

R_e

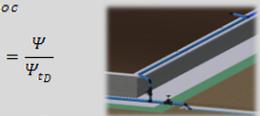
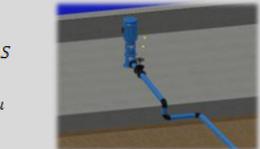
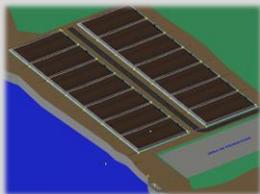
$$H_{t_2} = \mu \cdot H_{t_{\infty}}$$

$$y_n = \beta_0 + \beta_1 x_{n1} + \beta_2 x_{n2} + \dots$$



$$\begin{bmatrix} Q_A \\ Q_B \\ Q_C \\ \vdots \\ Q_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{AA'} \\ Q_{AB} \\ Q_{BC} \\ \vdots \\ Q_{LM} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Q_{AB} \\ Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_{13} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Q_{AH} \\ Q_{BC} \\ \vdots \\ Q_{14} \end{bmatrix}$$

$$\varphi = (0,55 + 0,68) + 0,6 \cdot \text{sen}\beta_2$$



S

μ

$h_{t_{oc}}$

$$\eta_h = \frac{\Psi}{\Psi_{t_D}}$$

$OD \quad Q_{DO}$

$$N_u = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000}$$

$$\Psi_{t_D} = \mu(1 - \phi_{t_D} \cdot \cot\beta_2)$$

$$H = \psi \cdot \frac{u_2^2}{g} \quad \alpha_{OD}$$

Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”

Facultad de Ingeniería

Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente

Trabajo de Diploma

En Opción al Título

De Máster en Eficiencia Energética

Título:

“Evaluación energética del sistema de bombeo de agua de mar hacia el banco de progenitores de camarón blanco *Litopenaeus Vannamei* en la UEB Yaguacam”

Autor: Ing. Yorlan González González

Tutores:

Ms.C. Reinier Jiménez Borges

Dr.C. José Pedro Monteagudo Yanes

Cienfuegos, 2021

DECLARACION DE AUTORIDAD



Por este medio hago constar que el presente trabajo constituye la culminación de la Maestría en Eficiencia Energética, autorizando a que el mismo sea utilizado por el Centro de Estudio Superior para los fines que estime conveniente, ya sea parcial o totalmente, que además no podrá ser presentado sin la aprobación de dicha institución.

Yorlan González González

Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido según acuerdo de la dirección del centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura, referido a la temática señalada.

Nombre y Apellidos

Vice Decano

Nombre y Apellidos

Tutor

Nombre y Apellidos

Información Científico Técnico

Nombre y Apellidos

Sistema de Doc. y Proyecto

Pensamientos

“...vegetar no es vivir. Vivir es tener algo que hacer. Vivir es tener una meta, un objetivo, una tarea, una obra a la cual dedicar el tiempo, la energía, y dedicar la vida...”

“Se pueden adquirir conocimientos y conciencia a lo largo de toda la vida, pero jamás en ninguna otra época de su existencia una persona volverá a tener la pureza y el desinterés con que, siendo joven, se enfrenta a la vida.”

Fidel Castro Ruz



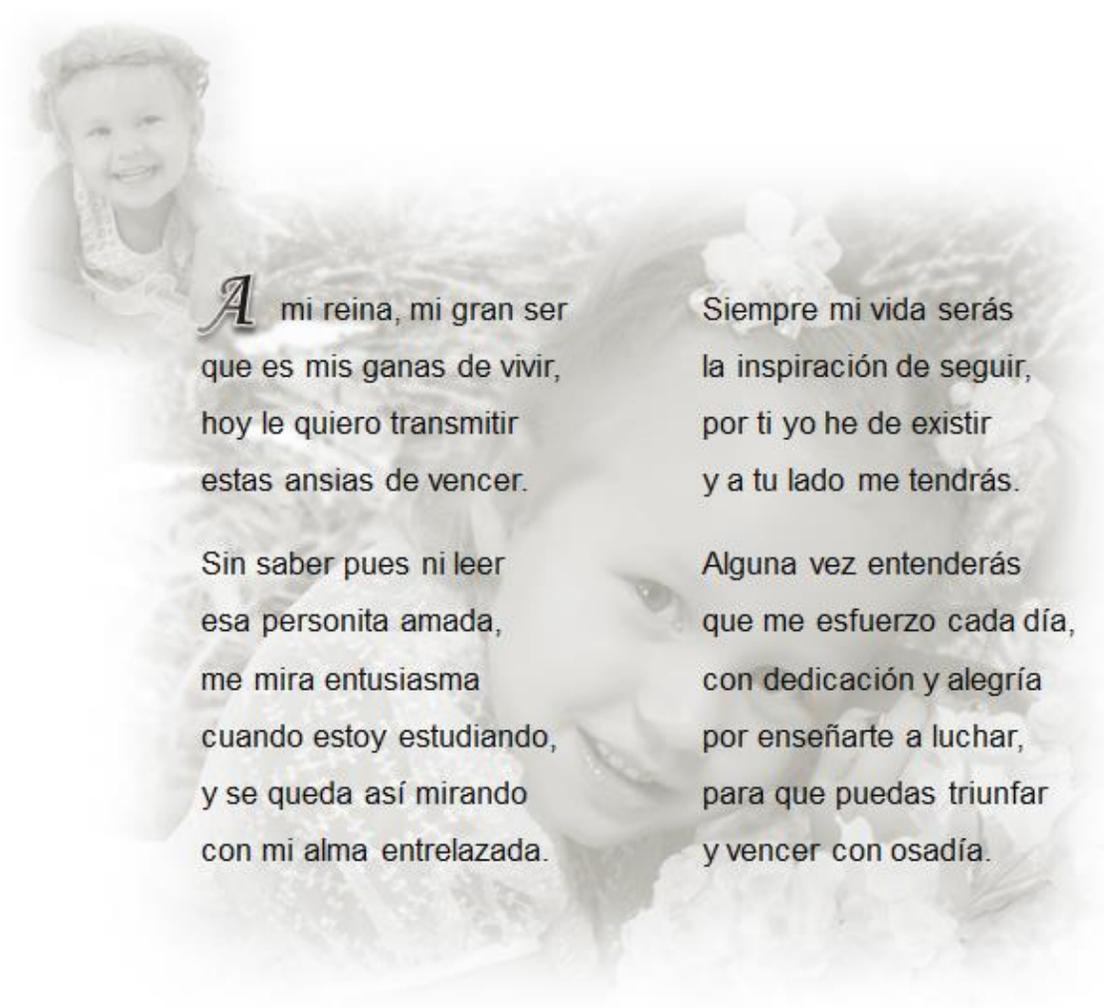
“Ahorrar y ser eficientes siempre dará ganancias.”

“Ciencia e innovación tienen que significar crecimiento económico y desarrollo social.”

“La eficiencia y la productividad deben ser los derroteros que marquen el desempeño de cualquier entidad”.

Miguel Mario Díaz-Canel Bermúdez

Dedicatoria



A mi reina, mi gran ser
que es mis ganas de vivir,
hoy le quiero transmitir
estas ansias de vencer.

Sin saber pues ni leer
esa personita amada,
me mira entusiasmo
cuando estoy estudiando,
y se queda así mirando
con mi alma entrelazada.

Siempre mi vida serás
la inspiración de seguir,
por ti yo he de existir
y a tu lado me tendrás.

Alguna vez entenderás
que me esfuerzo cada día,
con dedicación y alegría
por enseñarte a luchar,
para que puedas triunfar
y vencer con osadía.

Agradecimientos

A mi esposa Zurisleidy por el apoyo desmedido, por esa energía positiva que lo hace a uno querer alcanzar las metas propuestas sin titubear. Por estar siempre presente, y entender aquellos momentos de desenfado y estrés. No tengo palabras hoy para agradecer el apoyo en las mediciones realizadas, la corrección de errores de redacción, las largas noches de desvelo a mi lado, en fin, ERES ALGUIEN IMPRESCINDIBLE EN MI VIDA.

A mis padres Ricardo y Claribel por su preocupación y por empujarme todos los días hacia esta meta hecha hoy realidad. A ustedes les debo lo que soy.

A mi niña Ashley, porque con su escasa edad ha logrado entender “cuando papá estudiaba para terminar su tesis”, aunque en muchos momentos cerré todos los documentos y le puse sus muñes preferidos.

A mi tutor Reinier que día tras día se preocupaba por el estado de la investigación y brindaba ánimo para trabajar incluso cuando el cansancio era en demasía. Gracias amigo, por tener tanta paciencia en estos años de trabajo.

Al profe Pepe Monteagudo (como cariñosamente le decimos) del que tantas experiencias de sus análisis y reflexiones hemos obtenido, y el que también fue parte de consultas en temas referidos a la hidráulica de los fluidos.

A los profesores Orlando Stable, Yohana y Lourdes por el apoyo proporcionado en los análisis estadísticos.

A los trabajadores de la UEB Yaguacam que colaboraron en las mediciones como Pichón, Ángel Luis, Hannay, Zorroche y otros muchos. Al director y amigo Carlos, el cual apostó por esta investigación e hizo posible la no existencia de trabas que impidieran el desarrollo del trabajo. Al querido Hectico, el que tanto ayudó con su experiencia en los temas de camaronicultura.

A todos los que siempre se han preocupado por mi formación y han apostado por ello, eso ha sido imprescindible.

...a todos ¡Muchas Gracias! ...

Resumen

El estudio sobre “Evaluación energética del sistema de bombeo de agua de mar hacia el banco de progenitores de camarón blanco *Litopenaeus Vannamei* en la UEB Yaguacam” proviene de considerar que los equipos de bombeo representan el 35 % del consumo total de energía, y que en este caso se manipula una bomba de 53 kW de potencia que se utiliza 11 horas diarias. Para ello se investigaron características técnicas de la bomba y del sistema de tuberías, y se definió el punto de operación a 340 m³/h. De acuerdo a autores como Akifumi y Kubitza, Boyd, y Gurrola se identificó que su principal uso está dado para satisfacer los requerimientos biológicos de la especie. Cuestión por la cual se realizó un modelo matemático que contempla el Volumen de Recambio y otras variables asociadas a la oxigenación en los estanques. Este modelo describe el 94,02 % el cambio en la ΔOD , donde no se determina como influyente el Volumen de Recambio. Por otra parte, se realizó un diseño de experimento que señala se deben introducir grandes volúmenes de agua para garantizar un cambio en el OD; alternativa inviable si se considera que en los estanques no existe una incidencia de niveles críticos inferiores a 2 mg/l. Por lo cual se propone que el recambio se realice en días alternos y liberando agua desde el fondo. De acuerdo a esta utilización inadecuada y los salideros no deseados se genera una pérdida en energía de 106 397,5 y 15 600,1 kWh/año; respectivamente.

Palabras claves: camarón, oxígeno disuelto, recambio, influyente, bomba, energía.

Abstract

The study on "Energy evaluation of the seawater pumping system towards the *Litopenaeus Vannamei* white shrimp parent bank in the Yaguacam UEB" comes from considering that the pumping equipment represents 35 % of the total energy consumption, and that in this case, a 53 kW power pump is used, which is used for 11 hours a day. For this, the technical characteristics of the pump and the piping system were investigated, and the operating point was defined at 340 m³/h. According to authors such as Akifumi and Kubitza, Boyd, and Gurrola, it was identified that its main use is given to satisfy the biological requirements of the species. Question for which a mathematical model was carried out that contemplates the Replacement Volume and other variables associated with oxygenation in the ponds. This model describes the 94.02 % change in the ΔOD , where the Replacement Volume is not determined as influential. On the other hand, an experiment design was carried out that indicates large volumes of water must be introduced to guarantee a change in DO; An unviable alternative if it is considered that in ponds there is no incidence of critical levels below 2 mg/l. Therefore, it is proposed that the replacement be carried out on alternate days and releasing water from the bottom. According to this inappropriate use and unwanted leaks, an energy loss of 106,397.5 and 15,600.1 kWh/year is generated; respectively.

Key words: shrimp, dissolved oxygen, replacement, influential, pump, energy.

Índice

Introducción..... 1

Capítulo 1. Marco Teórico de la Investigación..... 5

1.1- Especificaciones en la producción de camarón. El uso de sistemas de bombeos para estanques de cultivo..... 5

1.1.1- El oxígeno disuelto como elemento importante en la calidad del agua..... 5

1.1.2- Las bombas como equipos de aireación suplementaria 9

1.1.3- Necesidad de recambio de agua en estanques para el cultivo de camarón 11

1.2- Fundamentos teóricos de hidráulica. Punto de operación de un sistema 16

1.2.1- Flujo de fluidos en tuberías 17

1.2.2- Bombas centrífugas 19

1.3- Fundamentos teóricos de estadística 25

1.3.1- Regresión lineal múltiple 25

1.3.2- Diseño de experimentos 27

Capítulo 2. Consideraciones hidráulicas sobre el sistema de bombeo de agua de mar hacia el banco de progenitores de la UEB Yaguacam 31

2.1- Descripción del sistema hidráulico 31

2.2- Determinación de la curva característica del sistema de tuberías 33

2.3- Determinación de las curvas características de la bomba centrífuga KSB ITUR 20800 ZARAUZ BEV-1226/2..... 37

2.3.1- Aplicación de la teoría clásica de Euler..... 38

2.3.2- Aplicación del método de Karassik 42

2.3.3- Aplicación del modelo de cálculo propuesto por Izquierdo y Sablón 44

2.3.4- Errores en las características de carga y rendimiento para las metodologías presentadas 49

2.4- Determinación del punto de operación del sistema 49

2.5- Flujo de agua a partir del criterio biológico de la especie de camarón blanco Litopenaeus Vannamei.....	50
---	----

Capítulo 3. Modelos matemáticos que describen la influencia del flujo de agua en la variación del oxígeno disuelto en los estanques de progenitores de la UEB Yaguacam..... 55

3.1- Medición de las variables asociadas a la oxigenación en el banco de progenitores	55
3.2- Análisis descriptivo de las variables	61
3.3- Modelos de regresión lineal múltiple	64
3.3.1- Modelo para caso 1	64
3.3.2- Modelo para caso 2	71
3.4- Diseño de experimento	73
3.5- Análisis de las oportunidades de ahorro.....	76
3.6- Análisis económico de los resultados.....	77

Conclusiones Generales 80

Recomendaciones..... 81

Bibliografía..... 82

Anexos 89

Glosario de términos y definiciones

En el sistema de tuberías A' y A hasta M, representan el punto ubicado en la descarga de la bomba y nodos en el sistema de tuberías ramificado, respectivamente.

En el método de Euler las magnitudes referentes a la entrada del álabe se designan con el subíndice 1 y a la salida con el subíndice 2.

En el método de Izquierdo y Sablón los coeficientes t_{∞} , t_D , D y DO están referidos a consideraciones teóricas infinitas, teóricas de diseño, de diseño y en el punto de diseño, respectivamente.

A_1, A_2	Área en la sección transversal de paso del fluido a la entrada y salida del impelente, (m ²)
a_{PT}, b_R	Coefficientes de Mestizo, (adimensional)
b_1, b_2	Ancho entre discos a la entrada y salida del impelente, (m)
B	Biomasa en el sistema (kg de animales), también es expresada en (kg de animales/ha)
c	Vector de velocidad absoluta del líquido, (m/s)
c_1, c_2	Velocidad absoluta a la entrada y salida en el impelente, (m/s)
c_{1r}, c_{2r}	Velocidad absoluta en sentido radial a la entrada y salida en el impelente, (m/s)
c_{1u}, c_{2u}	Velocidad absoluta en sentido tangencial a la entrada y salida en el impelente, (m/s)
d_1, d_2	Diámetros a la entrada y salida del impelente, (m)
d_{int}, d_{ext}	Diámetro interior y exterior de la tubería, (m)
D_i	Distancia de Cook
e_i	Error en la predicción individual del modelo
f	Coefficiente de pérdidas por rozamiento, (adimensional)

f_T	Factor de fricción, (adimensional)
FCA	Factor de conversión alimentaria, (kg de alimento/kg de animales)
g	Constante de gravitación universal, tomada como 9,81 m/s ²
h	Carga del sistema de tuberías, (m)
$h_{AA'}, h_{AB},$ $h_{BC} \dots h_{LM}$	Carga en los tramos AA', AB, BC hasta el tramo LM; (m)
h_R, h_C	Pérdidas hidráulicas por rozamiento y turbulencias, (m)
$h_W, h_{12}, h_{23}, h_{24}$	Cargas de la bomba y en los tramos 12, 23 y 24; (m)
h_f	Pérdidas friccionales en tramos rectos, o pérdidas por rozamiento, en los análisis toma la forma Σh_f ; (m)
h_{loc}	Pérdidas friccionales en válvulas y accesorios, o pérdidas locales, en los análisis toma la forma Σh_{loc} ; (m)
H	Carga real, (m)
H_{DO}	Carga en el punto de diseño, (m)
H_{tD}	Carga teórica de diseño, (m)
H_{t_z}	Carga teórica para un número finito de álabes, (m)
H_{t_∞}	Carga teórica infinita, (m)
k	Coefficiente de pérdidas locales, en los análisis toma la forma Σk ; (adimensional)
l	Longitud del tramo recto, (m)
$MAPE$	Error de porcentaje de la media absoluta (siglas en inglés), (%)
n	En mecánica se denomina frecuencia de giro, (rpm); en estadística designa el tamaño de la muestra, (adimensional)
$n_s, n_{s,US}$	Velocidad específica, (adimensional)

N_u	Potencia útil de la bomba, (kW)
OD	Oxígeno disuelto en el agua, (mg/l)
OD_{ini}	Oxígeno disuelto inicial, o de entrada; (mg/l)
OD_{fin}	Oxígeno disuelto final, o de salida; (mg/l)
ΔOD	Variación del oxígeno disuelto, (mg/l)
$\widehat{\Delta OD}$	valor ajustado de la variación de oxígeno disuelto, (mg/l)
P_1, P_2, P_3, P_4	Presiones en los puntos 1, 2, 3 y 4; (Pa)
Q	Flujo real, (m ³ /h)
$Q_1, Q_2,$ $Q_3 \cdots Q_{14}$	Flujo a la entrada de los estanques 1, 2, 3 hasta el estanque 14; (m ³ /h)
Q_{12}, Q_{23}, Q_{24}	Flujo en los tramos 12, 23 y 24; (m ³ /h)
$Q_A, Q_B,$ $Q_C \cdots Q_M$	Flujo en los nodos A, B, C hasta el nodo M; (m ³ /h)
$Q_{AA'}, Q_{AB},$ $Q_{BC} \cdots Q_{LM}$	Flujo en los tramos AA', AB, BC hasta el tramo LM; (m ³ /h)
Q_{DO}	Flujo en el punto de diseño, (m ³ /h)
Q_{OD}	Flujo requerido por demanda de oxígeno, (m ³ /h)
r_1, r_2	Radios a la entrada y salida del impelente, (m)
R	Resistencias, (h ² /m ⁵)
R_{12}, R_{23}, R_{24}	Resistencias en los tramos 12, 23 y 24; (h ² /m ⁵)
$R_{AA'}, R_{AB},$ $R_{BC} \cdots R_{LM}$	Resistencias en los tramos AA', AB, BC hasta el tramo LM; (h ² /m ⁵)
R_e	Número de Reynolds, (adimensional)
R_{OD}	Requerimientos de oxígeno de la biomasa de peces en el sistema, (kg de OD/h)

R^2	Coeficiente de correlación, (%)
R_i^2	Coeficiente de correlación de la regresión de las variables explicativas, (%)
S	Espesor de tubería, (m)
u	Vector de velocidad tangencial del líquido, (m/s)
u_1, u_2	Velocidad tangencial a la entrada y salida en el impelente, (m/s)
v	Velocidad del fluido por la tubería, (m/s)
VIF	Factor de Inflación de Varianza
VIF_i	Factor de Inflación de Varianza de las variables explicativas
w	Vector de velocidad relativa del líquido, (m/s)
w_1, w_2	Velocidad relativa a la entrada y salida en el impelente, (m/s)
W	Estadístico de White
$x_1, x_2 \dots x_8$	Términos asociados para describir las variables independientes Días/ciclo, Biomasa, Nivel de Zooplancton, Nivel de Fitoplancton, Temperatura del Agua, Radiación Solar, Velocidad del Viento y Volumen de Recambio; respectivamente.
X	Matriz de variable(s) independiente(s)
y_i, \hat{y}_i, \bar{y}	Valor real, ajustado y promedio de la variable dependiente, respectivamente
Y	Matriz de variable(s) dependiente(s)
z	Número de álabes, (adimensional)
Z	Altura, (m)
Z_1, Z_2, Z_3, Z_4	Alturas en los puntos 1, 2, 3 y 4; (m)
ΔZ	Variación de altura, (m)
$\Delta Z_{AA'}, \Delta Z_{AB},$	Variación de altura en los tramos AA', AB, BC hasta el tramo LM;

$\Delta Z_{BC} \cdots \Delta Z_{LM}$	(m)
α_1, α_2	Ángulo formado entre los vectores u y c , a la entrada y salida del impelente respectivamente; ($^\circ$)
α_{OD}	Tasa de respiración, (kg de OD/kg de alimento)
β_1, β_2	Ángulos de inclinación del álabe a la entrada y salida del impelente, ($^\circ$)
ε	Matriz de los errores de estimación del modelo
η	Rendimiento del motor, (%)
η_h	Rendimiento hidráulico, (%)
μ	Coefficiente de influencia del número de álabes, (adimensional)
ρ	Densidad del fluido transportado, (kg/m ³)
ν	Viscosidad cinemática, (m ² /s)
φ	Coefficiente de flujo, (adimensional)
$\phi_{t\infty}, \phi_{tD}, \phi_D,$ ϕ_{DO}, ϕ_X	Coefficientes de capacidad teórica infinita, teórico de diseño, de diseño, en el punto de diseño, y real, respectivamente; (adimensional)
$\chi_{crit}^2, \chi_{calc}^2$	Se refiere a los valores obtenidos para la prueba Chi-Cuadrado
ψ_R, ψ_C	Coefficientes de pérdidas por rozamiento y turbulencias, (adimensional)
$\Psi_{t\infty}, \Psi_{tD}, \Psi_D,$ Ψ_{DO}, Ψ	Coefficientes de carga teórica infinita, teórico de diseño, de diseño, en el punto de diseño, y real, respectivamente; (adimensional)
ω	Velocidad angular, (rad/s)

Biomasa: Materia total de los seres que viven en un lugar determinado, expresada en peso por unidad de área o de volumen. Es la abreviatura de masa biológica,

cantidad de materia viva producida en un área determinada de la superficie terrestre, o por organismos de un tipo específico (Cuéllar-Anjel et al, 2010).

Cultivo intensivo o semi-intensivo: se conoce el tipo de cultivo a partir de considerar la cantidad de animales por m². Para un cultivo intensivo la densidad es aproximadamente de 80 animales por m². Mientras que para un cultivo semi-intensivo la densidad en un estanque es de 10 a 12 animales por m² (Gurrola, 2016).

Depleción: es la disminución de la cantidad de líquido contenido en el organismo o en un órgano (Gran diccionario de la Lengua Española, 2016).

Detritus: en biología, los detritos son residuos, generalmente sólidos, permanentes, que provienen de la descomposición de fuentes orgánicas (Pérez, Rodríguez, & Gil, 2018).

ECCAM: Empresa para el Cultivo del Camarón

Factor de conversión alimentaria (FCA): Es la cantidad de alimento que se le suministra a un organismo para que consiga un peso deseado en un tiempo determinado, pudiese ser a lo largo de toda su vida (Arescurenaga, 2016).

FAO: Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura también conocida como ONUAA.

Fitoplancton: Es la principal fuente de alimentación en los ambientes acuáticos (tanto en el mar como en las aguas dulces). Está formado por vegetales verdes microscópicos los cuales se encuentran suspendidos en la columna de agua, regularmente son de color verde, aunque también hay algas azul-verdes, amarillas, rojas, negras o cafés. Además el fitoplancton es el principal productor de oxígeno dentro del estanque durante el día, pero durante la noche, respiran al igual que el resto de los organismos, consumiendo gran parte del oxígeno disponible (Abrévalo & Orellana, 2014).

Fotosíntesis: Proceso metabólico específico de ciertas células de los organismos autótrofos, por el que se sintetizan sustancias orgánicas a partir de otras

inorgánicas, utilizando la energía lumínica (Cuéllar-Anjel, Lara, Morales, De Gracia, & García, 2010).

Hipoxia: Condición de un organismo viviente o de una parte de este, en la cual hay privación de un suministro adecuado de oxígeno (Cuéllar-Anjel et al, 2010).

Lugol: es una disolución de yodo molecular y yoduro de potasio en agua destilada (Goenaga, 2012a).

Plancton: Está compuesto de organismos de origen vegetal (fitoplancton) y animal (zooplancton) que flotan en el agua (Abrévalo & Orellana, 2014).

Sobresaturación: Riesgo de la enfermedad de la burbuja de gas, puede ser indicativo de alta concentración de microalgas en el estanque (Cuéllar-Anjel et al, 2010).

Zooplancton: Componente animal del plancton. Conjunto de animales que se encuentran en el plancton (Abrévalo & Orellana, 2014).

Introducción

La acuicultura se ha convertido en los últimos años en una actividad primordial para satisfacer la demanda de productos alimenticios a nivel mundial; a causa del estancamiento de las fuentes pesqueras, dicha actividad provee una fuente de abastecimiento fundamental. Dentro de este enfoque industrial, la camaronicultura ha sido una de las actividades comerciales con mayor dinamismo en el mundo, dados los cambiantes factores del mercado y otros que han alterado el flujo normal de la demanda y producción (Cruz, 2013).

Uno de los inconvenientes en la camaronicultura es que se practica con altas tasas de recambio de agua, en consideración al tipo de cultivo asociado, que varían desde menos de un 2 % hasta más del 100 % diario. Debido a esto, se ha dado mayor énfasis en el desarrollo de cultivos con nulo o limitado recambio de agua. Gurrola (2016) aborda que disminuir significativamente la tasa de recambio de agua no disminuye el crecimiento, supervivencia y rendimiento del camarón. Aunque con bajas tasas de recambio se deben considerar los factores físico-químicos más influyentes en la calidad del agua como son: oxígeno disuelto (OD), pH, salinidad, temperatura, hierro, amonio, nitritos y nitratos, fósforo, sedimento de fondos, entre otras sustancias inorgánicas disueltas en el agua (Boyd, 2002).

El OD es la variable más crítica para la calidad del agua en un estanque de camarón. A la cual, los productores deben prestarle especial atención y entender los factores que afectan su variación. La concentración del OD puede bajar tanto, que los efectos provocados serían crecimientos lentos, mayor susceptibilidad frente a enfermedades, o incluso la muerte (Boyd, 2002).

Akifumi y Kubitza (2010) plantean que, si el agua de abastecimiento fuese la única fuente de oxígeno en los estanques, serían necesarias altas tasas de renovación. Cuestión no viable debido a los costos de inversión, mantenimiento y operación de los sistemas hidráulicos.

En Cuba, el cultivo de camarón es de gran interés y se encuentra considerado por las autoridades gubernamentales como “una actividad prioritaria que permitirá lograr el incremento de las exportaciones”, destacando que ya se tiene un

programa nacional para su desarrollo (FAO, 2020). Además se cuenta con siete centros destinados a la producción de camarón, entre los que se destaca la UEB Yaguacam. En estas entidades de cultivo se produce la especie del camarón blanco *Litopenaeus Vannamei*; debido a que tiene un mayor crecimiento después de alcanzar los cinco gramos, es resistente a la caída del oxígeno y su cola es mayor que la cabeza (Tamarit, 2008).

En la actualidad es un reto para las empresas cubanas, en particular para la UEB Yaguacam, tener los mayores niveles de utilidades. Para lo cual trabajar en la reducción de los consumos es de vital importancia, en especial en el referido a equipos de bombeo debido a que representan el 35 % del consumo total de energía eléctrica.

Problema Científico:

No existe una evaluación energética que justifique la utilización del sistema de bombeo de agua de mar hacia el banco de progenitores de camarón blanco *Litopenaeus Vannamei* en la UEB Yaguacam.

Hipótesis:

Un modelo matemático que considere las variables que influyen en la calidad del agua, permitirá disminuir el consumo energético del sistema de bombeo como consecuencia del recambio en los estanques del banco de progenitores de camarón blanco *Litopenaeus Vannamei* en la UEB Yaguacam.

Objetivo General:

Evaluar energéticamente el sistema de bombeo de agua de mar hacia el banco de progenitores de camarón blanco *Litopenaeus Vannamei* en la UEB Yaguacam.

Objetivos Específicos:

1. Realizar un marco teórico referencial relacionado con los sistemas de bombeo en estanques para el cultivo de camarón.
2. Determinar el punto de operación del sistema de bombeo hacia el banco de progenitores.

3. Proponer un modelo matemático que determine la influencia de los recambios de agua en la variación del oxígeno disuelto en los estanques de progenitores.
4. Realizar la evaluación económica de las oportunidades de ahorro existentes.

Capítulo 1. Marco teórico de la investigación

En este capítulo se realiza una búsqueda bibliográfica con el objetivo de conocer la importancia del uso de los sistemas de bombeo en los estanques de cultivo de camarón. Se analiza el oxígeno disuelto como elemento importante en la calidad del agua, las principales fuentes de oxigenación existentes, variables influyentes en una baja concentración y las condiciones adecuadas de OD, necesidad de recambio, y otros. Se fundamenta sobre elementos teóricos de hidráulica: el punto de operación de un sistema, flujo de fluidos en tuberías y las formas para determinar las curvas características de las bombas centrífugas. Además se hace alusión a elementos teóricos de estadística como: regresión lineal múltiple y diseños de experimentos.

Capítulo 2. Consideraciones hidráulicas sobre el sistema de bombeo de agua de mar hacia el banco de progenitores de la UEB Yaguacam

En este capítulo se describe el sistema hidráulico hacia el banco de progenitores de la UEB Yaguacam. Se determina la curva característica del sistema de tuberías, las curvas características de la bomba centrífuga KSB ITUR 20800 ZARAUTZ BEV-1226/2 y el punto de operación del sistema. Además se brindan nociones sobre el flujo de agua necesario a partir del criterio biológico de la especie de camarón blanco *Litopenaeus Vannamei*.

Capítulo 3. Modelo matemático para la influencia del flujo de agua en la variación del oxígeno disuelto

En este capítulo se desarrolla un modelo matemático que considera la influencia del flujo de agua (por ende del recambio de agua) en la variación del oxígeno disuelto. Además se realiza un análisis económico de las oportunidades de ahorro existentes.

Capítulo 1

$$H = \psi \cdot \frac{u_1^2}{g}$$

$$\eta_h = \frac{\psi}{\psi_{TD}}$$

$$Q = c_{1r} \cdot A_1$$

$$\alpha_{OD}$$

Capítulo 1. Marco Teórico de la Investigación

La estrategia en la resolución del tema investigativo se puede resumir en el gráfico mostrado en el anexo 1. Teniendo una incidencia directa en la relación de los elementos teóricos que son tratados en este capítulo.

1.1- Especificaciones en la producción de camarón. El uso de sistemas de bombeos para estanques de cultivo

La acuicultura representa un importante sector de la producción alimentaria mundial y constituye una fuente de proteínas, empleo e ingresos, siendo la base del sustento de una gran parte de la población mundial. En concreto, el camarón es un producto de alto valor, que se produce principalmente en Asia y América Latina, fundamentalmente para su exportación, generando riqueza en muchos de los países en vías de desarrollo de estas regiones (Harold & Andrade, 2016).

Cuba se encuentra entre los países de América que han introducido el *Litopenaeus Vannamei* en sus entidades de cultivo; teniendo en cuenta que tiene un mayor crecimiento después de alcanzar los cinco gramos, es resistente a la caída del oxígeno y su cola es mayor que la cabeza (Tamarit, 2008).

Según Alarcón (2019) en Cuba existen siete centros destinados a la producción de camarón. Se manejan cultivos intensivos en la UEB Guajaca (Holguín), UEB Cultisur (Camagüey) y UEB Calisur (Granma); y cultivos semi-intensivos en la UEB Cultizaza (Sancti Spíritus), UEB San Ross (Las Tunas), UEB Manzanillo (Granma) y UEB Yaguacam (Cienfuegos).

En la cadena productiva del camarón uno de los procesos críticos es el cultivo. En todas las actividades relacionadas con la acuicultura, la medición de parámetros biométricos y la selección de reproductores son factores importantes, ya que aseguran el éxito del cultivo (Cruz, 2013).

1.1.1- El oxígeno disuelto como elemento importante en la calidad del agua

Los camarones son criaturas delicadas, susceptibles de sufrir estrés ante condiciones ambientales adversas. Cuando sufren de estrés no comen bien,

tienden a enfermarse y crecen despacio. El ambiente de un estanque de camarón es garantizado por la calidad del suelo y del agua (Boyd, 2002).

Los factores físico-químicos más influyentes en la calidad del agua según Gutiérrez (2009) son: oxígeno disuelto (OD), pH, salinidad, temperatura, hierro, amonio, nitritos y nitratos. A los que Boyd (2002) le agrega: fósforo, sedimento de fondos, entre otras sustancias inorgánicas disueltas en el agua.

(Boyd, 2002) plantea que el OD es la variable más crítica para la calidad del agua en un estanque de camarón. A la cual, los productores deben prestarle especial atención y entender los factores que afectan su variación.

1.1.1.1- Fuentes de oxigenación en un estanque en acuicultura

Las principales fuentes de oxigenación en los sistemas en acuicultura son las siguientes (Sosa & Beltrán, 2015; Cabrera & Lara, 2014):

- Oxígeno atmosférico (difusión): se disuelve en el agua por diversos procesos como la difusión entre la atmósfera y el agua.
- Oxígeno en el agua entrante (renovación de agua): se genera debido a la oxigenación por el flujo del agua sobre las rocas y otros detritos, la agitación del agua por las olas y el viento.
- Oxígeno vía fotosintética: es generado a partir de la existencia de fitoplancton y otras plantas acuáticas en el estanque.
- Oxígeno a partir de los aireadores mecánicos: del mismo se tienen elementos en el apéndice 1.1.2.

1.1.1.2- Variables influyentes en una baja concentración de OD

Muchos de los factores físico-químicos más influyentes en la calidad del agua de una forma u otra se relacionan. Por ejemplo, Segarra (2017) plantea que un incremento en la temperatura del agua genera un aumento en el consumo de oxígeno y viceversa. Boyd (2002) señala que de la concentración de fósforo y nitrógeno (a partir del amonio, nitritos y nitratos) depende el crecimiento óptimo de fitoplancton. Si hay poco fósforo y nitrógeno habrá muy poco fitoplancton, el agua

estará clara y habrá escasez de comida para el camarón; si hay mucho fósforo y nitrógeno existirá exceso de fitoplancton (genera turbidez), y durante la noche caerá el OD.

Sonnenholzner (2014) proporciona otros elementos que influyen en una baja concentración de OD como el exceso de alimento debido a la falta de control, lo que aumenta la carga orgánica y origina una descomposición bacteriana que demanda oxígeno, la falla en los equipos suplementarios de aireación u oxigenación, y la mala calidad del agua de recambio.

A continuación, se resumen las variables más influyentes en la variación de OD, proporcionadas por Boyd (2002), Gutiérrez (2009), Sosa y Beltrán (2015), Cabrera y Lara (2014), Segarra (2017), y Sonnenholzner (2014); a los que se les suman otras consideraciones de Vides (2013) y Balnova (2018):

- Biomasa: expresada como el peso promedio de los camarones (kg). También se puede expresar en (kg/ha)
- Iluminación Solar: sin la cual no es posible la fotosíntesis (W/m^2).
- Cantidad de fitoplancton: garantiza la producción de oxígeno durante el día, aunque consume oxígeno durante la noche (cel/ml).
- Cantidad de zooplancton: consume oxígeno durante todo el día (org/l).
- Temperatura en el agua del estanque: influye en la descomposición de la materia orgánica, y en la reacción metabólica de los camarones ($^{\circ}C$).
- Velocidad del aire exterior: el cual genera turbulencia en la superficie del agua (especie de olas) permitiendo el intercambio de oxígeno entre la capa superficial y la columna de agua (m/s).
- Aumento de los sólidos en suspensión: se refiere a la cantidad de alimento suministrado y los residuos que se generan como heces y sedimentos (mg/l).
- Descomposición de la materia orgánica: genera poblaciones bacterianas que consumen oxígeno en dicho proceso (mg/l).

1.1.1.3- Condiciones adecuadas de OD

La concentración del OD puede bajar tanto, que los camarones pueden morir. Sin embargo, como se explicó, los efectos usuales del OD bajo se manifiestan en crecimientos lentos o en mayor susceptibilidad frente a enfermedades. En estanques con una baja crónica en la concentración de OD, los camarones comerán menos y no habrá una conversión alimenticia comparable con la de un estanque con niveles normales (Boyd, 2002).

La concentración crítica de oxígeno varía para diferentes especies en la acuicultura. Sonnenholzner (2014) aborda que para un intervalo entre 0 y 1 mg/l el efecto será letal si la exposición es por un período prolongado, cuando el intervalo es entre 1 y 4 mg/l el efecto provocará un crecimiento lento, por el contrario, cuando los valores se encuentran entre 4 y 7 mg/l es el intervalo óptimo en la concentración de OD. Balnova (2018) plantea que, la mejor condición para el crecimiento adecuado se encuentra en el intervalo entre 4 y 5 mg/l.

Boyd (2002) y Boyd et al. (2005) coinciden en que, para especies de camarón, la concentración de OD causará los efectos mostrados en la tabla 1.1.

Tabla 1.1- Efectos para diferentes concentraciones de oxígeno en los camarones. Fuente: (Boyd, 2002) y (Boyd et al., 2005)

Concentración de OD	Efecto
Menor de 1 o 2 mg/l	Mortal si la exposición dura más que unas horas
>2 y ≤5 mg/l	Crecimiento lento si la baja de OD se prolonga
>5 y ≤15 mg/l (saturación)	Mejor condición para crecimiento adecuado
>15 mg/l (sobresaturación)	Dañino si las condiciones existen por todo el estanque.

Para el cultivo de camarón blanco *Litopenaeus Vannamei*, Cuéllar-Anjel et al. (2010) proponen que el crecimiento será lento para una concentración de OD entre 2 y 4 mg/l, que la mejor condición para el crecimiento estará entre 4 y 12 mg/l, y que el riesgo de sobresaturación aparecerá para valores mayores a 12 mg/l.

Otros elementos son los ratificados por Cabrera y Lara (2014) quienes afirman se debe evitar no solo una baja concentración, sino valores superiores a 10 mg/l, ya que esto indicaría una excesiva concentración de fitoplancton que puede producir una depleción notable de oxígeno durante la noche. Para estos autores, un efecto letal será causado por niveles entre 0 y 1,3 mg/l, letal con exposición prolongada entre 1,3 y 1,7 mg/l, será pobre la conversión de alimento en el intervalo 1,7 y 3,0 mg/l, mientras que los intervalos normales deberán estar entre 4 y 9 mg/l.

Actualmente en la UEB Yaguacam, se utiliza el procedimiento P.3.BP.05 elaborado por (Goenaga, 2012b), el cual considera otros intervalos de OD basándose en los horarios de la mañana y la tarde, véase anexo 2. Este procedimiento añade las medidas a tomar para revertir los efectos causados por el bajo nivel de OD.

Para suplir bajas concentraciones de OD de forma esporádica con el uso de equipos de aireación Sonnenholzner (2014) propone se manejen los valores entre 2 y 3 mg/l, para cultivos intensivos y semi-intensivos.

Por otra parte, Cuéllar-Anjel et al. (2010) recomiendan medir los niveles de OD por la mañana hacia la salida del sol (6:00 a.m.) y por la tarde entre las 2:00 p.m. y las 4:00 p.m. Consideran indispensable realizar lecturas en horas de la noche, en caso que las concentraciones de la tarde estén por debajo de 6 mg/l; de esta manera se pueden implementar correctivos necesarios para evitar episodios de hipoxia, como el recambio de agua.

1.1.2- Las bombas como equipos de aireación suplementaria

Boyd et al. (2005) plantean que, los sistemas suministradores de oxígeno se pueden clasificar en dos grupos: uno que garantiza el oxígeno puro en el agua (oxigenador) y otro basado en la oxigenación a partir del suministro de aire (aireador).

En la elección del material de aireación y de oxigenación se considerará el tipo de instalación (agua disponible, volumen de los estanques, tiempo de renovación) el tiempo de utilización por año (amortización), y en función de su eficacia (cantidad de OD por hora y del rendimiento energético (Galli & Miguel, 2007).

Existen aireadores cuyo principio se encuentra basado en la gravedad, a los que se conoce de igual forma, aireadores por gravedad y otros del tipo mecánico. Estos últimos, utilizan la energía mecánica para provocar una ruptura del agua en gotas; los mismos pueden ser de eje horizontal o vertical (Boyd et al., 2005). La figura 1.1 muestra los principales aireadores mecánicos utilizados en la actualidad.



a) Hélice de aspiración



b) Aireador de paleta



c) Bombas



d) Sopladores

Figura 1.1- Equipos aireadores utilizados en estanques para el cultivo de camarón.

Fuente: (Sonnenholzner, 2014) y (Boyd et al., 2005)

Sonnenholzner (2014) plantea que las bombas utilizadas generalmente son de pequeñas potencias. Las diferencias en dos tipos básicos: bombas verticales de potencias entre 1 y 3 kW, y bombas de dispersión con potencias entre 7,5 y 10 kW. Se utilizan distintos tipos de accionamiento mecánicos como: tractores y motores.

Alarcón (2019) plantea que, en Cuba donde se manejan cultivos intensivos se utilizan aireadores de paleta para la oxigenación de los estanques de camarón y en semi-intensivos las bombas garantizan un recambio y mejor calidad del agua de ingreso. Esta realidad coincide con la de otros países donde se plantea que por

lo general en cultivos del tipo semi-intensivo los productores prefieren el uso del recambio de agua y no el de aireación.

Un grupo de medidas de buenas prácticas de manejo (BPM) para el cultivo de camarón son las expuestas por Cuéllar-Anjel et al. (2010) para la aireación y mostradas a continuación:

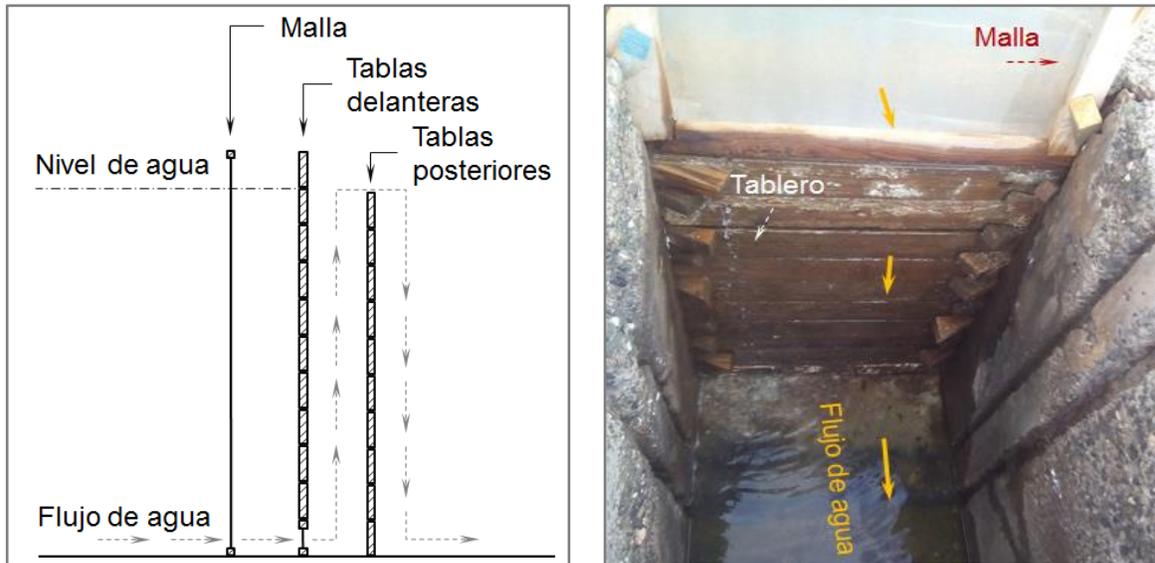
- Para una mejor difusión del oxígeno en el agua durante la aireación, es más eficiente tirar agua al aire (sistema de paletas), que aire al agua (sistema de inyectores).
- El sistema de aireación debe estar diseñado para promover la circulación del agua y romper la estratificación.
- Se deben utilizar aireadores de alta eficiencia, para obtener una óptima oxigenación en el estanque con un mínimo consumo de energía.
- El número y potencia de los aireadores en los estanques, deben ser proporcionales a la biomasa proyectada que se espera manejar durante el ciclo de cultivo.
- El encendido de los aireadores no debe ser a causa de una caída de OD a un nivel crítico, pues ya podría ser demasiado tarde. Debido a esto, se ha de iniciar su funcionamiento de manera oportuna y preventiva.

1.1.3- Necesidad de recambio de agua en estanques para el cultivo de camarón

El recambio más efectivo expuesto por Akifumi y Kubitza (2010) consiste en drenar primero la cantidad deseada de agua desde el fondo del estanque. Esto elimina el agua de más pobre calidad y los detritus acumulados en el fondo de los estanques. Las compuertas de salida deberían tener la capacidad de liberar agua desde el fondo, como en la figura 1.2 a), quitando tablas del fondo de la fila frontal, permitiendo que el agua del fondo salga por encima de la fila posterior de tablas.

La figura 1.2 b) muestra la manera en que se recambia el agua en el banco de progenitores de la UEB Yaguacam. En donde, no se extrae el agua de más pobre

calidad (la del fondo), sino la proveniente de la capa superficial. Elemento que influye en un aumento del recambio de agua en momentos de baja concentración de OD.



a) Recambio de agua del fondo

b) Recambio de agua capa superficial

Figura 1.2- a) Vista lateral de una estructura de drenaje según Akifumi y Kubitz (2010).

b) Vista superior de estanques en el centro para el desove del camarón UEB Yaguacam

1.1.3.1- Uso racional del agua

La reducción en el volumen del recambio de agua en un estanque, ayudará a reducir los costos energéticos que influyen directamente en los costos de producción, mantenimiento de los equipos de bombeo y cantidad de nutrientes en los efluentes (Cuéllar-Anjel et al., 2010).

Chamberlain (2001) reafirma que “los estanques de cultivo intensivo de camarón pueden necesitar un recambio de agua de entre 10 y 55 % del volumen del estanque por día para poder mantener las concentraciones de oxígeno disuelto por encima de los niveles críticos”.

Gurrola (2016) asegura que el recambio de agua varía desde menos de un 2 % hasta más del 100 % de forma diaria, dependiendo del tipo de cultivo fundamentalmente.

Sin embargo, Akifumi y Kubitza (2010) consideran que el desperdicio y el mal uso del agua son comunes en la mayoría de las pisciculturas; ese desperdicio se acentúa por la idea de que el cambio de agua es indispensable para la oxigenación de los estanques. Esto perjudica la eficiencia del encalado y de la fertilización, haciendo que el agua sea pobre de nutrientes; lo que impide la formación del plancton, manteniendo el agua transparente por mucho tiempo, favoreciendo la entrada de luz en la columna de agua, con el desarrollo de algas filamentosas y de plantas sumergidas en el fondo de los estanques.

Esta última teoría es apoyada por el colectivo de autores Suárez, Medina, Montiel, Ibarra, y Salcedo (2015), los que aseveran que el vínculo entre las enfermedades y las condiciones ambientales ha demostrado que, los escenarios sub-óptimos en el agua incrementan el estrés en los organismos, haciendo que se extiendan sus respuestas adaptativas más allá de sus posibilidades, provocando un desarrollo pobre o llegando incluso a sufrir una enfermedad.

Es por ello que, Gurrola (2016) garantiza que el consumo de agua ha sido drásticamente reducido en los años recientes y plantea que mantener en un mínimo la tasa de recambio de agua no disminuye el crecimiento, supervivencia y rendimiento del camarón.

El éxito radica en garantizar un uso racional del agua a partir de la experiencia de los especialistas en la producción, de estudios físico-químicos del agua en forma periódica y de la aplicación de nuevas tecnologías que aporten en tal sentido.

Si el agua de abastecimiento fuese la única fuente de oxígeno en los estanques, serían necesarias altas tasas de renovación. Esta es una cuestión prohibitiva en la mayoría de los encalados, aún en aquellos con pequeñas áreas superficiales, en virtud de la restricción de disponibilidad de agua y debido a los costos de inversión, mantenimiento y operación de los sistemas hidráulicos (Akifumi & Kubitza, 2010).

1.1.3.2- Criterios para la estimación del flujo de agua de diseño

El diseño del sistema hidráulico debe garantizar que los estanques puedan ser llenados en un período de tiempo no muy grande, que se cubrirá la demanda de

agua según los requerimientos biológicos de la especie, y que se repondrá el volumen que se pierda debido a la evaporación y/o filtración. Para el dimensionamiento se debe considerar el criterio que predomine de la figura 1.3 (Sánchez & Salazar, 2007).

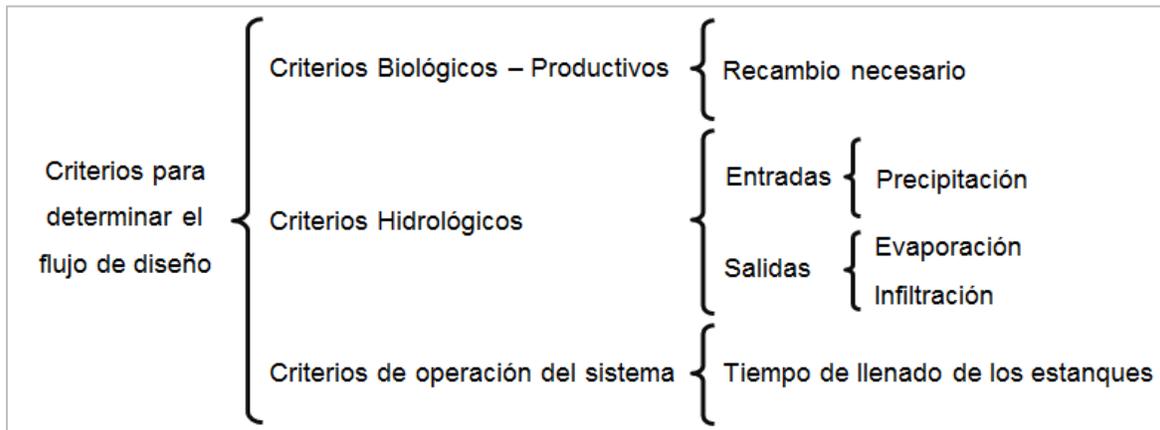


Figura 1.3- Criterios necesarios para estimar el flujo de agua necesario. Fuente: (Sánchez & Salazar, 2007)

Criterios Biológicos-Productivos

Como se ha mencionado, uno de los mecanismos para garantizar la conservación de la calidad del agua respecto a sus parámetros fundamentales es la sustitución parcial o total del volumen de agua con una cierta periodicidad (Sánchez & Salazar, 2007).

Para considerar las necesidades específicas de recambio es importante definir qué tipo de fases de desarrollo y en qué proporción se manejarán. A partir del criterio de que las necesidades de calidad y cantidad de agua en el recambio varían de manera significativa según la fase de crecimiento de la especie de cultivo y la densidad de siembra específica (Sánchez & Salazar, 2007).

Criterios Hidrológicos

Los criterios hidrológicos tienen que ver con los efectos que producen los factores climatológicos y con el tipo de suelo en la conservación del volumen de agua necesario. En lo fundamental son los aportes (entradas) y pérdidas (salidas) de agua del sistema (Sánchez & Salazar, 2007).

Criterios de operación a partir del tiempo de llenado de los estanques

El criterio de operación que establece el productor es el que determina el tiempo para el llenado de los estanques ya que entran en juego consideraciones tales como la necesidad de llenarlos nuevamente después de un vaciado rápido por cosecha, mantenimiento de diques, y vertimiento accidental de sustancias nocivas o contaminantes (Sánchez & Salazar, 2007).

La FAO (1992) recomienda que para estanques en donde el tiempo de llenado no sea el elemento predominante, para un volumen inferior a 1 500 m³, un período razonable sería de ocho días. Alarcón (2019) plantea que el tiempo promedio es de cinco días en un estanque de la UEB Yaguacam, con un volumen de 5 495 m³.

Según (Alarcón, 2019) para el diseño de los estanques de progenitores de la UEB Yaguacam se tuvo en cuenta el criterio biológico-productivo, debido a que no prevalecen los criterios hidrológicos y de operación del sistema. Las dimensiones superficiales de los estanques no son similares a las de una cuenca hidrográfica, y tampoco existe la necesidad de un llenado rápido entre la cosecha y la siembra posterior.

1.1.3.3- Recomendaciones sobre el flujo de agua a partir del criterio biológico de la especie

En la tabla 1.2, Akifumi y Kubitza (2010) explican lo que sucedería si el agua fuese la única fuente de abastecimiento de oxígeno.

Tabla 1.2- Estimación del vaciado de agua necesario en el abastecimiento de oxígeno para diferentes biomasa y tasas de alimentación. Fuente: Akifumi y Kubitza (2010)

Biomasa (kg/ha)	Tasa de alim. (kg/ha/día)	Consumo de oxígeno (g/hora)			Vaciado (l/s/ha)
		MO heces	MO peces	peces	
4 000	48	515	1 315	800	52
6 000	72	773	1 973	1 200	78
8 000	96	1 030	2 630	1 600	104
10 000	120	1 288	3 288	2 000	130

12 000	144	1 546	3 946	2 400	157
14 000	168	1 803	4 603	2 800	183

Leyenda: En la tabla 1.2 MO se refiere a la materia orgánica

De acuerdo a lo expresado, para una biomasa de 6 000 kg/ha y a los que se le aplica una ración de alimento de 72 kg/ha/día, se necesitaría un recambio de alrededor de 78 l/s/ha para garantizar los requerimientos de oxígeno.

Akifumi y Kubitzka (2010) plantean que, en la práctica para una biomasa entre 4 000 y 6 000 kg/ha los estanques se pueden mantener sin aireación mecánica y el agua de recambio no excederá el 3 % del volumen total por día, lo que equivale a un vaciado constante no superior a 4 l/s/ha.

Arescurenaga (2016) proporciona elementos para el cálculo del flujo en estanques de acuicultura, en donde se relaciona el flujo requerido con los niveles de OD en el estanque según la ecuación 1.1.

$$Q_{OD} = R_{OD} \cdot \frac{1}{\Delta OD} \quad (1.1)$$

En la que, ΔOD se determina de acuerdo a la ecuación 1.2.

$$\Delta OD = OD_{ini} - OD_{fin} \quad (1.2)$$

A pesar de que Harold y Andrade (2016) sintetizan ecuaciones aplicables solamente para el caso de un sistema de aireación a través de sopladores, la teoría coincide con la de Arescurenaga (2016) en la expresión 1.3, que permite el cálculo de los requerimientos de oxígeno de la biomasa de animales en el sistema.

$$R_{OD} = B \cdot FCA \cdot \alpha_{OD} \quad (1.3)$$

1.2- Fundamentos teóricos de hidráulica. Punto de operación de un sistema

El poder determinar el punto de operación resulta de mucha utilidad para la toma de decisiones desde el punto de vista energético. El mismo refleja la intercepción de la curva característica de carga de la bomba y del sistema de tuberías (Nordelo, et al. 2002).

1.2.1- Flujo de fluidos en tuberías

Las pérdidas hidráulicas en un sistema de tuberías se encuentran caracterizadas por pérdidas del tipo friccionales, y pérdidas hidráulicas en válvulas y accesorios. Este punto resume las ecuaciones de cálculo para ambos casos y presenta como se procedería en el cálculo de un sistema de tuberías ramificado.

1.2.1.1- Pérdidas hidráulicas por rozamiento

Las pérdidas friccionales en tramos rectos o pérdidas por rozamiento, se determinan según la ecuación 1.4, propuesta por Darcy-Weisbach (Nekrasov 1980).

$$\Sigma h_f = f \cdot \frac{l}{d_{int}} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (1.4)$$

De acuerdo a la demostración de Nekrasov (1980) el coeficiente f depende en lo fundamental del número de Reynolds (ecuación 1.5), por lo que generalmente se utiliza el diagrama de Moody para su determinación, ver anexo 3.

$$Re = \frac{v \cdot d_{int}}{\nu} \quad (1.5)$$

1.2.1.2- Pérdidas hidráulicas locales

La mayoría de las instalaciones industriales están constituidas por válvulas y accesorios, por lo que se hace necesario un conocimiento de su resistencia al paso de fluidos para determinar las características del flujo en el sistema de tuberías completo (Crane, s. f.).

Válvulas: Pudieran clasificarse en dos tipos: las que presentan un paso directo del flujo y las que tienen un cambio en la dirección del flujo. En el primer grupo se pudieran mencionar las válvulas de compuerta, bola, macho y de mariposa (presentan baja resistencia). En el segundo grupo se encuentran válvulas de globo y angulares (presentan alta resistencia).

Accesorios: Estos se clasifican en: de derivación, reducción, ampliación y desviación. Los accesorios como: tes, cruces, codos con salidas laterales, pueden considerarse de derivación.

La ecuación 1.6 rige el cálculo para las pérdidas friccionales en válvulas y accesorios también llamada pérdidas locales (Nekrasov, 1980).

$$\Sigma h_{loc} = \Sigma k \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (1.6)$$

1.2.1.3- Tuberías ramificadas

El cálculo en sistemas de tuberías se suele complejizar con la aparición de ramificaciones. Los tipos de redes se pueden clasificar como abiertas (ramificadas) o cerradas (malladas). Según Navarro (1986) la determinación en ambos casos parte de la formulación matricial a partir de la utilización de la ecuación de Darcy-Weisbach, en donde para sistemas ramificados se ha de considerar la equivalencia con un Sistema Isostático Interior en el análisis estructural de barras de la Resistencia de Materiales y en el caso de un sistema mallado con un Sistema Hiperestático Interior.

Navarro (1986) propone dos métodos clásicos, denominados Método de los Nudos y Método de los Flujos. Otros como, el Método iterativo de Hardy Cross o el de Newton-Raphson, también son utilizados en aquellos casos muy complejos como el de redes malladas (Streeter, Wylie, & Bedford, 2008).

En la actualidad existen herramientas para la resolución de estos problemas como el caso del software GESTAR implementado por el Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (2016), y otras soluciones programadas que tratan como incógnitas los tamaños y rugosidades de las tuberías.

En redes ramificadas existe una bifurcación del fluido en una o más tuberías, que no vuelven a unirse en ningún otro punto (nodo). Serán más complejas mientras más nodos existan. El flujo tendrá una distribución proporcional a la carga, trasladándose mayor flujo por la tubería que menos pérdidas provoque. En cada nodo debe cumplirse la ley general de los nodos en la que la suma neta de flujos que concurren en un nodo deber ser igual a cero (Toledo, 2016).

El caso más sencillo de un sistema de tuberías ramificado es el mostrado en el anexo 4, para cuando se tienen tres tramos. Las ecuaciones generales 1.7-1.10 rigen dicho sistema (Dulhoste, s. f.).

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho g} + Z_1 - Z_2 + h_W = h_{L12} = R_{12}Q_{12}^2 \quad (1.7)$$

$$\frac{P_2 - P_3}{\rho g} + Z_2 - Z_3 = h_{L23} = R_{23}Q_{23}^2 \quad (1.8)$$

$$\frac{P_2 - P_4}{\rho g} + Z_2 - Z_4 = h_{L24} = R_{24}Q_{24}^2 \quad (1.9)$$

$$Q_{12} = Q_{23} = Q_{24} \quad (1.10)$$

1.2.2- Bombas centrífugas

En la industria actual las bombas centrífugas tienen una amplia aplicación para el bombeo de los más diversos tipos de líquidos en un amplio intervalo de presiones (Ramos, 1995).

En la UEB Yaguacam el consumo de energía eléctrica referida a equipos de bombeo representan el 35 % del total de consumo. Algo similar sucede en el resto de las camaroneras del país en donde el bombeo, tanto para recambio como el llenado de tanques tienen un consumo de energía eléctrica promedio superior al 45 % del total de energía eléctrica (Alarcón, 2019).

En lo específico al uso de las bombas centrífugas, se puede ampliar que poseen ventajas y desventajas, de las que Fernández (2003) sintetiza lo siguiente:

Ventajas: garantizan un flujo constante, presión uniforme, sencillez de construcción, tamaño reducido, bajo mantenimiento y flexibilidad de regulación.

Desventajas: uno de los pocos inconvenientes es la necesidad de cebado previo al funcionamiento, ya que las bombas centrífugas, al contrario de otras, no son autoaspirantes.

1.2.2.1- Clasificación de las bombas centrífugas

Las bombas centrífugas se pueden clasificar de acuerdo a tres formas:

- a) Radiales, axiales y diagonales.
- b) De impulsor abierto, semiabierto y cerrado.
- c) Horizontales y verticales.

Debido a que el recambio de agua en la UEB Yaguacam se realiza mediante una bomba del tipo vertical, se analiza la última de estas clasificaciones. Para ello se tratarán brevemente sus características constructivas, exigencias a las que responden, ventajas, desventajas y aplicaciones específicas a partir de elementos proporcionados por Fernández (2003).

El eje de rotación de una bomba centrífuga puede ser horizontal o vertical (rara vez inclinado). De esta disposición se derivan diferencias estructurales en la construcción de la bomba que a veces son importantes.

Bombas horizontales: la disposición del eje de giro horizontal presupone que la bomba y el motor se encuentran a la misma altura; y el líquido bombeado llega a la bomba por medio de una tubería de aspiración. Como no son autoaspirantes requieren, antes de su puesta en marcha, el estar cebadas. Una de las principales ventajas es que son de construcción más barata que las verticales y, especialmente, su mantenimiento y conservación, es más sencillo y económico; el desmontaje de la bomba se suele hacer sin necesidad de mover el motor.

Bombas verticales: las bombas con eje de giro en posición vertical tienen, casi siempre, el motor a un nivel superior al de la bomba. Las bombas son inicialmente más caras que las horizontales y su mantenimiento mucho más elevado, ya que cualquier reparación exige el desmontaje de la bomba para izarla a la superficie; aunque para grandes flujos, la construcción vertical resulta en general más barata que la horizontal. Las bombas verticales se emplean normalmente en aplicaciones marinas, para aguas sucias, drenajes, irrigación, circulación de condensadores, etc. La ventaja de las bombas verticales, es que requieren muy poco espacio horizontal que las hace insustituibles en barcos, pozos, etc; sin embargo, se necesita un espacio vertical superior suficiente para permitir su cómodo montaje y desmontaje.

Su funcionamiento puede ser en seco o sumergidas. El funcionamiento sumergido de las bombas centrífugas elimina el inconveniente del cebado, por lo que el impulsor se encuentra continuamente rodeado por el líquido a impulsar y, por lo tanto, la bomba está en disposición de funcionar en cualquier momento. El control

de la unidad requiere únicamente la puesta en marcha del motor de accionamiento, sin necesidad de dispositivos adicionales de cebado previo. La aspiración, se hace a una cierta profundidad con respecto al nivel libre del líquido. Si esta profundidad es menor de lo debido, dos o tres veces el diámetro del orificio de aspiración, se pueden crear en la superficie vórtices o remolinos por cuyo centro se introduce aire en la bomba, con la consiguiente pérdida de flujo y deficiente funcionamiento.

1.2.2.2- Formas para determinar las curvas características de una bomba centrífuga

Metodología expuesta por Karassik

Generalmente un usuario de bombas centrífugas que desea determinar las características de funcionamiento, tiene una gran fuente de información de la que se pueden determinar estos datos (Karassik, 1968):

1. Una copia de la orden con la que se compró esa bomba.
2. La placa de la bomba. Esta placa generalmente lleva el número de serie de la fábrica de bombas, la designación del tipo del fabricante y las condiciones de servicio nominales, incluyendo la velocidad de operación.
3. La placa del impulsor motriz de la bomba. Si se ha perdido esa placa una medida directa en el impulsor dará la velocidad de operación.

No es usual que haya una bomba sin placas, tanto de la bomba como del motor, y que no se tenga registro de la compra, quedando la presencia física de la bomba como la única cosa positiva. Pero aún en ese caso es posible efectuar ciertas medidas y cálculos para obtener la información deseada con algún grado de precisión.

Una metodología muy utilizada es la expuesta por Karassik (1968), la cual toma como base la utilización de coeficientes experimentales para la determinación de la carga, la eficiencia y la potencia, a partir de considerar la velocidad específica de la máquina para su punto de diseño. El propio autor afirma que, las variaciones de la forma de las curvas resultantes se encontrarán dependiendo del diseño

propio de la bomba. Además, se considera una metodología sencilla de aplicar porque solo se requiere de las tablas mostradas en el anexo 5 y del punto de diseño de la máquina.

Metodología expuesta a partir de condiciones geométricas y cinemáticas de un impelente

Con ayuda de coeficientes experimentales se puede, a partir de la ecuación de Euler, determinar la carga real que puede desarrollar un impelente dado Ramos (1995).

El principio de funcionamiento de la bomba centrífuga consiste en lo siguiente: el órgano principal de trabajo de la bomba es una rueda de paletas que, girando a altas revoluciones, comunica al líquido que llena la bomba a una presión elevada y lo empuja con velocidad aumentada a la cámara espiral. Entre las paletas de la rueda y el flujo existe una interacción de fuerza, debido a la cual la energía del mando se transforma en la del flujo (figura 1.4), (Nekrasov, 1980).

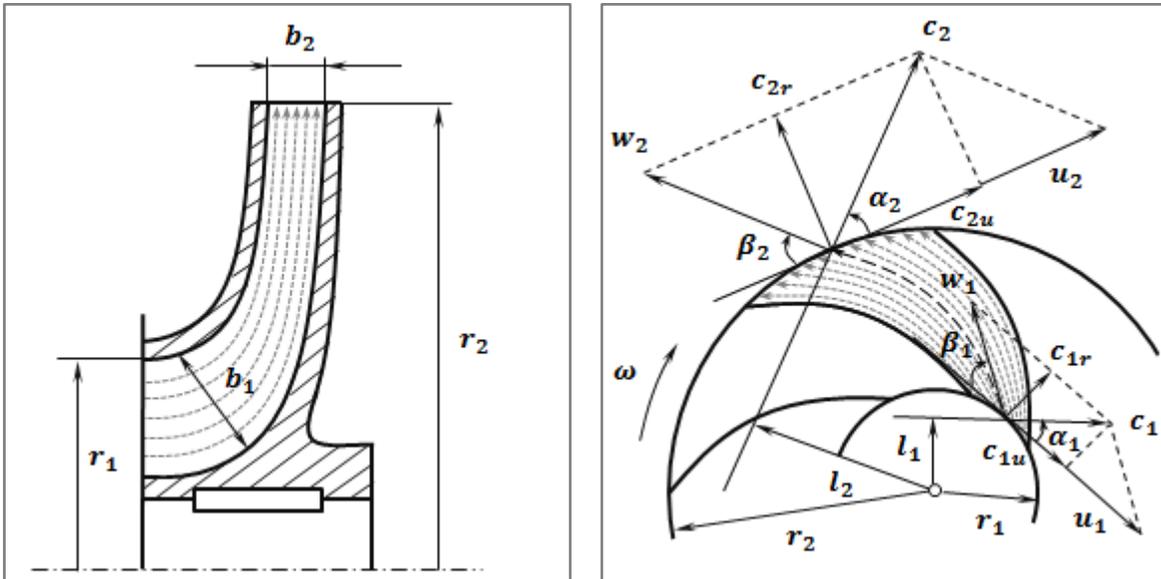


Figura 1.4- Esquema de corriente del líquido a través del impelente. Representación vectorial. Fuente: (Nekrasov, 1980)

El vector de velocidad absoluta del líquido en el impelente es la suma de los vectores de la velocidad de rotación y de la relativa. La velocidad relativa está

dirigida por la tangente del álabe y la de rotación, por la tangente a la circunferencia correspondiente.

Nekrasov (1980) expresa que el ángulo α varía con el cambio del régimen de trabajo de la bomba, es decir, al modificarse el número de revoluciones del impelente y el flujo. El ángulo β , no depende del régimen de trabajo de la bomba.

Según Ramos (1995), la *ecuación de Euler* o ecuación fundamental para una bomba centrífuga (ecuación 1.11), permite calcular la carga teórica que podría desarrollar un impelente centrífugo en condiciones ideales.

$$H_{t\infty} = \frac{c_{2u} \cdot u_2 - c_{1u} \cdot u_1}{g} \quad (1.11)$$

Para acercarse a la *ecuación de Euler* al proceso real de trabajo de una bomba con número finito de álabes, es necesario el uso de la ecuación 1.12 (Nekrasov, 1980).

$$H_{t_z} = \mu \cdot H_{t\infty} \quad (1.12)$$

El coeficiente μ , no depende del régimen de trabajo de la bomba sino de la geometría del impelente, por lo que es constante en todo el impelente. (Fernández, 2003).

Existen varias expresiones que permiten determinar μ , una de ellas es la propuesta por *Ecker* (ecuación 1.13), que de acuerdo a la forma toma en cuenta varios elementos geométricos del impelente (Nekrasov, 1980).

$$\mu = \frac{1}{1 + \frac{\pi \cdot \text{sen} \beta_2}{2 \cdot z \cdot \left(1 - \frac{r_1}{r_2}\right)}} \quad (1.13)$$

Al aplicar las pérdidas hidráulicas caracterizadas por el coeficiente de rendimiento hidráulico, se tiene que la carga de diseño de la bomba puede calcularse según la ecuación 1.14 (Nekrasov, 1980).

$$H_{t_D} = \eta_h \cdot H_{t_z} \quad (1.14)$$

La potencia útil de la bomba es la cantidad de energía por unidad de tiempo entregada al fluido que abandona la máquina por la tubería de descarga y se expresa de acuerdo a la ecuación 1.15 (Nordelo et al., 2002).

$$N_u = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000} \quad (1.15)$$

Metodología expuesta por Izquierdo y Sablón

Izquierdo y Sablón (2018) afirman que en el cálculo hidráulico de impelentes para bombas centrífugas los métodos tradicionales establecidos sobre una base puramente experimental basados en tanteos, no han resultado de aceptación en la actualidad, por considerarse inadecuados y anticientíficos. El progreso de la hipótesis del fluido ideal, algunas consideraciones relacionadas con el flujo real y una amplia compilación de datos a partir de resultados acumulados han desencadenado el perfeccionamiento de estos procedimientos, obteniéndose simplificaciones que permiten elaborar métodos de cálculo accesibles con una menor componente experimental.

El modelo propuesto por Izquierdo y Sablón (2018) se obtuvo a partir de consideraciones que proponen otros autores como Stepanoff (1959). Las que según estos, han permitido arribar a nuevas relaciones de cálculo que demuestran márgenes de perfeccionamiento en el tema analizado; aún, ante la existencia de una teoría con reconocimiento universal para el diseño de las bombas centrífugas y métodos de determinación de los coeficientes experimentales para la obtención de las curvas reales de trabajo.

1.2.2.3- Regulación de la capacidad de las máquinas centrífugas

Existen tres métodos básicos para la regulación de la capacidad en máquinas centrífugas (Beltrán, Yanes & Borges 2016):

- Recorte del impelente.
- Válvulas de estrangulamiento en la descarga de la bomba.
- Ajustando la velocidad del impelente.

El más utilizado es el estrangulamiento de una válvula situada en la descarga, por ser sencillo y reversible. Sin embargo, es el más ineficiente desde el punto de vista energético.

1.2.2.4- Características del trabajo en serie y paralelo

Cuando se requieren cargas superiores a las que pueden obtenerse con un solo impelente la solución consiste en asociar impelentes en serie, en los que el flujo que puede bombear uno de los impelentes es el que circula por el resto; sin embargo, la carga del sistema considerará la suma de todos los impelentes (Fernández, 2003).

Este acoplamiento en serie se puede realizar de dos formas, según Cengel y Cimbala (2006):

- a) Mediante múltiples impelentes.
- b) Colocando en serie las bombas de impelente simple.

Por otra parte, White (2002) añade que si se tratase de un requerimiento con un valor alto de carga en funcionamiento continuo, la solución más eficiente consiste en una bomba con múltiples etapas.

Algo similar sucede cuando se requieren flujos superiores a los que pueden obtenerse con un único impelente, el problema se resuelve asociando impelentes en paralelo, en donde la carga que puede bombear el conjunto es la misma que la de uno de los impelentes simples y el flujo se suma de acuerdo al número de impelentes en paralelo (Fernández, 2003).

Al igual que para el caso en serie, el autor plantea que, existen dos formas de realizar este acoplamiento:

- a) Mediante múltiples impelentes.
- b) Colocando en paralelo las bombas de impelente simple.

1.3- Fundamentos teóricos de estadística

1.3.1- Regresión lineal múltiple

La complejidad de la mayor parte de los mecanismos científicos es tal que para ser capaces de predecir una respuesta significativa se necesita un modelo de regresión múltiple. Cuando este modelo es lineal en los coeficientes, se denomina modelo de regresión lineal múltiple (Abuín, 2010).

La elaboración de un modelo de regresión lineal múltiple cuenta de cinco pasos (Baños, Fonseca, & Álvarez, 2019):

1. Seleccionar la variable dependiente.
2. Seleccionar las variables explicativas.
3. Verificar los supuestos del modelo.
4. Interpretar el modelo.
5. Realizar las pruebas de Bondad del ajuste.

Se deben realizar algunas consideraciones sobre los datos, también llamadas validación del modelo (Fernández, 2011):

1. Linealidad.
2. Normalidad de los errores.
3. Homocedasticidad.
4. Independencia de los errores.
5. Las variables explicativas son linealmente independientes.

Al ajustar un modelo a un conjunto de datos existentes siempre se comete un error de estimación entre los datos reales y los que se obtienen con un modelo de ajuste de forma general, tal y como se muestra en la figura 1.5.

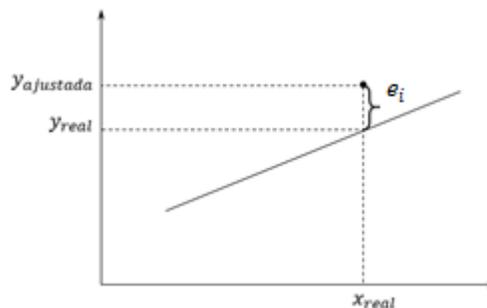


Figura 1.5- Error aleatorio o de estimación. Fuente: Elaboración propia

Cuando se utiliza un modelo de regresión lineal múltiple, en particular cuando el número de variables pasa de dos (ya sean dependientes o independientes), el conocimiento de las teorías matriciales puede facilitar las manipulaciones

matemáticas (Walpole, Myers, & Myers, 2008). Si se tienen m variables independientes x_1, x_2, \dots, x_m y n observaciones y_1, y_2, \dots, y_n , cada una de las cuales se puede expresar por la ecuación 1.16.

$$y_n = \beta_0 + \beta_1 x_{n1} + \beta_2 x_{n2} + \dots + \beta_m x_{nm} + e_n \quad (1.16)$$

Este modelo en esencia representa n ecuaciones que describen como se generan los valores de la respuesta y_n . Con el uso de la notación matricial la ecuación 1.16 se puede escribir como refiere la ecuación 1.17.

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (1.17)$$

O sea, el sistema matricial para un caso generalizado se puede plantear según la ecuación 1.18.

$$\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1j} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2j} \\ y_{31} & y_{32} & \dots & y_{3j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \dots & y_{nj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ 1 & x_{31} & x_{32} & \dots & x_{3m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_{01} & \beta_{02} & \dots & \beta_{0j} \\ \beta_{11} & \beta_{12} & \dots & \beta_{1j} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \dots & \beta_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \beta_{m1} & \beta_{m2} & \dots & \beta_{mj} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \dots & e_{1j} \\ e_{21} & e_{22} & \dots & e_{2j} \\ e_{31} & e_{32} & \dots & e_{3j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e_{n1} & e_{n2} & \dots & e_{nj} \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

La medida de precisión más importante y decisiva en los modelos de ajustes se encuentra enfocada a la exactitud que estos poseen. Una medida de este tipo se define a menudo en términos del error en el ajuste, que es la diferencia entre el valor que estima el ajuste y el real. Existe un número de medidas de exactitud en la literatura y cada una tiene ventajas y limitaciones (**Vandad, Furong, & Robinson, 2009**). Entre los más usados frecuentemente están: el coeficiente de determinación múltiple o correlación y el error de porcentaje de la media absoluta.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1.19)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{e_i}{y_i} \right| \cdot 100 \quad (1.20)$$

1.3.2- Diseño de experimentos

Diseñar estadísticamente un experimento, es realizar una prueba o una serie de pruebas, buscando caracterizar las variables explicativas o factores X_i de mayor influencia en un ensayo de interés, evaluado a través de varias variables

respuesta tal que, si deliberada o sistemáticamente se introducen cambios controlados en algunas de las variables explicativas del proceso, siempre que sea posible observar o cuantificar los cambios que éstos generan en las variables respuesta buscando adicionalmente, minimizar el efecto de las variables no controlables (covariables), procurando con ello estabilizar y minimizar la variabilidad de las respuestas (Dorta, Pérez, & Varela, 2004).

Para saber si dos efectos de interacción están confundidos y cuál de ellos afecta la respuesta se deben conocer los siguientes supuestos (Pérez, 2010).

- Los estimados de los efectos de los factores involucrados.
- La noción disponible sobre los factores experimentales y la posible interacción entre ellos.
- La determinación de los factores que realmente afectan la respuesta, utilizando toda la información disponible; entre otros.

Los experimentos se pueden clasificar de acuerdo a dos tipos fundamentales (Sotolongo & Guzmán, 2001):

El primero es el experimento absoluto en el cual el interés principal es la estimación y las propiedades físicas de la población a ser estudiada. Estas propiedades se espera que sean constantes. Aquí el propósito es incrementar el conocimiento científico. En estos experimentos un factor singular es estudiado frecuentemente para examinar un número reducido de tratamientos posibles o niveles de un factor. La selección de los tratamientos se hace generalmente mediante procesos aleatorios, por tanto, si el experimento puede ser repetido, el mismo grupo de tratamientos no necesariamente sería utilizado.

El segundo tipo es el experimento comparativo. En estos, los tratamientos se comparan por sus efectos medios sobre una variable respuesta con el objeto principal de determinar cuál de ellos es mejor en algún sentido. La principal característica de este tipo de experimentación es que todos los tratamientos de interés están incluidos en el experimento.

Conclusiones Parciales

- 1-** El uso de sistemas de bombeo en las camaroneras del país representa el 45 % del consumo total de energía eléctrica y para la UEB Yaguacam este valor representa aproximadamente el 35 %. De ahí la importancia de minimizar los consumos energéticos como consecuencia del bombeo hacia el banco de progenitores; considerando el impacto tanto para su llenado, renovación, como para su oxigenación.
- 2-** La renovación de agua en un estanque de camarón garantiza mayores niveles de OD debido a que se logra una menor cantidad de sólidos en suspensión y materia en descomposición, y oxigenación aportada por el agua que se ingresa.
- 3-** La metodología propuesta por Izquierdo y Sablón para la determinación de las curvas características de una bomba centrífuga propone un perfeccionamiento de los métodos tradicionales basados en tanteos, debido a que se obtienen métodos de cálculos con una menor componente experimental.
- 4-** Para poder explicar la complejidad de un mecanismo científico cualesquiera, donde existan varias variables ya sean del tipo dependientes o independientes, se utiliza un modelo de regresión lineal múltiple. En el caso de introducir cambios controlados, buscando estabilizar y minimizar la variabilidad de las respuestas, se utiliza un diseño de experimento.

Capítulo 2

$$H = \psi \cdot \frac{u_{12}^2}{g}$$

$$\eta_h = \frac{\psi}{\psi_{TD}}$$

$$Q = c_{1r} \cdot A_1$$

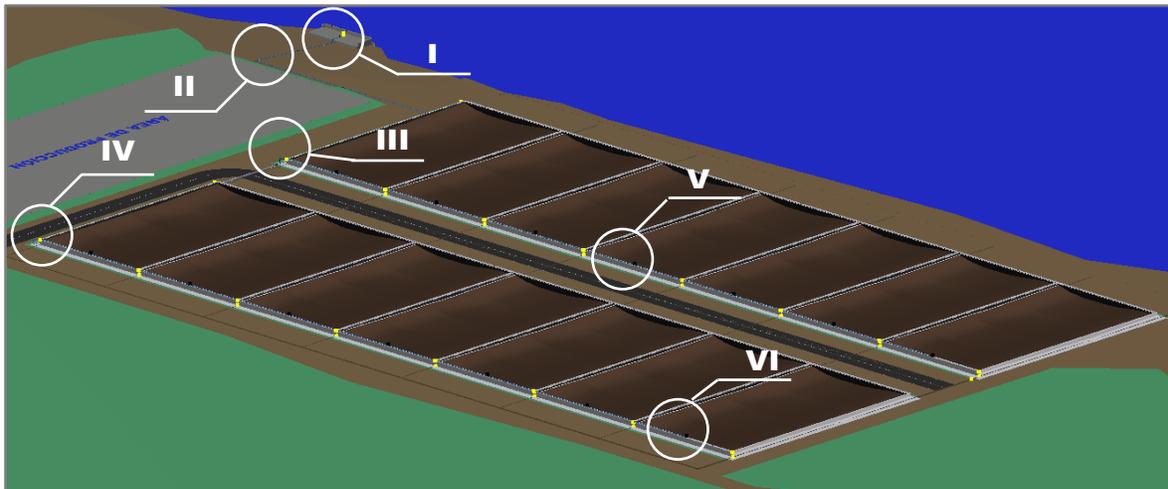
$$\alpha_{OD}$$

Capítulo 2. Consideraciones hidráulicas sobre el sistema de bombeo de agua de mar hacia el banco de progenitores de la UEB Yaguacam

El sistema de bombeo hacia el banco de progenitores es utilizado para garantizar el llenado y recambio de agua en los estanques, por lo que no se debe confundir con un sistema de aireación mecánica, según lo expuesto en el acápite 1.1.2. En este capítulo se presentan elementos de hidráulica, con vistas a una mejor explotación del sistema de bombeo. Para ello, se determinan las curvas características de la bomba y del sistema de tuberías; como elementos indispensables en el punto de operación.

2.1- Descripción del sistema hidráulico

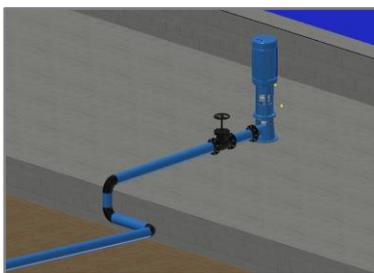
El sistema trasiega agua de mar hacia 14 estanques de cultivo, agrupados en dos baterías con igual cantidad y que poseen un área superficial de 0,39 ha; véase figura 2.1.



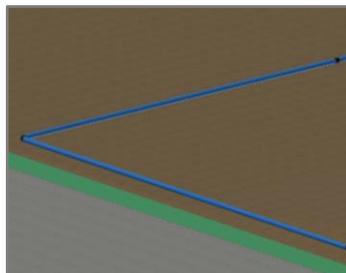
Vista I

Vista II

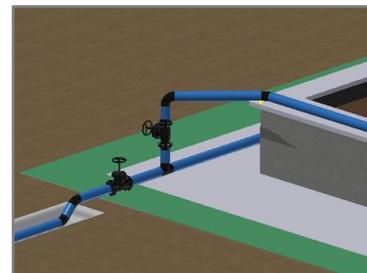
Vista III



Vista IV



Vista V



Vista VI

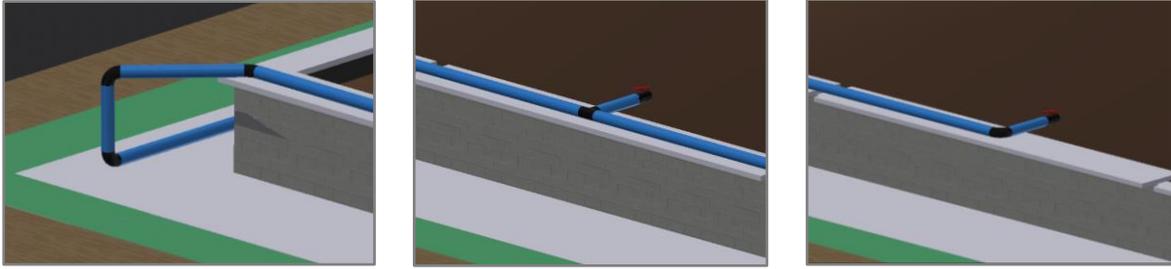


Figura 2.1- Sistema de bombeo de agua de mar hacia el banco de progenitores y vistas ampliadas del sistema. Fuente: Elaboración propia

A pesar de que el sistema de bombeo es utilizado para el llenado de los estanques, su manejo está dado para satisfacer los requerimientos biológicos de la especie. La frecuencia de uso se encuentra alrededor de las 11 horas diarias, a partir de la indicación de la dirección de la ECCAM, que plantea su puesta en funcionamiento a las 10:00 PM y su parada a las 9:00 AM; aunque en los días que se necesita llenar algún estanque se usa en otros horarios.

El sistema se encuentra construido de tuberías de PVC, debido a que el fluido que se maneja es corrosivo. Posee 919,3 m de longitud de tuberías, distribuidos en 196 m en el tramo AA'; 303,5 m desde el punto A hasta el estanque 7 y 419,8 m desde el punto A hasta el estanque 14. La tabla 2.1 muestra las dimensiones geométricas del sistema.

Tabla 2.1- Dimensiones geométricas del sistema hidráulico. Fuente: Elaboración Propia

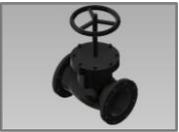
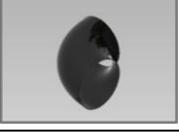
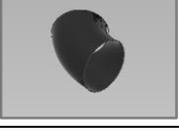
Parámetros geométricos	Tramo AA'	Tramo A hasta Estanque 7	Tramo A hasta Estanque 14
Longitud tubería (m)	196	303,5	419,8
Diámetro exterior (m)	0,205	0,197	0,197
Espesor (m)	0,010	0,010	0,010
Variación de altura (m)	4,5	1,2	1,8

Los apéndices 2.2 y 2.3 muestran otros elementos del sistema de tuberías como la cantidad de válvulas y accesorios, así como la bomba utilizada; respectivamente. Otras vistas del sistema son mostradas en el anexo 6.

2.2- Determinación de la curva característica del sistema de tuberías

Además de la válvula de compuerta, ubicada en el sistema posterior a la bomba (véase vista I en la figura 2.1), se cuenta con dos válvulas de igual tipo capaces de regular el flujo en las dos baterías de estanques (véase vista III en la figura 2.1).

Tabla 2.2- Cantidad de válvulas y accesorios dispuestos en la instalación y factor k según (Crane, s. f.). Fuente: Elaboración Propia

Resistencia Hidráulica	Vista CAD	Cant.	Factor k		Suma Factor k (Σk)
Válvula de Compuerta		3	$k = 8f_T = 0,112$		0,336
Válvula de Mariposa		14	$k = 45f_T = 0,63$		8,82
Codo 90°		10	$k = 30f_T = 0,42$		4,2
Codo 45°		6	$k = 16f_T = 0,224$		1,344
TE		13	directo	$k = 20f_T = 0,28$	3,64
			desviado	$k = 60f_T = 0,84$	10,92
Suma total del coeficiente de pérdidas locales					29,26

Según Crane (s. f.), existen accesorios como conexiones y uniones que no son resistentes al flujo; por lo que no se consideran en los cálculos.

En la tabla 2.2, se hace referencia al factor f_T , el que toma valor de 0,014 y depende del diámetro nominal de la tubería según el anexo 7.

Al analizar la Σk para cada válvula y accesorio se tiene que las mayores pérdidas, considerando la velocidad constante en la ecuación 1.4, están dadas por los cambios en la dirección del flujo en las tes. En donde, las válvulas de compuerta

tendrán un coeficiente casi despreciable; aunque este valor está dado para cuando las mismas se encuentran totalmente abiertas. Crane (s. f.) plantea que cuando una válvula de compuerta está 3/4 abierta el coeficiente $k = 35f_T$, para 1/2 abierta $k = 160f_T$ y cuando esté 1/4 abierta $k = 900f_T$.



Figura 2.2- Distribución de los flujos en el sistema. Fuente: Elaboración propia

Existen tramos de tuberías con iguales cantidades de válvulas y accesorios; por lo que se plantea la igualdad de la Σk . El tramo correspondiente desde el nodo B hasta el estanque 1 se denota como B1. Otras consideraciones se muestran en el anexo 8.

$$\Sigma k_{B1} = \Sigma k_{C2} = \Sigma k_{D3} = \Sigma k_{E4} = \dots = \Sigma k_{M13} = 1,47$$

$$\Sigma k_{G7} = \Sigma k_{M14} = 1,33$$

$$\Sigma k_{BC} = \Sigma k_{CD} = \Sigma k_{DE} = \Sigma k_{EF} = \dots = \Sigma k_{LM} = 0,28$$

En la ecuación 1.4, el coeficiente f es determinado según el anexo 3. El número R_e se considera para una viscosidad cinemática del agua de mar, a 30 °C y presión atmosférica, de $8,03 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, según (Crane, s. f.).

En el sistema tratado, el coeficiente f varía desde 0,03 ($R_e = 8\ 698$) para un flujo a la entrada de los estanques de 3,6 m³/h hasta 0,011 ($R_e = 1\ 096\ 000$) para cuando circula un flujo de 396 m³/h por el tramo AH. Este cambio en el coeficiente, no provoca una variación considerable de las resistencias (R); las gráficas del anexo 9 demuestran esta consideración. A partir de lo anterior, se toma un coeficiente en el tramo AA' de 0,011 y 0,014 en el resto del sistema. El ajuste en la gráfica del anexo 10 fue utilizado para la determinación de f con distintas variaciones de R_e .

A partir de los elementos anteriores, es posible determinar las ecuaciones que rigen el sistema ramificado; en donde se describe la dirección del flujo y se identifican como nodos los puntos A', A, B hasta M. Por lo que, se generan 13 ecuaciones como nodos existentes, ver sistema de ecuaciones 2.1.

$$\begin{bmatrix} Q_A \\ Q_B \\ Q_C \\ \vdots \\ Q_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{AA'} \\ Q_{AB} \\ Q_{BC} \\ \vdots \\ Q_{LM} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Q_{AB} \\ Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_{13} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Q_{AH} \\ Q_{BC} \\ \vdots \\ Q_{14} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Al aplicar la ley de los nodos:

$$\begin{aligned} \Sigma Q_A = \Sigma Q_B = \Sigma Q_C = \Sigma Q_D = \Sigma Q_E = \Sigma Q_F = \Sigma Q_G = \Sigma Q_H = \Sigma Q_I = \Sigma Q_J = \Sigma Q_K = \Sigma Q_L \\ = \Sigma Q_M = 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

Al sustituir la ecuación 2.2 en el sistema 2.1 se obtiene 2.1 a.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{AA'} \\ Q_{AB} \\ Q_{BC} \\ \vdots \\ Q_{LM} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Q_{AB} \\ Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_{13} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Q_{AH} \\ Q_{BC} \\ \vdots \\ Q_{14} \end{bmatrix} \quad (2.1\ a)$$

De forma general en cada tramo de tubería debe cumplirse (ecuación 2.3).

$$h = \Delta Z + RQ^2 \quad (2.3)$$

Las cargas expresadas en forma matricial y en términos de carga necesaria, quedan descritas como plantea el sistema 2.3 a. Este sistema es indeterminado desde el punto de vista algebraico, debido a que posee 40 ecuaciones y 54 incógnitas; y donde ΔZ y R son conocidas.

$$\begin{bmatrix} h_{AA'} \\ h_{AB} \\ h_{AH} \\ h_{BC} \\ \vdots \\ h_{LM} \\ h_{M13} \\ h_{M14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta Z_{AA'} \\ \Delta Z_{AB} \\ \Delta Z_{AH} \\ \Delta Z_{BC} \\ \vdots \\ \Delta Z_{LM} \\ \Delta Z_{M13} \\ \Delta Z_{M14} \end{bmatrix} + [R_{AA'} \quad R_{AB} \quad R_{AH} \quad R_{BC} \quad \dots \quad R_{LM} \quad R_{M13} \quad R_{M14}] \cdot \begin{bmatrix} Q_{AA'}^2 \\ Q_{AB}^2 \\ Q_{AH}^2 \\ Q_{BC}^2 \\ \vdots \\ Q_{LM}^2 \\ Q_{M13}^2 \\ Q_{M14}^2 \end{bmatrix} \quad (2.3 a)$$

Al sustituir Q_{AB} hasta Q_{LM} , en función de los flujos que entran a los estanques Q_1 hasta Q_{14} , se logra reducir el número de incógnitas hasta 40; quedando el sistema 2.3 b como un sistema determinado.

$$\begin{bmatrix} h_{AA'} \\ h_{AB} \\ h_{AH} \\ h_{BC} \\ \vdots \\ h_{LM} \\ h_{M13} \\ h_{M14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4,5 \\ 1,2 \\ 1,8 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + [1052,74 \quad 273,48 \quad 1003,49 \quad 283,31 \quad \dots \quad 283,31 \quad 129,46 \quad 377,41] \cdot \begin{bmatrix} (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10} + Q_{11} + Q_{12} + Q_{13} + Q_{14})^2 \\ (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7)^2 \\ (Q_8 + Q_9 + Q_{10} + Q_{11} + Q_{12} + Q_{13} + Q_{14})^2 \\ (Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7)^2 \\ \vdots \\ (Q_{13} + Q_{14})^2 \\ Q_{13}^2 \\ Q_{14}^2 \end{bmatrix} \quad (2.3 b)$$

La figura 2.3 muestra las curvas características del sistema para diferentes condiciones, a partir de suponer una distribución uniforme de flujo a la entrada de todos los estanques y evaluando en el sistema de ecuaciones 2.3 b.

Condición 1. Estanques del 1 al 7 abiertos (batería 1) y del 8 al 14 cerrados (batería 2).

Condición 2. Estanques del 1 al 7 cerrados y del 8 al 14 abiertos.

Condición 3. Todos los estanques abiertos.

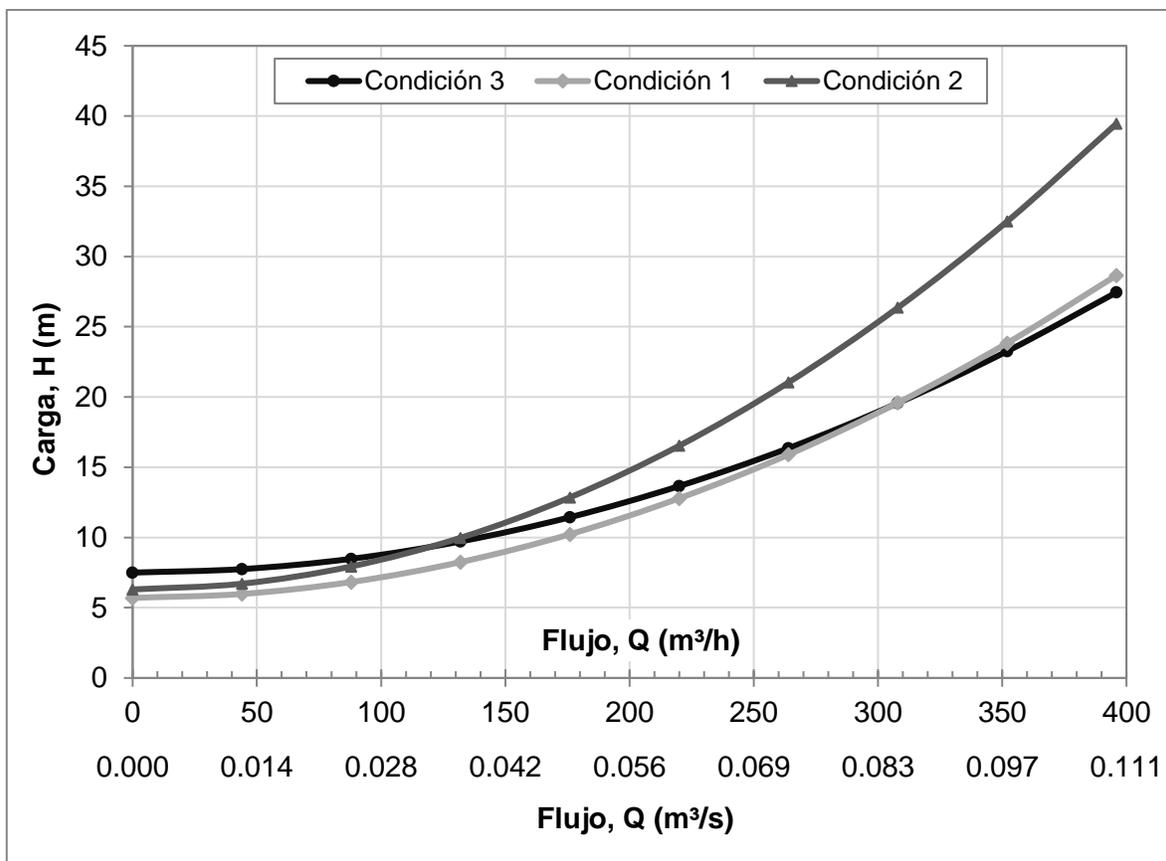


Figura 2.3- Curvas características del sistema para diferentes condiciones de flujo.

Fuente: Elaboración propia

Las mayores pérdidas al circular más de 130 m³/h por el tramo AA' ocurren para la condición 2, debido al aumento de las pérdidas friccionales. Las menores pérdidas ocurren cuando se trasiegan cantidades inferiores a 310 m³/h para la condición 1. Cuando el flujo a la salida de la bomba es de 352 m³/h, las menores pérdidas se producen para la condición 3; en este caso, las pérdidas entre la condición 3 y la condición 2 son superiores a 9 m.

2.3- Determinación de las curvas características de la bomba centrífuga KSB ITUR 20800 ZARAUZ BEV-1226/2

La bomba KSB ITUR 20800 ZARAUZ BEV-1226/2, mostrada en la figura 2.4, es una bomba centrífuga con el eje en posición vertical. El país de fabricación es España. Los años de producción y montaje fueron en el 2000 y 2004, respectivamente; el resto de sus datos técnicos se muestran en la tabla 2.3.



Figura 2.4- Vista isométrica de la bomba centrífuga KSB ITUR 20800 ZARAUTZ BEV-1226/2. Fuente: Elaboración propia

Es una bomba en la que, como se explica en el apéndice 1.2.2.1, la principal ventaja radica en no tener que cebarla, puesto que en el lugar de su ubicación se encuentra rodeada del líquido a impulsar y su principal desventaja es que cualquier reparación exige de su desmontaje y el izaje hacia la superficie.

Tabla 2.3- Datos proporcionados por el fabricante en la chapa de la bomba. Fuente: Elaboración propia

Modelo-Tamaño	BEV-1226	Flujo (m³/h)	216
Número de etapas	2	Carga (m)	45
No. de Serie	6034631	Frecuencia (rpm)	1770

En el Expediente Técnico, no se cuenta con el valor de la eficiencia para su punto de diseño y tampoco con las curvas características de la bomba. Además, a partir de otras revisiones bibliográficas no fue posible contar con dichas curvas. Aspectos técnicos relacionados con el motor eléctrico se muestran en el anexo 11, donde la potencia es de 53 kW.

2.3.1- Aplicación de la teoría clásica de Euler

La bomba centrífuga vertical del sistema tratado posee dos impelentes como el mostrado en la figura 2.5.

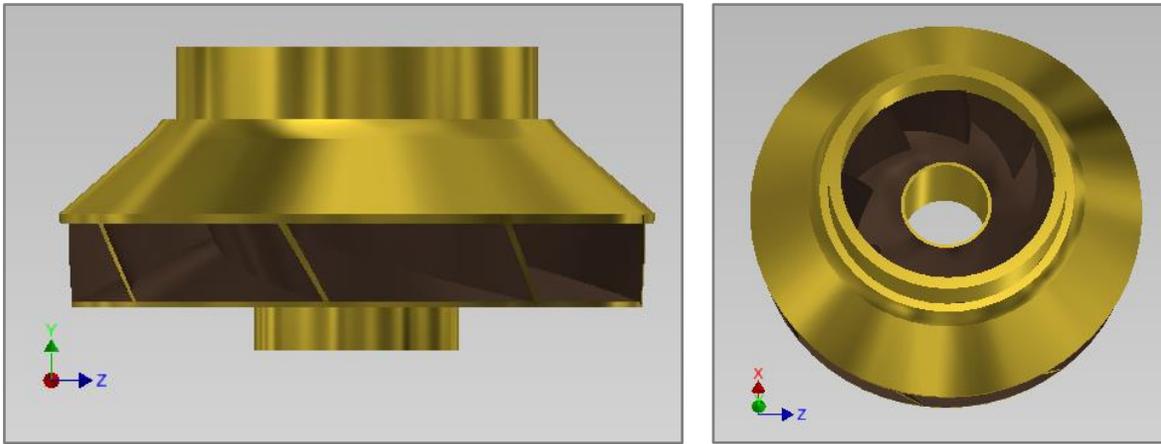


Figura 2.5- Vistas isométricas del impelente. Fuente: Elaboración propia

Los ángulos β_1 y β_2 fueron tomados a partir del tallado del álabe. La frecuencia de giro de la bomba (n) se obtiene a partir de los datos del fabricante como 1 770 rpm y se formula en términos de velocidad angular como ω (rad/s). Otros elementos necesarios en los cálculos son b_1 , b_2 , d_1 y d_2 los cuales son acotados en la figura 2.6. Además el diámetro d_2 es un valor medio en canal entre álabes a la salida del impelente.

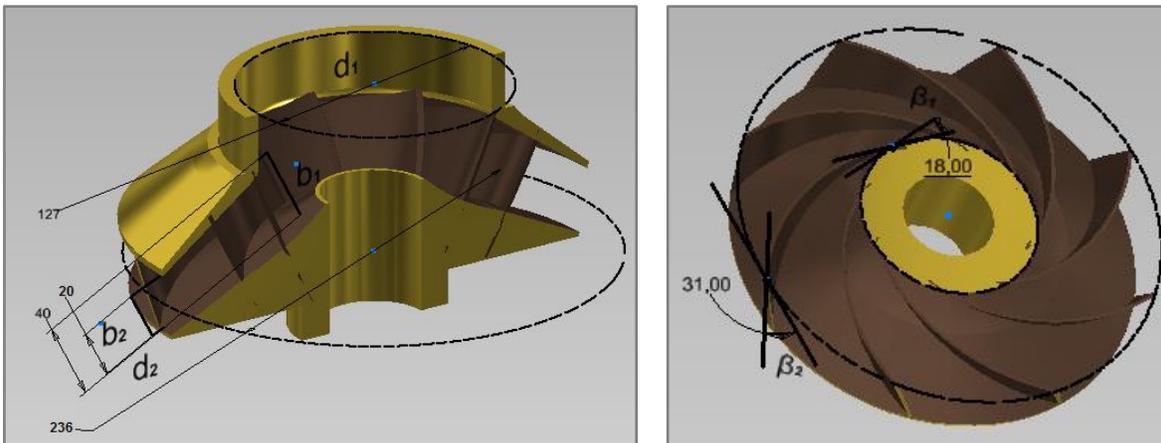


Figura 2.6- Dimensiones acotadas en el impelente. Fuente: Elaboración propia

Considerando que según Ramos (1995) los diseñadores generalmente toman la condición de que $\alpha_1 = 90^\circ$ para el diseño de un impelente centrífugo debido a que, para este valor la carga teórica infinita será máxima, en este caso $c_1 = c_{1r}$ y $c_{1u} = 0$; la representación vectorial de velocidades a la entrada y salida del álabe quedan como se observa en la figura 2.7.

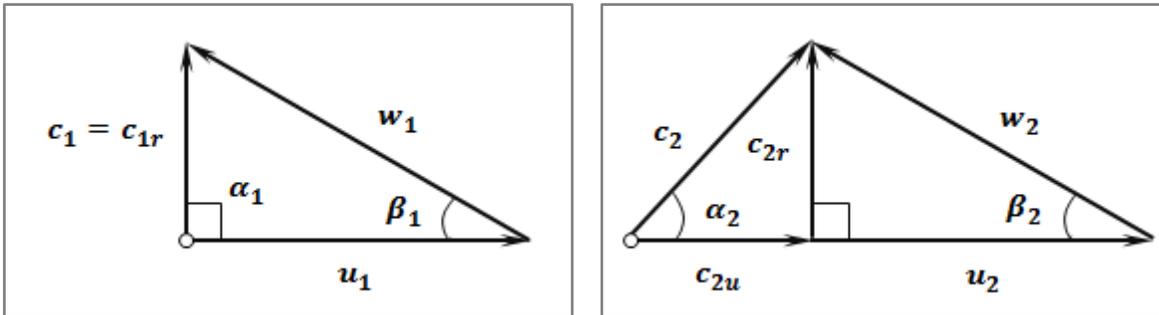


Figura 2.7- Triángulos de velocidad a la entrada y salida del impelente. Fuente: (Ramos, 1995)

Las ecuaciones 2.4 y 2.5 se utilizan para determinar las velocidades tangenciales a la entrada y la salida del impelente.

$$u_1 = \omega \cdot r_1 \quad (2.4)$$

$$u_2 = \omega \cdot r_2 \quad (2.5)$$

La ecuación 2.6 permite la determinación de la velocidad absoluta del líquido en el impelente en el sentido radial a la entrada.

$$c_{1r} = u_1 \cdot \tan(\beta_1) \quad (2.6)$$

A partir de la *Ecuación de Continuidad*, es posible determinar el flujo volumétrico que circula por el canal entre álabes de acuerdo a las ecuaciones 2.7 y 2.8.

$$Q = c_{1r} \cdot A_1 \quad (2.7)$$

$$Q = c_{2r} \cdot A_2 \quad (2.8)$$

En donde, A_1 y A_2 se determinan según las ecuaciones 2.9 y 2.10.

$$A_1 = \pi \cdot d_1 \cdot b_1 \quad (2.9)$$

$$A_2 = \pi \cdot d_2 \cdot b_2 \quad (2.10)$$

En el triángulo de velocidad a la salida c_{2u} puede determinarse de acuerdo a la ecuación 2.11.

$$c_{2u} = u_2 - \frac{c_{2r}}{\tan(\beta_2)} \quad (2.11)$$

Con la aplicación de las ecuaciones 2.4-2.11, y conocidos algunos valores geométricos y cinemáticos en el impelente, se obtienen los resultados mostrados

en la tabla 2.4. La magnitud de las velocidades resultantes c_2 , w_1 y w_2 se resuelven como una suma de dos vectores escalares.

Tabla 2.4- Resumen de velocidades a la entrada y salida del álabe. Fuente: Elaboración propia

Entrada			Salida		
Velocidad	Valor	Unidad	Velocidad	Valor	Unidad
u_1	11,77	m/s	u_2	21,87	m/s
c_{1r}	3,82	m/s	c_{2r}	4,12	m/s
c_{1u}	0	m/s	c_{2u}	15,02	m/s
c_1	3,82	m/s	c_2	15,58	m/s
w_1	12,38	m/s	w_2	15,36	m/s

En bombas centrífugas el parámetro limitativo lo constituye la velocidad tangencial a la salida del impelente que se mantiene por debajo de 40 m/s (Ramos, 1995). En el caso tratado u_2 es 21,87 m/s (<40 m/s), por lo que se cumple la suposición del autor y se puede garantizar que la bomba tratada es de este tipo.

El flujo volumétrico (Q), toma un valor de 0,061 m³/s y es equivalente a 219,6 m³/h, cercano al punto de diseño de 216 m³/h.

Al simplificar el segundo término en la ecuación 1.11 debido a que se toma $\alpha_1 = 90^\circ$ ($c_{1u} = 0$) y dejando la expresión en función del flujo (Q), se obtiene la ecuación 2.12.

$$H_{t\infty} = \frac{u_2^2}{g} - \frac{u_2 \cdot Q \cdot \cot(\beta_2)}{\pi \cdot d_2 \cdot b_2 \cdot g} \quad (2.12)$$

La ecuación 2.12, coincide con la dada por (Streeter, Wylie, & Bedford, 2008), en donde se conoce con anterioridad u_2 (el número de revoluciones del impelente es constante), por lo que la carga teórica infinita ($H_{t\infty}$) varía linealmente para diferentes valores de Q , tal como se muestra en la figura 2.8.

La utilización de la ecuación 1.13, para la determinación de μ , muestra como resultado 0,82; un valor cercano a 0,8 tal y como plantea Ramos (1995).

Teniendo un rendimiento hidráulico η_h de 0,85 a partir de considerar que Ramos (1986) plantea que las máquinas centrífugas modernas poseen valores en el intervalo 0,80 hasta 0,96; es posible determinar la carga real de diseño de la bomba aplicando la ecuación 1.14.

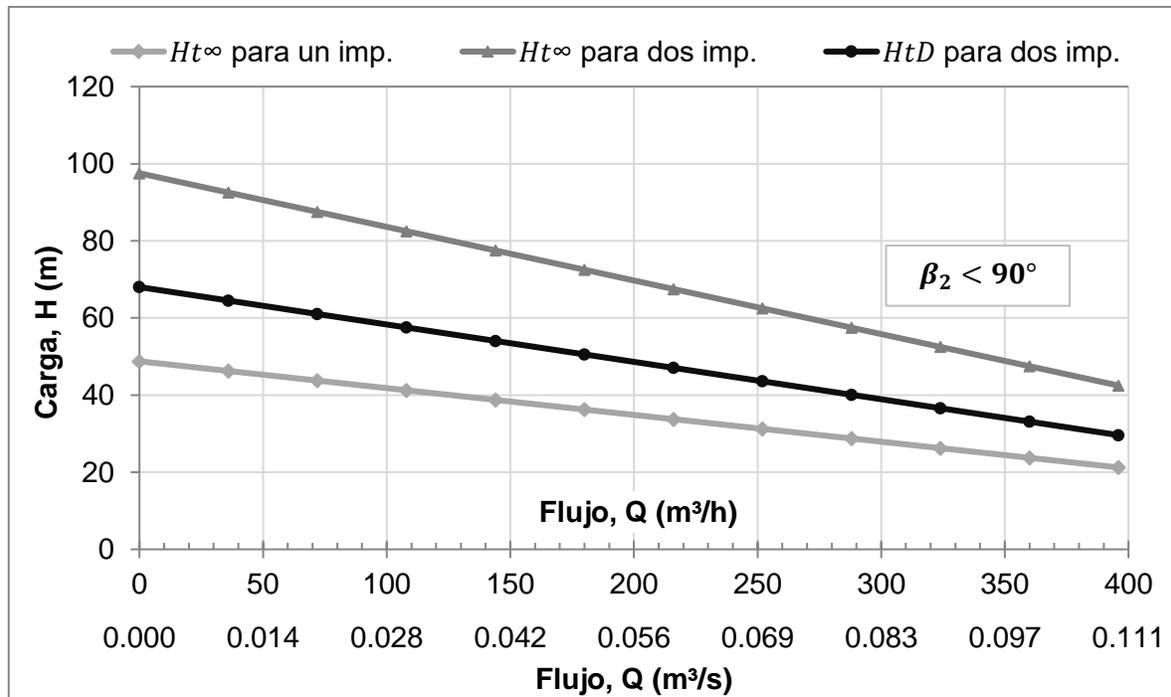


Figura 2.8- Característica de carga para un impelente y resultante de dos impelentes en serie. Fuente: Elaboración propia

La pendiente negativa de las rectas de la figura 2.8 ratifica que $\beta_2 < 90^\circ$, por lo que se considera un álabe inclinado hacia atrás. Nekrasov (1980) y Ramos (1995) coinciden en que este prototipo de impelente es el más utilizado debido a que muestra los mayores índices de rendimiento. Para un flujo de 216 m³/h se tiene una carga H_{tD} de 47,1 m; la que representa un error de aproximadamente un 4,5 % con respecto a la carga dada por el fabricante de 45 m.

2.3.2- Aplicación del método de Karassik

Conocido el punto de diseño de la bomba y aplicando la ecuación 2.13, en donde el flujo se expresa en gal (US)/min, la carga en pie y la frecuencia de giro en rpm

(sistema inglés); se tiene una velocidad específica ($n_{s,US}$) de 1 289. Al expresar estos términos en el sistema métrico, n_s es igual a 91.

$$n_{s,US} = \frac{n \cdot \sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad (2.13)$$

$$n_{s,US} = \frac{1\,770 \cdot \sqrt{951}}{148^{3/4}} = 1\,289$$

El valor de n_s ratifica que la bomba es centrífuga por encontrarse en el intervalo desde 40 a 300 (véase anexo 12).

Para este método la eficiencia máxima será del 80 % y se garantiza que la carga para este punto coincida con la de diseño. La tendencia de la carga y la eficiencia para diferentes variaciones de la capacidad se observan en la figura 2.9; otros elementos son expuestos en el anexo 13.

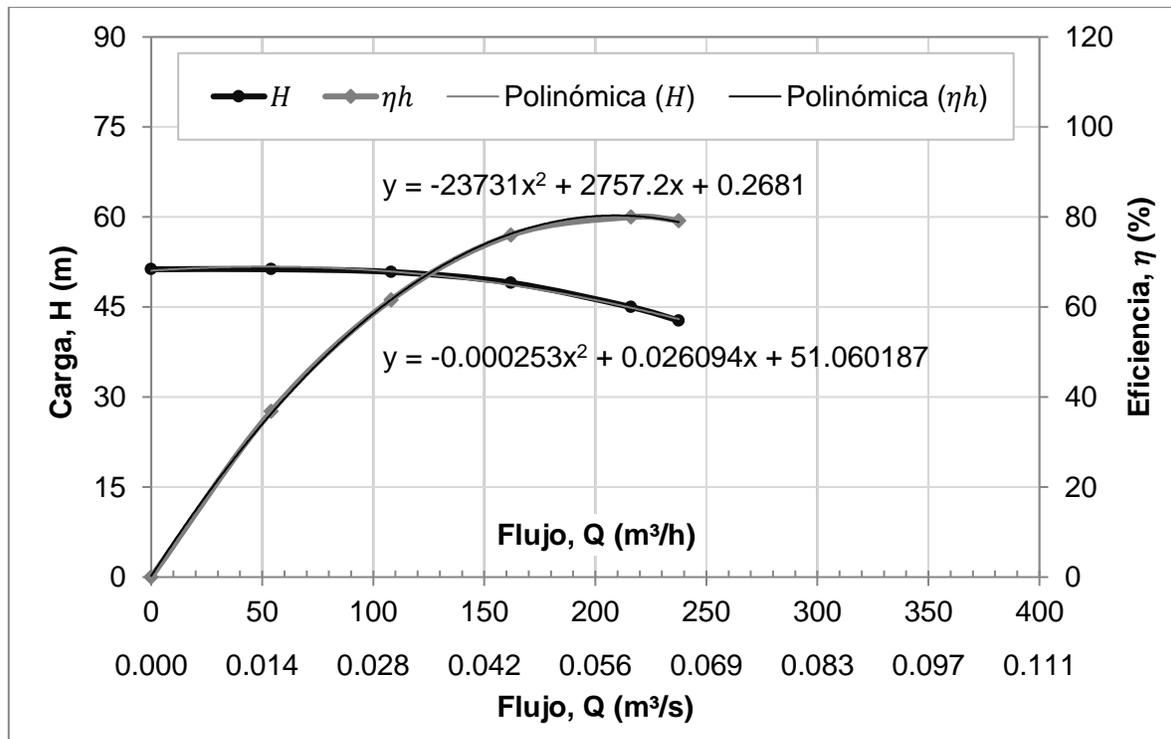


Figura 2.9- Curvas de carga y eficiencia según la metodología de Karassik. Fuente: Elaboración propia

Un inconveniente en esta metodología, lo constituye el no poder predecir qué sucederá con la carga y la eficiencia cuando el flujo alcance un valor de 360 m³/h,

que representa el 167 % con respecto al punto de diseño. Para ello se ha obtenido un ajuste cuadrático que describe las curvas de carga y eficiencia determinadas.

Aplicando las ecuaciones obtenidas por las curvas de ajuste, se tiene lo mostrado en la figura 2.10, donde el valor de carga para el punto de diseño será de 44,90 m; la cual representa un error inferior al 0,1 %. Además, se muestran los valores hasta el 175 % de la capacidad.

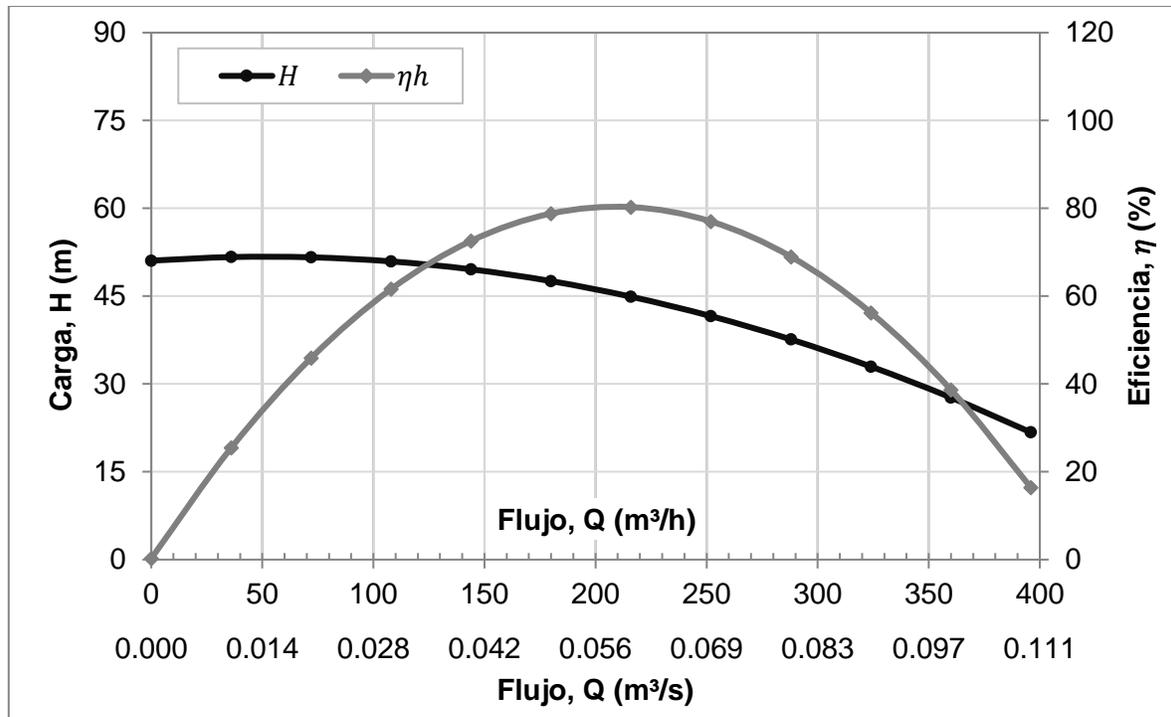


Figura 2.10- Curvas de carga y eficiencia aplicando un ajuste cuadrático a los resultados del método de Karassik. Fuente: Elaboración propia

De la curva de rendimiento se deduce que cuando el flujo es de 360 m³/h, esta toma un valor inferior al 40 %.

2.3.3- Aplicación del modelo de cálculo propuesto por Izquierdo y Sablón

A partir de considerar que existen datos conocidos por las mediciones realizadas al impelente, es posible el uso de la metodología de Izquierdo y Sablón (2018).

Los subíndices t_{∞} , t_D , D y DO en los términos utilizados, están referidos a consideraciones teóricas infinitas, teóricas de diseño, de diseño y en el punto de diseño, respectivamente.

La ecuación 2.14 permite la determinación del coeficiente de flujo (φ) en la que debe cumplirse que $r_2/r_1 \geq 2$.

$$\varphi = (0,55 \div 0,68) + 0,6 \cdot \text{sen}\beta_2 \quad (2.14)$$

La transición de las condiciones ideales a las reales en función de los coeficientes de carga y capacidad, de forma analítica, puede plantearse a través de las ecuaciones 2.15-2.17.

$$\Psi_{t_\infty} = 1 - \phi_{t_\infty} \cdot \text{cot}\beta_2 \quad (2.15)$$

$$\Psi_{t_D} = \mu(1 - \phi_{t_D} \cdot \text{cot}\beta_2) \quad (2.16)$$

$$\Psi_D = 0,95\mu(1 - \phi_D \cdot \text{cot}\beta_2) \quad (2.17)$$

Un coeficiente significativo en los cálculos es el de flujo real, el que tiene en cuenta el área circunferencial en la sección de salida del impelente y el factor de corrección de la misma (ε_2) que se encuentra en el intervalo 0,75 hasta 0,9.

$$\phi_X = \frac{Q}{A_2 \cdot \varepsilon_2 \cdot u_2} \quad (2.18)$$

Las pérdidas hidráulicas por rozamiento y por turbulencias (expresadas en metros) se determinan, por las ecuaciones 2.19 y 2.20.

$$h_R = \Psi_R \cdot \frac{u_2^2}{g} \quad (2.19)$$

$$h_C = \Psi_C \cdot \frac{u_2^2}{g} \quad (2.20)$$

Las ecuaciones 2.21 y 2.22 se utilizan para determinar los coeficientes de pérdidas por rozamiento y turbulencias.

$$\Psi_R = b_R \cdot \frac{\phi_X^2}{\phi_{D0}^2} \quad (2.21)$$

$$\Psi_C = a_{PT} - 2a_{PT} \cdot \frac{\phi_X}{\phi_{D0}} + a_{PT} \cdot \frac{\phi_X^2}{\phi_{D0}^2} \quad (2.22)$$

Los coeficientes a_{PT} y b_R se determinan de acuerdo a las ecuaciones 2.23 y 2.24.

$$a_{PT} = \frac{\varphi}{2} \left(\frac{d_1^2}{d_2^2} + \Psi_{t_D}^2 \right) \quad (2.23)$$

$$b_R = \Psi_{t_D} - \Psi_D \quad (2.24)$$

A partir de los parámetros de diseño H_{DO} y Q_{DO} se obtienen los coeficientes de carga y de capacidad de diseño con la aplicación de las ecuaciones 2.25 y 2.26.

$$\Psi_{DO} = 22 \left(\sqrt{\frac{Q_{DO}}{H_{DO}}} \tan \beta_2 \right) + 2,9 \sqrt{\frac{Q_{DO}}{H_{DO}}} \quad (2.25)$$

$$\phi_{DO} = 0,22 \left(\sqrt{\frac{Q_{DO}}{H_{DO}}} \tan \beta_2 \right) + 0,0029 \sqrt{\frac{Q_{DO}}{H_{DO}}} \quad (2.26)$$

El η_h se determina según la ecuación 2.28, la que se expresa en función de los coeficientes Ψ y Ψ_{t_D} . Un elemento importante en el caso de Ψ (ecuación 2.27), es que considera los coeficientes de pérdidas por rozamiento y turbulencias.

$$\Psi = \Psi_{t_D} - (\Psi_R + \Psi_C) \quad (2.27)$$

$$\eta_h = \frac{\Psi}{\Psi_{t_D}} \quad (2.28)$$

Las cargas H_{t_∞} , H_{t_D} y H , pueden ser determinadas en función de los coeficientes de carga Ψ_{t_∞} , Ψ_{t_D} y Ψ a partir de las ecuaciones 2.29-2.31.

$$H_{t_\infty} = \Psi_{t_\infty} \cdot \frac{u_2^2}{g} \quad (2.29)$$

$$H_{t_D} = \Psi_{t_D} \cdot \frac{u_2^2}{g} \quad (2.30)$$

$$H = \Psi \cdot \frac{u_2^2}{g} \quad (2.31)$$

Aplicando las ecuaciones 2.14-2.18, 2.21, 2.22 y 2.27 para el estudio de la transición de las condiciones ideales a las reales, en función de los coeficientes de flujo y de carga, se tienen las curvas de la figura 2.11. Los resultados obtenidos para el coeficiente Ψ_D son mostrados en el anexo 14.

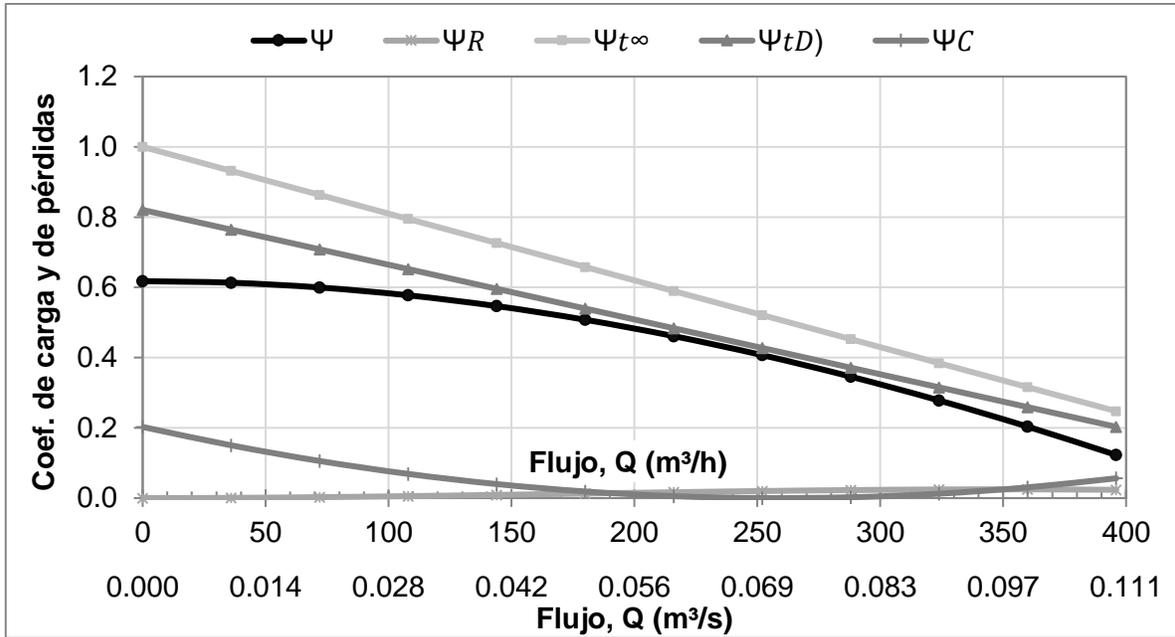


Figura 2.11- Coeficientes de flujo y de carga utilizados. Fuente: Elaboración propia

De igual manera, con la utilización de las ecuaciones 2.19, 2.20 y 2.28-2.31 se determina la transición de las condiciones ideales a las reales en la característica de carga-capacidad, el rendimiento hidráulico, y las pérdidas hidráulicas por rozamiento (figura 2.12). Un resumen se muestra en el anexo 15.

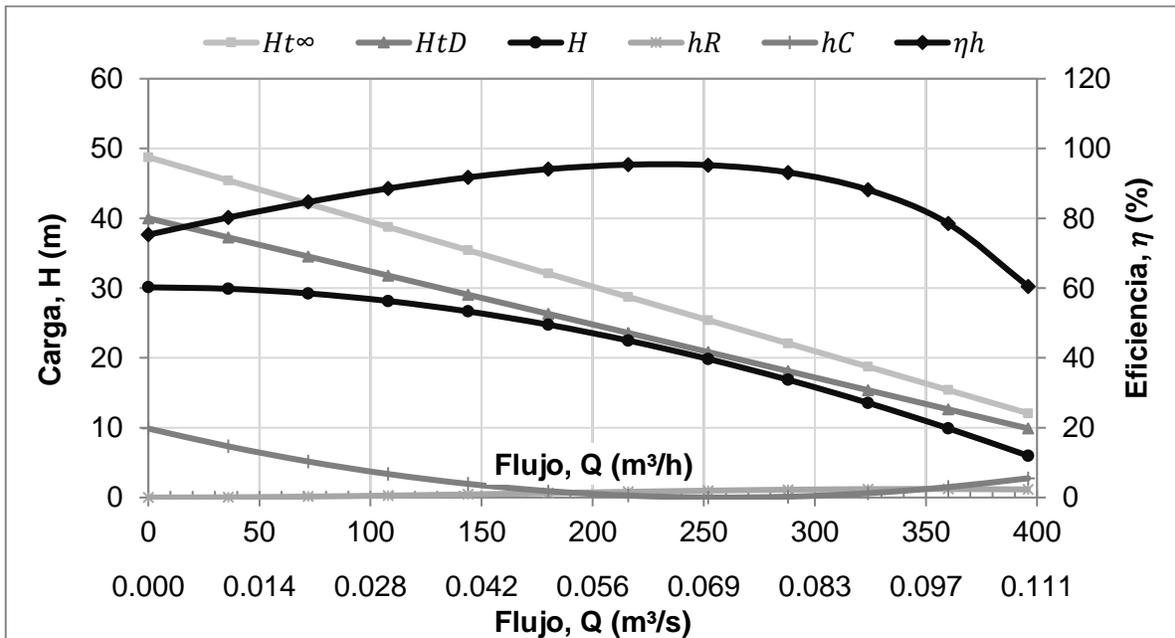


Figura 2.12- Curvas características de carga, rendimiento hidráulico y pérdidas por rozamiento y por turbulencias. Fuente: Elaboración propia

Los coeficientes de carga señalados en la figura 2.11 definen las formas de las curvas h_R , h_C , $H_{t\infty}$, H_{tD} y H de la figura 2.12; puesto que la frecuencia de giro de la máquina es constante.

De manera general, las pérdidas hidráulicas por turbulencias fueron superiores a las pérdidas por rozamiento en más de 2 m. Similar sucede con la $H_{t\infty}$, la cual como promedio es superior a la H_{tD} , en 5 m.

El resultado anterior está vinculado a una bomba centrífuga con un impelente. Por lo que se conoce la máquina tratada posee dos impelentes, que al igual que en la aplicación de la ecuación de Euler, harán que la carga resultante de la bomba centrífuga aumente al doble. Las curvas características de carga-capacidad y rendimiento-capacidad quedarían como se observa en la figura 2.13.

Para un flujo de 216 m³/h se obtiene un valor de carga de 44,32 m; la que representa un error inferior al 1,5 % con respecto a la carga dada por el fabricante de 45 m. En este punto la potencia útil es de 26,06 kW y la eficiencia hidráulica de 88,3 %; esta última se encuentra en el rango para máquinas modernas.

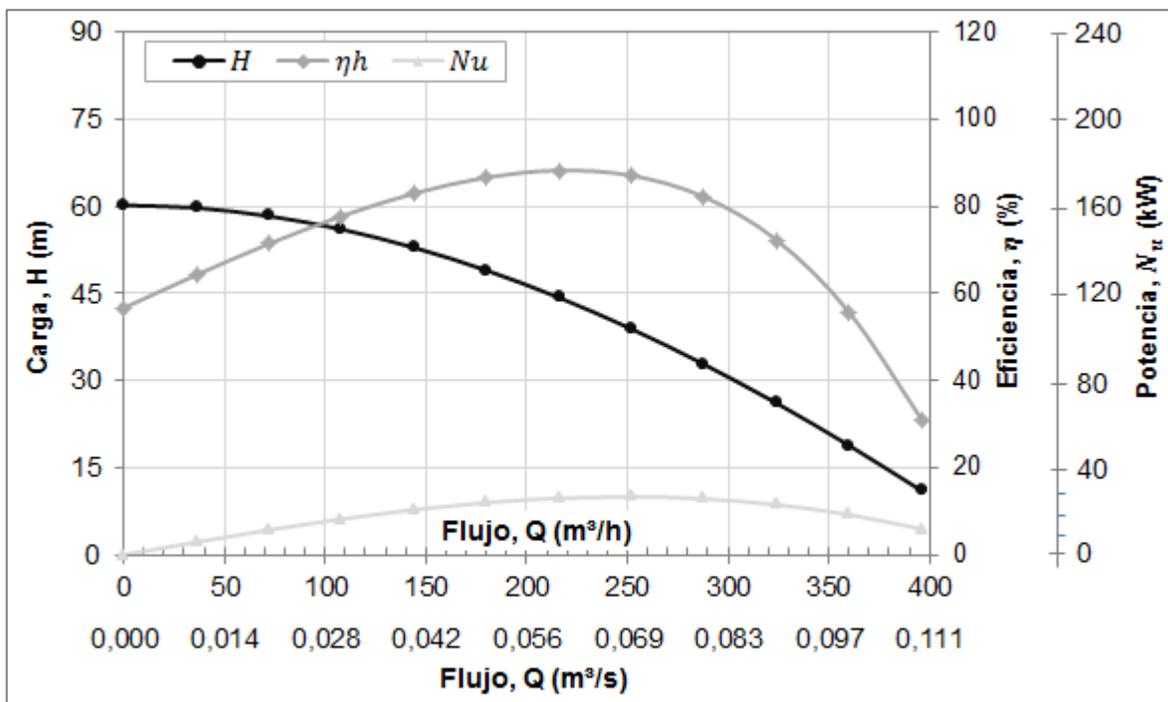


Figura 2.13- Curvas características de carga-capacidad y rendimiento-capacidad para la bomba centrífuga KSB ITUR 20800 ZARAUTZ BEV-1226/2. Fuente: Elaboración propia

2.3.4- Errores en las características de carga y rendimiento para las metodologías presentadas

Si se toma como base el modelo propuesto por Izquierdo & Sablón (2018) se tienen los errores en por ciento que representan las restantes dos metodologías con respecto a esta, véase tabla 2.5.

Tabla 2.5- Errores en las características de carga y rendimiento entre la metodología propuesta por Euler, Karassik e Izquierdo & Sablón. Fuente: Elaboración propia

Flujo, $Q(m^3/s)$	Euler-Izquierdo & Sablón		Karassik-Izquierdo & Sablón	
	Error de H (%)	Error de η_h (%)	Error de H (%)	Error de η_h (%)
0	13	50	15	100
36	8	32	14	60
72	5	19	12	36
108	3	9	9	21
144	2	2	6	13
180	3	-2	3	9
216	6	4	-1	9
252	12	2	7	12
288	22	3	14	16
324	40	18	26	22
360	76	53	47	31
396	168	173	97	47

De forma gráfica se tienen estas curvas en el anexo 16, en donde la carga para las metodologías de Karassik e Izquierdo & Sablón son semejantes y ambas pueden ser empleadas para cálculos ingenieriles de mediana precisión.

2.4- Determinación del punto de operación del sistema

El punto de intersección entre la curva característica de la bomba y la curva característica del sistema, es el denominado punto de operación. Es decir, este es

un punto en el que existe un equilibrio entre la potencia suministrada por la bomba y la potencia consumida por el sistema de tuberías.

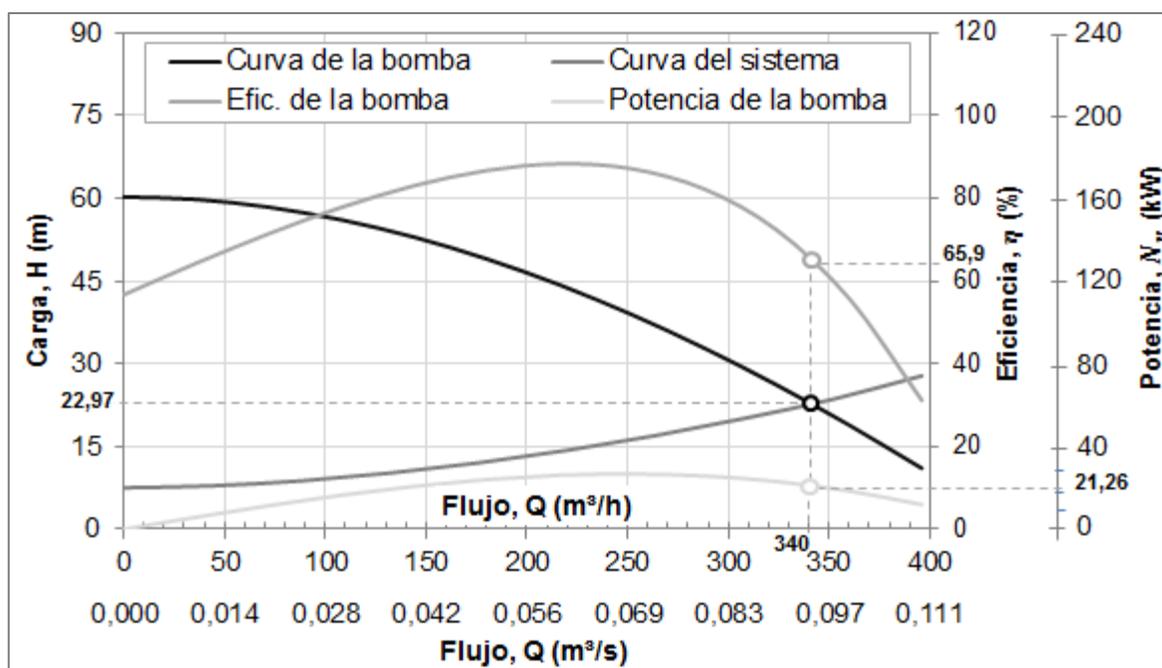


Figura 2.14- Punto de operación. Fuente: Elaboración propia

El punto de operación se encuentra a 340 m³/h para una carga de 22,97 m, un rendimiento del 65,9 % y una potencia útil de 21,26 kW. Para las mediciones de flujo descritas en el capítulo 3, los puntos de operación varían según la gráfica mostrada en el anexo 17, en donde la carga se obtiene para una evaluación en el sistema 2.3 b.

El punto de operación estará regido por el recambio de agua necesario para suplir los requerimientos biológicos de la especie. A partir de lo anterior, en el acápite 2.5 se analizarán cuáles serían los flujos adecuados.

2.5- Flujo de agua a partir del criterio biológico de la especie de camarón blanco *Litopenaeus Vannamei*

Una forma en la determinación del flujo de agua requerido para satisfacer los requerimientos biológicos de la especie, se tiene mediante el uso de las ecuaciones 1.1-1.3. Para lo cual se conoce que la biomasa de animales promedio es de 80,12 kg por estanque, la tasa de respiración es obtenida de Arescurenaga

(2016) y el total de alimento consumido es de 2 430 kg; distribuido en 1 383 kg de pienso de progenitores, 683 kg de pienso de engorde y 364 kg de calamar. Además de considerar que la permanencia en un estanque se encuentra alrededor de 240 días (Alarcón, 2019).

$$FCA = \frac{2\,430}{80,12 \cdot 240 \cdot 24} = 0,005 \text{ kg de alimento/kg de animales/h}$$

$$\alpha_{OD} = 0,05 \cdot 10^6 \text{ mg de OD/kg de alimento}$$

$$R_{OD} = 80,12 \cdot 0,005 \cdot 0,05 \cdot 10^6 = 20\,030 \text{ mg de OD/h}$$

La ecuación 2.32 es obtenida para el flujo requerido por demanda de oxígeno en función del oxígeno disuelto; donde el flujo se encuentra expresado en m³/h.

$$Q_{OD} = 20,03 \cdot \frac{1}{OD_{ini} - OD_{fin}} \tag{2.32}$$

La figura 2.15 es el resultado de evaluar diferentes variaciones de oxígeno (ecuación 1.2) en la ecuación 2.32. En la misma, se tiene que para garantizar la menor variabilidad de OD se deben introducir los mayores niveles de agua.

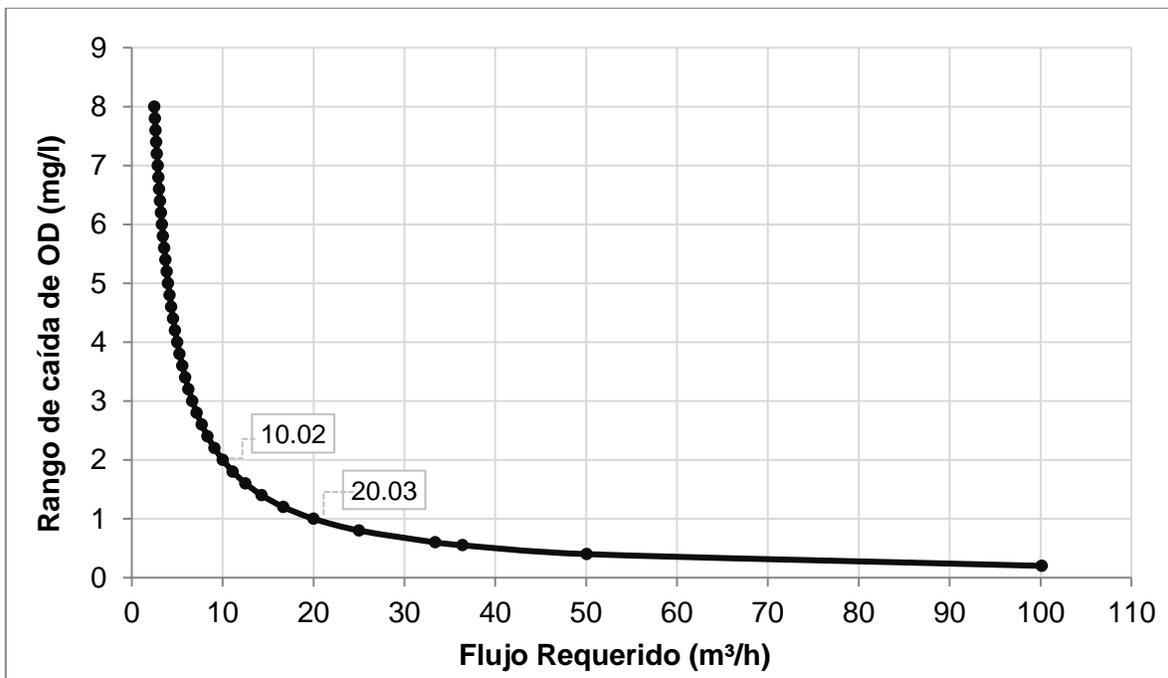


Figura 2.15- Flujo requerido por demanda de OD promedio en un estanque de progenitores para una hora. Fuente: Elaboración propia

En el caso específico que se desee mantener una caída de oxígeno entre 1 y 2 mg/l en una hora, se deben aplicar flujos continuos entre 20,03 y 10,02 m³/h, respectivamente. Para garantizar una caída de oxígeno de 2 mg/l en cuatro horas se deberá aplicar un flujo de 40,06 m³/h, es decir se producirá un recambio de 160,2 m³ (lo que representa el 2,9 % del volumen total del estanque). La figura 2.16 muestra el flujo necesario de acuerdo a condiciones críticas de OD en los horarios de 09:00 PM a las 06:00 AM. Un resumen de este análisis es el mostrado en el anexo 18.

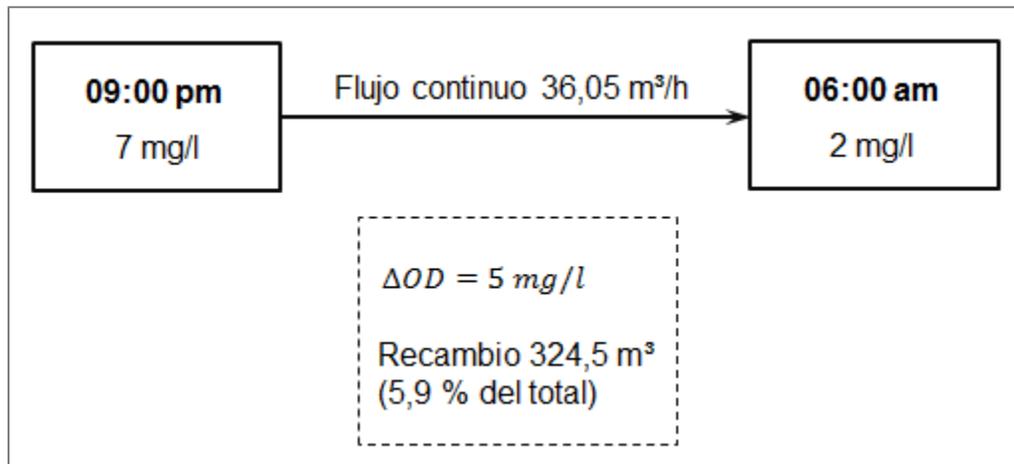


Figura 2.16- Flujo necesario para evitar episodios de hipoxia durante la noche, en condiciones de OD críticos en un estanque de progenitores. Fuente: Elaboración propia

Es decir, para evitar caídas a niveles mortales inferiores a 2 mg/l bajo estas condiciones, se deberá recambiar como mínimo el 5,9 % del volumen de agua del estanque. Este volumen de recambio es aproximadamente entre 2 y 3 veces superior al recomendado por Akifumi y Kubitza (2010), y Gurrola (2016); respectivamente.

La metodología descrita por Arescurenaga (2016) es un referente para sugerir un flujo. Pero, por lo abordado en el punto 1.1.1.2 se conoce que no solamente el flujo, la biomasa y la cantidad de alimento suministrado influyen en el consumo de oxígeno. La complejidad de interacción entre el resto de las variables y el OD destaca la necesidad de un estudio a partir de la aplicación de modelos matemáticos, de manera que se permita disminuir los volúmenes de recambio.

Conclusiones Parciales

- 1-** La UEB Yaguacam cultiva progenitores de camarón blanco *Litopenaeus Vannamei* en 14 estanques de agua de mar; que es recibida a través de una bomba vertical con una potencia de 53 kW, mediante un sistema de tubería de PVC con una longitud de 913,3 m.
- 2-** Aplicando las ecuaciones que rigen el sistema ramificado de tuberías se determinó la curva característica, definiéndose que las mayores pérdidas se producen cuando se bombea solo hacia la batería 2; y con la utilización de los métodos de Karassik, Izquierdo & Sablón y la teoría de Euler se determinaron las curvas características de la bomba centrífuga KSB ITUR 20800 ZARAUTZ BEV-1226/2.
- 3-** El punto de operación del sistema de tubería y el equipo de bombeo se encuentra a 340 m³/h para una carga de 22,97 m, un rendimiento del 65,9 % y una potencia útil de 21,26 kW.
- 4-** El volumen de recambio determinado según las ecuaciones de Arescurenaga es el 5,9 % del volumen de agua del estanque, representando un recambio entre 2 y 3 veces superior al recomendado por Akifumi y Kubitza (2010), y Gurrola (2016); respectivamente.

Capítulo 3

$$H = \psi \cdot \frac{u_1^2}{g}$$

$$\eta_h = \frac{\psi}{\psi_{TD}}$$

$$Q = c_{1r} \cdot A_1$$

$$\alpha_{OD}$$

Capítulo 3. Modelos matemáticos que describen la influencia del flujo de agua en la variación del oxígeno disuelto en los estanques de progenitores de la UEB Yaguacam

Los criterios proporcionados por autores como Arescurenaga, Akifumi y Kubitza, y Gurrola para el recambio de agua en un estanque de camarón, no consideran la influencia de otras variables en la oxigenación. Cuestión por la cual el efecto pudiera no ser el deseado, incurriendo en consumos energéticos excesivos y gastos innecesarios de agua.

3.1- Medición de las variables asociadas a la oxigenación en el banco de progenitores

Existen fundamentalmente ocho variables asociadas a los niveles de OD en un estanque de cultivo de camarón: Volumen de agua de recambio, Biomasa, Días en el ciclo, Nivel de Fitoplancton, Nivel de Zooplancton, Radiación Solar, Temperatura del Agua y Velocidad del Viento. Para las mediciones de dichas variables se conformaron los seis grupos horarios señalados en la tabla 3.1.

Tabla 3.1- Grupos horarios conformados para la medición de las variables. Fuente: Elaboración propia

Grupo No.	Horario	Grupo No.	Horario
1	09:00 AM - 01:00 PM	4	09:00 PM - 01:00 AM
2	01:00 PM - 05:00 PM	5	01:00 AM - 05:00 AM
3	05:00 PM - 09:00 PM	6	05:00 AM - 09:00 AM

Los grupos horarios No. 4, 5 y 6 coinciden con las horas de funcionamiento del sistema de bombeo. La conformación de estos grupos horarios generó mediciones cada cuatro horas de todas las variables asociadas a la oxigenación, así como de la propia variable OD. A continuación, se aborda la manera en la que se realizaron las mediciones, así como el tipo de equipamiento utilizado.

Oxígeno disuelto

Las mediciones de OD se realizaron con el Oxímetro Portable YSI modelo 55™, mostrado en el anexo 19 a). Se tomaron seis mediciones en cada estanque, tres

por el lado donde se incorpora el flujo de agua y tres por el lado de la compuerta de salida; teniendo un valor promedio de las mediciones. Un ejemplo de las mediciones realizadas es el mostrado en la figura 3.1.

Para las mediciones de OD realizadas el día 14 de Octubre de 2018 en el estanque No. 1, existe un crecimiento notable en los niveles de oxígeno en el horario 09:00 AM - 05:00 PM y una tendencia al decrecimiento durante las 05:00 PM - 05:00 AM; ver figura 3.1 a). El horario de inflexión en el decrecimiento de OD se produce de 05:00 AM - 09:00 AM. Un gráfico que reafirma la tendencia abordada del OD es el mostrado en el anexo 20.

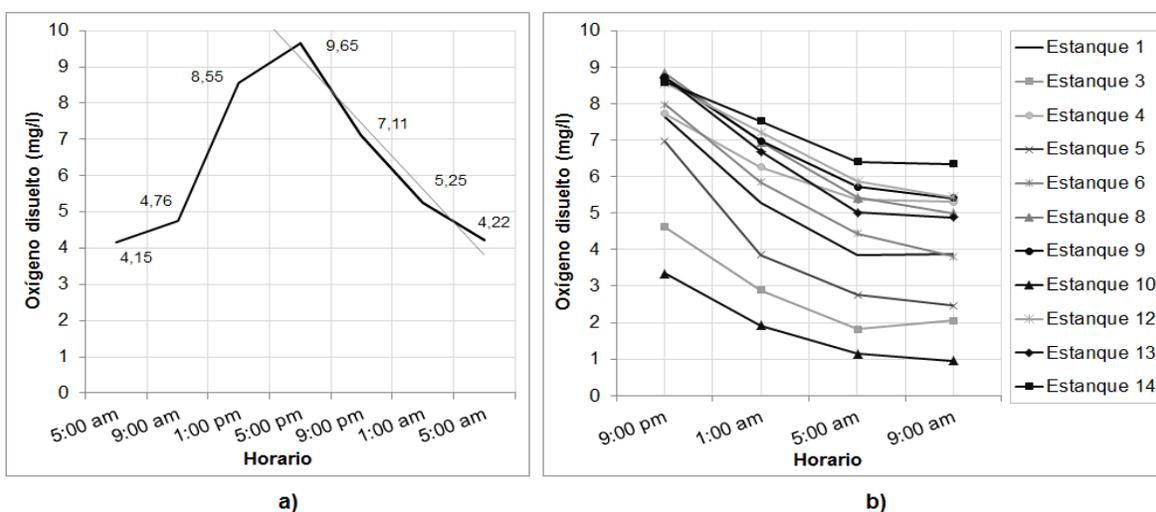


Figura 3.1- Mediciones realizadas de OD. a) Para medición en el estanque No. 1 del día 14 de Octubre de 2018. b) Para medición en todos los estanques del día 28 de Octubre de 2018. Fuente: Elaboración propia.

La figura 3.1 b) toma en cuenta las mediciones realizadas en todos los estanques del día 28 de Octubre de 2018. En la misma se muestra una caída a niveles mortales de oxígeno en los estanques 3 y 10, siendo las únicas mediciones del total de la muestra que reflejan estos niveles. La mayor diferencia se tiene para los estanques 5 y 6 con valores de 4,50 mg/l y 4,15 mg/l; respectivamente.

Es necesario señalar que, en los análisis posteriores no se utiliza la variable Oxígeno Disuelto sino la Variación de OD (ΔOD), la cual se determina de acuerdo a la ecuación 1.2. Por ejemplo, para el grupo horario No. 4, el OD_{ini} esta dado para las 09:00 PM y el OD_{fin} para las 01:00 PM.

Volumen de agua de recambio

La variable volumen de agua es obtenida tras multiplicar el flujo promedio por el tiempo previsto en las mediciones, para el caso cuatro horas. El equipo utilizado en las mediciones es el flujómetro ultrasónico PCE-TDS 100, ver anexo 19 b); en donde uno de los parámetros a configurar para una medición adecuada es el tipo de fluido, el resto se encuentran relacionados con características de la tubería como son: diámetro exterior, espesor de la pared y material.

Considerando la ramificación del sistema, descrito a detalle en el capítulo 2, del que se toma como referencia el sistema de ecuaciones 2.1, se tiene lo descrito en las tablas 3.2 y 3.3.

Las mediciones se realizaron a la salida de la bomba, a la entrada de cada batería y en las zonas intermedias entre las válvulas de entrada a cada estanque.

Tabla 3.2- Valores de flujo para las distintas zonas de medición. Fuente: Elaboración propia

Zonas de medición de flujo	Mediciones de flujo (m ³ /h)				
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
$Q_{AA'}$	341	356	360	344	361
Q_{AB}	172	184	161	160	183
Q_{AH}	151	132	138	155	150
Q_{BC}	144	130	133	121	132
Q_{CD}	115	130	133	121	132
Q_{DE}	102	105	101	94	101
Q_{EF}	64	91	93	67	82
Q_{FG}	54	62	66	34	43
Q_7	25	34	51	0	25
Q_{HI}	126	118	133	129	128
Q_{IJ}	101	96	115	124	107

Q_{JK}	101	64	92	118	77
Q_{KL}	81	64	37	41	68
Q_{LM}	43	47	31	31	56
Q_{14}	0	10	9	11	17

Leyenda:

- (1) Se realizó el 12 de Octubre de 2018 a las 09:00 PM
- (2) Se realizó el 19 de Octubre de 2018 a las 01:00 AM
- (3) Se realizó el 22 de Octubre de 2018 a las 01:00 AM
- (4) Se realizó el 25 de Octubre de 2018 a las 01:00 AM
- (5) Se realizó el 28 de Octubre de 2018 a las 09:00 AM

Tabla 3.3- Valores del flujo de fuga, Q_{fuga} . Fuente: Elaboración propia

	Mediciones de flujo (m ³ /h)				
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Q_{fuga}	17	40	61	29	28

Los salideros de agua asociados a cada medición, se producen en el tramo de tuberías AA', y a la entrada de cada batería de estanques, tal y como se muestra en la figura 3.2. Tomando su valor más crítico, para la medición del 21 de Octubre de 2018, con un 17 % de pérdidas (61 m³/h); o sea del flujo trasegado por la bomba de 360 m³/h fueron ingresados al banco de progenitores 299 m³/h.



Tramo a la salida de la bomba

Entrada de batería del 1 al 7

Entrada de batería del 8 al 14

Figura 3.2- Imágenes de salideros de agua en el sistema. Fuente: Elaboración Propia

Aplicando el sistema de ecuaciones 2.1 se tienen los flujos que ingresan a cada estanque. Por ejemplo, el valor de flujo para el día 25 de Octubre de 2018 a la 01:00 AM en los estanques No. 9 y 11 es de 5 m³/h y 77 m³/h, respectivamente; por lo que se infiere que no es adecuada la forma de regulación de las válvulas. El resto de las mediciones de flujo se muestran en el anexo 21.

Biomasa de animales en el sistema

En el análisis la biomasa se encuentra expresada en kg/ha. Entre los elementos proporcionados por Alarcón (2018) se tienen la cantidad de camarones existentes y el peso promedio. Un ejemplo para la batería 1 es el mostrado en el anexo 22, en donde no se observan mediciones en los estanques No. 2 y 7 debido a que estos se encuentran vacíos.

Esta es una prueba realizada para todos los estanques cada 15 días, que certifica el Laboratorio de Calidad. De manera que se toman valores intermedios de peso promedio y cantidad, para los días en los que se realizan las mediciones del resto de las variables. Se debe señalar, que en los análisis se desprecia el cambio de la misma en un tiempo inferior a 24 horas.

Días en el ciclo

Esta variable se encuentra expresada en días. La misma infiere el estado de adultez del camarón, considerando que el consumo de oxígeno es diferente. Por ejemplo, existen estanques en donde se tienen animales con 61 días en el ciclo y otros con 212 días (ver anexo 22); momentos en que el camarón ha evolucionado desde postlarva hasta adulto.

Nivel de fitoplancton

El fitoplancton es uno de los factores medidos a escala de laboratorio con el microscopio triocular Euromex modelo Bio-Blue.lab 1153-Plj, ver anexo 19 c).

Para hacer efectivo el proceso de medición se tomaron seis muestras en similar proporción en distintas zonas de cada estanque y luego se mezclaron obteniendo una muestra resultante, que después es homogenizada y absorbida con un capilar, siendo depositada en una cámara Neubauer. Dicha cámara, es preparada

anteriormente con un cubre-objeto, de manera que la muestra pueda ser observada en el microscopio. De ahí se obtuvo la existencia de diferentes tipos de algas, ver anexo 23. Un ejemplo de las mediciones se muestra en el anexo 24, en donde el estanque No. 11 posee un Nivel de Fitoplancton de 32,5 cel/ml y no se considera el estanque No. 12 por estar vacío.

Nivel de zooplancton

Se tomaron muestras en seis puntos de cada estanque hasta completar un litro de agua, garantizando de esta manera la exactitud en la medición. De la muestra resultante, fueron filtrados los microorganismos por una malla de 30 micras y vertidos en una probeta con 25 ml del agua. Se le añaden tres gotas de Lugol para facilitar su conteo, se vuelve a filtrar por la malla y se colocan en un portaobjeto. El tipo de zooplancton detectado en todas las mediciones es copépodo. Un ejemplo se muestra en el anexo 24, en donde el estanque No. 11 presenta un nivel de zooplancton de 22 org/l.

Niveles de radiación solar

La radiación solar incidente sobre la superficie terrestre ha sido obtenida de INSMET (2018) y se expresa en W/m^2 . La aparición de la radiación solar ocurre sobre las 07:20 AM hasta las 06:40 PM y su pico máximo se obtiene alrededor de la 01:00 PM, ver anexo 25. La variable es utilizada como un promedio de las mediciones en los diferentes grupos horarios.

Temperatura del agua en el estanque

Su medición es similar a la realizada para determinar el valor del OD, a partir de que se utiliza el oxímetro digital YSI 55TM y se toman como referencia los mismos puntos de muestreo a una profundidad de 50 cm. Al igual que en casos anteriores, esta variable es expresada por un valor promedio de las mediciones realizadas en los diferentes grupos horarios.

Velocidad del viento

En este caso se utilizó para las mediciones el Anemómetro de Molinete testo 410-1 modelo 05604101, ver anexo 19 d). Las mediciones fueron realizadas a nivel de

terreno con una frecuencia de media hora, obteniéndose ocho valores en cada grupo horario, a partir de lo cual se trabajó con un valor promedio.

3.2- Análisis descriptivo de las variables

El estudio de la variable ΔOD cuenta con un tamaño de muestra de 298 observaciones. La misma, analizada de acuerdo a los grupos horarios muestra una tendencia positiva en los horarios comprendidos desde las 09:00 AM hasta 05:00 PM, mientras que en el resto la tendencia es negativa. Las mayores diferencias se alcanzan en el grupo horario 09:00 AM - 01:00 PM, con una media de 3,19 mg/l.

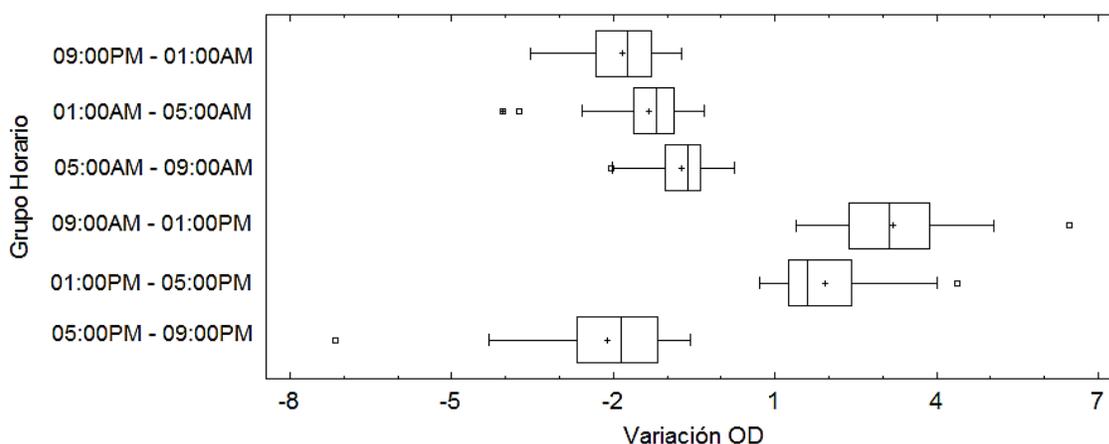


Figura 3.3- Gráfico de caja y bigotes para ΔOD vs Grupo Horario. Fuente: Elaboración propia

Los grupos horarios 1 y 2 poseen valores máximos en la ΔOD de 6,47 mg/l y 4,38 mg/l, así como los grupos horarios 3 y 5 se encuentran identificados por los mínimos -7,16 mg/l y -3,74 mg/l; respectivamente. Siendo adecuado no incurrir en valores extremos puesto que pudieran conducir a cambios notables en los niveles de OD, que traerían al traste riesgos de sobresaturación o hipoxia en los estanques de cultivo.

En un estudio de la muestra para la ΔOD se tiene que la mayoría de las observaciones realizadas poseen aproximadamente un valor de -2 mg/l, ver figura 3.4 a). En dicha figura, existen zonas en donde estas variaciones tienden a un valor positivo y otras a un valor negativo. Por lo general las de un valor positivo se

encuentran asociadas al día y las de un valor negativo a la noche. Además, las variaciones negativas del OD se generan fundamentalmente en un entorno de utilización del equipo de bombeo. Este elemento si se analiza de manera muy simple expresa que recambiar agua en el estanque provoca una caída en los niveles de oxígeno, lo cual es contradictorio a la concepción del sistema de bombeo, y por ende será analizado con posterioridad.

En lo adelante se denomina caso 1 para las mediciones realizadas en los grupos horarios No. 4, 5 y 6, momento en el que se orienta el uso del sistema del bombeo, y caso 2 para las mediciones realizadas en los grupos horarios No. 1, 2 y 3. Además se trabaja con una muestra de 199 y 99 observaciones para los casos 1 y 2; respectivamente.

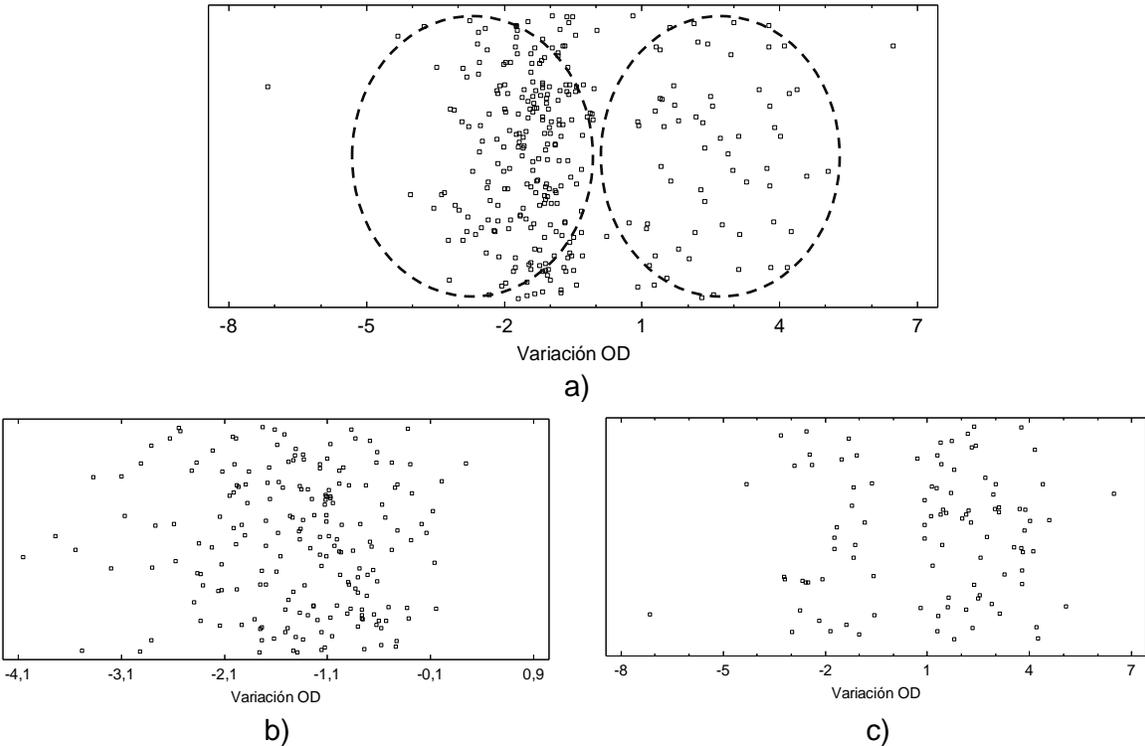


Figura 3.4- Diagramas de dispersión. Total de la muestra (a), caso 1 (b), caso 2 (c).

Fuente: Elaboración propia

La dispersión existente en la figura 3.4 a) es un argumento de la no normalidad de la ΔOD en un estudio de toda la muestra. Estas dispersiones pudieran estar provocadas por el tamaño de la muestra, lo cual afecta la potencia de la prueba. Las muestras extremadamente pequeñas pueden tener la potencia insuficiente

para detectar salidas significativas de la distribución. Las muestras extremadamente grandes pueden tener una potencia excesiva para detectar salidas irrelevantes y pequeñas en la distribución.

Cuando se analiza de manera independiente la ΔOD en los casos 1 y 2 se tiene que los valores del sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, se encuentran dentro del rango esperado para datos provenientes a una distribución normal entre -2 y 2.

La diferencia entre las medias para los casos en estudio es otra herramienta que establece la no similitud de las observaciones para la ΔOD , ver figura 3.5.

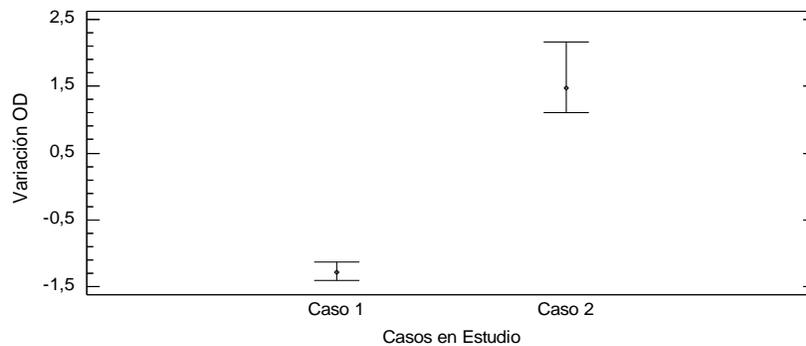


Figura 3.5- Gráfico de medias de los casos en estudio. Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.5, la amplitud en el intervalo es superior para el caso 2 con respecto al caso 1, con valores de 13,63 mg/l y 4,29 mg/l; respectivamente. En el anexo 26 b) se muestra un resumen estadístico de la ΔOD para los casos en estudio.

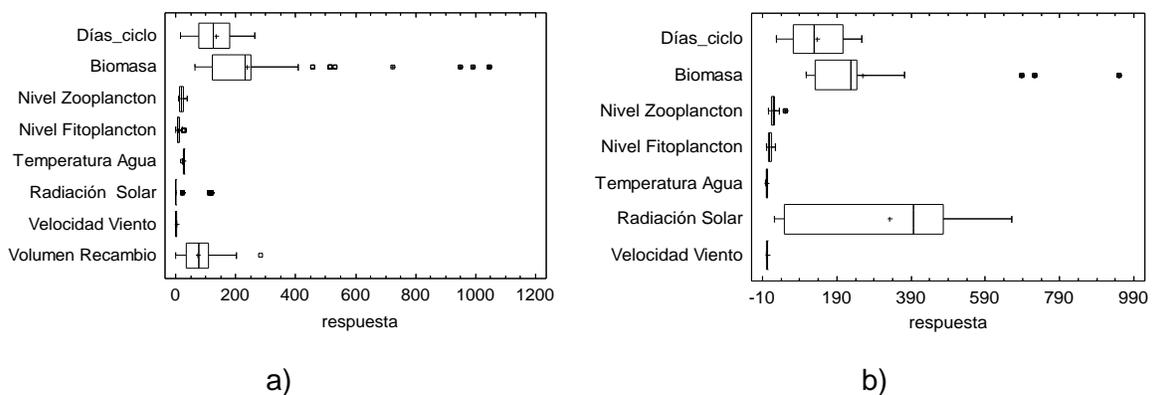


Figura 3.6- Gráficos de caja y bigotes para las variables asociadas a la oxigenación, a) caso 1, b) caso 2. Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, en los gráficos de la figura 3.6 se muestra una descripción de las variables asociadas a la oxigenación en el banco de progenitores de la UEB Yaguacam. Un resumen estadístico se muestra en el anexo 27.

Los extremos que más se notan en los gráficos son los relacionados a la Biomasa con valores de 1 044,69 kg/ha y 949,3 kg/ha, para los casos 1 y 2; respectivamente.

Como se explicó con anterioridad, en el caso 2 no se considera el Volumen de Recambio debido a que nunca se utiliza el sistema de bombeo hacia el banco de progenitores en estos horarios. Para el caso 1 tiene un valor extremo de 284 m³, o sea un flujo continuo de 71 m³/h, alcanzado en el grupo horario de 09:00 PM – 01:00 AM del día 24 de Octubre de 2018.

La variable con mayor rango para el caso 2 es la Radiación Solar. Sin embargo, la misma cuando es analizada en el caso 1 se muestra como la de menor rango, puesto que solo se consideran horas solares comprendidas en el grupo horario 05:00 AM - 09:00 AM.

3.3- Modelos de regresión lineal múltiple

Los análisis de regresión persiguen explicar y pronosticar la tendencia de la variable dependiente ΔOD en relación al comportamiento de las variables independientes (Días/ciclo, Biomasa, Nivel de Zooplancton, Nivel de Fitoplancton, Temperatura del Agua, Radiación Solar, Velocidad del Viento y Volumen de Recambio).

Para un mejor entendimiento de los modelos generados se utilizan los términos desde x_1, x_2, \dots, x_8 para denotar las variables independientes.

Los análisis se realizaron con el uso de herramientas como Microsoft Excel, Statgraphics Centurion y Matlab R2017a.

3.3.1- Modelo para caso 1

Este análisis abarca los grupos horarios No. 4, 5 y 6. Además como se explicó, coinciden con las horas de funcionamiento del sistema de bombeo.

La tabla 3.4 muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre la ΔOD y las ocho variables independientes.

Tabla 3.4- ANOVA de los resultados. Fuente: Elaboración propia

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
Intercepto	0,74893	1,02409	0,73847	0,4655
x_1	0,0002562	0,000921526	0,2780	0,7813
x_2	0,000063553	0,000921526	0,279185	0,8001
x_3	-0,030451	0,000250596	0,258124	0,0044
x_4	-0,041126	0,0105738	-2,87701	0,0000
x_5	-0,043375	0,00932337	-4,41643	0,1932
x_6	0,0055918	0,0332986	-1,31114	0,0000
x_7	-0,15966	0,00112512	4,96903	0,0338
x_8	0,0013815	0,074688	-2,14318	0,5501

El modelo explica el 69,93 % del cambio de la ΔOD . Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05, esos términos no son estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 95,0 %. Consecuentemente, se considera eliminar del modelo x_1 , x_2 , x_5 y x_8 . La ecuación del modelo ajustado es la ecuación 3.1.

$$\widehat{\Delta OD} = -3,0451 \cdot 10^{-2}x_3 - 4,1126 \cdot 10^{-2}x_4 + 5,5918 \cdot 10^{-3}x_6 - 0,1597x_7 \quad (3.1)$$

En este modelo x_3 , x_4 y x_7 influyen de manera negativa sobre la $\widehat{\Delta OD}$, mientras que x_6 influye de manera positiva.

Además del modelo señalado con anterioridad, se establecieron otros modelos de regresión lineal múltiple con la utilización del comando *fitlm* del software MATLAB R2017a, ver anexo 28. En este, se puede cambiar el tipo de ajuste: lineal en los términos (*linear*), con interacción en los términos (*interactions*) y cuadrático (*quadratic*).

Selección del mejor modelo

Para determinar el mejor modelo de los planteados, se utilizan como medidas de precisión el R^2 y el MAPE; con el uso de las ecuaciones 1.19 y 1.20.

Tabla 3.5- Comparación entre los errores de ajuste en los modelos de regresiones lineales múltiples. Fuente: Elaboración propia

Modelo	R^2 (%)	MAPE (%)
Lineal en sus términos	69,90	1041,50
Con interacción	84,50	101,53
Cuadrático	92,90	44,29

La tabla 3.5 refleja que el mejor de los ajustes lineales planteados es el cuadrático, por tener el mayor R^2 y menor MAPE, de ahí que será el modelo seleccionado.

De los análisis anteriores se tiene que, en ninguno de los modelos propuestos x_8 tiene una influencia estadísticamente significativa sobre la ΔOD , ni por si sola ni con la interacción con otras variables. Este elemento contradice la teoría expuesta por varios especialistas de la UEB Yaguacam acerca de su utilización.

Validación del modelo

Como se describió en el apéndice 1.3.1, los supuestos de un modelo estadístico se refieren a una serie de condiciones que deben darse para garantizar la validez del modelo, de lo contrario no se puede abordar que se tiene una buena estrategia para predecir la muestra de datos, a continuación se examinan estos supuestos.

Supuesto 1: Linealidad

La linealidad se produce cuando existe relación lineal entre las variables independientes y la dependiente. Pudiera ser un problema si no se cumple porque se estarían considerando variables que no aportan al modelo o porque estas relaciones no serían lineales (Abuín, 2010).

Se puede detectar si existe linealidad o no a partir de considerar que en un gráfico de los valores predichos vs los residuos, debe cumplirse que la línea de tendencia posea pendiente cero.

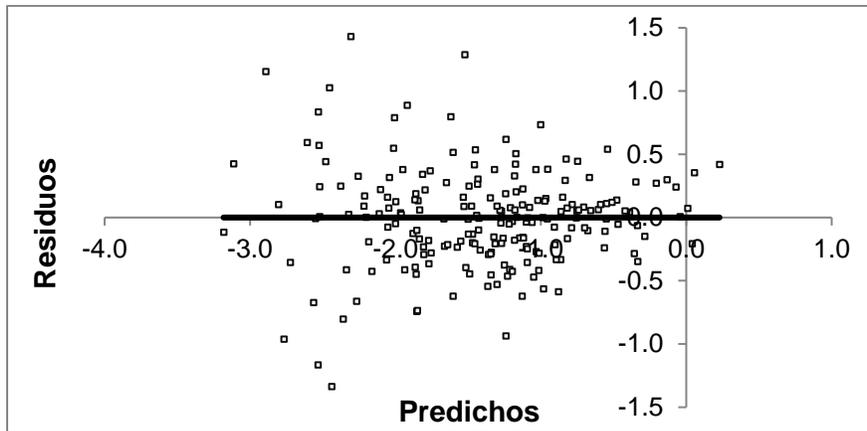
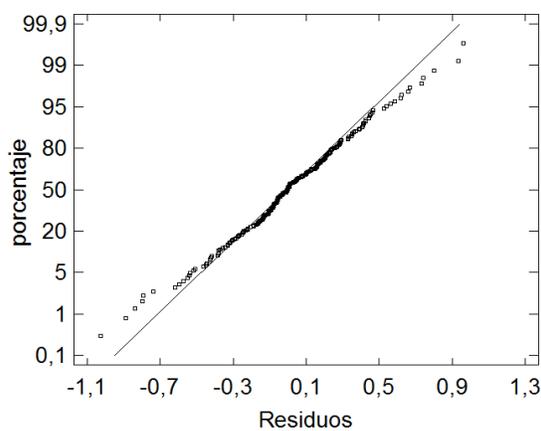


Figura 3.7- Diagrama de dispersión entre valores predichos y los residuos. Fuente: Elaboración propia

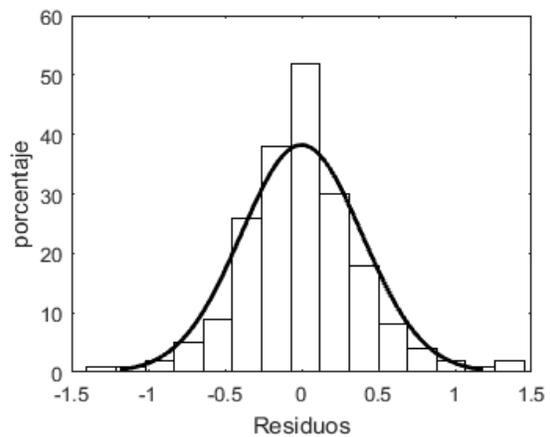
En la figura 3.7 la pendiente de la recta de regresión sigue una tendencia a cero, por lo que se puede afirmar que se cumple con el supuesto de linealidad.

Supuesto 2: Normalidad de los residuos

La normalidad de los residuos se produce cuando los residuos del modelo siguen una distribución normal. Pudiera ser un problema de no cumplirse porque no se podrían aplicar las pruebas de validación global del modelo con referencia a la desviación estándar (Baños, Fonseca, & Álvarez, 2019).



a)



b)

Figura 3.8- Gráfico de probabilidad normal para los residuos del modelo cuadrático (a) e histograma de frecuencias (b). Fuente: Elaboración propia

En el gráfico de probabilidad normal de la figura 3.8 los valores se sitúan sobre la línea diagonal, lo que señala el cumplimiento del supuesto. Además el histograma de frecuencias demuestra una distribución sesgada (por no ser demasiado plana o picuda y no tener valores extremos); otro elemento que indica la normalidad de los residuos.

Otra manera de determinar la normalidad es verificando que los valores del sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada se encuentren en el rango de -2 a 2. En este caso ambos valores se encuentran dentro de este rango, ver anexo 29. Por tanto, se puede afirmar que se cumple con el supuesto de normalidad.

Supuesto 3: Homocedasticidad

Este supuesto asume que el error del modelo de regresión no afecta la varianza o dispersión de la estimación. Se puede observar de forma gráfica porque todos los términos del error se distribuyen de la misma forma alrededor de la recta de regresión. Otra forma para su detección es mediante la utilización de una prueba de hipótesis con la aplicación de un Test de White (Calle, 2015).

Para el caso tratado la prueba de hipótesis quedaría como sigue:

1) Formulación de la Hipótesis

$$H_0: \text{var}(e_i | x_1, x_2 \dots x_8) = \sigma^2 \text{ (homocedasticidad)}$$

$$H_1: \text{var}(e_i | x_1, x_2 \dots x_8) \neq \sigma^2 \text{ (heterocedasticidad)}$$

2) Nivel de significancia, $\alpha = 5 \%$

$$\chi_{crit}^2 = 73,3115 \text{ (Para 44 términos regresores en el modelo auxiliar)}$$

3) Estadístico de prueba, $W = nR^2 \sim \chi_{calc}^2$

$$\text{Modelo auxiliar, } e_i^2 = f(x_1, x_2 \dots x_8); \text{ ver anexo 28 d)}$$

$$W = 199 \cdot 0,226 = 44,974$$

$$\chi_{calc}^2 = 44,974 \rightarrow \alpha = 0,8306$$

4) Regla de decisión, $\chi_{calc}^2 > \chi_{crit}^2$, rechazo H_0

5) Toma de decisión

Dado que $\chi_{calc}^2 < \chi_{crit}^2$ se acepta la hipótesis nula. Por tanto, se puede afirmar que existe homocedasticidad en el modelo.

Supuesto 4: Ausencia de multicolinealidad

Se produce cuando existe fuerte o total correlación entre las variables independientes. Pudiera ser un problema debido a que cuando la colinealidad es alta produce coeficientes muy inestables en el modelo, es decir los efectos atribuidos a las variables independientes pueden ser erróneos (Fernández, 2011).

La manera de detectar la multicolinealidad es a través del estadístico VIF_i , el mismo se determina de acuerdo a la ecuación 3.2.

$$VIF_i = \frac{1}{1 - R_i^2} \quad (3.2)$$

Tabla 3.6- Matriz de Coeficiente de Correlación. Fuente: Elaboración propia

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
x_1	1,0000	-0,2068	0,6348	0,5548	0,0196	-0,0457	-0,0460	0,3167
x_2	-0,2068	1,0000	0,0180	0,0811	0,1376	-0,0895	-0,1373	-0,0901
x_3	0,6348	0,0180	1,0000	0,7158	-0,0335	0,0051	0,0543	0,2063
x_4	0,5548	0,0811	0,7158	1,0000	-0,0577	0,0180	0,0408	0,1494
x_5	0,0196	0,1376	-0,0335	-0,0577	1,0000	-0,4634	-0,5591	-0,2154
x_6	-0,0457	-0,0895	0,0051	0,0180	-0,4634	1,0000	0,0289	0,0932
x_7	-0,0460	-0,1373	0,0543	0,0408	-0,5591	0,0289	1,0000	-0,1297
x_8	0,3167	-0,0901	0,2063	0,1494	-0,2154	0,0932	-0,1297	1,0000

De la tabla 3.6 se sospecha sobre la multicolinealidad entre $x_1 \div x_3$, $x_1 \div x_4$, $x_3 \div x_4$, y $x_5 \div x_6$, por poseer valores del coeficiente de correlación mayores a 0,5. Es por ello que se considera necesario realizar el análisis utilizando el factor de Inflación de la varianza.

Tabla 3.7- Valores de VIF_i para las variables explicativas. Fuente Elaboración propia

Función de regresión	R_i^2	VIF_i
$x_1 = f(x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8)$	0,5234	2,10
$x_2 = f(x_1, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8)$	0,1463	1,17
$x_3 = f(x_1, x_2, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8)$	0,6025	2,52
$x_4 = f(x_1, x_2, x_3, x_5, x_6, x_7, x_8)$	0,5466	2,21
$x_5 = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_6, x_7, x_8)$	0,5800	2,38
$x_6 = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_7, x_8)$	0,3087	1,45
$x_7 = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_8)$	0,4640	1,87
$x_8 = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7)$	0,2452	1,32

Con el uso de la ecuación 3.2 se obtienen los VIF_i para funciones de regresión entre las variables independientes (X). Como todos los valores de $VIF_i < 5$, se puede afirmar que no existe multicolinealidad en el modelo.

Supuesto 5: Ausencia de valores influyentes

Una observación influyente se define como una observación que se diferencia marcadamente del conjunto de datos y tiene una gran influencia en el resultado del modelo. Pudiera ser un problema debido a que afectan los coeficientes de la ecuación y generan errores de predicción. Se pueden utilizar tres medidas para identificar puntos extremos: valores de distancia, residuales estudentizados y la distancia de Cook (Baños, Fonseca, & Álvarez, 2019).

La distancia de Cook es un indicador para determinar si una observación influye en el valor del vector de los coeficientes beta. Si $D_i > 1$, la observación i influye en el vector de los coeficientes Beta del modelo.

Desde el punto de vista gráfico y con la utilización del comando *plotDiagnostics* de Matlab se tiene la figura 3.9, donde se identifican las distancias de Cook.

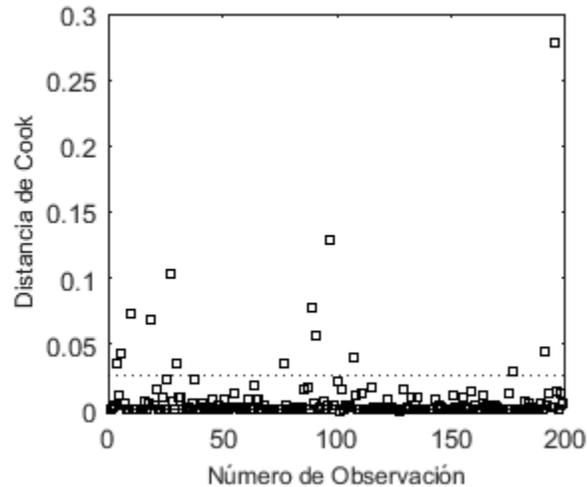


Figura 3.9- Distancia de Cook en el modelo. Fuente: Elaboración propia

Las distancias de Cook más relevantes corresponden a las observaciones 27, 97, y 195; todas con $D_i < 1$, por lo que se puede afirmar que no existen valores extremos en el modelo.

3.3.2- Modelo para caso 2

Al igual que en el caso anterior se generaron tres modelos, ver anexo 30. Los que consideran los grupos horarios No. 1, 2 y 3. Por ejemplo en el caso del modelo de regresión lineal en sus términos se tiene la ecuación 3.3, donde solamente se consideran la Temperatura del Agua y Radiación Solar debido a que son estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95,0 % o mayor.

$$\widehat{\Delta OD} = -2,2997 + 0,5978x_5 + 5,8797 \cdot 10^{-3}x_6 \quad (3.3)$$

Este modelo explica el 77,6479 % el cambio en la ΔOD , además las variables dependientes influyen de manera positiva sobre la dependiente.

Se debe señalar que en los análisis no se considera la variable Recambio de Agua (x_3) debido a que en estos horarios no se utiliza el sistema de bombeo hacia el banco de progenitores.

Selección del mejor modelo

La tabla 3.8 refleja que el mejor de los ajustes lineales planteados es el cuadrático, por tener el mayor R^2 y menor MAPE.

Tabla 3.8- Comparación de los modelos. Fuente: Elaboración propia

Modelo	R ² (%)	MAPE (%)
Lineal en sus términos	77,65	47,02
Con interacción	93,57	27,80
Cuadrático	94,02	25,97

Validación del modelo

En este punto se realiza un resumen de los supuestos para la validación del modelo con el uso de la figura 3.10.

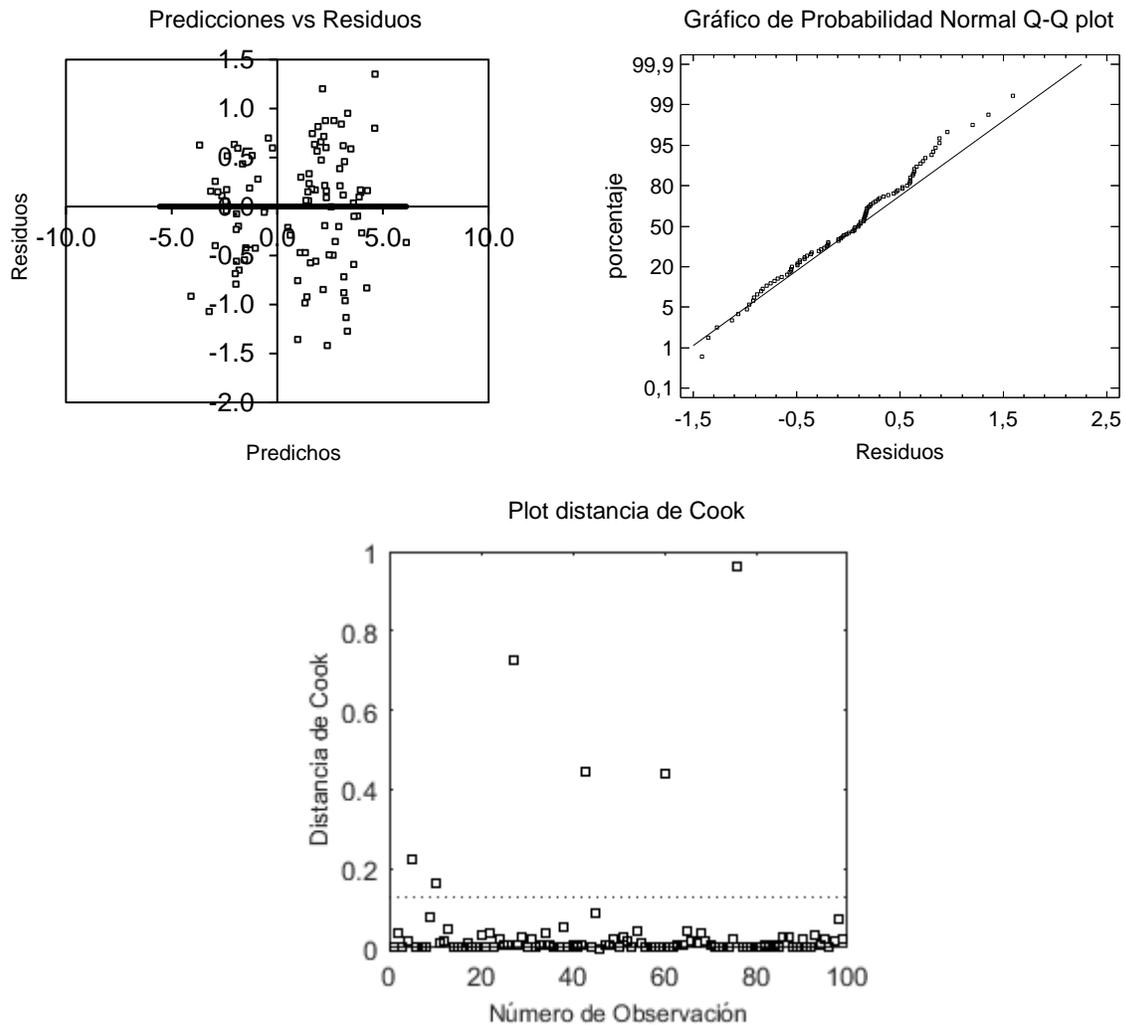


Figura 3.10- Diagrama de dispersión entre valores predichos y los residuos. Fuente: Elaboración propia

La línea de tendencia en el gráfico de los valores predichos vs residuos, posee pendiente cero; elemento por el cual se puede afirmar que se cumple el supuesto de linealidad en el modelo.

Los residuos siguen una distribución normal puesto que se ubican sobre la línea diagonal del gráfico de probabilidad normal. Además el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada poseen valores -0,410933 y -0,654915 respectivamente, los cuales se encuentran en el rango esperado para una distribución normal. Estos elementos enfatizan que se cumple el supuesto de normalidad de los residuos.

Las distancias de Cook más relevantes corresponden a las observaciones 27, 43, 60 y 76; con $D_i < 1$, por lo que se puede afirmar que no existen valores extremos en el modelo y se cumple el supuesto de ausencia de valores influyentes.

La matriz de los coeficientes de correlación mostrada en el anexo 31 c), evidencia sospecha de multicolinealidad entre $x_1 \div x_3$, $x_1 \div x_4$, $x_3 \div x_4$, $x_5 \div x_6$, $x_4 \div x_5$ y $x_6 \div x_7$ por poseer valores del coeficiente de correlación mayores a 0,5. A pesar de ello, los valores de $VIF_i < 5$ para todas las regresiones realizadas, por lo que se puede afirmar que no existe multicolinealidad en el modelo.

De la prueba de hipótesis descrita en el anexo 31 b) se tiene que $\chi^2_{calc} < \chi^2_{crit}$, por lo que se cumple la hipótesis de que existe homocedasticidad en el modelo.

3.4- Diseño de experimento

Una vez conocido que el Volumen de Recambio no tiene influencia en la ΔOD , hipótesis demostrada en los modelos generados para las mediciones realizadas, serían efectivas las siguientes interrogantes:

1. ¿Qué volúmenes de agua mínimos se necesitan para el cambio de condiciones críticas de OD en un estanque, a estados favorables que no permitan la mortalidad del cultivo?
2. ¿Existirá otra manera de hacer más efectivo el recambio de agua en el estanque?
3. ¿Se cumplirá la teoría de Arescurenaga que plantea se deben generar altas tasas de recambio para garantizar la oxigenación por esta vía?

El diseño de experimento propuesto persigue responder estas interrogantes. Para ello se analiza la influencia de los factores experimentales Volumen de Recambio, Tipo de Sistema y Grupo Horario sobre la variable respuesta ΔOD . El análisis del Grupo Horario, no considerado en los modelos del apéndice 3.3, se encuentra asociado a la determinación de las horas de mayor consumo de OD.

De los análisis realizados con anterioridad se conoce que existen factores perturbadores en la Variación del OD como la Biomasa, Días/ciclo, Nivel Zooplancton, Nivel Fitoplancton, Temperatura del Agua, Velocidad del Viento y Radiación Solar. Los mismos no son tomados en cuenta en este estudio debido a que se comportan de manera no controlable.

Se utilizaron como unidades experimentales los estanques No. 1 y 4 (denominados hermanos) por tener similitud de características en cuanto a tamaño, cantidades y peso de los camarones.

Tabla 3.9- Factores y niveles definidos en el diseño de experimento. Fuente: Elaboración propia

Factor	Bajo	Alto	Niveles
Volumen de Recambio	-1,0	1,0	4
Tipo de Sistema	-1,0	1,0	2
Grupo Horario	-1,0	1,0	3

En la tabla 3.9 se hace alusión a que en el diseño generado el factor Volumen de Recambio posee cuatro niveles: 20, 40, 80 y 120 m³. En el Tipo de Sistema se analizan los niveles: con recambio normal y con dispersión. Por su parte el Grupo Horario utiliza los grupos 4, 5 y 6, definidos en el apéndice 3.1, coincidentes con las horas de funcionamiento del sistema de bombeo.

Se utiliza un diseño factorial multinivel debido a que este permite estudiar el efecto de cada factor y las interacciones entre factores sobre la variable respuesta. Es un diseño completamente aleatorizado donde se generan 48 corridas (de acuerdo al número de niveles 4x2x3) y dos réplicas del diseño.

El modelo ajustado explica solamente en 60,30 % la variabilidad de la ΔOD , lo que pudiera estar dado por la no consideración de otros factores influyentes. El diseño es perfectamente ortogonal, debido a que se cumple que el V.I.F es igual a 1, ver anexo 33.

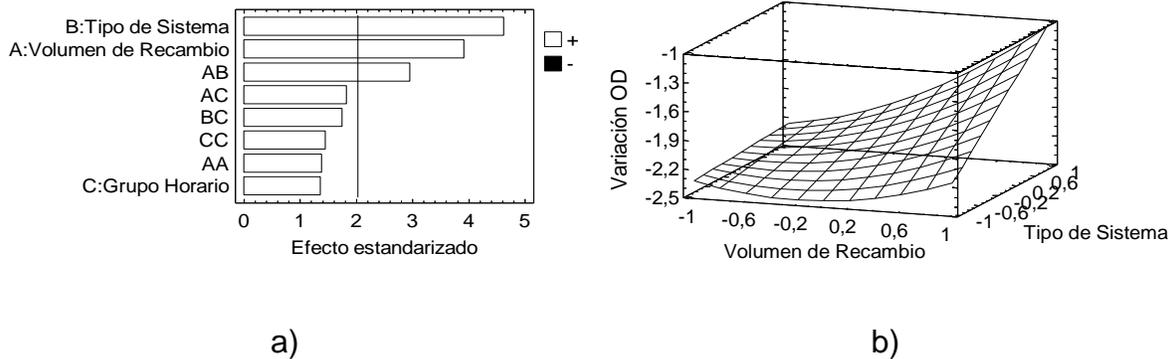


Figura 3.11- Efectos influyentes sobre la ΔOD . a) Diagrama de Pareto estandarizado. b) Gráfico de superficie de respuesta. Fuente: Elaboración propia

La figura 3.11 a), muestra los efectos estimados más influyentes sobre la variable respuesta en orden decreciente de magnitud. En este estudio los efectos estadísticamente significativos con un 95,0 % de nivel de confianza son: el Tipo de Sistema, el Volumen de Recambio y una interacción entre ambos.

Una idea más clara de la influencia entre los factores y la variable respuesta se observa en la Superficie de Respuesta Estimada, ver figura 3.11 b).

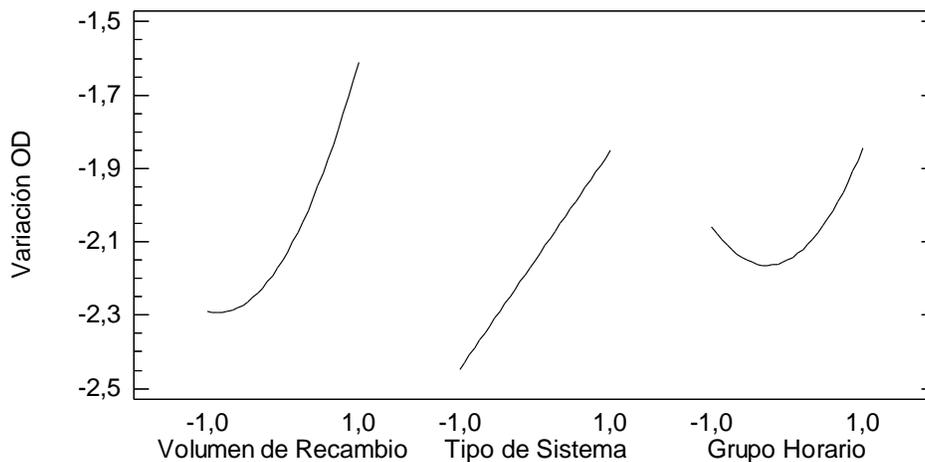


Figura 3.12- Efectos principales para ΔOD . Fuente: Elaboración propia

La altura de la superficie en el gráfico (desde -1,0 mg/l hasta -2,5 mg/l) representa los valores de la ΔOD . Existe una tendencia a un valor cero de esta variable cuando el Volumen de Recambio aumenta desde su nivel bajo hasta su nivel alto y se cambia el tipo de sistema desde el normal hasta el de dispersión.

El estudio del efecto Grupo Horario evidencia que los menores rangos de la ΔOD se producen en el grupo de 05:00 AM – 09:00 PM. Además el horario de mayor consumo se produce en la madrugada, de acuerdo al grupo horario de 01:00 AM – 05:00 PM.

En la figura 3.12, cuando cambia el Tipo de Sistema desde un sistema normal hacia un sistema con dispersión se observa una disminución en la amplitud de la ΔOD .

A medida que aumenta el Volumen de Recambio la ΔOD tiende a cero, o sea existiría menor diferencia entre el OD final y el OD inicial. Cuando este efecto es bajo (niveles 1 y 2) no garantiza un cambio de la variable respuesta. Para que exista un cambio del OD en los estanques, se deben suministrar los volúmenes definidos en los niveles 3 y 4 (de 320 m³ y 480 m³) en un período de cuatro horas. Estos representan un 17,47 % y 26,20 % del volumen del estanque de forma diaria, respectivamente. Como se ha explicado, dichos volúmenes son superiores a los sugeridos por Akifumi y Kubitza (2010), Gurrola (2016) y otros; por lo que se considera que solamente deben ser usados para niveles críticos de OD en los estanques con esta situación y no como una práctica cotidiana.

3.5- Análisis de las oportunidades de ahorro

Las oportunidades de ahorro en el sistema de bombeo hacia el banco de progenitores se resumen en:

De acuerdo a su utilización

A pesar de que el criterio para el llenado de los estanques pudiese inferir un sobredimensionamiento del sistema a partir de los elementos expuestos por la FAO (1992), el criterio a tener en cuenta por la importancia en el cultivo es el recambio de agua de acuerdo a las necesidades biológicas de la especie. Sobre

este último se conoce que garantiza la eliminación de sedimentos del fondo, pero no un aumento en los niveles de OD; puesto que la variable Volumen de Recambio no tiene influencia sobre la respuesta en el modelo de regresión para las horas de funcionamiento del sistema, en la que dichos volúmenes no son notables.

Por otra parte, el diseño de experimento enfatiza que para garantizar los menores rangos de ΔOD debe ser elevado el volumen de recambio, evitando de esta forma que en estanques con bajos niveles de OD se pueda llegar al límite de 2 mg/l. Como se explicó en el apéndice 3.1, esta condición crítica solo tuvo lugar en dos estanques para el total de mediciones de la muestra.

Por lo anterior, no se considera justificable el recambio de agua de forma diaria en el sistema. La estrategia propuesta estaría asociada a un recambio con la capacidad de liberar agua desde el fondo y una intervención con elevados volúmenes en aquellos estanques con bajos niveles de OD. Esto traería consigo que se utilice el sistema solamente la mitad de lo previsto en un año, por lo que el consumo energético garantizaría un ahorro de 106 397,5 kWh/año.

De acuerdo a erróneos tratamientos con el sistema

En este análisis no se considera el impacto provocado por erróneas operaciones de acuerdo al punto de operación, puesto que se necesitan las mediciones de voltaje de línea, corriente de línea y factor de potencia.

Por otra parte, los salideros no deseados representan el 7 % del valor promedio de flujo trasegado por el sistema de 348,56 m³/h para las mediciones realizadas, según el anexo 21 y considerando un Q_{fuga} promedio de 25,56 m³/h. De acuerdo a la demanda de energía del sistema de 583 kWh/día, este tanto por ciento representa una pérdida de 42,74 kWh/día (15 600,1 kWh/año).

3.6- Análisis económico de los resultados

La tarifa eléctrica utilizada por la UEB Yaguacam es la tarifa de media tensión con actividad continua (M1-A) de acuerdo a Ministra de Finanzas y Precios (2020). Para el cálculo de los ingresos por ahorro en el sistema de bombeo hacia el banco

de progenitores se utiliza la ecuación propuesta para la madrugada, ecuación 3.4. En la misma el término consumo en la madrugada es sustituido por la energía ahorrada en un año para las distintas oportunidades existentes y los ingresos se encuentran asociados a los ingresos por ahorro en un año.

$$\text{Ingresos} = (1,0601\$/kWh \cdot K + 0,8595\$/kWh) \cdot \text{Consumo_madrugada}(kWh) \quad (3.4)$$

En la ecuación 3.4 el factor K toma un valor de 1,039 para el centro en estudio. Un resumen de los ingresos de acuerdo a cada propuesta de ahorro se tiene en la tabla 3.10.

Tabla 3.10- Ingresos por concepto de ahorro. Fuente: Elaboración propia

Oportunidades de ahorro	(1)	(2)
Energía Eléctrica ahorrada (kWh/año)	106 397,5	15 600,1
Ingresos por ahorro (CUP/año)	208 639,52	30 590,92

Leyenda:

- (1) De acuerdo a su utilización (considerando el criterio biológico)
- (2) De acuerdo a erróneos tratamientos con el sistema (considerando los salideros)

Aunque el ingreso por concepto de ahorro más importante se encuentra asociado a la oportunidad de acuerdo a su utilización, la oportunidad que considera los salideros representa un aporte significativo.

Conclusiones Parciales

- 1- Se realizaron 298 mediciones distribuidas en seis grupos horarios para las variables asociadas a la oxigenación; notándose que el mayor consumo se produce de 01:00 AM – 05:00 AM, que solo se produjeron dos mediciones con niveles críticos de OD inferiores a 2 mg/l, y que las ΔOD se comportan en el entorno de -2 mg/l para los grupos horarios 4, 5 y 6.
- 2- El modelo generado para las horas de funcionamiento del equipo de bombeo describe el 94,02 % de la variación del OD, donde no se considera influyente el Volumen de Recambio para las condiciones reales del sistema; proponiéndose que se realice en días alternos y liberando agua desde el fondo.

- 3- El diseño de experimento resalta la necesidad de utilizar grandes volúmenes de recambio para garantizar por esta vía oxigenación en los estanques de cultivo, para lo que sería factible una intervención con elevados volúmenes a aquellos estanques con bajos niveles de OD.
- 4- Los elementos que cobran mayor influencia en el impacto económico están dados fundamentalmente por la utilización inadecuada del sistema y los salideros no deseados.

Conclusiones Generales

- 1- Los sistemas de bombeo en la UEB Yaguacam representan el 35 % del consumo total de energía eléctrica. En el banco de progenitores su uso se justifica con el llenado, renovación, así como en la oxigenación; siendo este último el elemento más importante en la supervivencia y desarrollo del cultivo.
- 2- Con la determinación de las curvas características de la bomba centrífuga KSB ITUR 20800 ZARAUTZ BEV-1226/2 por el método de Izquierdo & Sablón y la curva característica del sistema ramificado de tuberías se obtuvo el punto de operación a 340 m³/h, para una carga de 22,97 m, un rendimiento del 65,9 % y una potencia útil de 21,26 kW.
- 3- El modelo propuesto no considera influyente el Volumen de Recambio en la variación del OD, mientras que el diseño de experimento resalta la necesidad de utilizar grandes volúmenes de recambio para garantizar oxigenación en los estanques de cultivo, significando entonces que lo ideal sería que el sistema trabajara en días alternos con recambio de agua por el fondo y teniendo en cuenta el nivel oxígeno existente.
- 4- La utilización inadecuada del sistema y los salideros no deseados generan una pérdida de 106 397,5 y 15 600,1 kWh/año que representan un impacto económico de 208 639,52 y 30 590,92 CUP/año, respectivamente.

Recomendaciones

- 1- Analizar el impacto provocado por erróneas operaciones de acuerdo al punto de operación en el sistema de bombeo.
- 2- Determinar la incidencia del no recambio de agua de manera total sobre el cultivo semi-intensivo de camarón blanco *Litopenaeus Vannamei* en el banco de progenitores; de producirse por la existencia de niveles críticos, evaluar la efectividad de realizarlo por el fondo.
- 3- Estudiar la influencia sobre el OD de variables no consideradas en el modelo como cantidad de desechos sólidos en el fondo, u otras.
- 4- Identificar la viabilidad económica de la instalación de un sistema de oxigenación basado en la dispersión del agua.

Bibliografía

- Álvarez, J. C., & Sevilla, K. E. (2011). Efecto de la aplicación de alimento con Floculo y sin Floculo sobre el crecimiento de camarones *Litopenaeus vannamei* en etapa de Pls 17 a juvenil 20. (Tesis de Ingeniería). Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua UNAN-León. <http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/bitstream/123456789/6151/1/223541.pdf>
- Burbano, E., Imués, M., González, E., Otavio, L., Olivera, A., & Vinatea, L. (2015). Supervivencia de poslarvas de *Litopenaeus vannamei* sometidas a la prueba de estrés osmótico y su relación con el estado de muda. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 50, N°2: 323-329. <https://scielo.conicyt.cl/pdf/revbiolmar/v50n2/art10.pdf>
- Meyer, D. (2004). Introducción a la Acuicultura. Escuela Agrícola Panamericana. https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/2490/1/208986_0363%20-%20Copy.pdf
- Muñoz, J. G. (2012). Capacidad de carga vs calidad de agua en acuicultura. <http://www.solla.com/sites/default/files/productos/secciones/adjunt/Capacidad%20de%20Carga%20vs%20calidad%20del%20agua%20Jaime%20Guerrero.pdf>
- Rojas, M. (2003). Establecimiento, Diseño y Manejo de Granjas Camaroneras. Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”.
- Zelaya, C. A., & Real, O. M. (2013). Crecimiento de camarones juveniles *Litopenaeus vannamei* en aguas fertilizadas con Ferti-Lake versus fertilizante experimental. (Tesis de Ingeniería). Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua UNAN-León. <http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/bitstream/123456789/5402/1/222932.pdf>

Referencias Bibliográficas

- Abrévalo, E. A. F., & Orellana, G. M. G. (2014). Utilización de melaza como fertilizante orgánico de estanque de camarones durante la fase de engorde del camarón marino (*Litopenaeus vannamei*). (Tesis de Maestría). Universidad de El Salvador. <http://eprints.uanl.mx/1956/1/1080179662.pdf>

- Abuín, J. M. R. (2010). Regresión Lineal Múltiple. Instituto de Geografía y Economía.
- Akifumi, E., & Kubitza, F. (2010). Construcción de estanques y de estructuras hidráulicas para el cultivo de peces. Ministerio de Economía y Producción. http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_peces/piscicultura/38-estanques_parte1.pdf
- Alarcón, H. C. (2018). Actualización de las familias en el Banco de Progenitores.
- Alarcón, H. C. (2019). Producción de camarón *Litopenaeus Vannamei* en Cuba.
- Arescurenaga, Á. F. (2016). Diseño de los componentes hidráulicos de un sistema de recirculación acuícola y el diseño estructural de los tanques de cultivo. (Tesis de Maestría). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas UPC. http://repositorio_academico.upc.edu.pe/upc/bitstream/10757/621695/1/ARESCURENAGA_OA.pdf
- Balnova. (2018). Oxígeno en estanques de camarón. <http://www.balnova.com/oxigeno-en-estanques-de-camaron/>
- Baños, R. V., Fonseca, M. T., & Álvarez, M. R. (2019). Análisis de regresión lineal múltiple con SPSS: un ejemplo práctico. <https://www.revistes.ub.edu/index.php/reire/article/download/reire2019.12.222704-61419-3-PB.pdf>
- Beltrán, R. S., Yanes, J. P. M., & Borges, R. J. (2016). Impacto de las modificaciones en las bombas de agua alimentar en el insumo de energía de la central Termoeléctrica Carlos Manuel de Céspedes. (Tesis de Ingeniería) Universidad de Cienfuegos.
- Boyd, C. (2002). Consideraciones sobre la calidad del agua y del suelo en cultivos del camarón. <http://www.cesasin.com.mx/CentroAmerica/1Calidad%20del%20agua.pdf>
- Boyd, C., Kwei, C., Pantoja, C., Lightner, D., Brock, J., Johnson, K., & Treece, G. (2005). Buenas Prácticas de Manejo para el Cultivo de Camarón. http://www.crc.uri.edu/download/PKD_good_mgt_field_manual.pdf

- Cabrera, S., & Lara, S. (2014). Comparación del crecimiento de post-larvas de camarón blanco del Pacífico *Litopenaeus Vannamei*, sometidas a dos condiciones experimentales: una alimentada con alimento comercial más biofloc y la otra sin biofloc. (Tesis de Doctorado). Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua UNAN-León. <http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jsp/bitstream/12345679/3183/1/225664.pdf>
- Calle, J. A. C. (2015). Detección de multicolinealidad y heterocedasticidad (aplicaciones en Eviews-Stata). http://economia.unmsm.edu.pe/data/doc_trab/17-2015-OBG.pdf
- Cengel, Y., & Cimbala, J. (2006). Mecánica de los Fluidos. Fundamentos y aplicaciones. McGraw-Hill Interamericana.
- Chamberlain, G. (2001). Cultivo sostenible de camarón: mitos y realidades (Ponencia). Conferencia SHRIMP. <http://www.innovacion.gob.sv/inventa/attachments/article/287/Mitos%20Realidades.pdf>
- Crane (s. f.). Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. McGraw-Hill.
- Cruz, J. S. (Ed.). (2013). Tecnologías que apoyan el desarrollo de la camaronicultura en Colombia. Superintendencia de Industria y Comercio. http://www.ibepi.org/wp-content/uploads/2014/12/Boletin_camarones_FINAL_27junio.pdf
- Cuéllar-Anjel, J., Lara, C., Morales, V., De Gracia, A., & García, O. (2010). Manual de buenas prácticas para el manejo del cultivo de camarón blanco *Litopenaeus Vannamei* (Primera Edición). <http://aquaticcommons.org/16644/1/86.%20Various%20Institutions.%20MBP%202010%5B1%5D.pdf>
- Dorta, R. L. G., Pérez, B. R., & Varela, A. E. (2004). Diseño de Experimentos y Control de la Calidad. Universidad de Cienfuegos.
- Dulhoste, J.-F. (s. f.). Flujo en sistemas de tuberías. http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/djean/index_archivos/Documentos/MF7_Flujo_en_sistemas_de_tuberias.pdf

- FAO. (2020). Programa de desarrollo de la camaronicultura en Cuba. <https://www.fao.org/3/AC392S/AC392S01.html>
- Fernández, P. (2003). Bombas Centrífugas y Volumétricas. http://files.pfernandez_diez.es/MecanicaFluidos/PDFs/09MecFluidos.pdf
- Fernández, J. M. V. (2011). Regresión lineal múltiple. Predicción, diagnosis del modelo, selección de variables. <https://es.scribd.com/document/465996665/Mat-50140129-RegresionMultiple-pdf>
- Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural. (2016). Delimitación cartográfica, anteproyecto y estudio de costes de la zona regable de arroyo del campo (Badajoz). http://www.juntaex.es/filescms/con03/uploaded_files/SectoresTem/DesarrolloRural/Regadios/RegadioArroyoDelCampo/MemoriaYAnejos/AN.10-CalculoDeLaRedDeDistribucion.pdf
- Galli, O., & Miguel, F. (2007). Sistemas de recirculación y tratamiento de agua. CENADAC. http://www.minagri.gob.ar/sitio/areas/acuicultura/cultivos/otros/_archivos/000003-Sistemas%20de%20recirculaci%C3%B3n%20y%20trat%20de%20agua.pdf
- Goenaga, N. (2012a). Procedimiento P.2.LB.13 Chequeos biológicos y veterinario de los camarones.
- Goenaga, N. (2012b). Procedimiento P.3.BP.05. Manejo del agua del estanque.
- Gran diccionario de la Lengua Española. (2016). Larousse. <https://es.thefreedictionary.com>
- Gurrola, J. A. H. (2016). Caracterización de la calidad de agua en un sistema intensivo de cultivo de camarón blanco *Litopenaeus Vannamei*, en condiciones de alta salinidad con recambio de agua limitado. Centro de Investigaciones Biológicas del Noreste, S.C. https://cibnor.repositorio-institucional.mx/jspui/bitstream/1001/42/1/hernandez_j.pdf
- Gutiérrez, L. (2009). Laboratorio de Camarón AQUA-TECNOLOGIA. <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/tab/estudios/2006/27TA2006PD034.pdf>

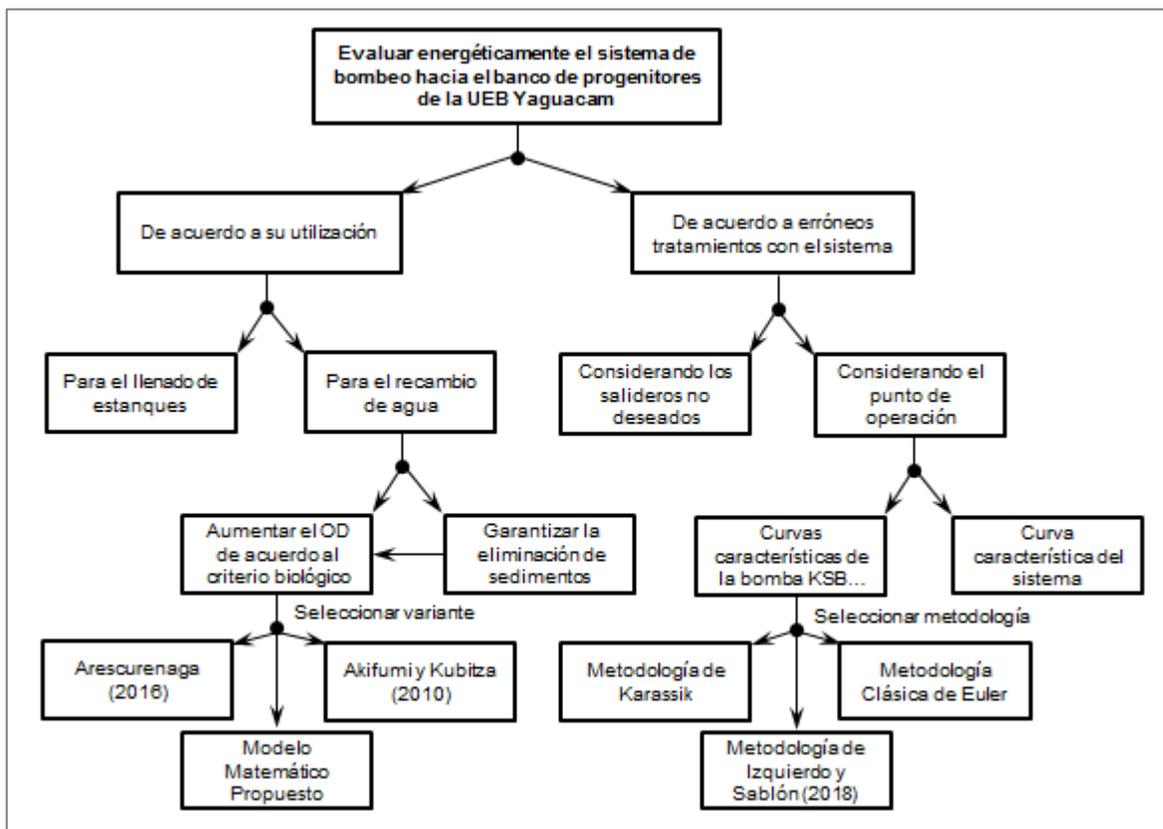
- Harold, A., & Andrade, Z. (2016). Adecuación e implementación de un laboratorio de larvicultura para producir especies bioacuáticas en el campo de la carrera de Ingeniería en Acuicultura y Pesquerías. (Tesis de Ingeniería). Universidad Técnica de Manabí. <http://repositorio.utm.edu.ec/bitstream/123456789/402/1/ADECUACION%20E%20IMPLEMENTACION%20DE%20UN%20LABORATORIO%20DE%20LARVICULTURA%20.pdf>
- INSMET. (2018). Servicio de meteorología 2018. Estación Cienfuegos obs trihorarias. carlosdelfin@cfg.insmet.cu
- Izquierdo, R., & Sablón, L. E. (2018). Desarrollo de un modelo de cálculo para la determinación de las curvas de trabajo de la bomba centrífuga ПБ160/40. *Ciencia & Futuro*, VIII (1). http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revista_estudiantil/article/view/1507/858
- Karassik, I., & Carter, R. (1968). Bombas Centrífugas. Selección, operación y mantenimiento. Unidad Productora 06 del Instituto del Libro.
- Kenneth, J. (1998). Bombas. Selección, uso y mantenimiento. McGraw-Hill Interamericana.
- Navarro, A. (1986). Análisis hidráulico de tuberías por métodos matriciales.
- Nekrasov, B. (1980). Hidráulica. Mir.
- Nordelo, A. B., Yanes, J. M., Teyra, M. de A., Landín, J. P., Pérez, M. M., & Hernández, S. M. (2002). Ahorro de Energía en Sistemas Termomecánicos. Universidad de Cienfuegos.
- Pérez, B. R. (2010). Experimentos con dos niveles. Diseños factoriales fraccionados. Universidad de Cienfuegos.
- Pérez, E. P., Rodríguez, F. P., & Gil, D. B. (2018). Los detritus en el proceso de cicatrización y su eliminación para una correcta preparación del lecho de la herida. *Gerokomos*, 29. https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1134-928X2018000300141
- Ramos, N. (1995). Bombas, Ventiladores y Compresores. ISPJAE.

- Sánchez, I. A., & Salazar, R. (2007). Infraestructura hidráulica para acuicultura. *Revista Electrónica de Ingeniería en Producción Acuícola*, II. <http://revistas.udenar.edu.co/index.php/reipa/article/viewFile/1669/2060>
- Segarra, I. A. (2017). Estrategias para obtener poblaciones homogéneas de post-larvas en el cultivo del camarón blanco *Litopenaeus Vannamei*. (Tesis de Ingeniería). Universidad Técnica de Machala.
- Sonnenholzner, S. (2014). Oxígeno disuelto y su importancia en la acuicultura: Sistemas de aireación para mejorar los cultivos acuícolas. (Ponencia). IV Congreso Internacional de Acuicultura-ESPE 2014. <http://acuicultura.espe.edu.ec/wp-content/uploads/2013/07/Oxigeno-D-Stanislaus-Sonnenholzner.pdf>
- Sosa, J., & Beltrán, E. (2015). Automatización y control para el bombeo de una granja camaronera en la localidad de Pimientillo. (Tesis de Ingeniería). Instituto Tecnológico de Celaya. <http://www.itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas/article/viewFile/349/338>
- Sotolongo, G., & Guzmán, M. (2001). Aplicaciones de las redes neuronales. El caso de la bibliometría. (Ponencia). III Jornada de Desarrollo de la Inteligencia artificial, La Habana, Cuba.
- Stepanoff, A. (1959). *Centrifugal and axial flow pumps*. McGraw-Hill Interamericana.
- Streeter, V., Wylie, B., & Bedford, K. (2008). *Mecánica de los Fluidos* (Novena Edición, Vol. 2). Félix Varela.
- Suárez, M. G., Medina, Z., Montiel, M., Ibarra, J., & Salcedo, A. (2015). Distribución de *Vibrio* spp en agua y sedimento de estanques productores de camarón *Litopenaeus Vannamei* cultivados con aguas del lago de Maracaibo. *Revista Científica, FCV-LUZ*, volumen XXV (número 4), páginas 293-299.
- Tamarit, Y. (2008). Caracterización de la textura sensorial e instrumental del camarón de cultivo *Litopenaeus Vannamei* en la camaronera de Tunas de Zaza. Universidad de la Habana. <https://www.oceandocs.org/bitstream/handle/1834/2821/TESIS?sequence=1>

- Toledo, J. C. (2016). Sistemas de Tuberías. <http://toledocursos.com/MECFLU2/mf1u8.pdf>
- Vides. (2013). Acuicultura hoy. <https://consideraciones-acuicolas2.webnode.com.co/news/parametros-fisico-quimicos/>
- Walpole, R. E., Myers, R. H., & Myers, S. L. (2008). Probabilidad y estadística para ingenieros (Sexta Edición, Vol. II). Félix Varela.
- White, F. (2002). Mecánica de los Fluidos (Cuarta Edición). McGraw-Hill Interamericana.

Anexos

Anexo 1- Flujograma de tareas para el desarrollo del tema investigativo. Fuente: Elaboración propia

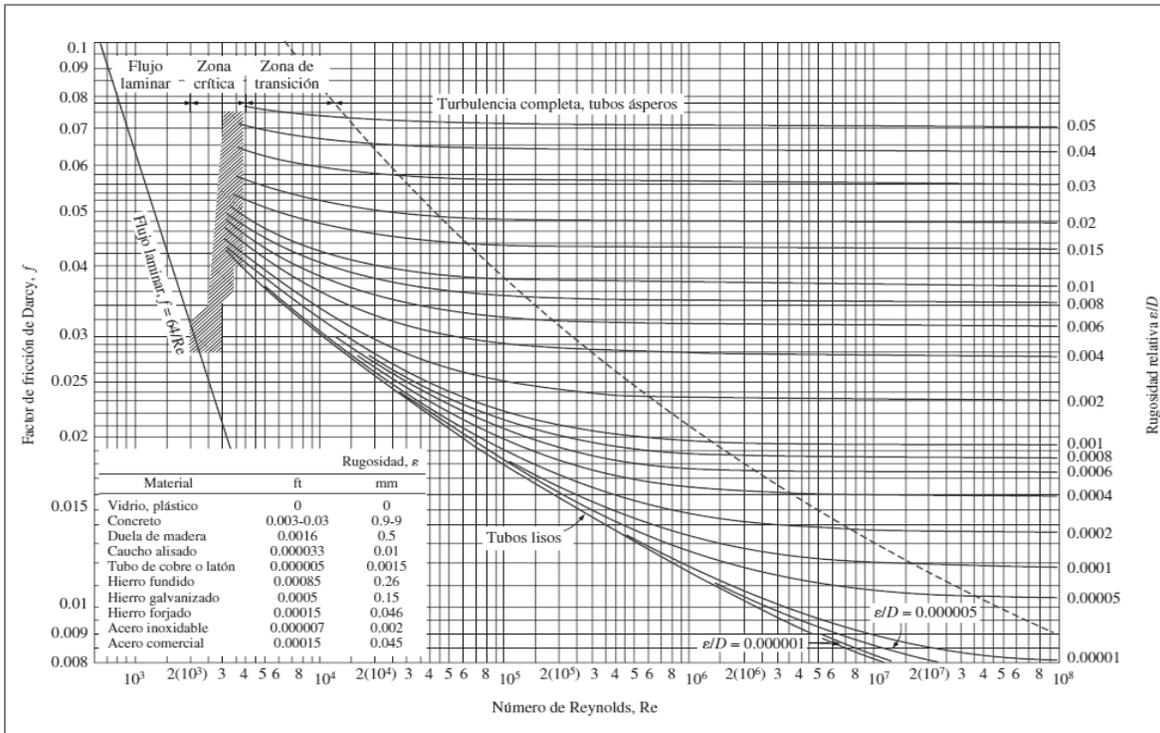


Anexo 2- Procedimiento P.3.BP.05 utilizado en la UEB Yaguacam. Fuente: (Goenaga, 2012b)

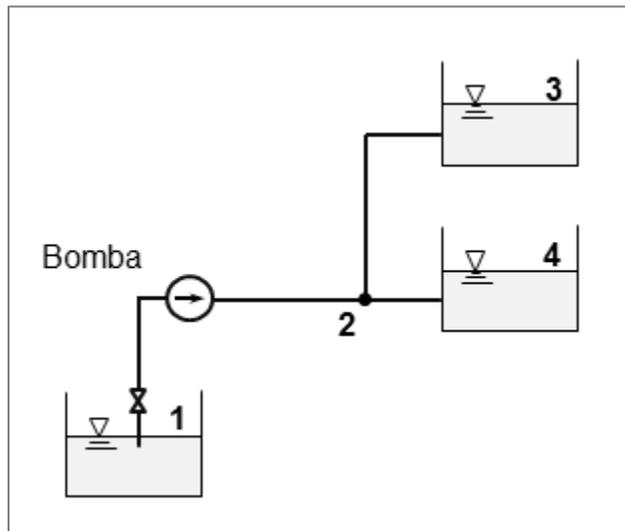
Sección	Concentración de OD	Efecto
Mañana	≥ 0 y < 1 mg/l	Mortal
	≥ 1 y $< 2,5$ mg/l	Crítico
	$\geq 2,5$ y $< 3,0$ mg/l	Alerta
	$\geq 3,0$ y $< 6,0$ mg/l	Óptimo
Tarde	≥ 1 y $< 4,0$ mg/l	Peligro
	≥ 4 y $< 6,0$ mg/l	Alerta

	≥ 6 y $< 10,0$ mg/l	Óptimo
	$\geq 10,0$ mg/l	Posible sobreconsumo de oxígeno durante la noche. Disminución rápida de nutrientes

Anexo 3- Diagrama de Moody. Fuente: (Cengel y Cimbala, 2006)



Anexo 4- Ejemplo de sistema ramificado de tuberías. Fuente: (Dulhoste, s. f.)



Anexo 5- Variación de valores de carga, potencia y eficiencia al 25, 50, 75 y 110 % de capacidad con la velocidad específica, y relación entre la eficiencia y la velocidad específica para diferentes flujos. Fuente: (Karassik, 1968)

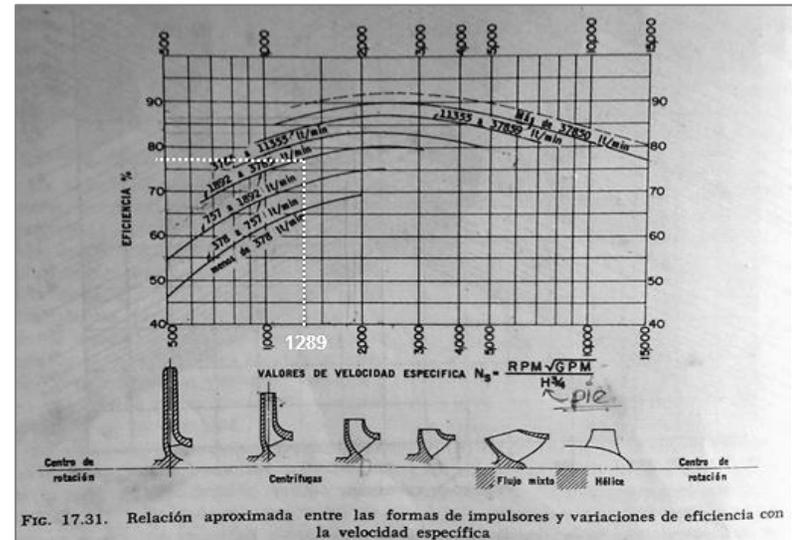
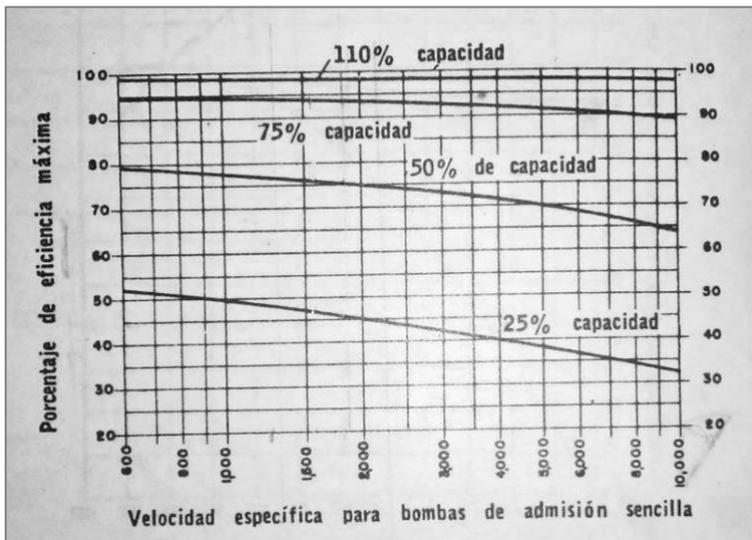
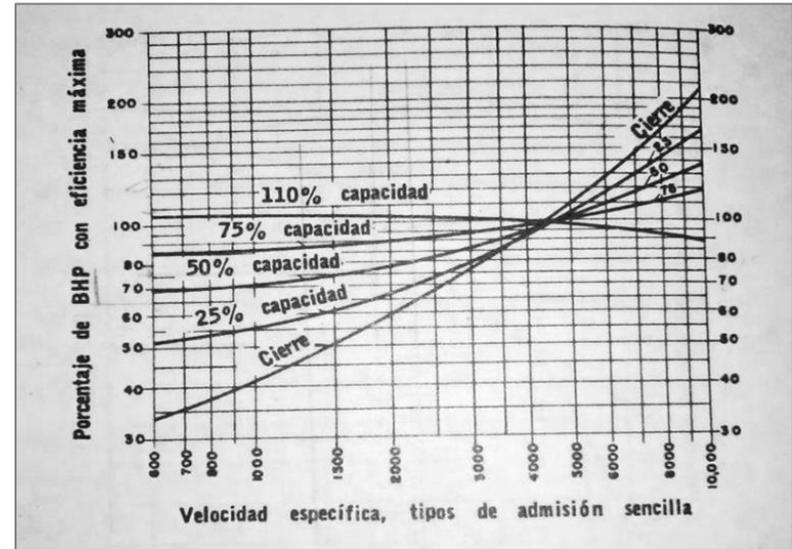
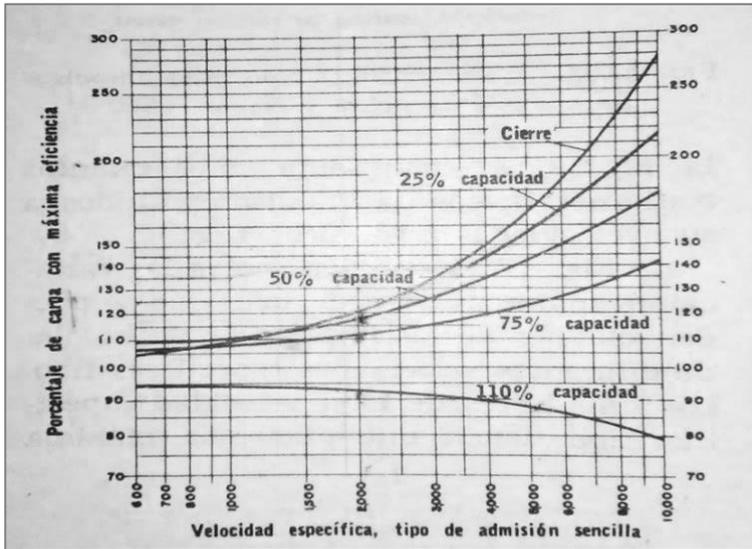
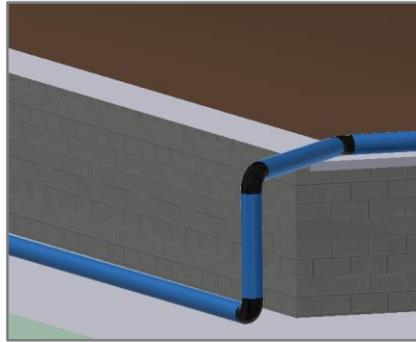
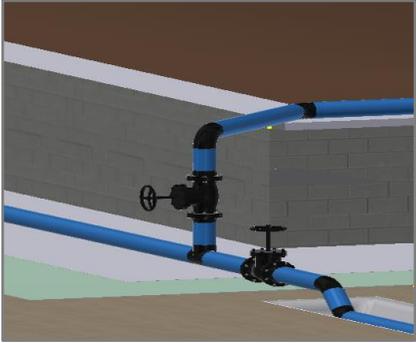
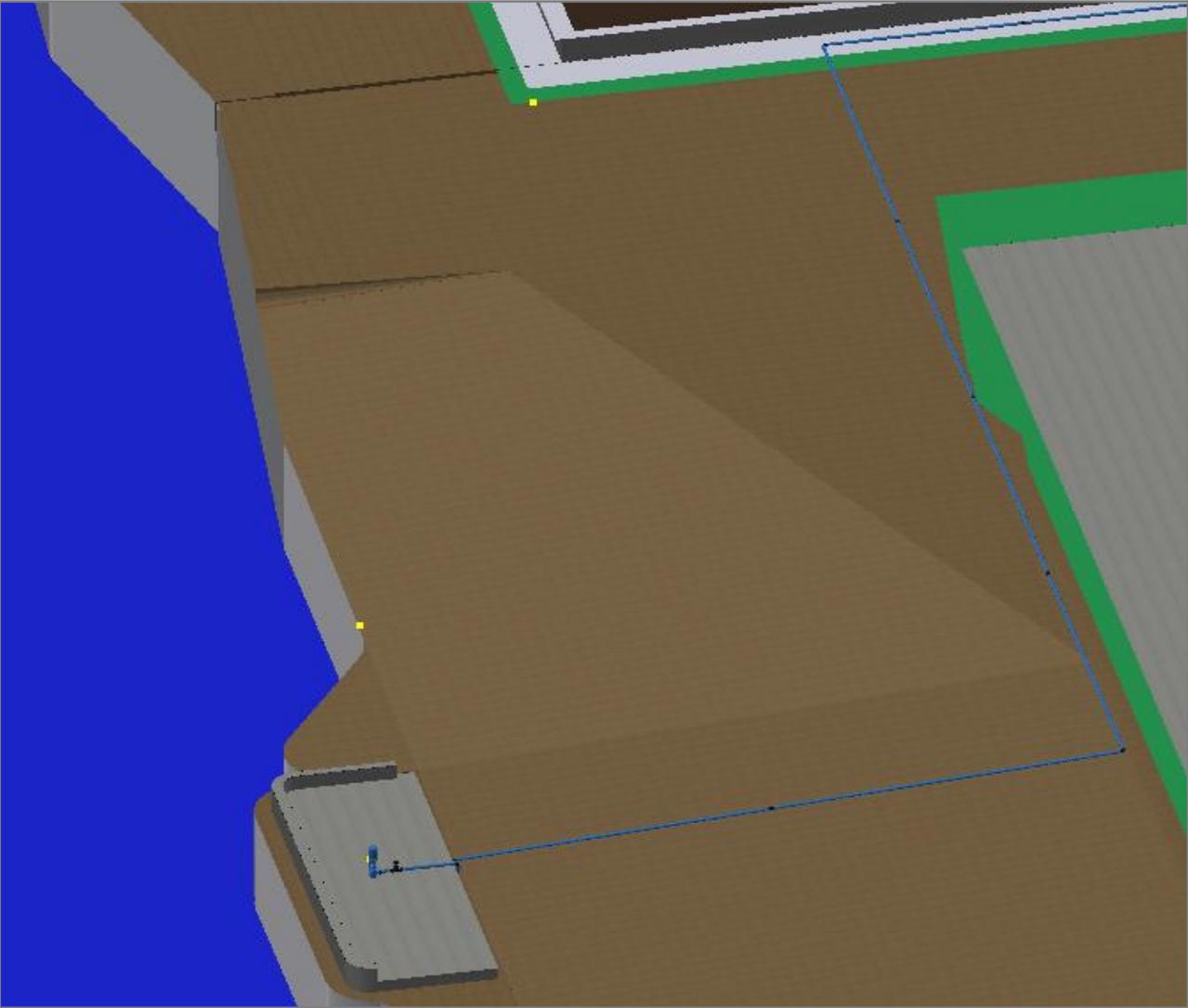
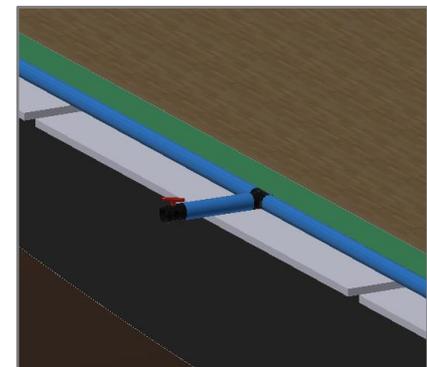
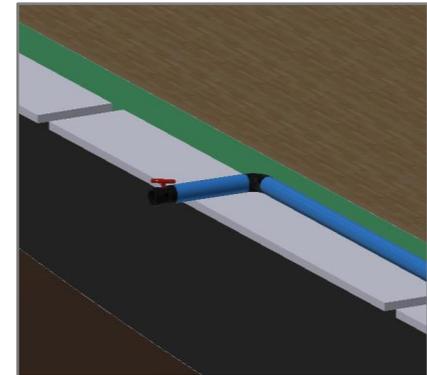
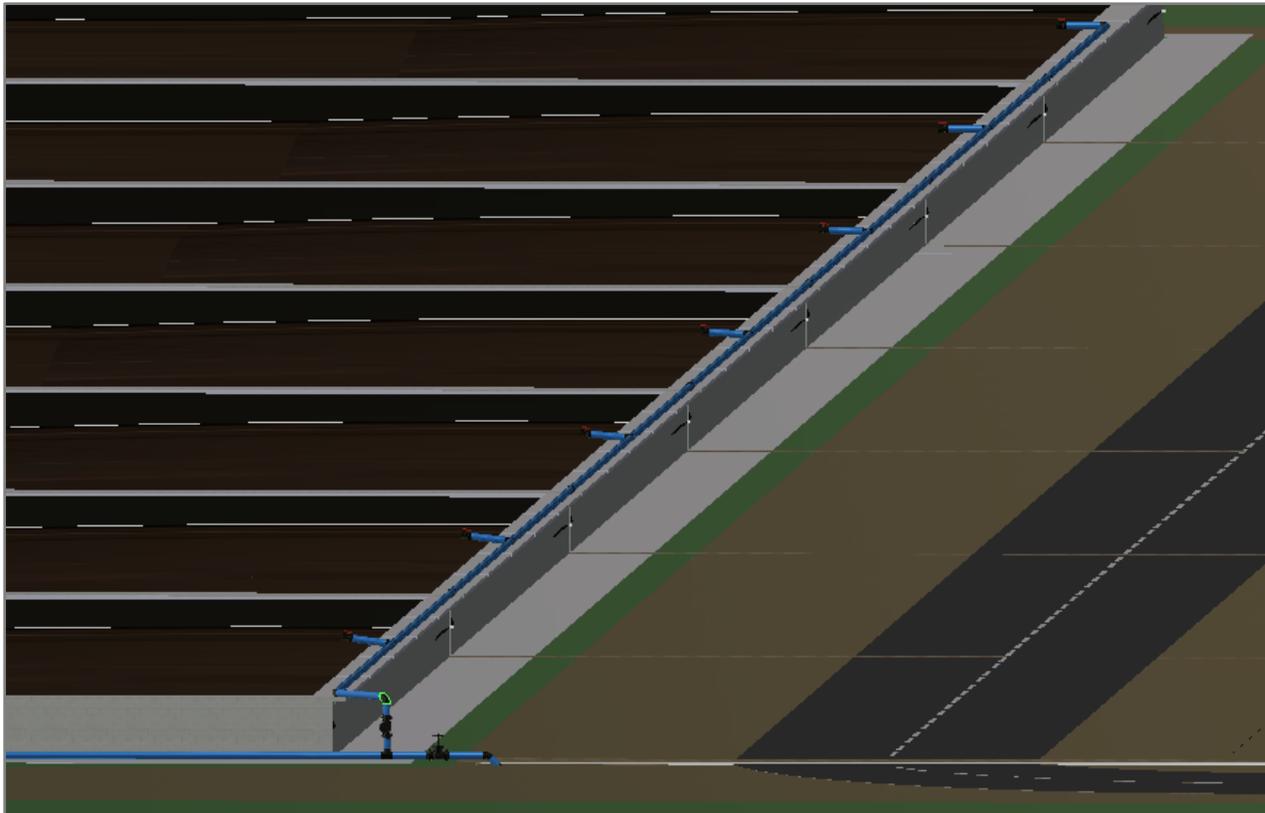


FIG. 17.31. Relación aproximada entre las formas de impulsores y variaciones de eficiencia con la velocidad específica

Anexo 6- Otras vistas del sistema de bombeo de agua de mar hacia el banco de progenitores de la UEB Yaguacam.
Fuente: Elaboración propia

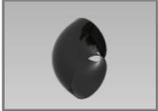




Anexo 7- Factor de Fricción (f_T) para tuberías. Fuente: (Crane, s. f.)

Diámetro Nominal	(mm)	15	20	25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	250	300	400	450	600
	(pulg)	½	¾	1	1 ¼	1 ½	2	2 ½	3	4	5	6	8	10	12	16	18	24
Factor de Fricción (f_T)		0,027	,025	,023	,022	,021	,019	,018	,018	,017	,016	,015	,014	,014	,013	,013	,012	0,12

Anexo 8- Factor k para cada tramo de tubería. Fuente: Elaboración propia

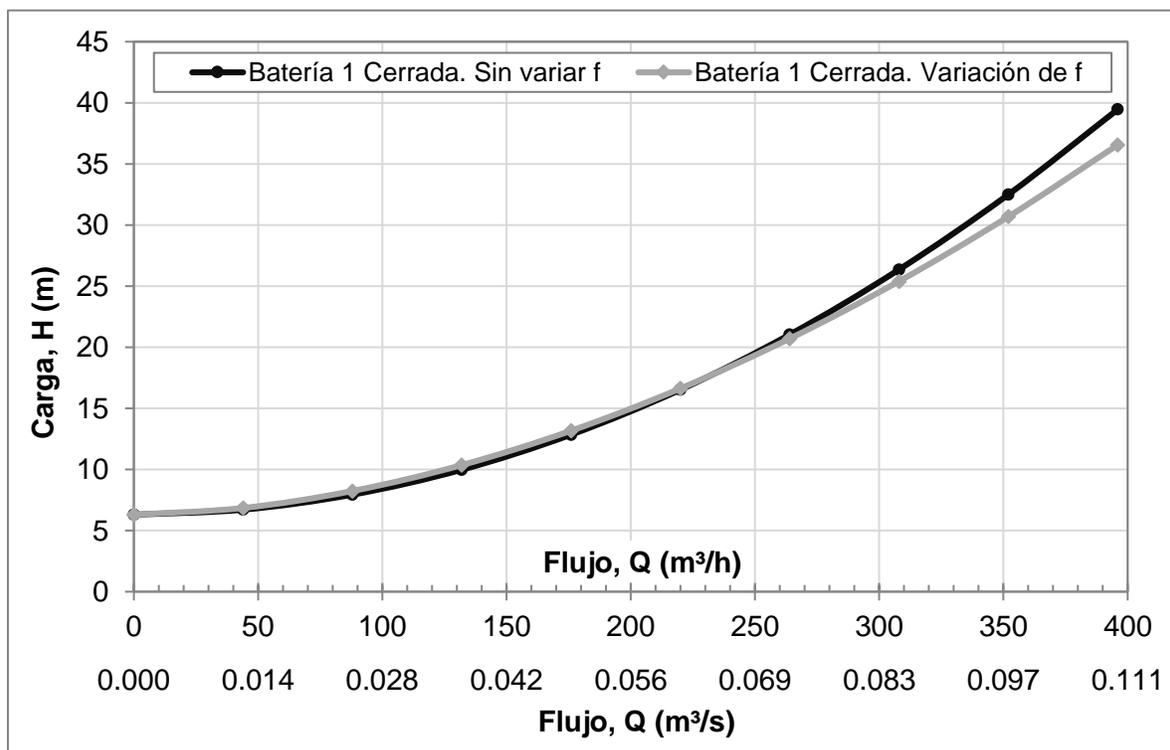
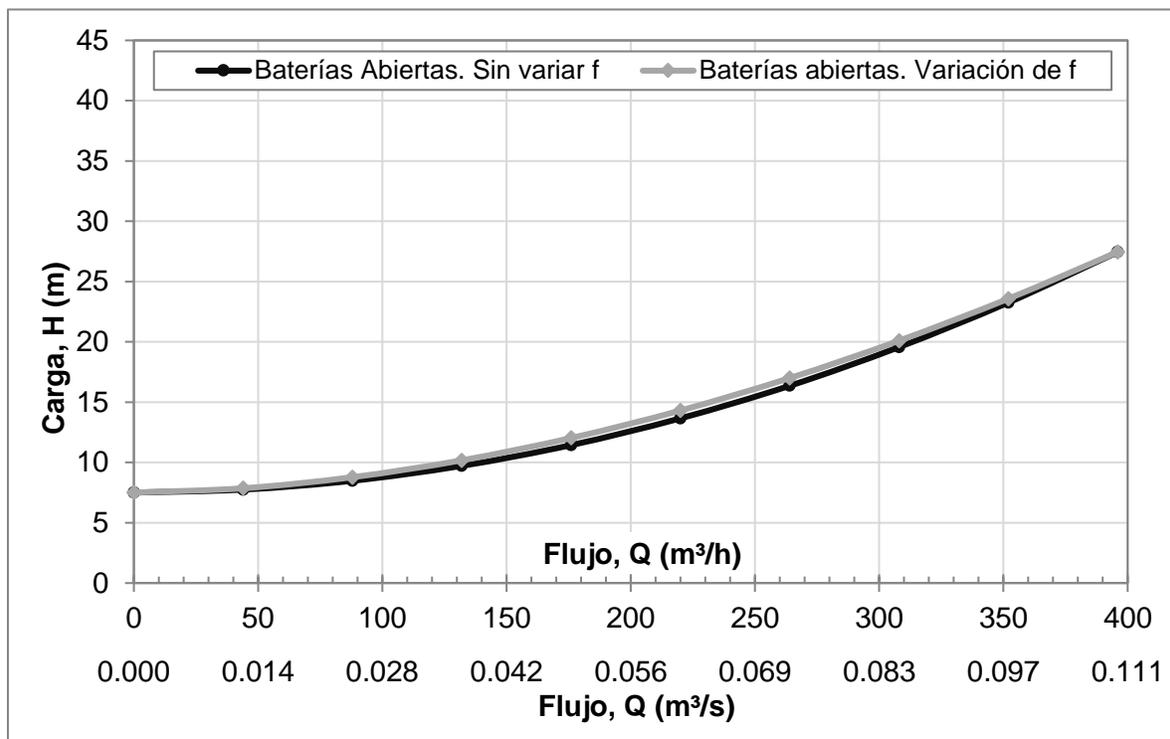
Resistencia Hidráulica	Vista CAD	Tramo AA'		Tramo AH		Tramo AB		Tramo B1		Tramo BC		Tramo G7	
		Cant.	k	Cant.	k	Cant.	k	Cant.	k	Cant.	k	Cant.	k
codo 90°		5	2,1	2	0,84	1	0,42	0	0	0	0	1	0,42
codo 45°		0	0	5	1,12	1	0,224	0	0	0	0	0	0
TE (flujo directo)		0	0	1	0,28	0	0	0	0	1	0,28	1	0,28
TE (flujo desviado)		0	0	0	0	1	0,84	1	0,84	0	0	0	0
válvula de compuerta		1	0,112	1	0,112	1	0,112	0	0	0	0	0	0
válvula de mariposa		0	0	0	0	0	0	1	0,63	0	0	1	0,63
Suma Total		6	2,212	9	2,352	4	1,596	2	1,47	1	0,28	3	1,33

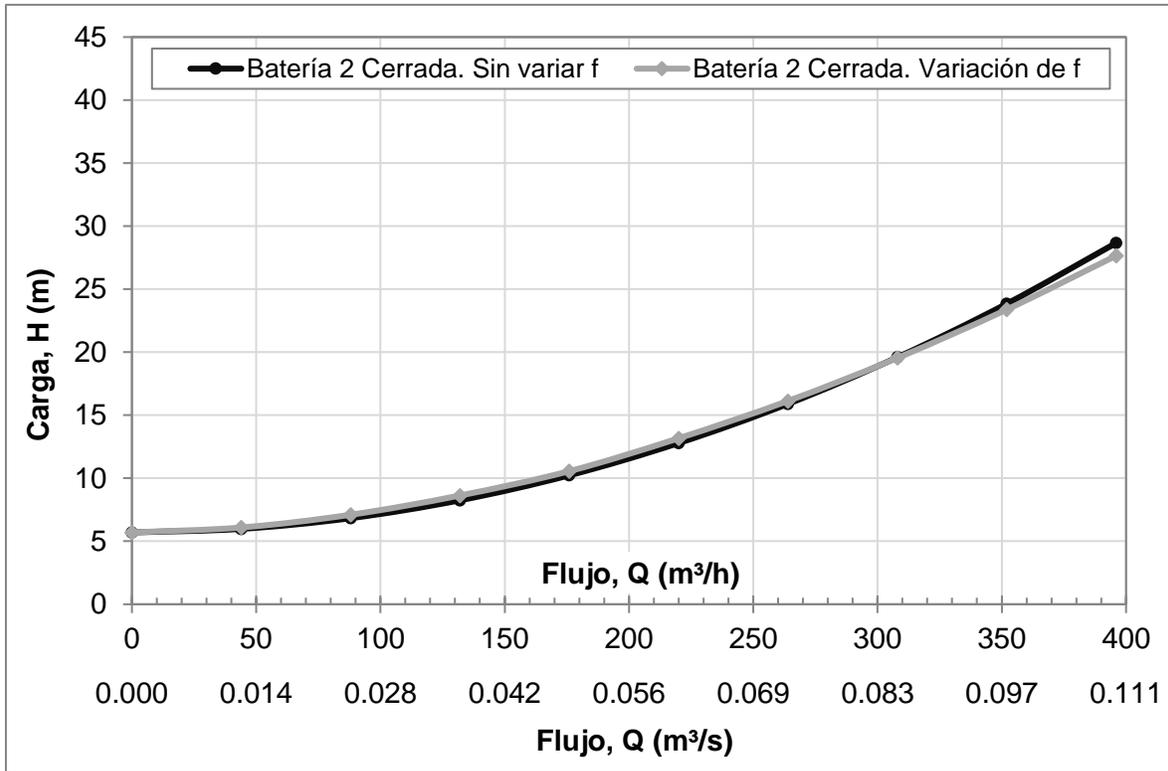
$$\Sigma k_{B1} = \Sigma k_{C2} = \Sigma k_{D3} = \Sigma k_{E4} = \Sigma k_{F5} = \Sigma k_{G6} = \Sigma k_{H8} = \Sigma k_{I9} = \Sigma k_{J10} = \Sigma k_{K11} = \Sigma k_{L12} = \Sigma k_{M13} = 1,47$$

$$\Sigma k_{G7} = \Sigma k_{M14} = 1,33$$

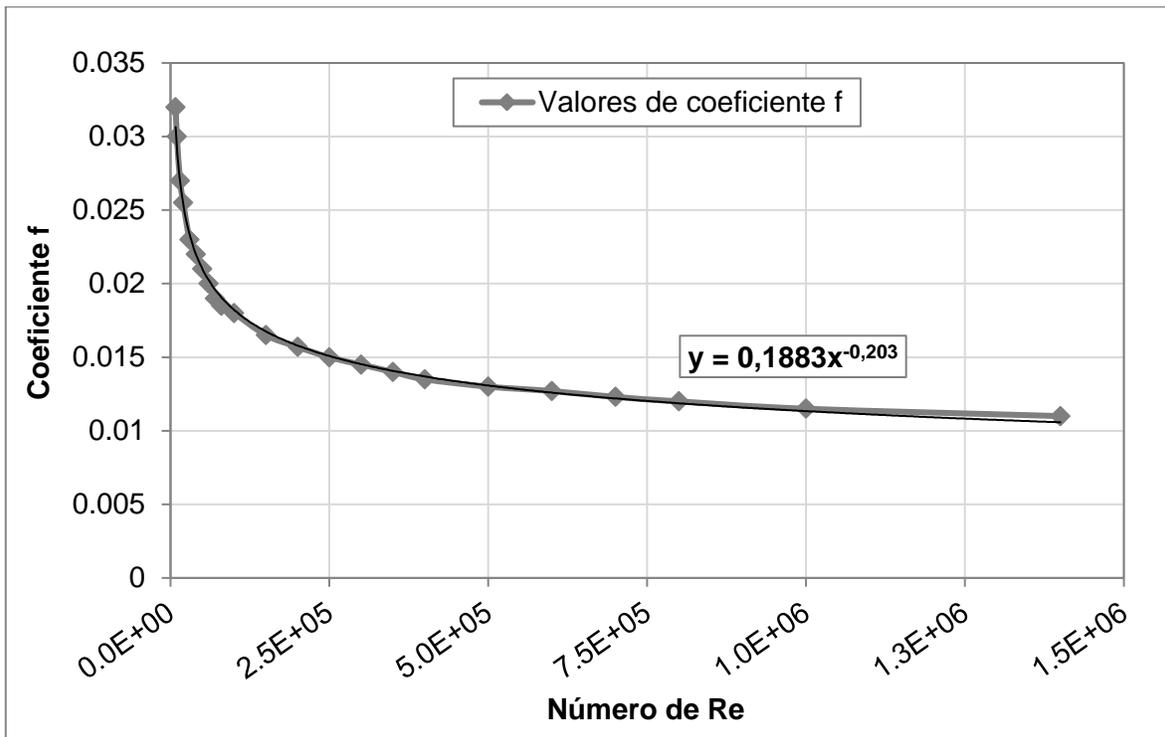
$$\Sigma k_{BC} = \Sigma k_{CD} = \Sigma k_{DE} = \Sigma k_{EF} = \Sigma k_{FG} = \Sigma k_{HI} = \Sigma k_{IJ} = \Sigma k_{JK} = \Sigma k_{KL} = \Sigma k_{LM} = 0,28$$

Anexo 9- Comparación de las curvas características del sistema para diferentes valores del coeficiente f





Anexo 10- Valores del coeficiente f para distintos Número de Re en tuberías de PVC (extraídos del Diagrama de Moody). Fuente: Elaboración propia



Anexo 11- Datos proporcionados por el fabricante en la chapa del motor. Fuente: Elaboración propia

Voltaje Δ/Y	Frecuencia (Hz)	Potencia (kW)	Frecuencia de giro (rpm)	Corriente Δ/Y	$\cos \varphi$
380/660	50	45	1 470	83,4/48,0	0,88
400/690	50	45	1 475	80,7/46,8	0,86
415/-	50	45	1 475	79,5/-	0,84
440/-	60	53	1 770	84,6/-	0,88
460/-	60	53	1 770	81,6/-	0,87

Anexo 12- Intervalos de velocidades específicas para distintos tipos de bombas. Fuente: (Ramos, 1995)

Tipos de bomba	Intervalos de n_s
Rotatorias y de pistones	<40
De remolino	entre 10 y 40
Centrífugas	entre 40 y 300
Mixtas	entre 300 y 600
Axiales	entre 600 y 1 200

Anexo 13- Valores de carga y eficiencia para diferentes variaciones de flujo según la metodología de Karassik. Fuente: Elaboración propia

Var. Capacidad	Coef. Carga (%)	Coef. Efic. (%)	$Q(m^3/h)$	$H (m)$	$\eta_h (%)$
Al cierre	114	0	0	51,30	0
Al 25%	114	46	54	51,30	36,80
Al 50%	113	77	108	50,85	61,60

AI 75%	109	95	162	49,05	76,00
AI 100%	100	100	216	45,00	80,00
AI 110%	95	99	237,6	42,75	79,20

Anexo 14- Coeficientes de flujo y de carga utilizados. Fuente: Elaboración propia

$Q(m^3/s)$	ϕ	Ψ_{t_∞}	Ψ_{t_D}	Ψ_D	Ψ	Ψ_R	Ψ_C
0	0,000	1,000	0,820	0,763	0,618	0,000	0,203
36	0,041	0,932	0,764	0,711	0,613	0,001	0,150
72	0,082	0,863	0,708	0,659	0,599	0,004	0,106
108	0,123	0,795	0,652	0,606	0,575	0,008	0,069
144	0,164	0,726	0,596	0,554	0,543	0,013	0,040
180	0,206	0,658	0,540	0,502	0,503	0,018	0,019
216	0,247	0,589	0,484	0,450	0,454	0,024	0,006
252	0,288	0,521	0,427	0,398	0,399	0,028	0,000
288	0,329	0,453	0,371	0,345	0,337	0,032	0,003
324	0,370	0,384	0,315	0,293	0,268	0,035	0,013
360	0,411	0,316	0,259	0,241	0,193	0,035	0,031
396	0,452	0,247	0,203	0,189	0,113	0,033	0,057

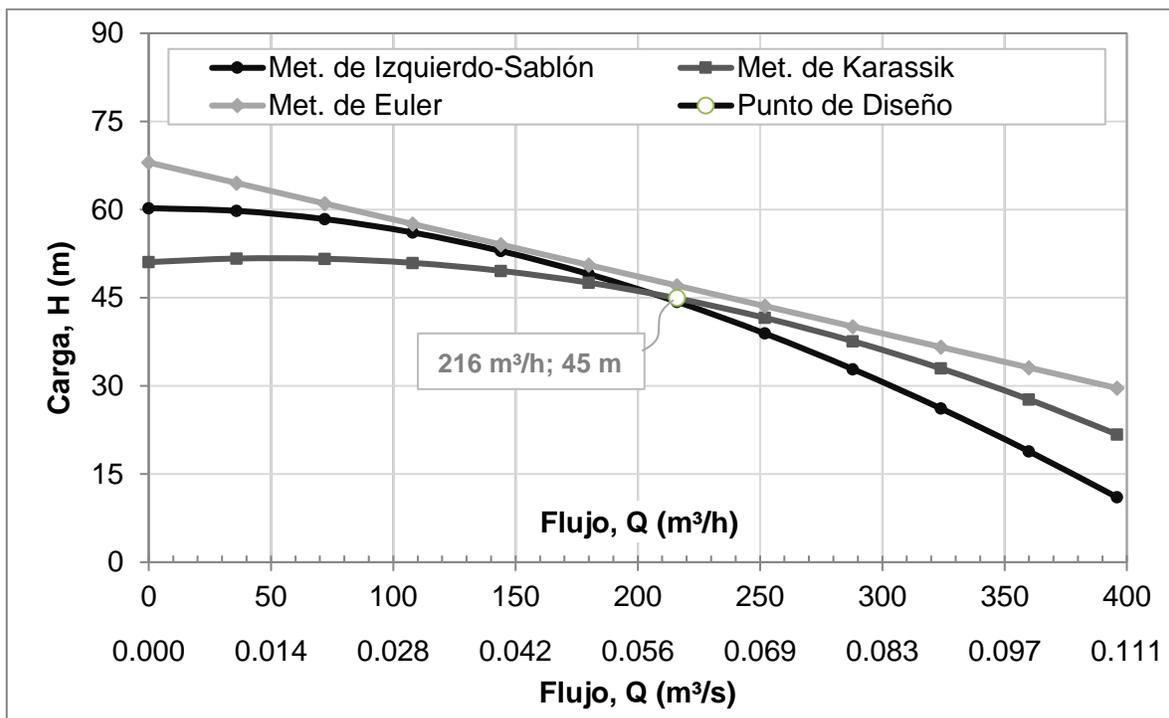
Anexo 15- Transición de las condiciones ideales a las reales para un impelente.

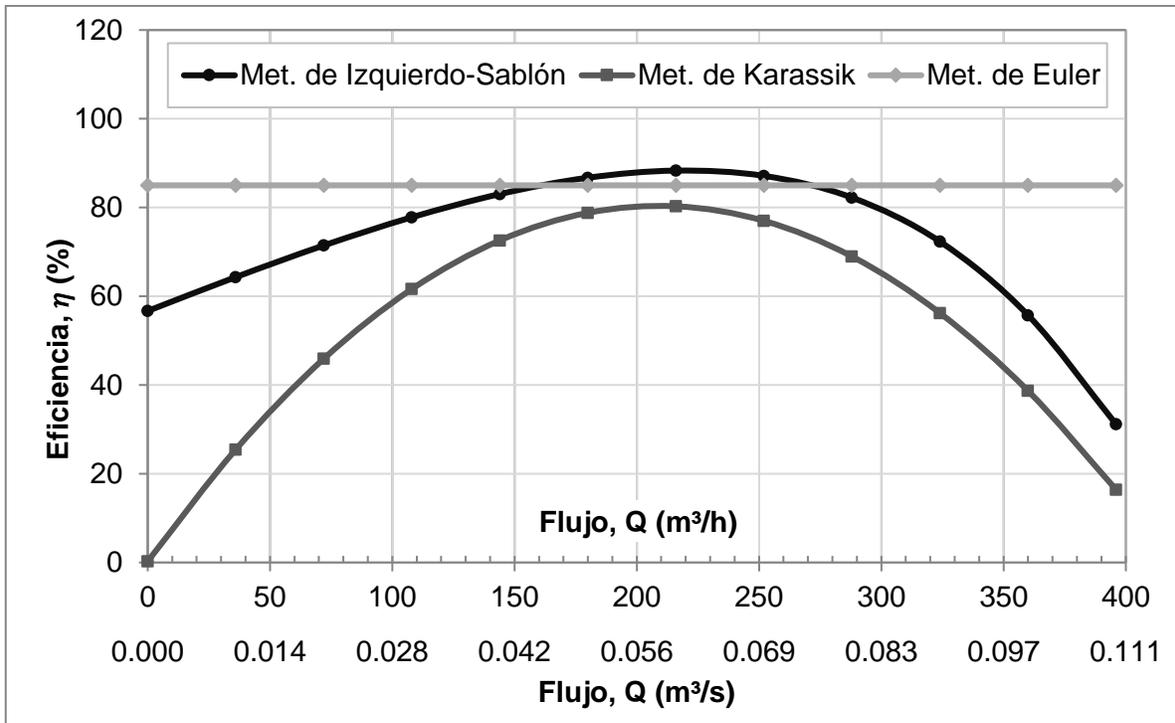
Fuente: Elaboración propia

$Q(m^3/s)$	$h_R (m)$	$h_C (m)$	$H_{t_\infty} (m)$	$H_{t_D} (m)$	$H (m)$
0	0,000	9,885	48,76	40,00	30,12
36	0,050	7,329	45,43	37,27	29,89

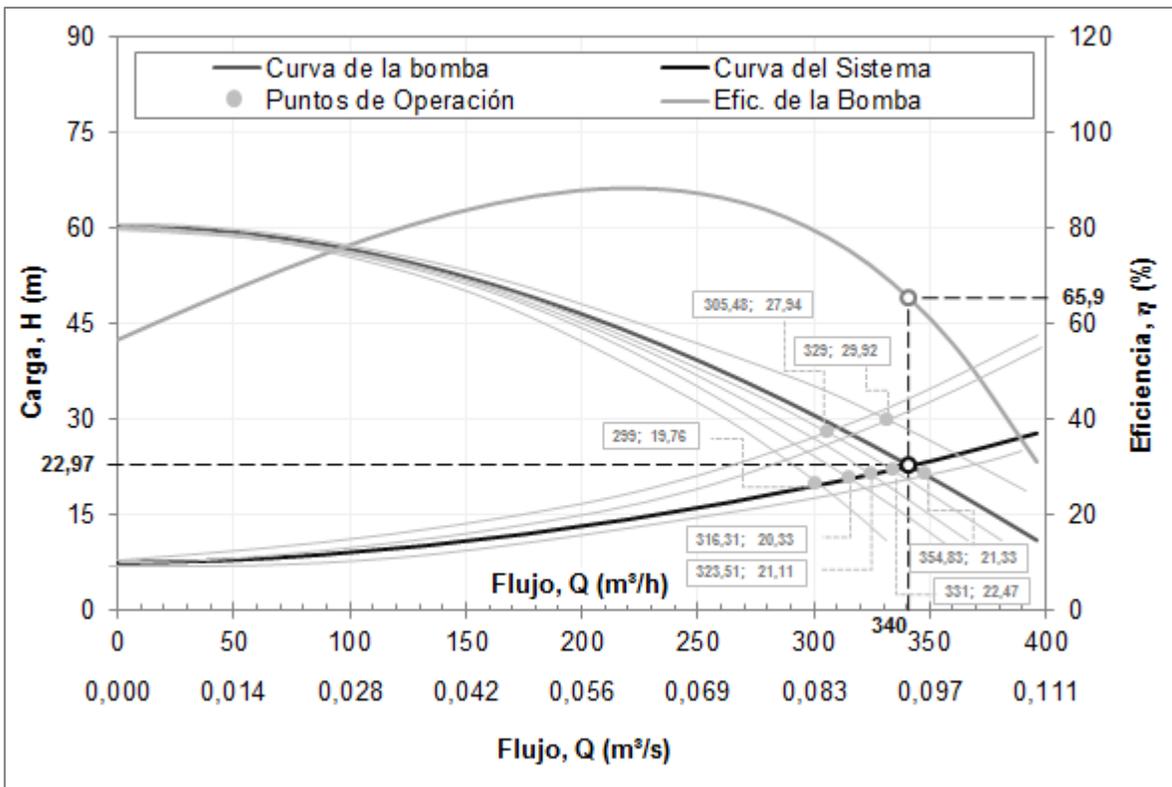
72	0,187	5,155	42,09	34,53	29,19
108	0,386	3,363	38,75	31,79	28,04
144	0,628	1,952	35,42	29,06	26,48
180	0,889	0,922	32,08	26,32	24,51
216	1,147	0,274	28,75	23,58	22,16
252	1,380	0,008	25,41	20,84	19,46
288	1,565	0,122	22,07	18,11	16,42
324	1,682	0,619	18,74	15,37	13,07
360	1,706	1,496	15,40	12,63	9,43
396	1,617	2,755	12,06	9,90	5,52

Anexo 16- Errores de forma gráfica en las características de carga y rendimiento entre la metodología propuesta por Euler, Karassik e Izquierdo & Sablón. Fuente: Elaboración propia





Anexo 17- Puntos de operación del sistema para las mediciones realizadas con el flujómetro en la descarga de la bomba. Fuente: Elaboración propia



Anexo 18- Flujo requerido por demanda de OD promedio en un estanque de progenitores según el método de Arescurenaga. Fuente: Elaboración propia

En 1 hora		
$\Delta OD = 2 \text{ mg/l}$	$\longrightarrow Q_0 = 10,02 \text{ m}^3/\text{h}$	Se produce un recambio de $10,02 \text{ m}^3$ de agua (0,18 % del volumen del estanque).
$\Delta OD = 1 \text{ mg/l}$	$\longrightarrow Q_0 = 20,03 \text{ m}^3/\text{h}$	Se produce un recambio de $20,03 \text{ m}^3$ de agua (0,36 % del volumen del estanque).
En 4 horas		
$\Delta OD = 2 \text{ mg/l}$	$\longrightarrow Q_0 = 40,06 \text{ m}^3/\text{h}$	Se produce un recambio de $160,2 \text{ m}^3$ de agua (2,9 % del volumen del estanque).
En 9 horas		
$\Delta OD = 5 \text{ mg/l}$	$\longrightarrow Q_0 = 36,05 \text{ m}^3/\text{h}$	Se produce un recambio de $324,5 \text{ m}^3$ de agua (5,9 % del volumen del estanque).

Anexo 19- Equipamiento utilizado para la medición de las variables asociadas al proceso de oxigenación en el banco de progenitores. Fuente: Elaboración propia

a) Oxímetro digital YSI 55™



Este es un medidor digital, robusto, basado en microprocesador, con la sonda de Oxígeno Disuelto unida directamente al instrumento. El sistema despliega simultáneamente mediciones de temperatura en $^{\circ}\text{C}$ y Oxígeno Disuelto en mg/l . La sonda puede operar en agua dulce, agua de mar o agua contaminada, en un

rango de temperatura desde -5°C hasta 45°C y a una profundidad entre 0 y 7,5 m (en dependencia de la longitud del cable).

b) Flujómetro digital por ultrasonido PCE-TDS 100



Este flujómetro está diseñado para medir la velocidad de fluidos que circulan por un conducto. Utiliza dos transductores, ambos funcionan como transmisores y receptores de ultrasonidos. Una vez configurado el flujómetro e instalados los transductores a la distancia calculada por el software del equipo, este es capaz de proporcionar la velocidad y flujo del fluido transportado.

c) Microscopio triocular Euromex modelo Bio-Blue.lab 1153-Pli



Este es un microscopio para objetivos planos corregidos al infinito 4x, 10x S40x y S-100x; con tubos portaoculares inclinados 30° y giratorio 360°.

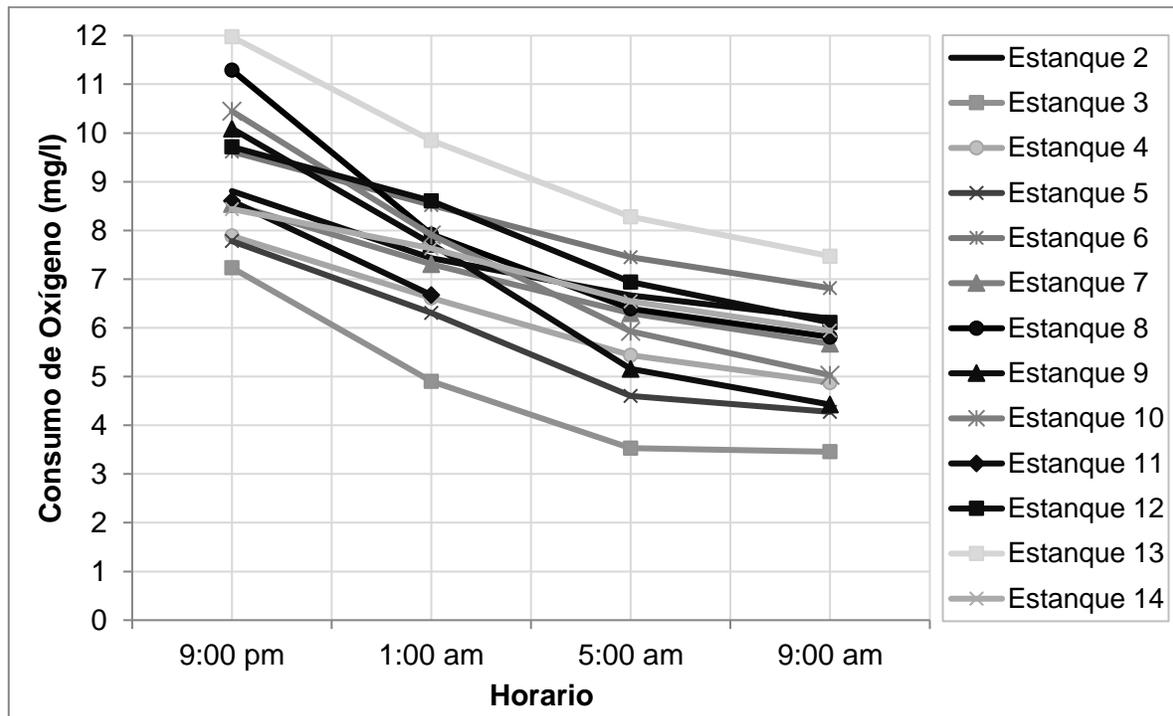
d) Anemómetro de Molinete testo 410-1



El Anemómetro de Molinete testo 410-1 modelo 05604101 mide la velocidad del viento, así como la temperatura; con rangos desde 0,4 hasta 20 m/s y -10 hasta 50 °C, respectivamente.

Anexo 20- Mediciones realizadas de OD para el día 21 de Noviembre de 2018.

Fuente: Elaboración propia



Anexo 21- Mediciones de flujo ingresado a cada estanque y pérdidas ocurridas.

Fuente: Elaboración propia

	Mediciones de flujo (m ³ /h)								
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
<i>Q_{fuga}</i>	17	10	7	40	61	7	29	28	31

Leyenda:

- (1) Día 12 de Octubre de 2018 a las 09:00 PM
- (2) Día 13 de Octubre de 2018 a las 01:00 AM
- (3) Día 13 de Octubre de 2018 a las 05:00 AM
- (4) Día 19 de Octubre de 2018 a las 01:00 AM
- (5) Día 22 de Octubre de 2018 a las 01:00 AM
- (6) Día 24 de Octubre de 2018 a las 09:00 PM
- (7) Día 25 de Octubre de 2018 a las 01:00 AM
- (8) Día 28 de Octubre de 2018 a las 09:00 AM
- (9) Día 29 de Octubre de 2018 a las 01:00 AM

Estanque No.	Mediciones de flujo (m ³ /h)								
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
1	28	0	77	54	28	0	39	51	39
2	28	0	66	0	0	0	0	0	0
3	14	0	30	25	32	0	27	31	24
4	38	0	13	14	8	0	27	19	15
5	10	0	7	29	27	0	33	39	30
6	29	0	5	27	15	0	34	18	14
7	25	0	6	34	51	0	0	25	19
8	26	56	65	14	5	16	26	22	21
9	25	21	35	23	18	23	5	21	22
10	0	0	24	32	23	71	6	30	46

11	19	20	13	0	55	141	77	9	12
12	39	39	7	17	6	9	10	12	23
13	43	169	3	37	22	43	20	39	42
14	0	0	4	10	9	26	11	17	24

Anexo 22- Biomasa y Días/ciclo para los días 19 de Octubre y 02 de Noviembre de 2018. Fuente: (Alarcón, 2018)

Estanque No.	día 19/10/2018				día 02/11/2018			
	Días/ciclo (días)	Peso (g)	Cantidad	Biomasa (kg/ha)	Días/ciclo (días)	Peso (g)	Cantidad	Biomasa (kg/ha)
1	212	39,6	2 326	236,2	226	42,5	2 267	247,0
2	-	-	-	-	-	-	-	-
3	212	41,5	2 326	247,5	226	43,4	2 267	252,3
4	73	15,4	2 925	115,5	87	18,0	2 852	131,6
5	170	35,8	2 480	227,7	184	38,3	2 418	237,5
6	61	9,2	31 000	731,3	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-

Anexo 23- Vista del zooplancton y fitoplancton en las mediciones realizadas. Fuente: Elaboración propia



Zooplancton (del tipo copépodo)



AMPHORA



THALASIOTRHX



TETRASELMIS



NAVICULA



CHAETOCERO

Fitoplancton

Anexo 24- Mediciones de fitoplancton y zooplancton para el día 12 de Diciembre de 2018 en la batería 2. Fuente: Elaboración propia

Estanque No.	CH	TH	AM	NA	TETRA	Nivel Fitoplancton (cel/ml)	Nivel Zooplancton (org/l)
8	0	7,5	12,5	0	2,5	22,5	30
9	0	7,5	0	20	0	27,5	13
10	0	0	5	15	0	20	37
11	0	2,5	0	30	0	32,5	22
12	-	-	-	-	-	-	-
13	0	0	0	5	0	5	19
14	0	5	0	20	0	25	23

Leyenda:

CH: CHAETOCERO

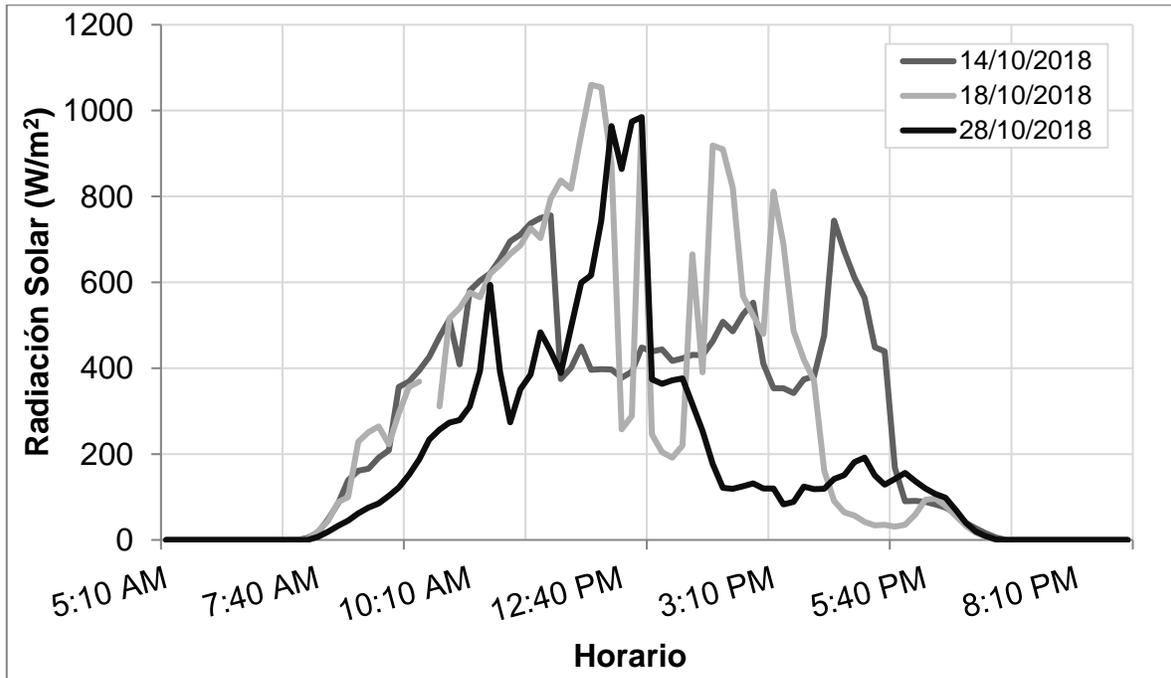
TH: THALASIOTRHX

AM: AMPHORA

NA: NAVICULA

TETRA: TETRASELMIS

Anexo 25- Radiación Solar para los días 14, 18 y 28 de Octubre de 2018. Fuente: (INSMET, 2018)



Anexo 26- Resumen estadístico para la ΔOD . Fuente: Elaboración propia

a) Para los grupos horarios

Grupo horario	Recuento	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Mínimo	Máximo	Rango
09:00PM - 01:00AM	81	-1,8358	0,701129	-38,192%	-3,54	-0,74	2,8
01:00AM - 05:00AM	70	-1,34871	0,671477	-49,786%	-4,05	-0,31	3,74
05:00AM - 09:00AM	48	-0,723958	0,519757	-71,794%	-2,05	0,24	2,29
09:00AM - 01:00PM	33	3,19394	1,12622	35,261%	1,39	6,47	5,08
01:00PM - 05:00PM	33	1,92848	0,972353	50,421%	0,71	4,38	3,67
05:00PM - 09:00PM	33	-2,11364	1,2927	-61,160%	-7,16	-0,56	6,6
Total	298	-0,599228	1,95291	-325,904%	-7,16	6,47	13,63

b) Para los casos en estudio

Casos en estudio	Recuento	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Mínimo	Máximo	Rango
caso 1	199	-1,39628	0,780563	-55,903%	-4,05	0,24	4,29
caso 2	99	1,00293	2,53855	253,113%	-7,16	6,47	13,63
Total	298	-0,599228	1,95291	-325,904%	-7,16	6,47	13,63

Casos en estudio	Sesgo estandarizado	Curtosis estandarizada
caso 1	-1,22993	1,64142
caso 2	-1,19286	-0,351396

Anexo 27- Resumen estadístico para las variables asociadas a la oxigenación. Fuente: Elaboración propia

a) Para caso 1

Variable	Recuento	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Mínimo	Máximo	Rango
Días/ciclo	199	133,573	66,2191	49,5753%	16,0	264,0	248,0
Biomasa	199	239,268	181,951	76,0448%	65,32	1 044,69	979,37
Nivel Zooplancton	199	19,8241	6,3193	31,8768%	11,0	37,0	26,0
Nivel Fitoplancton	199	9,43467	6,71108	71,1321%	0,0	27,5	27,5
Temperatura Agua	199	27,0896	1,95217	7,20633%	22,45	29,75	7,3
Radiación Solar	199	22,8779	45,0317	196,835%	0,0	118,3	118,3
Velocidad Viento	199	1,62226	0,770485	47,4945%	0,54	2,84	2,3
Volumen Recambio	199	75,1236	50,7196	67,5149%	0,0	284,0	284,0
Total	1 592	66,1016	105,798	160,054%	0,0	1 044,69	1 044,69

b) Para caso 2

Variable	Recuento	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Mínimo	Máximo	Rango
Días/ciclo	99	135,939	69,5532	51,1649%	27,0	257,0	230,0
Biomasa	99	260,519	183,292	70,3566%	106,82	949,3	842,48
Nivel Zooplancton	99	19,9394	8,87995	44,5347%	5,0	51,0	46,0
Nivel Fitoplancton	99	9,64646	6,42867	66,6428%	0,0	25,0	25,0
Temperatura Agua	99	0,689293	1,59701	231,688%	-1,77	3,2	4,97
Radiación Solar	99	332,288	226,87	68,2752%	21,2	660,5	639,3
Velocidad Viento	99	2,61111	1,1533	44,1687%	1,14	4,62	3,48
Total	693	108,805	170,632	156,824%	-1,77	949,3	951,07

Anexo 28- Modelos de regresión para caso 1 y modelo auxiliar en la Prueba de Contraste de White. Fuente: Elaboración propia

a) Modelo lineal

```

model = Linear regression model:
      y ~ 1 + x1 + x2 + x3 + x4 + x5 + x6 + x7 + x8
Estimated Coefficients:

```

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	0.74893	1.0241	0.7313	0.4655
x1	0.0002562	0.00092146	0.27804	0.78129
x2	6.3553e-05	0.00025058	0.25363	0.80006
x3	-0.030451	0.010573	-2.88	0.0044328
x4	-0.041126	0.0093226	-4.4114	1.718e-05
x5	-0.043375	0.033301	-1.3025	0.19432
x6	0.0055918	0.0011251	4.9699	1.4901e-06
x7	-0.15966	0.074678	-2.1379	0.0338
x8	0.0013815	0.00095602	1.4451	0.55009

Number of observations: 199, Error degrees of freedom: 190
 Root Mean Squared Error: 0.593
 R-squared: 0.699, Adjusted R-Squared 0.423
 F-statistic vs. constant model: 19.1, p-value = 5.71e-21

b) Modelo con interacción

```

model = Linear regression model:
      y ~ [Linear formula with 37 terms in 8 predictors]
Estimated Coefficients:

```

	Estimate	SE	tStat	pValue		Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	6.1294	4.7217	1.2981	0.19609					
x1	0.028804	0.027366	1.0526	0.29411	x3:x6	-0.00024973	0.00025027	-0.99788	0.31983
x2	0.0050545	0.0076709	0.65892	0.51089	x3:x7	0.039369	0.021168	1.8599	0.06472
x3	-0.17897	0.27186	-0.65831	0.51127	x3:x8	9.5547e-05	0.0002648	0.36082	0.7187
x4	-0.14327	0.25595	-0.55975	0.57642	x4:x5	0.0040423	0.0085052	0.47527	0.63523
x5	-0.23086	0.15948	-1.4476	0.14966	x4:x6	0.00087414	0.00021421	4.0808	7.0299e-05
x6	-0.044356	0.071438	-0.62089	0.53554	x4:x7	-0.0071787	0.017639	-0.40698	0.68456
x7	-3.1647	1.5676	-2.0188	0.045158	x4:x8	-0.00027212	0.00026535	-1.0255	0.30665
x8	0.016594	0.022533	0.73643	0.46253	x5:x6	0.0016244	0.0025066	0.64806	0.51786
x1:x2	-1.9822e-05	1.076e-05	-1.8421	0.067285	x5:x7	0.099821	0.054231	1.8407	0.067497
x1:x3	1.1455e-05	0.00018773	0.061021	0.95142	x5:x8	-0.00058457	0.00075343	-0.77588	0.43895
x1:x4	2.2251e-06	0.00019714	0.011287	0.99101	x6:x7	0.00091877	0.0058271	0.15767	0.87491
x1:x5	-0.00079699	0.00089567	-0.88982	0.37488	x6:x8	2.9734e-05	3.0586e-05	0.97215	0.33242
x1:x6	1.4311e-05	2.606e-05	0.54916	0.58365	x7:x8	-0.00075534	0.0014549	-0.51916	0.60436
x1:x7	-0.0024482	0.0015149	-1.6161	0.10803					
x1:x8	1.3516e-05	1.8688e-05	0.72325	0.47057					
x2:x3	-6.6364e-05	0.00012447	-0.53318	0.59464					
x2:x4	8.704e-05	0.00010019	0.86876	0.38626					
x2:x5	-0.00010372	0.00025025	-0.41448	0.67907					
x2:x6	-6.1049e-06	8.9529e-06	-0.68189	0.49629					
x2:x7	-0.0004124	0.00042787	-0.96384	0.33656					
x2:x8	6.9197e-06	6.4173e-06	1.0783	0.2825					
x3:x4	-0.0007741	0.0017915	-0.43209	0.66625					
x3:x5	0.0036736	0.0083459	0.44017	0.6604					

Number of observations: 199, Error degrees of freedom: 162
 Root Mean Squared Error: 0.529
 R-squared: 0.845, Adjusted R-Squared 0.775
 F-statistic vs. constant model: 7.47, p-value = 6.54e-20

c) Modelo cuadrático

model = Linear regression model:
y ~ [Linear formula with 45 terms in 8 predictors]

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue		Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	75.147	19.994	3.7586	0.0002421					
x1	0.021676	0.024055	0.90111	0.36893	x4:x5	-0.000371	0.0075136	-0.049378	0.96068
x2	-0.0049523	0.0068273	-0.72537	0.46933	x4:x6	0.00083674	0.00018259	4.5825	9.4328e-06
x3	-0.29382	0.25161	-1.1678	0.2447	x4:x7	-0.0028267	0.015253	-0.18532	0.85322
x4	-0.049326	0.22306	-0.22113	0.82528	x4:x8	-0.00012084	0.00022766	-0.5308	0.59632
x5	-4.7113	1.3036	-3.614	0.00040782	x5:x6	-0.00019709	0.0022813	-0.086393	0.93127
x6	0.068651	0.067616	1.0153	0.31155	x5:x7	0.28077	0.081545	3.4431	0.00074084
x7	-8.4296	2.6059	-3.2348	0.0014898	x5:x8	0.0016891	0.00085034	1.9864	0.748768
x8	-0.049291	0.02575	-1.9142	0.557446	x6:x7	-0.0044965	0.0052443	-0.85741	0.39255
x1:x2	-5.7625e-06	1.1333e-05	-0.50848	0.61184	x6:x8	5.8777e-05	2.7972e-05	2.1013	0.337243
x1:x3	-3.4061e-05	0.00027464	-0.12402	0.90146	x7:x8	0.002362	0.0018854	1.2528	0.21218
x1:x4	-8.4449e-05	0.00021933	-0.38504	0.70074	x1^2	1.5743e-05	1.7809e-05	0.88397	0.37809
x1:x5	-0.00074479	0.00079294	-0.93928	0.34906	x2^2	-2.9828e-07	8.7692e-07	-0.34014	0.73421
x1:x6	-4.9958e-06	2.2654e-05	-0.22053	0.82575	x3^2	-4.8198e-05	0.0016015	-0.030096	0.97603
x1:x7	-0.0020889	0.0013696	-1.5251	0.12928	x4^2	-0.00092837	0.0014948	-0.62107	0.53547
x1:x8	1.3124e-05	1.771e-05	0.74108	0.45977	x5^2	0.072622	0.0216	3.3621	0.00097582
x2:x3	-6.2377e-05	0.00011132	-0.56032	0.57607	x6^2	-0.00053098	7.7715e-05	-6.8324	1.8258e-10
x2:x4	4.6076e-05	9.31e-05	0.49491	0.62137	x7^2	0.080107	0.11834	0.6769	0.49949
x2:x5	0.00022842	0.00022366	1.0213	0.30871	x8^2	-3.2413e-05	1.2387e-05	-2.6168	0.0997599
x2:x6	-3.9256e-06	7.8223e-06	-0.50185	0.61649					
x2:x7	-0.00026885	0.00040904	-0.65728	0.51198					
x2:x8	7.8433e-06	5.8109e-06	1.3497	0.17908					
x3:x4	0.001685	0.0021427	0.78638	0.43285					
x3:x5	0.0075337	0.007774	0.9691	0.33402					
x3:x6	-8.7491e-05	0.00021692	-0.40333	0.68727					
x3:x7	0.030184	0.018267	1.6524	0.1005					
x3:x8	0.00016848	0.00024194	0.69638	0.48724					

Number of observations: 199, Error degrees of freedom: 154
Root Mean Squared Error: 0.447
R-squared: 0.929, Adjusted R-Squared 0.863
F-statistic vs. constant model: 10.2, p-value = 6.77e-28

d) Modelo auxiliar

model = Linear regression model:
y ~ [Linear formula with 45 terms in 8 predictors]

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue		Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	-10.062	12.247	-0.82162	0.41256					
x1	-0.014722	0.014735	-0.99914	0.31929	x3:x8	-0.00029019	0.0001482	-1.9581	0.052028
x2	0.0018993	0.004182	0.45415	0.65036	x4:x5	-0.00060175	0.0046024	-0.13075	0.89615
x3	0.15147	0.15412	0.98283	0.32723	x4:x6	-9.9385e-06	0.00011184	-0.08886	0.92931
x4	-0.046292	0.13663	-0.33881	0.73521	x4:x7	-0.0012489	0.0093429	-0.13367	0.89384
x5	0.71236	0.79853	0.89209	0.37373	x4:x8	0.0002376	0.00013945	1.7039	0.090418
x6	0.030736	0.041417	0.7421	0.45916	x5:x6	-0.0012637	0.0013974	-0.90434	0.36723
x7	-0.41068	1.5962	-0.25728	0.7973	x5:x7	0.023914	0.04995	0.47877	0.63278
x8	0.012185	0.015773	0.7725	0.441	x5:x8	-0.00039593	0.00052086	-0.76014	0.44833
x1:x2	-1.0723e-05	6.9416e-06	-1.5447	0.12448	x6:x7	0.00012368	0.0032123	0.038501	0.96934
x1:x3	0.00013515	0.00016822	0.80338	0.423	x6:x8	7.9381e-06	1.7134e-05	0.4633	0.6438
x1:x4	1.3022e-05	0.00013435	0.09693	0.92291	x7:x8	0.00058785	0.0011549	0.50902	0.61147
x1:x5	0.00070269	0.0004857	1.4467	0.15	x1^2	-2.557e-05	1.0909e-05	-2.344	0.020354
x1:x6	5.3167e-06	1.3876e-05	0.38316	0.70213	x2^2	-1.1723e-06	5.3715e-07	-2.1824	0.030597
x1:x7	0.00093365	0.00083895	1.1129	0.26749	x3^2	-0.00024377	0.00098098	-0.2485	0.80408
x1:x8	1.1465e-05	1.0848e-05	1.0569	0.2922	x4^2	-0.00050478	0.00091561	-0.55131	0.58222
x2:x3	-0.00011547	6.819e-05	-1.6933	0.092415	x5^2	-0.013854	0.013231	-1.0471	0.29671
x2:x4	6.8962e-05	5.7027e-05	1.2093	0.22841	x6^2	1.8156e-05	4.7603e-05	0.3814	0.70343
x2:x5	5.8904e-05	0.000137	0.42996	0.66782	x7^2	-0.033249	0.07249	-0.45867	0.64712
x2:x6	-1.1057e-06	4.7914e-06	-0.23077	0.8178	x8^2	-5.3759e-06	7.5872e-06	-0.70855	0.47968
x2:x7	-0.00014472	0.00025055	-0.57759	0.56439					
x2:x8	2.9619e-06	3.5594e-06	0.83212	0.40663					
x3:x4	0.0024519	0.0013125	1.8681	0.063642					
x3:x5	-0.0036332	0.0047618	-0.76299	0.44664					
x3:x6	-0.0001306	0.00013287	-0.98289	0.3272					
x3:x7	-0.01721	0.011189	-1.5381	0.12608					

Number of observations: 199, Error degrees of freedom: 154
Root Mean Squared Error: 0.274
R-squared: 0.258, Adjusted R-Squared 0.172
F-statistic vs. constant model: 1.94, p-value = 0.00172

Anexo 29- Resumen estadístico para los residuos del modelo cuadrático. Fuente: Elaboración propia

Recuento	199
Promedio	0,00714278
Desviación estándar	0,342344
Coefficiente de variación	4 792,86%
Mínimo	-1,0286
Máximo	0,9591
Rango	1,9877
Sesgo estandarizado	-0,422772
Curtosis estandarizada	1,25897

Anexo 30- Modelos de regresión para caso 2 y modelo auxiliar en la Prueba de Contraste de White. Fuente: Elaboración propia

a) Modelo lineal

```

model = Linear regression model:
      y ~ 1 + x1 + x2 + x3 + x4 + x5 + x6 + x7

Estimated Coefficients:

```

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	-2.2985	0.49963	-4.6005	1.3585e-05
x1	0.0019009	0.0030229	0.62883	0.53103
x2	0.00050558	0.0007829	0.64578	0.52005
x3	-0.0023405	0.024068	-0.097245	0.92275
x4	0.021864	0.031159	0.70169	0.48466
x5	0.59809	0.17242	3.4687	0.00080086
x6	0.0058835	0.0014455	4.0703	9.9918e-05
x7	0.14564	0.18125	0.80349	0.42378

```

Number of observations: 99, Error degrees of freedom: 91
Root Mean Squared Error: 1.25
R-squared: 0.777, Adjusted R-Squared 0.759
F-statistic vs. constant model: 45.2, p-value = 6.1e-27

```

b) Modelo con interacción

model = Linear regression model:
y ~ [Linear formula with 29 terms in 7 predictors]

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue		Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	-1.3194	1.2281	-1.0743	0.28636					
x1	-0.0023058	0.0093095	-0.24768	0.80511	x3:x5	-0.077656	0.04182	-1.8569	0.067528
x2	-0.0015133	0.0023993	-0.63074	0.53027	x3:x6	0.0010034	0.00032002	3.1354	0.0025088
x3	-0.071819	0.07413	-0.96882	0.33597	x3:x7	-0.063305	0.03532	-1.7923	0.0774
x4	0.051692	0.094323	0.54803	0.58542	x4:x5	0.051229	0.040305	1.271	0.20793
x5	0.39381	0.66353	0.59351	0.55475	x4:x6	-0.00056265	0.0003806	-1.4783	0.14381
x6	0.0059663	0.0042462	1.4051	0.16441	x4:x7	0.040063	0.042059	0.95254	0.3441
x7	1.0955	0.61788	1.773	0.080585	x5:x6	-0.0013509	0.00049719	-2.7171	0.0082915
x1:x2	-9.6961e-06	1.8596e-05	-0.52142	0.60372	x5:x7	0.17652	0.22585	0.78157	0.4371
x1:x3	-9.7891e-05	0.0002976	-0.32893	0.74319	x6:x7	-0.0033731	0.0011507	-2.9314	0.0045556
x1:x4	0.00019759	0.00036836	0.5364	0.59338					
x1:x5	0.0058317	0.0023836	2.4466	0.016936					
x1:x6	-2.9388e-05	2.1767e-05	-1.3501	0.18134	Number of observations: 99, Error degrees of freedom: 70				
x1:x7	0.0043075	0.0027878	1.5451	0.12682	Root Mean Squared Error: 0.761				
x2:x3	-0.00011261	0.00013917	-0.80914	0.42117	R-squared: 0.936, Adjusted R-Squared 0.91				
x2:x4	0.00014439	0.0001914	0.75441	0.45314	F-statistic vs. constant model: 36.4, p-value = 1.59e-31				
x2:x5	0.00062182	0.00059624	1.0429	0.30058					
x2:x6	-1.2342e-06	6.1059e-06	-0.20214	0.84039					
x2:x7	0.0012093	0.00076205	1.5869	0.11704					
x3:x4	-0.0012454	0.0028526	-0.43658	0.66376					

c) Modelo cuadrático

model = Linear regression model:
y ~ [Linear formula with 36 terms in 7 predictors]

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue		Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	-1.4875	1.519	-0.9793	0.33118					
x1	-0.0050709	0.01649	-0.30752	0.75946	x3:x7	-0.064035	0.036389	-1.7598	0.083304
x2	-0.002938	0.0041211	-0.71291	0.47853	x4:x5	0.052858	0.041849	1.2631	0.21122
x3	-0.085344	0.096237	-0.88681	0.37855	x4:x6	-0.00061081	0.00040043	-1.5254	0.13217
x4	0.1065	0.11362	0.93728	0.35219	x4:x7	0.043342	0.044042	0.98409	0.32884
x5	1.2068	0.85657	1.4089	0.16379	x5:x6	0.00050715	0.0059456	0.085298	0.93229
x6	-0.0011578	0.0068512	-0.16899	0.86634	x5:x7	-0.42528	0.6335	-0.67132	0.50447
x7	2.096	1.0631	1.9716	0.053046	x6:x7	0.0020692	0.0062176	0.3328	0.74039
x1:x2	1.1108e-05	3.0018e-05	0.37003	0.7126	x1^2	4.3291e-05	5.8863e-05	0.73545	0.4648
x1:x3	-0.00080759	0.00063136	-1.2791	0.20554	x2^2	1.7209e-06	2.3871e-06	0.72093	0.47362
x1:x4	0.00034293	0.0007792	0.44084	0.66084	x3^2	0.0046928	0.0042889	1.0942	0.27804
x1:x5	0.0057547	0.0025515	2.2554	0.027588	x4^2	0.0064766	0.0061466	1.0537	0.29605
x1:x6	-2.9673e-05	2.2766e-05	-1.3034	0.19719	x5^2	-0.032775	0.32513	-0.10081	0.92002
x1:x7	0.0038688	0.0029161	1.3267	0.1894	x6^2	-1.0892e-05	3.1679e-05	-0.34383	0.73212
x2:x3	-0.00018301	0.0001535	-1.1922	0.23764	x7^2	-0.47195	0.45542	-1.0363	0.30403
x2:x4	9.6261e-05	0.00021214	0.45377	0.65155					
x2:x5	0.00052901	0.00062085	0.85207	0.3974	Number of observations: 99, Error degrees of freedom: 63				
x2:x6	3.4593e-08	6.3895e-06	0.0054141	0.9957	Root Mean Squared Error: 0.774				
x2:x7	0.00095729	0.00080175	1.194	0.23695	R-squared: 0.94, Adjusted R-Squared 0.907				
x3:x4	-0.010064	0.011281	-0.89206	0.37576	F-statistic vs. constant model: 28.3, p-value = 3.35e-27				
x3:x5	-0.080029	0.04286	-1.8672	0.06623					
x3:x6	0.0010433	0.0003307	3.1549	0.0024611					

d) Modelo auxiliar

model = Linear regression model:
y ~ [Linear formula with 36 terms in 7 predictors]

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue		Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	-0.7401	0.96022	-0.77075	0.44373					
x1	-0.0018953	0.010424	-0.18182	0.85631	x3:x6	4.5436e-05	0.00020905	0.21734	0.82864
x2	0.0005671	0.0026052	0.21768	0.82838	x3:x7	-0.0044265	0.023003	-0.19243	0.84803
x3	0.022261	0.060837	0.36592	0.71565	x4:x5	0.021	0.026455	0.7938	0.43029
x4	-6.3036e-05	0.071827	-0.00087761	0.9993	x4:x6	-0.00017734	0.00025314	-0.70058	0.48614
x5	-0.30662	0.54148	-0.56626	0.57323	x4:x7	0.01344	0.027842	0.48272	0.63097
x6	0.0041592	0.004331	0.96033	0.34056	x5:x6	0.0020489	0.0037586	0.54512	0.58759
x7	0.57231	0.67204	0.8516	0.39766	x5:x7	0.077802	0.40047	0.19428	0.84658
x1:x2	-1.869e-06	1.8976e-05	-0.098494	0.92185	x6:x7	0.00016399	0.0039305	0.041723	0.96685
x1:x3	0.00023484	0.00039912	0.58839	0.55838	x1^2	-2.8595e-05	3.7211e-05	-0.76846	0.44509
x1:x4	0.00040191	0.00049176	0.81729	0.41684	x2^2	-3.4836e-07	1.509e-06	-0.23085	0.81818
x1:x5	-0.00054537	0.0016129	-0.33812	0.73639	x3^2	-0.00092195	0.0027112	-0.34005	0.73495
x1:x6	8.6169e-06	1.4392e-05	0.59874	0.55149	x4^2	-0.00382	0.0038856	-0.98312	0.32931
x1:x7	-0.00033491	0.0018434	-0.18168	0.85642	x5^2	-0.17969	0.20553	-0.87428	0.38529
x2:x3	-6.3901e-06	9.7034e-05	-0.065854	0.9477	x6^2	-1.1468e-05	2.0026e-05	-0.57267	0.56891
x2:x4	-6.072e-05	0.0001341	-0.45279	0.65226	x7^2	-0.10422	0.2879	-0.36199	0.71857
x2:x5	-0.0001676	0.00039247	-0.42704	0.67081					
x2:x6	3.6651e-06	4.0391e-06	0.9074	0.36766	Number of observations: 99, Error degrees of freedom: 63				
x2:x7	-0.00016782	0.00050683	-0.33113	0.74165	Root Mean Squared Error: 0.489				
x3:x4	0.0016086	0.0071316	0.22556	0.82228	R-squared: 0.358, Adjusted R-Squared 0.00158				
x3:x5	-0.016778	0.027094	-0.61925	0.53799	F-statistic vs. constant model: 1, p-value = 0.483				

Anexo 31- Elementos que evidencian el cumplimiento de los supuestos en el modelo de regresión para caso 2. Fuente: Elaboración propia

a) Resumen estadístico de residuos del modelo cuadrático

Recuento	99
Promedio	0,000040404
Desviación estándar	0,620494
Coefficiente de variación	1,53572E6%
Mínimo	-1,415
Máximo	1,595
Rango	3,01
Sesgo estandarizado	-0,410933
Curtosis estandarizada	-0,654915

b) Prueba de hipótesis para determinar homocedasticidad en el modelo

1) Formulación de la Hipótesis

$$H_0: \text{var}(e_i | x_1, x_2 \dots x_8) = \sigma^2 \text{ (homocedasticidad)}$$

$$H_1: \text{var}(e_i | x_1, x_2 \dots x_7) \neq \sigma^2 \text{ (heterocedasticidad)}$$

2) Nivel de significancia, $\alpha = 5 \%$

$$\chi_{crit}^2 = 49,802 \text{ (Para 35 términos regresores en el modelo auxiliar)}$$

3) Estadístico de prueba, $W = nR^2 \sim \chi_{calc}^2$

$$\text{Modelo auxiliar, } e_i^2 = f(x_1, x_2 \dots x_7)$$

$$W = 99 \cdot 0,358 = 35,442$$

$$\chi_{calc}^2 = 35,442 \rightarrow \alpha = 0,4474$$

4) Regla de decisión, $\chi_{calc}^2 > \chi_{crit}^2$, rechazo H_0

5) Toma de decisión

Dado que $\chi^2_{calc} < \chi^2_{crit}$ se acepta la hipótesis nula. Por tanto, se puede afirmar que existe homocedasticidad en el modelo.

c) Matriz de coeficientes de correlación entre variables explicativas

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
x_1	1,0000	-0,3544	0,7096	0,6486	-0,0028	-0,0129	-0,0058
x_2	-0,3544	1,0000	-0,0590	-0,0061	-0,0096	-0,0044	-0,0049
x_3	0,7096	-0,0590	1,0000	0,7405	-0,0141	-0,0020	0,0308
x_4	0,6486	-0,0061	0,7405	1,0000	0,0238	-0,0098	-0,0730
x_5	-0,0028	-0,0096	-0,0141	0,0238	1,0000	0,7755	0,0580
x_6	-0,0129	-0,0044	-0,0020	-0,0098	0,7755	1,0000	0,5450
x_7	-0,0058	-0,0049	0,0308	-0,0730	0,0580	0,5450	1,0000

d) Valores de VIF_i para las variables explicativas

Función de regresión	R_i^2	VIF_i
$x_1 = f(x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7)$	64,85	2,85
$x_2 = f(x_1, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7)$	23,69	1,31
$x_3 = f(x_1, x_2, x_4, x_5, x_6, x_7)$	65,61	2,91
$x_4 = f(x_1, x_2, x_3, x_5, x_6, x_7)$	62,79	2,69
$x_5 = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_6, x_7)$	78,75	4,71
$x_6 = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_7)$	75,35	4,06
$x_7 = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$	64,44	2,81

Anexo 32- Imágenes del sistema normal y el sistema con difusores. Fuente: Elaboración propia



Sistema normal



Sistema con difusores

Anexo 33- Resumen estadístico del diseño de experimento para ΔOD . Fuente: Elaboración propia

a) Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuad.	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Volumen de Recambio	3,06682	1	3,06682	15,32	0,0004
B:Tipo de Sistema	4,2781	1	4,2781	21,37	0,0000
C:Grupo Horario	0,367653	1	0,367653	1,84	0,1834

AA	0,379852	1	0,379852	1,90	0,1764
AB	1,74251	1	1,74251	8,70	0,0054
AC	0,666931	1	0,666931	3,33	0,0758
BC	0,607753	1	0,607753	3,04	0,0895
CC	0,420026	1	0,420026	2,10	0,1557
bloques	0,0266021	1	0,0266021	0,13	0,7175
Error total	7,60705	38	0,200185		
Total (corr.)	19,1633	47			

b) Efectos estimados

Efecto	Estimado	Error Estándar	V.I.F
promedio	-2,14995	0,137942	-
A:Volumen de Recambio	0,67825	0,173285	1,0
B:Tipo de Sistema	0,597083	0,129159	1,0
C:Grupo Horario	0,214375	0,158187	1,0
AA	0,400312	0,290608	1,0
AB	0,51125	0,173285	1,0
AC	0,387375	0,21223	1,0
BC	0,275625	0,158187	1,0
CC	0,396875	0,273988	1,0
bloque	0,0470833	0,129159	1,0