piscícola, que el resto de energía disponible sea almacenada en las baterías para el consumo nocturno y que los excedentes finales sean exportados a la red pública. De esta manera, se evaluaron dos escenarios: uno con campo solar de  $96,1 kW_{DC}$  y  $76,3 kW_{AC}$  de potencia instalada, y otro con campo solar de  $17,6 kW_{DC}$  y potencia instalada de  $14 kW_{AC}$ . El primer escenario fue diseñado para una producción de energía equivalente a la demanda anual esperada en la piscícola, que es de 113.000 kWh, tomando como referencia la del año 2019. Se obtuvo que sería necesario un capital de inversión aproximado de \$735,6 - miles de millones - con TIR de 5,78 % a 15 años. El segundo escenario fue diseñado para que la potencia instalada fuese menor al 15 % de la capacidad del transformador existente, con el objetivo de acceder a los procesos simplificados de solicitud de conexión estipulados en la CREG 030 de 2018 y también porque su viabilidad económica puede ser mayor, de acuerdo a los recursos actuales de la organización. El capital de inversión obtenido es de \$262.535 - en miles de millones -, y la TIR resulta negativa incluso para un período de 15 años.

Observando los análisis y evaluaciones desarrollados en la planificación energética para SFF, se recomienda tener en cuenta para los planes de acción, priorizar la implementación del control de la AM con monitoreo continuo de OD, no solamente porque los resultados de su evaluación económica son atractivos, sino porque sus efectos tienen impacto sobre la eficiencia energética como tal de la piscícola, independientemente de la fuente de energía, lo cual mitiga tanto los riesgos asociados a las tarifas, como de las restricciones cada vez mayores para el uso del agua. También se requiere submedición de energía eléctrica, mediante la instalación de medidores en los tableros de los aireadores, para poder hacer seguimiento al desempeño energético de cada ciclo de producción. En razón a que el consumo de energía eléctrica es un componente de peso en los costos totales de producción, es recomendable un SGE<sub>n</sub> en SFF.

## 5.2. Aportes

En la literatura académica encontrada hay suficiente información respecto a cada uno de los factores que contribuyen a la variación del OD en los estanques piscícolas, y también, de las necesidades biológicas para el crecimiento sano de los peces. El presente trabajo llevó a cabo la integración de esta información y su aplicación, para hacer análisis y cálculos con enfoque energético, que ayuden a descubrir mecanismos de mejoramiento continuo en el uso de la energía.

Los organismos que pretendan conformidad con la norma ISO 50001, allí podrán encontrar los requisitos que se deben cumplir, pero no la forma de hacerlo, ya que la norma está estipulada para cualquier tipo de organización. El enfoque y los análisis que utiliza un determinado tipo de industria, puede no ser aplicable en otras. Este documento puede servir como referencia para las granjas de piscicultura continental ubicadas en el Valle del Alto Magdalena que cultivan tilapia nilótica, que están requiriendo bajar sus costos de producción mejorando su desempeño energético, especialmente en estos momentos en los que la implementación de SGEN está en estado incipiente en el país, razón por la cual la cultura de eficiencia energética no está arraigada en la industria y se carece de sistemas de medición sistemática, así como de registros, de los parámetros que tienen que ver con los usos y consumos de la energía.

El AOTR de los aireadores es fundamental para determinar el desempeño energético en las piscícolas. Como este parámetro depende de las condiciones de operación, el cálculo de AOTR realizado a un aireador tipo splash armado en talleres locales, queda disponible como referencia para comparar niveles de rendimiento con otros aireadores utilizados en la región.

## 5.3. Trabajos futuros

Una vez que se adopten los sistemas de medición y registro requeridos, se podrá relacionar el consumo de energía en los ciclos productivos con el comportamiento del OD en los estanques, llevando a cabo análisis de tipo estocástico, que incluyan información de suficientes ciclos de producción, considerando factores estacionales y posibles correlaciones con la alimentación de los peces, ya que éste último representa el mayor costo de producción en la piscicultura continental.

Ante la situación de que para mantener cualquier SGEN, definitivamente se requieren cambios en los perfiles del personal operativo y aumenta su responsabilidad laboral, será atractivo, por no decir que necesario, construir software de mantenimiento del SGEN basado

en la planificación energética desarrollado en SFF, que se pueda administrar remotamente, de tal manera que la organización solamente deba proporcionar los datos de operación y producción.

De la misma forma que por medio de las baterías se pueden almacenar excedentes de generación de energía eléctrica por parte de paneles solares, sería muy ventajoso determinar mecanismos eficientes de circulación del agua al interior de los estanques, por ejemplo utilizando sistemas de esclusas, para poder almacenar los excedentes de producción de OD por cuenta del fitoplancton.



# Referencias

---

- [1] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, “World Population Prospects 2019: Highlights,” no. (ST/ESA/SER.A/423), p. 7, 2019.
- [2] N.M. Trendov, S. Varas y M. Zeng, “Tecnologías digitales en la agricultura y zonas rurales,” *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma*, pp. 1–2, 2019.
- [3] L. P. y B. P. Hansen Shirley J., *ESCOS around the world: lessons learned in 49 countries*, p. 27. River Publishers, 2009.
- [4] S. Fawks, “A brief history of energy efficiency,” *Only Eleven Percent, blog*, May. 15, 2016. [Online] <https://www.onlyelevenpercent.com/a-brief-history-of-energy-efficiency/>.
- [5] International Energy Agency, “Energy efficiency 2017,” *Market Report Series*, p. 11, 2017.
- [6] International Energy Agency, “Energy efficiency 2018 analysis and outputs,” *Market Report Series*, p. 99, 2018.
- [7] Ministerio de Minas y Energía - Unidad de Planeación Minero Energética, “Plan de acción indicativo de eficiencia energética 2017 - 2022,” p. 12, 2017.
- [8] International Energy Agency, “Energy efficiency 2017,” *Market Report Series*, p. 76, 2017.
- [9] Therkelsen P., McKane A., Sabouni R., Tamm Y., Rao P. y Scheihing P., “Development of an Enhanced Payback Function for the Superior Energy Performance Program,” in *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry, Buffalo, NY*, p. 7, 2015.
- [10] International Energy Agency, “Energy efficiency 2018 analysis and outputs,” *Market Report Series*, pp. 110–112, 2018.

- [11] GlobalSTD Certification, “ISO SURVEY 2018,” Sep. 20, 2019. [Online] <https://www.globalstd.com/blog/iso-survey-2018>.
- [12] ISO, “The ISO Survey of Management System Standard Certifications 2019,” Sep. 2020. [Online] <https://www.iso.org/the-iso-survey.html>.
- [13] Merino C., Salazar G. y Gómez D., *Guía práctica de la piscicultura en Colombia*, p. 1. INCODER, 2006.
- [14] FAO, “El estado mundial de la pesca y la acuicultura,” *Cumplir los objetivos de desarrollo sostenible*, Roma, no. CC BY-NC-SA 3.0 IGO, p. vii, 2018.
- [15] Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca, AUNAP. Resolución 1607 del 25 de julio de 2019.
- [16] Ministerio de agricultura. Cadena de la acuicultura - Presentación, págs No 4, 11, 1er Trimestre 2020.
- [17] ICONTEC, “Norma técnica colombiana NTC-ISO 50001 (Primera actualización),” *Requisitos con orientación para uso*, 2019. Adopción idéntica por traducción de la ISO 50001:2018.
- [18] ISO, “ISO 50001:Energy Managment,” Page. [Online] <https://www.iso.org/iso-50001-energy-management.html>.
- [19] OCDE/IEA, “Indicadores de eficiencia energética: fundamentos estadísticos,” p. 17, 2016.
- [20] Gregor Erbach, “Understanding energy efficiency,” *European Parliament Research Service (EPRS)*, p. 1, Oct. 2017.
- [21] OCDE/IEA, “Indicadores de eficiencia energética: fundamentos estadísticos,” p. 19, 2016.
- [22] Ebeling J., “Recirculating aquaculture systems short course,” *Aquaculture in the Classroom Newsletter*, vol. 4, no. 7, pp. 19–25, Aug. 2017.
- [23] Boyd C. y Tucker C., *Pond aquaculture water quality management*, pp. 75–84. Kubler Academics Publishers, 1998.
- [24] Boyd C. y Teichert-Coddington D., “Relation between wind speed and and reaeration in small ponds,” *Department of Fisheries and Allied Aquacultures, Auburn University, Alabama 36849, USA*, no. 11, p. 129, 1992.

- [25] FAO, “Tilapia del Nilo - Crecimiento,” *Sistema de Información sobre Alimentos y Recursos Fertilizantes para la Acuicultura*, Page. [Online] <http://www.fao.org/fishery/affris/perfiles-de-las-especies/nile-tilapia/crecimiento/es/>.
- [26] V.B. dos Santos, E.A. Mareco and M. Dal Pai Silva, “Growth curves of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) strains cultivated at different temperatures,” *Acta Scientiarum Animal Sciences*, p. 237, Sep. 2013.
- [27] Boyd C. y Lichtkoppler F., “Water quality management in fish culture,” *Research and Development Series No. 22*, pp. 7–9, 1979.
- [28] Wilkins D. y Piedrahíta R., “The relation between phytoplankton and dissolved oxygen in fish ponds,” *Aquaculture*, no. 68, 1988.
- [29] F. J., *HandBook Of Modern Sensors - Physics, Designs, and Applications*, p. 1. Springer, 2010.
- [30] FONDRIEST Environmental Learning Center, “Measuring dissolved oxygen,” Page. [Online] <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/measurements/measuring-water-quality/dissolved-oxygen-sensors-and-methods/>.
- [31] Webster C. y Jana B., *Sustainable Aquaculture: Global Perspectives*, p. 22. Food Products Press, 2003.
- [32] United States Department of Agriculture, USDA, *Technical Note No AEN-3: Aerations of pond used in aquaculture*, 2011.
- [33] Claude E. Boyd, “Species, pond size define aeration approaches,” *Global Aquaculture Alliance*, Jul. 01, 2014. [Online] <https://www.aquaculturealliance.org/advocate/species-pond-size-define-aeration-approaches/>.
- [34] Boyd C. y Tucker C., *Pond aquaculture water quality management*, pp. 306–340. Kubler Academics Publishers, 1998.
- [35] F.J. Gimeno, S. Orts, S. Seguí, *Curso Introducción a la energía solar fotovoltaica*, vol. Unidad 2 - Módulo 1 (Módulos fotovoltaicos), pp. 28–52. Universidad Politécnica de Valencia, 2014.
- [36] González I., “¿Qué es y cómo calcular la TIR (Tasa Interna de Retorno)?,” Ene. 2019. Blog. [Online] <https://www.unir.net/empresa/desarrollo-directivo/estrategia-de-negocio/como-calcular-tir-tasa-interna-retorno/>.

- [37] R. Coss, *Análisis y evaluación de proyectos de inversión*, p. 62. Limusa, 1995.
- [38] O. Prías, J.C. Campos, D.B. Rojas y A. Palencia, *Implementación de un Sistema de Gestión de la Energía con base en la norma ISO 50001:2018*, p. 44. RED COLOMBIANA DE CONOCIMIENTO EN EFICIENCIA ENERGÉTICA - RECIEE, 2019.
- [39] A. Habte, A. López, M. Sengputa, S. Wilcox, “Temporal and Spatial Comparison of gridded TMY, TDY, and TGY data sets,” tech. rep., NREL, Feb. 2014.

---

## Capítulo 6

# Anexos

---

### Anexo No 1: Notas a las evaluaciones económicas

En los **Anexos 2, 3 y 4** se realizaron las evaluaciones económicas correspondientes a la implementación de un sistema de monitoreo continuo de OD y las alternativas 1 y 2 para instalación de un sistema fotovoltaico en la piscícola, utilizando los resultados de tipo técnico en la planificación energética desarrollada para SFF. Los cálculos fueron realizados considerando períodos de 5, 10 y 25 años; todos los costos fueron proyectados tomando como primer año de producción el 2022, haciendo la inversión inicial en el año 2021; se tuvieron en cuenta cotizaciones puntuales para los montos de inversión; como tarifas de referencia fueron tomadas las del mes de abril de 2021, tanto de Electrohuila para el kWh en nivel 1, como del galón del diésel en la ciudad de Neiva. Para efectos de simplificar el análisis, se tuvo en cuenta que los costos y tarifas anuales, aumentan proporcionalmente a la inflación, tomando como referencia la registrada en el año 2019, ya que la del 2020 fue atípica.

**Tabla 6.1:** Datos financieros para evaluaciones económicas mostradas en Anexos 2, 3 y 4

Parámetro	Unidad	Valor
Tarifa de compra de energía	[\$/kWh]	0,703
Tarifa de venta de energía	[\$/kWh]	0,602
Diésel en Neiva	[\$/kWh]	0,602
IPC 2019	[%]	3,5
Tasa de descuento	[%]	7
Costo de instalación FV	[\$/kW <sub>DC</sub> ]	3,8
Costo de baterías (Energía)	[\$/kWh]	593
Costo de baterías (Potencia)	[\$/kW]	
Costo O&M	[\$/kW <sub>DC</sub> ]	0,038
Descuento de renta ley 1715	[%]	50

El costo de la energía generada con la planta de emergencia tipo diésel, está directamente relacionada con el precio del galón de diésel y al rendimiento de consumo de combustible

típico para esta clase de generadores, que se muestra a continuación en la de acuerdo a su capacidad, tomado del catálogo de Gedesa para generadores con motores cummins de 100 kW de potencia continua:

**Tabla 6.2:** Rendimiento de combustible para generador diésel de 100 kW

Cargabilidad [%]	25	50	75	100
Consumo diésel [L/h]	9,8	15,0	18,5	28,0

Para efectos de todos los cálculos se utilizará el consumo correspondiente a una cargabilidad del generador de 75 %, considerando que puede ser su condición de operación promedio. Así, teniendo en cuenta que, un galón es equivalente a 3,7854 litros, el costo del kWh queda dado por la siguiente ecuación:

$$G_{ACPM} [$/kWh] = T_{ACPM} \cdot \frac{\frac{22}{3,7854} \text{ gal.h}^{-1}}{75 \text{ kW}}$$

$$G_{ACPM} [$/kWh] = T_{ACPM} \cdot \frac{1 \text{ gal/kWh}}{12,9047}$$

**Anexo No 2: Evaluación económica de sistema continuo de monitoreo de nivel OD en los estanques, con  $D_s=72,1 \text{ pez}/m^2$  para procesos de Alevinaje y  $D_s=8,8 \text{ pez}/m^2$  para procesos de engorde**

<b>Desempeño energético proyectado</b>	<b>Valor</b>
Demanda en AM alevinaje [kWh]	40.003,0
Demanda en AM engorde [kWh]	78.852,0
Demanda en AM sin sistema OD [kWh]	118.855,0
Ahorros con monitoreo en alevinaje	24,4 %
Ahorros con monitoreo en engorde	2,0 %
Demanda en AM con sistema OD [kWh]	107.517,2
Ahorros en AM con sistema OD [kWh]	11.337,8
<b>Año 0</b>	
Costo de inversión sistema de monitoreo OD [\$]	<b>79.200,00</b>
<b>Año 1</b>	
Compra de energía sin sistema	<b>65.465,33</b>
Compra de diésel sin sistema	<b>7.273,93</b>
Compra de energía con sistema	<b>59.220,49</b>
Compra de diésel con sistema	<b>6.580,05</b>
Ahorros en compra de energía	6.244,84
Ahorros en generación diésel	693,87
Operación & Mantenimiento	<b>342,21</b>
Servicio de monitoreo remoto	<b>150,00</b>
Descuento renta Ley 1715	0,00
Flujo neto de efectivo	5.600,72
<b>Resultados evaluación económica</b>	
Tiempo de retorno de la inversión [años]	14,90
VAN (5 años) [COP]	<b>52.598</b>
TIR (5 años) [%]	<b>25,27 %</b>
VAN (10 años) [COP]	<b>26.011</b>
TIR (10 años) [%]	<b>3,11 %</b>
VAN (15 años) [COP]	552
TIR (15 años) [%]	3,89 %

**Anexo No 3: Evaluación económica de sistema continuo de monitoreo de nivel OD en los estanques, con  $D_s=72,1$  pez/ $m^2$  para procesos de Alevinaje y  $D_s=7$  pez/ $m^2$  para procesos de engorde**

<b>Desempeño energético proyectado</b>	<b>Valor</b>
Demanda en AM alevinaje [kWh]	40.003,0
Demanda en AM engorde [kWh]	78.852,0
Demanda en AM sin sistema OD [kWh]	118.855,0
Ahorros con monitoreo en alevinaje	24,4 %
Ahorros con monitoreo en engorde	9,3 %
Demanda en AM con sistema OD [kWh]	101.761,0
Ahorros en AM con sistema OD [kWh]	17.094,0
<b>Año 0</b>	
Costo de inversión sistema de monitoreo OD [\$]	<b>79.200,00</b>
<b>Año 1</b>	
Compra de energía sin sistema	<b>65.465,33</b>
Compra de diésel sin sistema	<b>7.273,93</b>
Compra de energía con sistema	<b>56.049,98</b>
Compra de diésel con sistema	<b>6.227,78</b>
Ahorros en compra de energía	9.415,36
Ahorros en generación diésel	1.046,15
Operación & Mantenimiento	<b>342,21</b>
Servicio de monitoreo remoto	<b>150,00</b>
Descuento renta Ley 1715	0,00
Flujo neto de efectivo	9.123,51
<b>Resultados evaluación económica</b>	
Tiempo de retorno de la inversión	9,10
VAN (5 años) [COP]	<b>35.696</b>
TIR (5 años) [%]	<b>13,99 %</b>
VAN (10 años) [COP]	7.787
TIR (10 años) [%]	5,61 %
VAN (15 años) [COP]	51.231
TIR (15 años) [%]	11,07 %



**Anexo No 4: Evaluación económica de potencial fotovoltaico en SFF, con campo solar de 96,077  $kW_{DC}$ .**

<b>Desempeño energético proyectado</b>	<b>Valor</b>
Demanda [kWh]	113.000,0
Capacidad instalada [WDC]	96.077,0
Energía recibida [kWh]	9.954,0
Energía entregada [kWh]	12.666,0
Batería [kWh]	650,0
<b>Año 0</b>	
Costo de inversión FV [\$]	365.092,60
Costo de inversión Bat [\$]	370.500,00
Costo de inversión Total [\$]	735.592,60
<b>Año 1</b>	
Compra de energía sin sistema	62.138,70
Compra de diésel sin sistema	6.430,42
Compra de energía con sistema	5.473,70
Compra de diésel con sistema	588,28
Ahorros en compra de energía red externa	56.665,00
Venta de energía	7.738,93
Ahorros en generación diésel	5.842,14
Operación & Mantenimiento	1.441,16
Descuento renta Ley 1715	0,00
Flujo neto de efectivo	68.804,91
<b>Resultados evaluación económica</b>	
Tiempo de retorno de la inversión [años]	10,70
VAN (5 años) [COP]	451.333,20
TIR (5 años) [%]	22,29 %
VAN (10 años) [COP]	167.133,13
TIR (10 años) [%]	0,80 %
VAN (15 años) [COP]	116.870
TIR (15 años) [%]	5,78 %

**Anexo No 5: Evaluación económica de potencial fotovoltaico en SFF, con campo solar de 17,614  $kW_{DC}$ .**

<b>Desempeño energético proyectado</b>	<b>Valor</b>
Demanda [kWh]	113.000,0
Capacidad instalada [WDC]	17.614,0
Energía recibida [kWh]	91.946,0
Energía entregada [kWh]	99,0
Batería [kWh]	315,0
<b>Año 0</b>	
Costo de inversión FV [\$]	66.933,20
Costo de inversión Bat [\$]	179.550,00
Costo de inversión Total [\$]	246.483,20
<b>Año 1</b>	
Compra de energía sin sistema	62.138,70
Compra de diésel sin sistema	6.430,42
Compra de energía con sistema	50.561,11
Compra de diésel con sistema	5.434,01
Ahorros en compra de energía red externa	11.577,59
Venta de energía	60,49
Ahorros en generación diésel	996,41
Operación & Mantenimiento	264,21
Descuento renta Ley 1715	0,00
Flujo neto de efectivo	12.370,29
<b>Resultados evaluación económica</b>	
Tiempo de retorno de la inversión [años]	
VAN (5 años) [COP]	202.941,12
TIR (5 años) [%]	36,98 %
VAN (10 años) [COP]	159.410,30
TIR (10 años) [%]	12,29 %
VAN (15 años) [COP]	115.915
TIR (15 años) [%]	3,53 %

Anexo No 6: Valores de  $IEnBa_i$  para las densidades de siembra mostradas en figura 3.7, de acuerdo a criterios de operación actuales en SFF en proceso de alevinaje.

Semana	Biomasa [kg]	Cantidad de aireadores	Tiempo semanal [h]	Energía semanal [kWh]	Energía acumulada [kWh]	$IEnBa_i$ [kWh/kg]	$IEnDa_i$ [kWh.m <sup>2</sup> /kg.pez]
<b>Datos dados para Ds=72,1 [pez/m<sup>2</sup>]</b>							
1	1.832	1	84	127	127	0,069	0,960
2	2.687	1	84	127	254	0,094	1,309
3	4.101	2	84	254	507	0,124	1,716
4	5.580	2	84	254	761	0,136	1,892
5	6.661	3	84	381	1.142	0,171	2,377
6	7.457	3	84	381	1.522	0,204	2,831
7	8.160	3	84	381	1.903	0,233	3,234
<b>Datos dados para Ds=80 [pez/m<sup>2</sup>]</b>							
1	4.816	2	84	254	254	0,053	0,658
2	7.064	3	84	381	634	0,090	1,122
3	10.782	4	84	507	1.142	0,106	1,324
4	14.669	5	84	634	1.776	0,121	1,513
5	17.509	6	84	761	2.537	0,145	1,811
6	19.603	7	84	888	3.425	0,175	2,184
7	21.451	8	84	1.015	4.439	0,207	2,587
<b>Datos dados para Ds=90 [pez/m<sup>2</sup>]</b>							
1	5.418	2	84	254	254	0,047	0,520
2	7.947	3	84	381	634	0,080	0,887
3	12.129	5	84	634	1.268	0,105	1,162
4	16.502	6	84	761	2.029	0,123	1,366
5	19.698	7	84	888	2.917	0,148	1,646
6	22.054	8	84	1.015	3.932	0,178	1,981
7	24.132	9	84	1.142	5.074	0,210	2,336
<b>Datos dados para Ds=100 [pez/m<sup>2</sup>]</b>							
1	6.020	3	84	381	381	0,063	0,632
2	8.830	3	84	381	761	0,086	0,862
3	13.477	5	84	634	1.395	0,104	1,035
4	18.336	7	84	888	2.283	0,125	1,245
5	21.887	8	84	1.015	3.298	0,151	1,507
6	24.504	9	84	1.142	4.439	0,181	1,812
7	26.814	9	84	1.142	5.581	0,208	2,081

Anexo No 7: Valores de  $IEnBe_i$  para las densidades de siembra mostradas en figura 3.6, de acuerdo a criterios de operación actuales en SFF en proceso de engorde.

Semana	Biomasa [kg]	Cantidad de aireadores	Tiempo semanal [h]	Energía semanal [kWh]	Energía acumulada [kWh]	$IEnBa_i$ [kWh/kg]	$IEnDa_i$ [kWh.m <sup>2</sup> /kg.pez]
<b>Datos dados para <math>D_s=7,0</math> [pez/m<sup>2</sup>]</b>							
1	4.467	2	84	254	254	0,057	8,112
2	6.097	2	84	254	507	0,083	11,888
3	7.500	2	84	254	761	0,101	14,497
4	8.551	2	84	254	1.015	0,119	16,952
5	9.468	2	84	254	1.268	0,134	19,139
6	10.453	3	84	381	1.649	0,158	22,536
7	11.335	3	84	381	2.029	0,179	25,576
8	11.967	3	84	381	2.410	0,201	28,770
9	12.639	3	84	381	2.790	0,221	31,540
10	13.661	3	84	381	3.171	0,232	33,161
11	14.975	4	84	507	3.678	0,246	35,090
12	16.448	4	84	507	4.186	0,254	36,353
13	17.990	4	84	507	4.693	0,261	37,268
14	19.511	5	84	634	5.327	0,273	39,006
15	20.887	5	84	634	5.961	0,285	40,774
16	22.102	5	84	634	6.596	0,298	42,631
17	23.603	5	84	634	7.230	0,306	43,759
18	25.733	6	84	761	7.991	0,311	44,362
19	27.991	6	84	761	8.752	0,313	44,667
20	29.787	7	84	888	9.640	0,324	46,232
21	30.973	7	84	888	10.528	0,340	48,558
22	31.664	7	84	888	11.416	0,361	51,503
23	32.582	7	84	888	12.303	0,378	53,945
24	34.348	8	84	1.015	13.318	0,388	55,391
25	36.456	8	84	1.015	14.333	0,393	56,165
<b>Datos dados para <math>D_s=8,0</math> [pez/m<sup>2</sup>]</b>							
1	5.106	2	84	254	254	0,050	6,211
2	6.968	2	84	254	507	0,073	9,102
3	8.571	2	84	254	761	0,089	11,099
4	9.773	3	84	381	1.142	0,117	14,601
5	10.820	3	84	381	1.522	0,141	17,584
6	11.946	3	84	381	1.903	0,159	19,909
7	12.955	3	84	381	2.283	0,176	22,030
8	13.676	3	84	381	2.664	0,195	24,346
9	14.445	4	84	507	3.171	0,220	27,441
10	15.612	4	84	507	3.678	0,236	29,451
11	17.114	4	84	507	4.186	0,245	30,572
12	18.798	4	84	507	4.693	0,250	31,207
13	20.560	5	84	634	5.327	0,259	32,389
14	22.298	5	84	634	5.961	0,267	33,419
15	23.871	5	84	634	6.596	0,276	34,539
16	25.260	6	84	761	7.357	0,291	36,406
17	26.975	6	84	761	8.118	0,301	37,617
18	29.409	7	84	888	9.006	0,306	38,277

Continúa en página siguiente.

Tabla 6.3 – viene de página previa.

Semana	Biomasa [kg]	Cantidad de aireadores	Tiempo semanal [h]	Energía semanal [kWh]	Energía acumulada [kWh]	$IEnBa_i$ [kWh/kg]	$IEnDa_i$ [kWh.m <sup>2</sup> /kg.pez]
19	31.990	7	84	888	9.894	0,309	38,659
20	34.042	8	84	1.015	10.908	0,320	40,054
21	35.397	8	84	1.015	11.923	0,337	42,104
22	36.188	8	84	1.015	12.938	0,358	44,689
23	37.236	8	84	1.015	13.952	0,375	46,837
24	39.255	9	84	1.142	15.094	0,385	48,063
25	41.664	9	84	1.142	16.236	0,390	48,710
Datos dados para $D_s=8,8$ [pez/m <sup>2</sup> ]							
1	5.616	2	84	254	254	0,045	6,453
2	7.664	2	84	254	507	0,066	9,457
3	9.428	2	84	254	761	0,081	11,532
4	10.750	3	84	381	1.142	0,106	15,170
5	11.902	3	84	381	1.522	0,128	18,269
6	13.140	3	84	381	1.903	0,145	20,684
7	14.250	3	84	381	2.283	0,160	22,888
8	15.044	4	84	507	2.790	0,185	26,499
9	15.889	4	84	507	3.298	0,208	29,650
10	17.173	4	84	507	3.805	0,222	31,654
11	18.826	4	84	507	4.313	0,229	32,725
12	20.678	5	84	634	4.947	0,239	34,175
13	22.616	5	84	634	5.581	0,247	35,253
14	24.528	6	84	761	6.342	0,259	36,938
15	26.258	6	84	761	7.103	0,271	38,645
16	27.785	6	84	761	7.864	0,283	40,433
17	29.672	7	84	888	8.752	0,295	42,136
18	32.350	7	84	888	9.640	0,298	42,569
19	35.189	8	84	1.015	10.655	0,303	43,254
20	37.446	8	84	1.015	11.669	0,312	44,518
21	38.937	9	84	1.142	12.811	0,329	47,002
22	39.807	9	84	1.142	13.952	0,351	50,072
23	40.960	9	84	1.142	15.094	0,369	52,643
24	43.181	9	84	1.142	16.236	0,376	53,713
25	45.830	10	84	1.268	17.504	0,382	54,561
Datos dados para $D_s=10$ [pez/m <sup>2</sup> ]							
1	6.382	254	84	254	254	0,040	3,975
2	8.710	254	84	254	507	0,058	5,825
3	10.714	381	84	381	888	0,083	8,287
4	12.216	381	84	381	1.268	0,104	10,383
5	13.525	381	84	381	1.649	0,122	12,191
6	14.932	507	84	507	2.156	0,144	14,440
7	16.194	507	84	507	2.664	0,164	16,449
8	17.095	507	84	507	3.171	0,185	18,549
9	18.056	507	84	507	3.678	0,204	20,372
10	19.515	634	84	634	4.313	0,221	22,098
11	21.393	634	84	634	4.947	0,231	23,123
12	23.498	634	84	634	5.581	0,238	23,751
13	25.700	761	84	761	6.342	0,247	24,677
14	27.873	761	84	761	7.103	0,255	25,484

Continúa en página siguiente.

Tabla 6.3 – viene de página previa.

Semana	Biomasa [kg]	Cantidad de aireadores	Tiempo semanal [h]	Energía semanal [kWh]	Energía acumulada [kWh]	$IE_nBa_i$ [kWh/kg]	$IE_nDa_i$ [kWh.m <sup>2</sup> /kg.pes]
15	29.838	888	84	888	7.991	0,268	26,781
16	31.574	888	84	888	8.879	0,281	28,120
17	33.719	1.015	84	1.015	9.894	0,293	29,341
18	36.761	1.015	84	1.015	10.908	0,297	29,673
19	39.988	1.142	84	1.142	12.050	0,301	30,134
20	42.553	1.142	84	1.142	13.191	0,310	31,000
21	44.247	1.268	84	1.268	14.460	0,327	32,680
22	45.235	1.268	84	1.268	15.728	0,348	34,770
23	46.546	1.268	84	1.268	16.997	0,365	36,516
24	49.069	1.395	84	1.395	18.392	0,375	37,481
25	52.080	1.395	84	1.395	19.787	0,380	37,994

**Anexo No 8: Valores en base 100 de los IDEn normalizados para las densidades de siembra mostradas en las figuras 3.11 y 3.12.**

<i>IEnDa<sub>i</sub></i> (100) - Alevinaje [%]				
<b>Semana</b>	<b>Ds=72,1</b>	<b>Ds=80</b>	<b>Ds=90</b>	<b>Ds=100</b>
1	100,0	68,6	54,2	65,8
2	100,0	85,7	67,7	65,8
3	100,0	77,1	67,7	60,3
4	100,0	80,0	72,2	65,8
5	100,0	76,2	69,2	63,4
6	100,0	77,1	70,0	64,0
7	100,0	80,0	72,2	64,4
<i>IEnDe<sub>i</sub></i> (100) - Engorde [%]				
<b>Semana</b>	<b>Ds=7,0</b>	<b>Ds=8,0</b>	<b>Ds=8,8</b>	<b>Ds=10,0</b>
1	158,0	121,0	100,0	77,4
2	158,0	121,0	100,0	77,4
3	158,0	121,0	100,0	90,3
4	140,5	121,0	100,0	86,0
5	131,7	121,0	100,0	83,9
6	137,0	121,0	100,0	87,8
7	140,5	121,0	100,0	90,3
8	136,5	115,5	100,0	88,0
9	133,7	116,3	100,0	86,4
10	131,7	117,0	100,0	87,8
11	134,8	117,4	100,0	88,8
12	133,7	114,8	100,0	87,4
13	132,9	115,5	100,0	88,0
14	132,8	113,7	100,0	86,7
15	132,6	112,4	100,0	87,1
16	132,6	113,2	100,0	87,4
17	130,6	112,2	100,0	87,5
18	131,0	113,0	100,0	87,6
19	129,8	112,4	100,0	87,6
20	130,6	113,1	100,0	87,5
21	129,9	112,6	100,0	87,4
22	129,3	112,2	100,0	87,3
23	128,8	111,8	100,0	87,2
24	129,6	112,5	100,0	87,7
25	129,4	112,2	100,0	87,5

## Anexo No 9: Valores de los coeficientes para los polinomios de interpolación con splines cúbicos.

Para determinar los valores de las biomاسas en las semanas en donde no hubo medición, se recurrió al método de *interpolación con splines cúbicos*. En cada intervalo la curva de crecimiento de la biomasa está dado por la función  $B(t) = A_3.t^3 + A_2.t^2 + A_1.t + A_0$ , en donde  $t$  toma valores de la semana correspondiente:

Semana	Fecha	Biomasa Medida [g]	Biomasa interpolada [g]	$A_3$	$A_2$	$A_1$	$A_0$
<b>Alevinaje</b>							
1	2/1/2021	4,5	4,5	4,5	1,54878049	0	0,23780488
2	-	-	6,3				
3	15/1/2021	9,5	9,5	9,5	4,40243902	1,42682927	-0,37652439
4	-	-	15,0				
5	31/1/2021	21,0	21,0	21	5,59146341	-0,83231707	0,14329268
6	-	-	25,9				
7	15/2/2021	30,0	30,0	30	3,98170732	0,02743902	-0,00914634
8	22/2/2021	34,0	34				
<b>Engorde</b>							
1	24/8/2020	50,0	50,0				
2	31/8/2020	65,0	65,0	65	24,58463175	0	-0,52115794
3	-	-	89,1				
4	15/9/2020	110,0	110,0	110	18,33073649	-3,12694763	0,73078969
5	-	-	125,9				
6	30/9/2020	140,0	140,0	140	14,59242228	1,25779053	-0,65200083
7	-	-	155,2				
8	15/10/2020	169,0	169,0	169	11,79957439	-2,65421447	1,00221364
9	-	-	179,1				
10	31/10/2020	190,0	190,0	190	13,20928016	3,35906736	-0,35685372
11	-	-	206,2				
12	15/11/2020	227,0	227,0	227	22,36330496	1,21794504	-0,19979876
13	-	-	250,4				
14	30/11/2020	275,0	275,0	275	24,8375	0,01915248	-0,34395124
15	-	-	299,5				
16	15/12/2020	322,0	322,0	322	20,78669504	-2,04455496	1,45060372
17	-	-	342,2				
18	31/12/2020	367,0	367,0	367	30,01571984	6,65906736	-1,83346364
19	-	-	401,8				
20	15/1/2021	439,0	439,0	439	34,65042561	-4,34171447	-0,11674917
21	-	-	469,2				
22	29/1/2021	490,0	490,0	490	15,88257772	-5,04220947	2,30046031
23	-	-	503,1				
24	15/2/2021	520,0	520,0	520	23,31926351	8,76055237	-1,46009206
25	-	-	550,6				
26	27/02/201	590,0	590,0				



**Anexo No 10: Código en Octave para simulación de comportamiento de OD  
mostrado en la figura 4.3.**

```
clear all;
Ds=8.8;%Densidad de siembra [pez/m2]
Ao=9858;%espejo de agua estanque [m2]
ho=1.8;%profundidad promedio estanque [m]
Vo=Ao*ho;%volumen estanque [m3]
Temp=29;%[°C] Temperatura estanque
p_bar=0.9968;%[atm] presión barométrica en Tello(Calculada con altura)
p_bar_mar0=1;%[atm] presión barométrica a nivel del mar
Cp=3;%OD agua [mgO2/l]
Cs_st=7.67; %Cs estándar-OD saturación agua(1 atm, 29°C, tabla 2.28 Boyd)
%Crecimiento de la Tilapia-Gompertz
%Tasa de consumo Tilapia - semanal

%Matriz:columnas:semanas 1-32;
%Matriz:filas:1-Gompertz[g];
%Matriz:filas:2-Tasa OD unidad[mgO2/h.pez]
%Matriz: filas:3-Tasa OD área [mgO2/h.m2];
%Matriz: filas:4-Tasa OD volumen [mgO2/h.m3]

A_G=3115.71694;%coeficiente A Gompertz
B_G=0.06558011;%coeficiente B Gompertz
C_G=31.3959547;%coeficiente C Gompertz

sem_ini=1; %semana inicial
sem_fin=25; %semana final
sem_per=sem_fin-sem_ini+1;

ODB=zeros(sem_per,6); %(i,j) (filas,columnas)
vec=[65; 89.1; 110; 125.9; 140; 155.2; 169; 179.1; 190; 206.2; 227; 250.4; 275; 299.5; 322;
342.2; 367; 401.8; 439; 469.2; 490; 503.1; 520; 550.6; 587];
sup=0.9;
pob_ini=Ds;
pob_fin=Ds*sup;
sem_o=sem_ini;

for j=1:sem_per,
    ODB(j,1)=sem_ini;%usado splamente para flexibilidad alevino o engorde
    %ODB(j,2)=A_G*exp(-exp(-B_G*(ODB(j,1)-C_G))); %Gompertz
    ODB(j,2)=vec(sem_ini);%biomasa cada semana
    ODB(j,3)=ODB(j,2)^0.82; %Tasa OD cada semana por Pez
    ODB(j,4)=(pob_ini-pob_fin)/(sem_fin-sem_o)*(sem_fin-ODB(j,1))+pob_fin;%Cantidad peces/m2
    ODB(j,5)=ODB(j,3)*ODB(j,4);%%Tasa OD cada semana por m2
```

```

    ODB(j,6)=ODB(j,5)/ho * 0.001; %Tasa OD aquí queda en gramos por m3
    sem_ini=sem_ini+1;
    ODB
endfor

%recambio
DO_min=3;%mg por L o gramo por m3
Qe=36;%m3 por segundo
Qs=36;%m3 por hora
Rho_e=5;
hora_0=12;%6PM
hora_o=24;%6PM
int_r=hora_0:1:23;%intervalo de recambio

%tiempo=(hora_0:1:hora_0+dur_rec);%intervalo recambio 6PM-6AM
Ke=Qe*Rho_e/Vo;
Ks=Qs/Vo;

%Datos OD para densidad baja de fitoplancton
fb=[7 9 10 10.5 11 10.5 10 9 8];%OD baja densidad
fm=[5.5 8.5 12.5 14 14.5 13 12 9.5 6];%OD media densidad
tb=[0 3 6 9 12 15 18 21 24];%hora del día

%con polyfit se consiguen los coeficientes de polinomio de ajuste
% de segundo grado

ODfvs=polyfit(tb,fb,2);%Se cambia fb, fm segun OD densidad requerida
co2=ODfvs(1,1)
co1=ODfvs(1,2)
co0=ODfvs(1,3)
%se incluye la tasa negativo de consumo de la tilapia
%para cada semana de crecimiento Gompertz
%ODr ya con recambio
ODro=zeros(24,sem_per);
ODr=zeros(24,sem_per);
ODr_poly0=zeros(sem_per,3);
ODr_poly1=zeros(sem_per,3);
ODlim_aux0=zeros(sem_per,2);
ODlim_aux1=zeros(sem_per,2);
ODlim=zeros(sem_per,2);

for j=1:sem_per,
    ODFvsb=[co2 co1-ODB(j,6) co0]

%se deriva para g(x) eq diferencial

```

```

gx=polyder(ODfvsb)
do1=gx(1,1)
do0=gx(1,2)
%t0=0; tiempo cero para recambio
odini=polyval(ODfvsb,hora_0)
eqdif=@(t,x) -Ks*x+Ke+do1*t+do0; %Funcion del modelo
[t,q]= ode45 (eqdif,int_r,odini); %Solucion numerica
aux=q;
ODr(1:hora_0,j)=[polyval(ODfvsb,0:hora_0-1)];%OD antes de recambio
ODro(1:hora_0,j)=[polyval(ODfvsb,0:hora_0-1)];%OD antes de recambio
ODr(hora_0+1:24,j)=q;%OD con recambio
ODr_poly0(j,:)=polyfit(t,q,2);%curva para cada semana ciclo
ODr_poly1(j,:)=polyfit(t,q,2);%curva para cada semana ciclo para correr
ODr_poly1(j,3)=ODr_poly1(j,3)-DO_min;%curva para cada semana ciclo corrida OD min
ODlim_aux0(j,:)=roots(ODr_poly0(j,:));%curvas sin recambio
ODlim_aux1(j,:)=roots(ODr_poly1(j,:));%curvas con recambio
ODlim(j,1)=max(ODlim_aux0(j,:));
ODlim(j,2)=max(ODlim_aux1(j,:));
endfor
t=0:1:23;
figure(1);

plot(t,ODr(:,1));
axis([0,24,0,15])
xlabel("[h]");ylabel("DO [mgO_2 /L]");
hold on;
plot(t,ODr(:,10));
hold on;
plot(t,ODr(:,20));
hold on;
plot(t,ODr(:,25));
hold on;
plot(t,y=DO_min);
%text(1,2.1,"Nivel crítico");
text(2,1.8,"DO=3 [mgO_2/L]");
set(gca,'FontSize',8,'Fontname','arial');
set (gca, 'xtick', [0 6 12 18 23])
set (gca, 'xticklabel', {'6 AM', '12 PM', '6 PM','12 AM', '5 AM'})
hold off;
legend({"Semana 2","Semana 4","Semana 6","Semana 8"},"location","northeast");
print -deps -color odyn01.eps

```

**Anexo No 11: Tiempos diarios de operación de AM calculados mediante simulaciones del comportamiento diario del OD, realizados con Octave.**

Alevinaje					
Semana	Tiempo actual [h]	Tiempos proyectados para cada Ds [h]			
		Ds=72,1	Ds=80	Ds=90	Ds=100
1	84,0	7,6	11,6	17,2	22,7
2	84,0	21,9	27,2	34,4	41,4
3	84,0	42,9	49,7	58,8	67,4
4	84,0	61,0	68,8	78,9	88,2
5	84,0	72,2	80,4	90,7	100,0
6	84,0	79,2	87,5	97,9	107,0
7	84,0	84,6	93,0	103,3	112,1
Total	504,0	369,4	418,1	481,1	538,7
Porcentaje		73,3 %	83,0 %	95,5 %	106,9 %

Engorde					
Semana	Tiempo actual [h]	Tiempos proyectados para cada Ds [h]			
		Ds=72,1	Ds=80	Ds=90	Ds=100
1	84,0	0,0	0,0	0,0	4,2
2	84,0	0,3	5,4	9,5	15,4
3	84,0	6,9	12,8	17,5	24,4
4	84,0	11,6	18,1	23,2	30,7
5	84,0	15,5	22,5	28,0	36,0
6	84,0	19,6	27,1	32,9	41,4
7	84,0	23,2	31,0	37,2	46,1
8	84,0	25,6	33,8	40,1	49,3
9	84,0	28,2	36,6	43,2	52,6
10	84,0	32,1	40,9	47,7	57,5
11	84,0	36,9	46,2	53,3	63,5
12	84,0	42,1	51,8	59,3	69,9
13	84,0	47,3	57,5	65,2	76,1
14	84,0	52,2	62,8	70,7	81,8
15	84,0	56,5	67,3	75,4	86,6
16	84,0	60,1	71,2	79,4	90,6
17	84,0	64,4	75,7	84,0	95,2
18	84,0	70,2	81,8	90,1	101,3
19	84,0	76,1	87,8	96,1	107,0
20	84,0	80,4	92,1	100,4	111,2
21	84,0	83,1	94,9	103,1	113,7
22	84,0	84,6	96,3	104,5	115,0
23	84,0	86,6	98,3	106,4	116,8
24	84,0	90,3	101,9	109,9	120,0
25	84,0	94,5	106,0	113,8	123,5
Total	2.100,0	1.188,4	1.419,8	1.591,0	1.829,6
Reducción		56,6 %	67,6 %	75,8 %	87,1 %

## Anexo No 12: Perfil diario de las potencias.

Hora del día	Electricity battery from system	Electricity to grid from system	Electricity to load from battery	Electricity to load from grid	Electricity to load from system	Electricity load
0.5	0,0	0,0	24,9	0,5	0,0	25,4
1.5	0,0	0,0	23,8	1,6	0,0	25,4
2.5	0,0	0,0	21,3	4,1	0,0	25,4
3.5	0,0	0,0	18,1	7,3	0,0	25,4
4.5	0,0	0,0	14,8	10,6	0,0	25,4
5.5	0,0	0,0	11,7	13,8	0,0	25,5
6.5	1,9	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2
7.5	10,9	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
8.5	22,5	0,0	0,0	0,0	0,4	0,4
9.5	34,3	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
10.5	41,7	0,2	0,0	0,0	0,1	0,1
11.5	44,6	0,4	0,0	0,0	0,1	0,1
12.5	44,6	0,6	0,0	0,0	0,1	0,1
13.5	38,7	4,0	0,0	0,0	0,2	0,2
14.5	28,5	8,0	0,0	0,0	0,1	0,1
15.5	18,2	9,2	0,0	0,0	0,1	0,1
16.5	8,3	5,8	0,0	0,0	0,4	0,4
17.5	1,6	1,4	0,0	0,0	0,1	0,1
18.5	0,0	0,0	26,2	0,0	0,0	26,2
19.5	0,0	0,0	26,3	0,0	0,0	26,3
20.5	0,0	0,0	26,3	0,0	0,0	26,3
21.5	0,0	0,0	25,6	0,0	0,0	25,6
22.5	0,0	0,0	25,4	0,0	0,0	25,4
23.5	0,0	0,0	25,2	0,0	0,0	25,4

### Anexo No 13: Perfil diario de las potencias.

Hora del día	Electricity battery from system	Electricity to grid from system	Electricity to load from battery	Electricity to load from grid	Electricity to load from system	Electricity load
0,5	0	0,0	0,0	25,4	0,0	25,4
1,5	0,0	0,0	0,0	25,4	0,0	25,4
2,5	0,0	0,0	0,0	25,4	0,0	25,4
3,5	0,0	0,0	0,0	25,4	0,0	25,4
4,5	0,0	0,0	0,0	25,4	0,0	25,4
5,5	0,0	0,0	0,0	25,5	0,0	25,5
6,5	0,2	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2
7,5	1,9	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
8,5	3,8	0,0	0,0	0,0	0,4	0,4
9,5	6,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
10,5	7,5	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
11,5	8,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
12,5	8,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
13,5	7,5	0,1	0,0	0,0	0,2	0,2
14,5	6,1	0,4	0,0	0,0	0,1	0,1
15,5	4,3	0,6	0,0	0,0	0,1	0,1
16,5	1,8	0,5	0,0	0,0	0,4	0,4
17,5	0,4	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1
18,5	0,0	0,0	24,3	1,9	0,0	26,2
19,5	0,0	0,0	19,8	6,4	0,0	26,3
20,5	0,0	0,0	5,8	20,4	0,0	26,3
21,5	0,0	0,0	0,4	25,2	0,0	25,6
22,5	0,0	0,0	0,0	25,4	0,0	25,4
23,5	0,0	0,0	0,0	25,4	0,0	25,4