



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, AUTOMATIZACIÓN Y  
DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE  
FUNCIONAMIENTO DE UN AIREADOR DIFUSOR TORNADO  
PARA EL SECTOR CAMARONERO ”**

**Trabajo de titulación**

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar el grado académico de:

**INGENIERO MECÁNICO**

**AUTOR:**

**DANIEL ALEJANDRO ARIAS MONTERO**

Riobamba - Ecuador

2021



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, AUTOMATIZACIÓN Y  
DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE  
FUNCIONAMIENTO DE UN AIREADOR DIFUSOR TORNADO  
PARA EL SECTOR CAMARONERO ”**

**Trabajo de titulación**

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar el grado académico de:

**INGENIERO MECÁNICO**

**AUTOR: DANIEL ALEJANDRO ARIAS MONTERO**

**DIRECTOR: Ing. SÓCRATES MIGUEL AQUINO ARROBA**

Riobamba - Ecuador

2021

**© 2021, Daniel Alejandro Arias Montero**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.

Yo, Daniel Alejandro Arias Montero, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 19 de marzo del 2021

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Daniel Alejandro Arias Montero', with a long horizontal stroke extending to the right.

**Daniel Alejandro Arias Montero**

**230012214-6**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA**


**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación; tipo Proyecto Técnico **DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, AUTOMATIZACIÓN Y DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE UN AIREADOR DIFUSOR TORNADO PARA EL SECTOR CAMARONERO**, realizado por el señor : **DANIEL ALEJANDRO ARIAS MONTERO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

FIRMA

FECHA

Ing. Edwin Fernando Viteri Núñez

EDWIN  
FERNANDO  
VITERI NUNEZ  
 Firmado digitalmente  
por EDWIN FERNANDO  
VITERI NUNEZ  
Fecha: 2021.05.12  
11:25:27 -05'00'

2021-03-19

**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

Ing. Sócrates Miguel Aquino Arroba



Firmado electrónicamente por:  
**SOCRATES MIGUEL  
AQUINO ARROBA**

2021-03-19

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

Ing. Jorge Isaias Caicedo Reyes



Firmado electrónicamente por:  
**JORGE ISAIAS  
CAICEDO REYES**

2021-03-19

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo se lo dedico a mis padres Jorge Arias y Anita Montero, que con su sacrificio han logrado apoyarme incondicionalmente durante todos estos años, conservando siempre la esperanza en mí. A mis abuelitos Polivio y Marina, que siempre me apoyaron. A mi esposa Joselin, que me acompañó durante toda esta travesía siempre motivándome a ser mejor.

Finalmente, se lo dedico a cada uno de mis amigos que me acompañaron a lo largo de este camino y que me apoyaron cuando más lo necesitaba.

Daniel

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mis padres por apoyarme en todo sentido para la ejecución de este trabajo, a los Ingenieros Miguel Aquino, Isaías Caicedo y John Vera, que me guiaron y me tendieron la mano para que logre culminar este trabajo.

Agradezco a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en especial a la Carrera de Ingeniería Mecánica y a cada uno de los docentes que participaron en mi formación en todos estos años.

Daniel

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
ÍNDICE DE GRAFICOS.....	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xv
RESUMEN.....	xvi
SUMMARY .....	xvii
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPITULO I.....	4
1. DIAGNOSTICO DEL PROBLEMA.....	4
1.1. Antecedentes .....	4
1.2. Objetivos .....	5
1.2.1. <i>Objetivo general</i> .....	5
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	6
CAPITULO II .....	7
2. FUNDAMENTOS TEORICOS .....	7
2.1. Generalidades del cultivo del camarón.....	7
2.1.1. <i>Tipos de especies cultivadas</i> .....	7
2.1.2. <i>Métodos de producción de camarón</i> .....	8
2.2. Mecanismos de aireación.....	8
2.2.1. <i>Aireador de paletas</i> .....	9
2.2.2. <i>Aireador pulverizador</i> .....	9
2.2.3. <i>Aireador de bomba vertical</i> .....	10
2.2.4. <i>Sistemas de aire difuso</i> .....	11
2.3. Turbomáquinas hidráulicas .....	11
2.3.1. <i>Clasificación de las turbomáquinas hidráulicas</i> .....	12



2.3.1.1. Turbomáquina hidráulica generadora.....	12
2.3.1.2. Turbomáquina hidráulica motora.....	12
2.3.1.3. Turbomáquina hidráulica radial.....	13
2.3.1.4. Turbomáquina hidráulica axial .....	13
2.3.1.5. Turbomáquina hidráulica diagonal .....	13
<b>2.4. Intercambio de energía en el rodete .....</b>	<b>13</b>
2.4.1. Triángulos de velocidad .....	13
2.4.2. Ecuación de Euler.....	15
2.4.3. Curvas características teóricas .....	15
<b>2.5. Teoría de diseño de las turbomáquinas radiales .....</b>	<b>16</b>
2.5.1. Criterios para el ángulo de entrada $\beta_1$ .....	16
2.5.2. Criterios para el ángulo de salida $\beta_2$ .....	17
2.5.3. Coeficiente de disminución de trabajo .....	17
2.5.4. Número de álabes .....	18
2.5.5. Espesor de los álabes.....	19
2.5.6. Coeficiente de obstrucción .....	19
<b>2.6. Simulación.....</b>	<b>19</b>
2.6.1. Dinámica de fluidos computacional.....	20
<b>2.7. Automatización y control .....</b>	<b>20</b>
2.7.1. Sistema de control de lazo abierto .....	21
2.7.2. Sistema de control de lazo cerrado .....	21
2.7.3. Componentes de control.....	21
2.7.3.1. Variador de frecuencia .....	21
2.7.3.2. Relé Temporizador .....	22
<b>2.8. Calidad del agua.....</b>	<b>22</b>
2.8.1. Oxígeno disuelto.....	22
2.8.1.1. Influencia de la salinidad.....	22
2.8.1.2. Influencia de la temperatura .....	23

2.8.1.3. <i>Fluctuaciones del oxígeno disuelto</i> .....	23
2.8.2. <i>Influencia en el camarón del oxígeno disuelto</i> .....	24
2.9. <b>Medición del oxígeno disuelto</b> .....	25
2.9.1. <i>Medidores de oxígeno disuelto</i> .....	25
2.9.1.1. <i>Sensores polarográficos</i> .....	25
2.9.1.2. <i>Sensores galvánicos</i> .....	26
2.9.1.3. <i>Sensores de fibra óptica</i> .....	26
2.10. <b>Transferencia de oxígeno</b> .....	26
2.10.1. <i>Coefficiente de transferencia de oxígeno</i> .....	26
2.10.2. <i>Tasa de transferencia de oxígeno estándar</i> .....	26
2.10.3. <i>Eficiencia de aireación estándar</i> .....	27
<b>CAPITULO III</b> .....	28
3. <b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	28
3.1. <b>Selección de alternativas</b> .....	28
3.1.1. <i>Criterios de evaluación</i> .....	28
3.2. <b>Diseño aireador difusor tornado</b> .....	30
3.2.1. <i>Parámetros de funcionamiento</i> .....	31
3.2.2. <i>Profundidad de trabajo</i> .....	31
3.2.3. <i>Potencia de funcionamiento</i> .....	32
3.3. <b>Selección de materiales</b> .....	32
3.3.1. <i>Estrategia de selección</i> .....	32
3.3.2. <i>Metodología para la selección de los materiales</i> .....	33
3.4. <b>Diseño hidráulico</b> .....	34
3.5. <b>Diseño del álabe</b> .....	46
3.6. <b>Selección del motor</b> .....	51
3.6.1. <i>Potencia de diseño</i> .....	53
3.7. <b>Diseño mecánico</b> .....	54
3.7.1. <i>Análisis de esfuerzos en el rodete</i> .....	54

3.7.1.1. Esfuerzos en el álabe.....	54
3.7.1.2. Verificación de la resistencia de los álabes .....	56
3.7.2. Dimensionamiento conexión eje-rodete .....	58
3.7.2.1. Dimensionamiento de los pernos .....	59
3.7.2.2. Chequeo de aplastamiento en el eje .....	60
3.7.2.3. Chequeo de aplastamiento en la ceja del rodete.....	61
3.7.3. Dimensionamiento acoplamiento con el motor.....	62
3.7.3.1. Dimensionamiento de los pernos .....	62
3.7.3.2. Análisis de esfuerzos en la chaveta y el acople.....	63
3.7.4. Diseño flotadores.....	64
3.8. Simulación del rodete.....	66
3.8.1. Dominio computacional.....	66
3.8.2. Discretización del modelo .....	66
3.8.3. Condiciones de contorno.....	67
3.8.4. Convergencia de resultados .....	67
3.8.5. Análisis de resultados.....	68
3.8.5.1. Régimen transitorio.....	68
3.8.5.2. Régimen permanente .....	69
3.9. Selección de componentes eléctricos.....	71
3.9.1. Variador de frecuencia.....	71
3.9.2. Temporizador digital .....	72
3.9.3. Selector de dos posiciones .....	72
3.9.4. Interruptor .....	73
3.9.5. Luz piloto .....	74
3.10. Control de la máquina .....	74
3.10.1. Parámetros del variador de frecuencia.....	75
3.11. Construcción y montaje.....	76
3.11.1. Método constructivo .....	76

3.11.1.1. Máquinas y herramientas .....	76
3.11.1.2. Elementos constitutivos .....	77
3.11.1.3. Operaciones y tiempo de construcción .....	78
3.11.2. Montaje de la máquina .....	80
3.11.3. Tiempo total de construcción y montaje .....	80
3.12. Manual de operación y mantenimiento de la máquina.....	81
3.12.1. Especificaciones técnicas .....	81
3.12.2. Manual del operador .....	81
3.12.3. Manual de mantenimiento .....	82
3.13. Análisis de costos .....	83
3.13.1. Costos directos .....	83
3.13.2. Costos indirectos .....	85
3.13.3. Costos totales .....	85
<b>CAPITULOS IV .....</b>	<b>86</b>
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>86</b>
4.1. Determinación de parámetros de oxigenación.....	86
4.1.1. Transferencia de oxígeno.....	86
4.1.2. Coeficiente de transferencia de oxígeno.....	87
4.1.3. Tasa de transferencia de oxígeno estándar .....	88
4.1.4. Eficiencia de aireación estándar .....	89
4.2. Pruebas de funcionamiento en campo .....	90
4.2.1. Niveles de OD en función de la distancia .....	90
4.2.2. Niveles de OD en función de la profundidad .....	92
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>94</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>95</b>
<b>GLOSARIO</b>	
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-2:</b> Métodos para el cultivo del Camarón.....	8
<b>Tabla 2-2:</b> Coeficientes de disminución de trabajo para bombas centrífugas.....	18
<b>Tabla 3-2:</b> Ecuaciones de conservación.....	20
<b>Tabla 4-2:</b> Niveles de saturación a distintas salinidades.....	23
<b>Tabla 5-2:</b> Niveles de saturación a distintas temperaturas.....	23
<b>Tabla 6-2:</b> Niveles de OD y consecuencias.....	25
<b>Tabla 1-3:</b> Alternativas de selección.....	28
<b>Tabla 2-3:</b> Evaluación del peso específico de cada criterio.....	28
<b>Tabla 3-3:</b> Evaluación de soluciones respecto del criterio contaminación.....	29
<b>Tabla 4-3:</b> Evaluación de soluciones respecto del criterio difusión.....	29
<b>Tabla 5-3:</b> Evaluación de soluciones respecto del criterio Mantenimiento.....	29
<b>Tabla 6-3:</b> Evaluación de soluciones respecto del criterio Costo.....	30
<b>Tabla 7-3:</b> Soluciones de las alternativas.....	30
<b>Tabla 8-3:</b> Funciones de cada elemento.....	33
<b>Tabla 9-3:</b> Preselección del material.....	33
<b>Tabla 10-3:</b> Selección del material.....	34
<b>Tabla 11-3:</b> Resumen de cálculos con nuevo coeficiente de obstrucción.....	43
<b>Tabla 12-3:</b> Resumen dimensiones de rodete.....	46
<b>Tabla 13-3:</b> Resumen dimensiones de rodete.....	48
<b>Tabla 14-3:</b> Datos iniciales.....	51
<b>Tabla 15-3:</b> Propiedades mecánicas.....	54
<b>Tabla 16-3:</b> Peso de los elementos.....	64
<b>Tabla 17-3:</b> Variador de frecuencia.....	71
<b>Tabla 18-3:</b> Temporizador digital.....	72
<b>Tabla 19-3:</b> Selector de dos posiciones.....	73
<b>Tabla 20-3:</b> Interruptor doble.....	73
<b>Tabla 21-3:</b> Luz piloto.....	74
<b>Tabla 22-3:</b> Parámetros modificados del variador de frecuencia.....	75
<b>Tabla 23-3:</b> Máquinas utilizadas.....	76
<b>Tabla 24-3:</b> Herramientas utilizadas.....	76
<b>Tabla 25-3:</b> Elementos constitutivos del aireador.....	77
<b>Tabla 26-3:</b> Tiempos de fabricación del conjunto estructural.....	78
<b>Tabla 27-3:</b> Tiempos de fabricación del conjunto rotativo.....	78
<b>Tabla 28-3:</b> Tiempos de fabricación del conjunto de estabilidad.....	79
<b>Tabla 29-3:</b> Tiempos de fabricación del conjunto de control.....	79

<b>Tabla 30-3:</b> Tiempos de montaje .....	80
<b>Tabla 31-3:</b> Tiempos totales.....	80
<b>Tabla 32-3:</b> Especificaciones técnicas del aireador difusor tornado .....	81
<b>Tabla 33-3:</b> Plan de mantenimiento .....	83
<b>Tabla 34-3:</b> Materiales mecánicos .....	83
<b>Tabla 35-3:</b> Materiales eléctricos.....	84
<b>Tabla 36-3:</b> Mano de obra.....	84
<b>Tabla 37-3:</b> Costos de pruebas .....	85
<b>Tabla 38-3:</b> Costos de transporte .....	85
<b>Tabla 39-3:</b> Costos indirectos .....	85
<b>Tabla 40-3:</b> Costos totales.....	85
<b>Tabla 1-4:</b> Resultados de la prueba de transferencia de oxígeno .....	86
<b>Tabla 3-4:</b> Niveles de OD en función de la distancia.....	91
<b>Tabla 4-4:</b> Niveles de OD en función de la profundidad .....	92

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-2:</b>	Especie <i>Litopenaeus vannamei</i> .....	7
<b>Figura 2-2:</b>	Aireador de Paletas .....	9
<b>Figura 3-2:</b>	Aireador Pulverizador .....	10
<b>Figura 4-2:</b>	Aireador de Bomba Vertical .....	10
<b>Figura 5-2:</b>	Esquematación del Sistema de aire Difuso .....	11
<b>Figura 6-2:</b>	Clasificación de las Turbomáquinas Hidráulicas .....	12
<b>Figura 7-2:</b>	Velocidades y ángulos del rodete .....	14
<b>Figura 8-2:</b>	Triángulos de velocidad a la entrada y salida del rodete .....	14
<b>Figura 1-3:</b>	Modelado del aireador difusor tornado .....	31
<b>Figura 2-3:</b>	Triángulo de velocidades a la entrada .....	40
<b>Figura 3-3:</b>	Triángulo de velocidades a la salida .....	45
<b>Figura 4-3:</b>	Desarrollo del álabe .....	50
<b>Figura 5-3:</b>	Porción del álabe .....	55
<b>Figura 6-3:</b>	Material asignado .....	56
<b>Figura 7-3:</b>	Geometría fija .....	57
<b>Figura 8-3:</b>	Asignación de carga .....	57
<b>Figura 9-3:</b>	Esfuerzos resultantes .....	58
<b>Figura 10-3:</b>	Conexión eje-rodete .....	58
<b>Figura 11-3:</b>	Bosquejo de conexión .....	59
<b>Figura 12-3:</b>	Conexión eje motor .....	62
<b>Figura 13-3:</b>	Modelado del flotador .....	65
<b>Figura 14-3:</b>	Dominio computacional .....	66
<b>Figura 15-3:</b>	Discretización del modelo .....	67
<b>Figura 16-3:</b>	Condiciones de contorno .....	67
<b>Figura 17-3:</b>	Análisis transitorio de la velocidad del fluido .....	69
<b>Figura 18-3:</b>	Velocidades en régimen permanente .....	70
<b>Figura 19-3:</b>	Presiones relativas en régimen permanente .....	70
<b>Figura 20-3:</b>	Circuitos de fuerza y control .....	75
<b>Figura 1-4:</b>	Lugar de pruebas .....	90

## ÍNDICE DE GRAFICOS

<b>Gráfico 1-2:</b> Curva H vs Q de Euler .....	16
<b>Gráfico 2-2:</b> Variación de curvas H vs Q según $\beta_2$ .....	17
<b>Gráfico 3-2:</b> Fluctuaciones del Oxígeno disuelto.....	24
<b>Gráfico 1-3:</b> Variaciones de w y b en función de r .....	48
<b>Gráfico 2-3:</b> Curva $(r \operatorname{tg}\beta)^{-1}$ vs r .....	50
<b>Gráfico 3-3:</b> Convergencia de resultados.....	68
<b>Gráfico 1-4:</b> Oxígeno disuelto vs Tiempo.....	87
<b>Gráfico 2-4:</b> Niveles de OD en función de la distancia .....	91
<b>Gráfico 3-4:</b> Niveles de OD en función de la profundidad .....	93



## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** FICHA TÉCNICA VARIADOR DE FRECUENCIA

**ANEXO B:** FICHA TÉCNICA MEDIDOR DE OXÍGENO DISUELTO

**ANEXO C:** PLANOS

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo es el diseño de un aireador difusor tornado, su construcción y automatización, así como la determinación de los parámetros de funcionamiento de este, orientado al mejoramiento de los niveles de oxígeno disuelto de los estanques acuícolas. En el marco referencial se mencionan otros mecanismos de aireación, además las bases para el diseño hidráulico del aireador. El diseño hidráulico del aireador se lo realizó siguiendo la metodología de diseño de las turbomáquinas hidráulicas, obteniendo de esta forma las dimensiones principales del rodete. Además, mediante Flow Simulation se realizó un análisis CFD del conjunto eje-rodete, determinando las velocidades y presiones máximas generadas durante el régimen permanente, además se ejecutó la simulación en régimen transitorio. Los demás elementos mecánicos se calcularon teóricamente. Una vez construida la máquina se implementó un control de lazo abierto que, mediante un temporizador digital y un variador de frecuencia controlan el arranque del aireador. Se realizaron pruebas en laboratorio y campo. Las pruebas de laboratorio se realizaron en un ambiente controlado en un estanque de concreto  $12,5 \text{ m}^3$ , donde con ayuda de un medidor de oxígeno disuelto y la metodología respectiva se determinó la tasa de transferencia de oxígeno estándar ( $OT_s$ ) y la eficiencia de aireación estándar (SAE), cuyos valores fueron de  $1,641 \text{ kgO}_2/\text{h}$  y  $1,094 \text{ kg O}_2/\text{kWh}$ . Las pruebas de campo se realizaron en un estanque de  $3000 \text{ m}^2$  con presencia de camarones de 60 días de cultivo, donde se determinó las relaciones matemáticas de la distancia y profundidad con la transferencia de oxígeno. Se concluye que el aireador difusor tornado logró mejorar la concentración de oxígeno disuelto del estanque, para mejores resultados se recomienda implementar un control de lazo cerrado con ayuda de un controlador de oxígeno disuelto.

**Palabras clave:** < OXÍGENO DISUELTO >, < MECANISMOS DE AIREACIÓN >, < TURBOMÁQUINAS HIDRÁULICAS >, < RÉGIMEN PERMANENTE >, < RÉGIMEN TRANSITORIO>, < TASA DE TRANSFERENCIA DE OXÍGENO >, < EFICIENCIA DE AIREACIÓN ESTÁNDAR >.



Firmado digitalmente por:  
**HOLGER GERMAN  
RAMOS UVIDIA**

0955-DBRAI-UPT-2021

2021-04-07

## **SUMMARY**

The objective of this work is the design of a tornado diffuser aerator, its construction and automation, as well as the determination of its operating parameters, aimed at improving dissolved oxygen levels in aquaculture ponds. The hydraulic design of the aerator was carried out following the design methodology of hydraulic turbomachines, thus obtaining the main dimensions of the impeller. Furthermore, using Flow Simulation, a CFD analysis of the shaft-impeller assembly was performed, determining the maximum speeds and pressures generated during the permanent regime, and the simulation was also run in the transitory regime. The other mechanical elements were calculated theoretically. Once the machine was built, an open loop control was implemented, using a digital timer and a frequency variator to control the start of the aerator, tests were carried out in the laboratory and in the field. The laboratory tests were carried out in a controlled environment in a 12.5 m<sup>3</sup> concrete pond, where, with the help of a dissolved oxygen meter and the respective methodology, the standard oxygen transfer rate (OTS) and the aeration efficiency standard (SAE), were determined, which values were 1,641 kgO<sub>2</sub> / h and 1,094 kg O<sub>2</sub> / kWh. The field tests were carried out in a 3000 m<sup>2</sup> pond with the presence of shrimp with 60 days of culture, where the mathematical relationships of distance and depth with oxygen transfer were determined. It is concluded that the tornado diffuser aerator managed to improve the dissolved oxygen concentration of the pond, for better results it is recommended to implement a closed loop control with the help of a dissolved oxygen controller.

**Keywords:** <AERATION MECHANISMS> <DISSOLVED OXYGEN> <HYDRAULIC TURBOMACHINES> <OXYGEN TRANSFER RATE> <STANDARD AIR EFFICIENCY>

## INTRODUCCIÓN

La acuicultura comprende la cría de organismos acuáticos, estos pueden ser, peces, moluscos, crustáceos y plantas. La cría implica intervención humana para mejorar la reproducción de la especie cultivada (FAO, 2003). El cultivo de organismos acuáticos es una práctica antigua posiblemente desde los orígenes del pastoreo y la agricultura (Castello, 1993: p.11). La acuicultura es considerada como una importante actividad comercial en la actualidad, en 2016 la suma de la producción pesquera y la producción acuícola mundial alcanzó 362 miles de millones de dólares, de los cuales el 64% le perteneció a la producción acuícola.

La supervivencia de las especies marinas cultivadas es un parámetro importante a tener en cuenta. Los parámetros que afectan la supervivencia de la especie cultivada son: la temperatura, el PH del suelo y la cantidad de oxígeno disuelto (OD) que existe en el agua. El parámetro en el que se enfoca el presente proyecto es el oxígeno disuelto. El nivel de oxígeno disuelto debe oscilar entre 8-12mg/L, para obtener condiciones adecuadas para el cultivo de la mayoría de las especies marinas (Goyenola, 2007: p.1). Para lograr este intervalo es necesario implementar mecanismos de aireación que garanticen los niveles de oxígeno y por lo tanto la supervivencia de las especies cultivadas.

Los aireadores son máquinas encargadas de suministrar oxígeno al estanque. Estas máquinas aireadoras son esenciales en la acuicultura semi-intensiva e intensiva, ya que ayuda a mantener un ambiente propicio para las especies cultivadas (Kumar et al., 2013: p.71). Existen diferentes tipos de mecanismos de aireación; sin embargo, los aireadores de paletas presentan mayor eficiencia en la transferencia de oxígeno que otros tipos de aireadores (Boyd y Ahmandm1987; citados en Taparhudee et al., 2007: p.523). En la literatura internacional varios autores enfocan sus análisis al estudio de aireadores de paletas (Anongponyoskun et al., 2012: p.751 ; Taparhudee et al., 2007: p.522 ; Taparhudee, 2002: p.408 ; Tunsutapanich et al., 2006: p.1).Otros tipos aireadores son los difusores, estos son máquinas eficientes, únicamente superados por los aireadores de paleta, pero con una distribución de oxígeno más homogénea (Boyd, 1998: p.9).

El control y la automatización de los mecanismos de aireación constituyen una herramienta que generan grandes ventajas al acuicultor. La principal ventaja está en relación con la eficiencia energética, ya que aireadores que están automatizados con sensores, generan un ahorro del 80% del gasto energético frente a aireadores accionados de forma manual (Boyd, 1998: p.9). Existen diferentes tipos de control aplicables a estos dispositivos, como el control ON-OFF (Oroxón, 2017:

p.23), control PID (Vera y Cadena, 2019: p.30), control FUZZY, (Atia et al., 2012: p.385 ; Vera y Cadena, 2019: p.37) y control avanzado NEPSAC (Sacasqui, 2017: p.17).

La acuicultura en el Ecuador es una de las principales actividades económicas. En 2016 el sector acuícola ecuatoriano ocupó el puesto 15 en acuicultura mundial con 426000 TM y el puesto 4 en actividad camaronera mundial con 403000 TM (ESPAE, 2018: p.5). En Ecuador la acuicultura se enfoca en el cultivo del camarón, mismo que está ocupando un gran espacio dentro de las exportaciones no petroleras, llegando a representar el 28,9% de las mismas para el año 2019 (Banco Central del Ecuador, 2019). Actualmente la industria camaronera ecuatoriana se muestra muy consolidada con grandes empresas que se dedican a esta actividad, por lo que se ha generado varios aportes científicos en esta área.

En Ecuador la implementación de mecanismos de aireación se ha convertido en una necesidad, producto de los excelentes resultados que conlleva la aplicación de estos. En presencia de mecanismos de aireación, el camarón obtuvo un incremento de peso superior en un 47% frente a sistemas no aireados según un estudio realizado en Guayaquil por (Ruales, 2012: p.76). Otra literatura nacional concluye que con la implementación de mecanismos de aireación se redujo en 3 semanas el tiempo de crecimiento de la especie cultivada (Barba, 2015: p.72). La implementación de mecanismos de aireación en ambos casos generó impactos positivos sobre la producción de las especies cultivadas.

En Pedernales cantón de Manabí (lugar donde se realizaron la pruebas y toma de datos) según el mapa de zonas, en relación con la Cartografía básica del Instituto Geográfico Militar y SENPLADES, se deduce que el área destinada para producción camaronera es de 8.374,3 hectáreas (GAD Pedernales, 2017: p.212). En Pedernales existen alrededor de 400 camaroneros acreditados los que representan el 10% de la economía local. Debido a la falta de tecnificación en la producción de camarón en la provincia de Manabí ésta actividad no ha podido resurgir como debe, motivo por el cual Manabí es considerada como una de las provincias productoras de camarón más rezagadas (Romero, 2014; citado en Muñoz, 2017: p.6).

El oxígeno disuelto (OD) conforma uno de los parámetros más relacionados con la supervivencia del camarón. Los bajos niveles de OD pueden ocasionar altas tasas de mortalidad, enfermedades y crecimientos deficientes del camarón ecuatoriano. Por otra parte, la poca o ninguna tecnificación en las piscinas camaroneras genera bajos rendimientos productivos de las mismas. El camarón ecuatoriano en su gran mayoría es producto de exportación, por lo tanto, es primordial mantener altos niveles de calidad, mismos que se logran con la implementación de tecnología en sus procesos productivos.

En el presente trabajo se pretende realizar el diseño de un aireador difusor tornado mediante técnicas tradicionales de diseño. Este diseño se optimizará y validará mediante el método de elemento finito, para posteriormente proceder a la construcción del aireador. Para la automatización del aireador se aplicará control ON-OFF mediante un variador de frecuencia y un temporizador. El fin es comprobar la hipótesis de que al aplicar este estudio se obtendrán niveles de oxígeno disuelto (OD) óptimos y constantes.

## CAPITULO I

### 1. DIAGNOSTICO DEL PROBLEMA

#### 1.1. Antecedentes

El cultivo de organismos acuáticos es una práctica que se viene dando en el mundo hace muchos años atrás posiblemente desde los orígenes del pastoreo y la agricultura. La acuicultura nace con el objetivo de controlar la crianza de los organismos acuáticos evitando su muerte prematura y acelerando su crecimiento, convirtiéndose en fuente principal de sustento para quienes realizaban esta actividad (Castello, 1993: p.14). En las últimas décadas la acuicultura registra un importante crecimiento entre los sectores productores de alimentos, convirtiéndose así en una industria vital (FAO, 2011: p.11). Para el año 2016, la producción mundial de la acuicultura, fue de 110,2 millones de toneladas, bordeando un valor de venta de 243 500 millones de dólares (FAO, 2018: p.35).

El agua es el medio en el que crece el camarón, por lo tanto, la calidad de esta es un parámetro crucial. Una calidad deficiente puede afectar severamente la supervivencia de este y por lo tanto disminuir drásticamente la producción. Para garantizar la calidad del agua (y por tanto la producción de camarón), esta debe mantenerse libre de tóxicos, pesticidas y demás contaminantes, así como tener un PH y temperaturas adecuados (Goyenola, 2007: p.1). Otro parámetro que influye en la calidad del agua es el oxígeno disuelto, mismo que es considerado como el principal parámetro para el correcto desarrollo y supervivencia de la mayoría de especies acuáticas (Boyd, 1998: p.9). De esta forma se considera que el oxígeno disuelto es un parámetro con el que se puede medir la calidad del agua.

La deficiencia de oxígeno disuelto es uno de los principales problemas a la hora de adoptar sistemas de producción semi-intensivos e intensivos (Li et al., 2006: p.609). Debido a la poca disponibilidad de espacio y alta cantidad de especies cultivadas, el oxígeno disuelto tiende a disminuir. Si los niveles de oxígeno son bajos, la capacidad de aprovechamiento del alimento del camarón será limitada, causando bajos índices de crecimiento afectando directamente a los acuicultores (Van Wyk, 1999: p.13). La deficiencia de oxígeno disuelto puede aumentar la mortalidad de la especie cultivada. Para combatir este evidente problema, durante varios años, los productores solían utilizar grandes aireadores mecánicos impulsados por tractores, sin embargo

el alto coste energético limitaba el uso de estos dispositivos (Boyd y Ahmad, 1987: p.3). En presencia de niveles óptimos de oxígeno disuelto el camarón tiende a crecer más aceleradamente. Especímenes que mantienen un nivel mayor de oxígeno disuelto tienen un incremento de peso significativo, frente a otros con concentraciones de oxígeno disuelto menores (Nonwachai et al., 2011: p.2).

Estudios en Ecuador muestran que, al implementar mecanismos de aireación, las especies cultivadas tienden a crecer más rápido y en mayor proporción. Una de las literaturas afirma que en presencia de aireación se logra aumentar en un 50% la densidad de la especie cultivada, además de reducir el tiempo de cultivo en tres semanas (Barba, 2015: pp.58-59). Otro autor indica que, en presencia de aireadores se obtuvo un aumento del 47% en el peso de los camarones, además redujo la mortalidad del camarón en un 12% (Rúales, 2012: p.58). De esta forma de evidencian las importantes ventajas que ofrecen los sistemas con aireación forzada.

El presente trabajo pretende mejorar los niveles de oxígeno en estanques destinados al cultivo de camarón ecuatoriano. Se propone un sistema que garantice la entrega de niveles óptimos de oxígeno disuelto (OD), promoviendo de esta forma un mecanismo de producción más eficiente. Se pretende proveer a los acuicultores una herramienta que le permita mejorar los índices de supervivencia del camarón y otras especies cultivables. El proyecto tiene como finalidad diseñar, construir y automatizar un aireador difusor tornado acorde a las necesidades del sector camaronero del Ecuador. En primera instancia se diseñará los diferentes elementos de máquina que constituyen el aireador, además se pretende simular el rodete de aireación mediante el uso de un software especializado para obtener una geometría eficiente. Se construirá íntegramente la máquina y se automatizará mediante control ON-OFF con el objetivo de obtener niveles de OD óptimos. Se realizarán las pruebas de funcionamiento respectivas donde se obtendrán los parámetros de funcionamiento del aireador.

## **1.2. Objetivos**

### ***1.2.1. Objetivo general***

- Diseñar, construir, automatizar y determinar los parámetros de funcionamiento de un aireador difusor tornado para el sector camaronero.



### ***1.2.2. Objetivos específicos***

- Diseñar un aireador difusor tornado haciendo uso de la metodología pertinente, así como mediante la simulación con ayuda de un software especializado para cumplir con los parámetros requeridos.
- Construir el aireador mediante técnicas tradicionales siguiendo lo establecido en el diseño conceptual y automatizarlo por medio de la aplicación de un temporizador y un variador de frecuencia.
- Realizar pruebas experimentales para verificar los parámetros de funcionamiento, además determinar mediante un modelo matemático la variación de los niveles de oxígeno disuelto en función de la distancia.

## CAPITULO II

### 2. FUNDAMENTOS TEORICOS

#### 2.1. Generalidades del cultivo del camarón en Ecuador

La ubicación geográfica del Ecuador es excepcional para la actividad acuícola, constituyéndose así en su mejor aliada ya que en 2016 ocupó el puesto 15 en acuicultura mundial con 426000 TM y el puesto 4 en actividad camaronera con 403000 TM. Actualmente la industria acuícola ecuatoriana se muestra muy consolidada con grandes empresas que se dedican a esta actividad, es así como en 2016 se tienen registros de 129 laboratorios de larvas, 1,432 camaroneras, 14 procesadoras primarias, 50 establecimientos de insumos acuícolas y 16 procesadoras de piensos (ESPAE, 2018: p.5).

##### 2.1.1. Tipos de especies cultivadas

En Ecuador la principal especie para el cultivo es el camarón blanco del pacifico el cual pertenece a la familia Litopenaeus, del cual el 95% de los cultivos pertenecen a la especie Litopenaeus Vannamei, la cual es considerada por expertos como una de las especies más resistentes a los cambios medioambientales, el 5% restante le corresponde a la especie Litopenaeus Stylirostris (Rúales, 2012: p.1).



**Figura 1-2:** Especie Litopenaeus vannamei

**Fuente:** (Molinos Champion S.A., 2020)

### 2.1.2. Métodos de producción de camarón

Los métodos de producción de camarón vienen dados típicamente por la densidad con la que está siendo cultivada, es decir la cantidad de animales existentes por unidad de área (Expresadas generalmente en cantidad de animales por cada hectárea). En Ecuador existen tres métodos de producción de camarón los mismos que son: extensivo, semi-intensivo e intensivo, en la tabla 1-2 se muestra las características de cada uno de los métodos de producción.

**Tabla 1-2:** Métodos para el cultivo del Camarón

Sistema	Características
Extensivo	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bajas densidades de 10000 – 15000/ha</li><li>• No se alimenta con dietas formuladas</li><li>• Producción promedio de 600 lb//ha/año</li></ul>
Semi-intensivo	<ul style="list-style-type: none"><li>• Densidades medias de 15000 - 120000/ha</li><li>• Se alimenta con dietas formuladas</li><li>• Producción promedio de 1000-5000 lb//ha/año</li></ul>
Intensivo	<ul style="list-style-type: none"><li>• Densidades altas más de 15000/ha</li><li>• Se alimenta con dietas formuladas</li><li>• Producción superior a 5000 lb//ha/año</li></ul>

Fuente: (FAO, 2019)

Realizado por: Arias, D. 2020

### 2.2. Mecanismos de aireación

Los aireadores son máquinas indispensables para cultivar especies marinas de forma semi intensiva e intensiva, estos proveen de un ambiente agradable que promueven el correcto desarrollo de la especie cultivada, en cultivos intensivos es imposible cubrir la demanda de oxígeno de las especies, por lo que es fundamental el uso de mecanismos de aireación (Kumar, 2013: p.71). Se han desarrollado diversos tipos de aireadores, buscando siempre la máxima transferencia de oxígeno al agua, entre los más comunes tenemos: Pulverizadores, de paletas, de hélice, de bomba vertical, y los sistemas de aire difuso (Boyd, 1998: p.13).

### **2.2.1. Aireador de paletas**

El aireador de paletas se compone básicamente de un motor conectado un eje, mismo que está conectado a su vez a unas paletas plásticas que golpean y remueven la superficie del agua, este tipo de mecanismo ejerce dos efectos, uno es introducir aire en el agua cuando la paleta la golpea y el otro es salpicar agua al aire. Ambos efectos provocan que se difunda oxígeno en el agua (BIOAQUAFLOC, 2018). Los aireadores de paletas pueden ser accionados por motores de combustión interna (para potencias entre 35 kW y 75 kW) o por motores eléctricos (para potencias entre 3,7 kW y 7,5 kW), siendo los últimos los más económicos de operar (Ahmad y Boyd, 1988: p.40).



**Figura 2-2:** Aireador de Paletas

Fuente: (Tecnoacua, 2020)

### **2.2.2. Aireador pulverizador**

Un aireador pulverizador consta de una bomba de alta presión, misma que permite la descarga agua a velocidades elevadas a través de uno o varios orificios para mejorar la aireación. La potencia consumida por este tipo de aireadores generalmente varía de 2 a 15 kW, y las velocidades del impulsor oscilan entre 500 y 1000 rpm (Boyd, 1998: p.14).



**Figura 3-2:** Aireador Pulverizador

**Fuente:** (Dobbs Corporation Inc., 2020)

### **2.2.3. Aireador de bomba vertical**

Un aireador de bomba vertical consta básicamente de un motor eléctrico sumergible con un impulsor conectado a su eje. El motor está suspendido por flotadores y el impulsor lanza agua hacia el aire para promover la mezcla del aire con el agua. Este tipo de aireadores pueden consumir desde 1 a 50 kW, pero generalmente los equipos destinados para la acuicultura rara vez superan los 2 kW. Los equipos para acuicultura tienen impulsores de alta velocidad, que giran entre 1730 y 3450 rpm (Boyd, 1998: p.14).

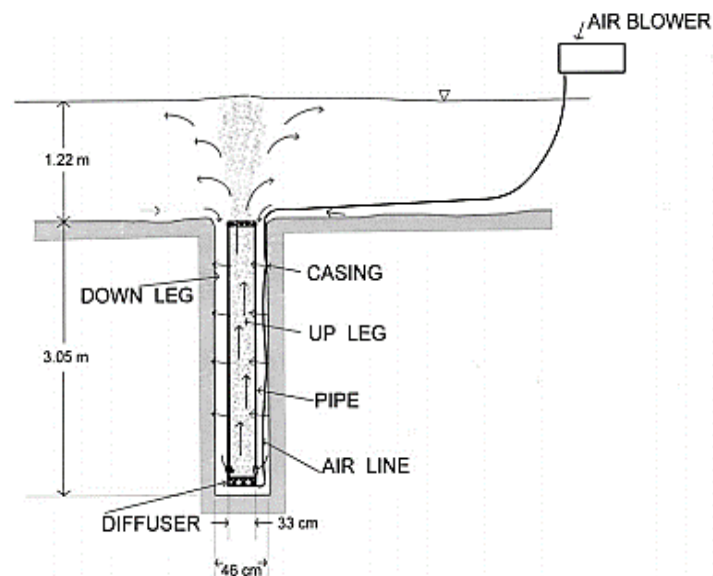


**Figura 4-2:** Aireador de Bomba Vertical

**Fuente:** (Aquatools., 2020)

#### 2.2.4. Sistemas de aire difuso

Los sistemas de aire difuso utilizan un soplador (blower) que inyecta grandes cantidades de aire hacia el estanque por medio de difusores que se encuentran en el fondo del estanque. Este tipo de aireadores liberan un gran volumen de aire a baja presión, misma que aumenta al aumentar la profundidad del agua por encima de los difusores (Boyd, 1998: p.16).



**Figura 5-2:** Esquematación del Sistema de aire Difuso

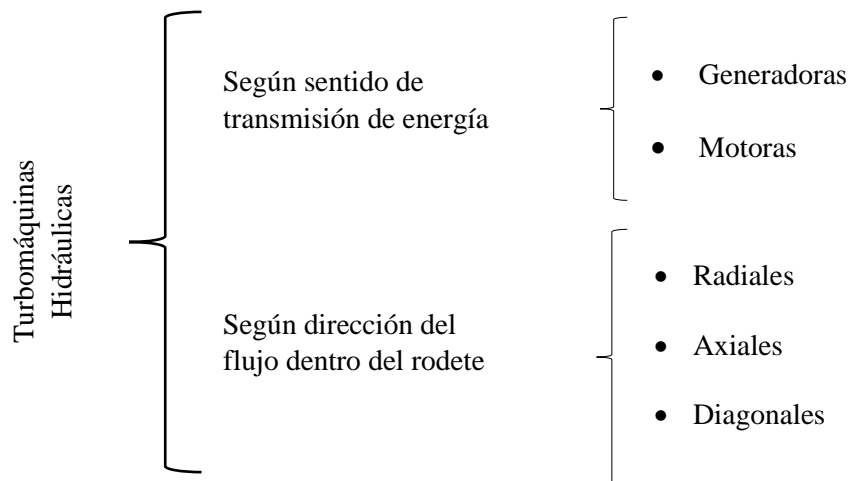
Fuente: (Boyd, 1998)

#### 2.3. Turbomáquinas hidráulicas

Las turbomáquinas hidráulicas son máquinas de fluido que le otorgan una determinada energía a un fluido, debido a la variación del momento cinético del fluido, que se produce al pasar por conductos que se mueven con movimiento de rotación, dotado con alabes, que se lo denomina comúnmente como rotor. El rotor es el único elemento encargado de transformar la energía mecánica en energía hidráulica. Se considera Turbomáquina Hidráulica a aquella que rige su principio de funcionamiento a la ecuación de Euler, cuyo diseño se lo realiza despreciando los efectos de la compresibilidad del fluido (variación de la densidad) que pueden darse a través de la máquina (Mataix, 1975: pp.39-40).

### 2.3.1. Clasificación de las turbomáquinas hidráulicas

Las turbomáquinas hidráulicas se pueden clasificar de dos formas: en función del sentido de transmisión de energía y según la dirección del flujo dentro del rodete como se muestra a continuación:



**Figura 6-2:** Clasificación de las Turbomáquinas Hidráulicas

Fuente: (Mataix, 1975)

#### 2.3.1.1. Turbomáquina hidráulica generadora

Se considera que una máquina hidráulica es generadora cuando el rodete le otorga energía al fluido circundante, es decir, que el fluido percibe un incremento de energía al abandonar el rodete de este tipo de máquinas. Los ventiladores y las bombas son los ejemplos más comunes de este tipo de máquinas (Mataix, 1975: p.41).

#### 2.3.1.2. Turbomáquina hidráulica motora

Las máquinas hidráulicas motoras son aquellas que reciben energía del fluido por medio del rodete, en estas máquinas el fluido presenta un decremento de energía al abandonar el rodete de la máquina. Las turbinas hidráulicas son el ejemplo más común de este tipo de máquinas (Mataix, 1975: p.41).

### *2.3.1.3. Turbomáquina hidráulica radial*

Este tipo de máquinas también son denominadas máquinas centrífugas, en ellas cualquier partícula que ingrese en el rodete presenta dos tipos de velocidades: tangencial y radial, sin experimentar velocidad axial (Mataix, 1986: p.368).

### *2.3.1.4. Turbomáquina hidráulica axial*

En este tipo de máquinas la el ingreso del fluido al rodete es coaxial con el eje del mismo, cualquier partícula que ingrese experimenta velocidad periférica y axial, sin experimentar el efecto de la fuerza centrífuga (Mataix, 1986: p.368).

### *2.3.1.5. Turbomáquina hidráulica diagonal*

Estas máquinas se conocen también como máquinas de flujo radio axial o flujo mixto, esta es la única turbomáquina que tiene componentes de velocidad en los tres ejes, es decir, que cualquier partícula que ingrese al rodete experimenta velocidad axial, radial y tangencial (Mataix, 1986: p.368).

## **2.4. Intercambio de energía en el rodete**

En las turbomáquinas hidráulicas el único intercambio de energía mecánica y de fluido se da en el rodete, los restantes componentes de las máquinas hidráulicas únicamente son transformadores de un tipo de energía a otro. El intercambio de energía sucede por la interacción entre las paredes de los álabes del rodete y el fluido. La energía que el rodete intercambia con un fluido puede ser de dos tipos: energía de presión y energía cinética (Mataix, 1975: p.167).

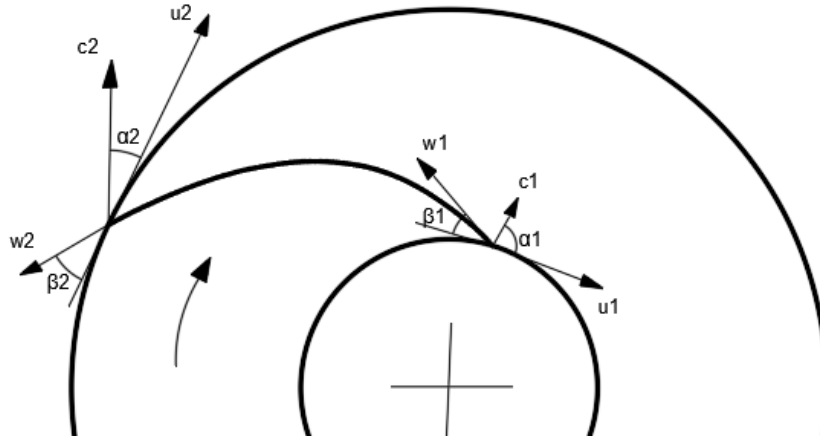
### **2.4.1. Triángulos de velocidad**

Los triángulos de velocidad son una herramienta muy eficaz para el análisis y diseño de las turbomáquinas hidráulicas, estos triángulos se pueden dibujar en cualquier punto de la trayectoria de la partícula a través del rodete, pero normalmente solo se dibujan a la entrada y a la salida del rodete. El triángulo de velocidad está conformado por tres vectores que son:



- $u$ : Velocidad periférica de rodete
- $w$ : Velocidad relativa del flujo
- $c$ : Velocidad absoluta del flujo

Las velocidades se acompañan de los subíndices 1 y 2 dependiendo si se analiza la partícula a la entrada o la salida del rodete respectivamente (Viejo, 2000: p.53).



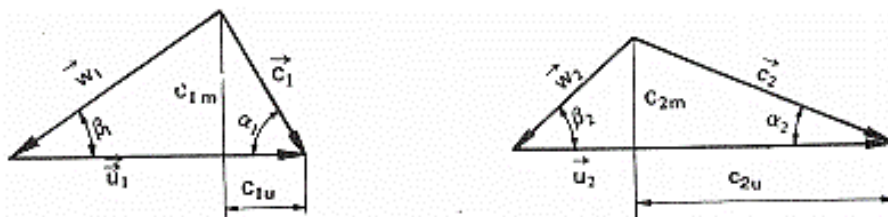
**Figura 7-2:** Velocidades y ángulos del rodete

Fuente: (Viejo, 2000)

El triángulo de velocidad se forma por los tres vectores de velocidad mencionados anteriormente, cumpliéndose la siguiente igualdad:

$$\vec{w} = \vec{c} - \vec{u}$$

Los triángulos que se forman a la entrada y a la salida del rodete son muy importantes, ya que en función de estos se determina el diseño de una turbomáquina hidráulica.



**Figura 8-2:** Triángulos de velocidad a la entrada y salida del rodete

Fuente: (Mataix, 1975)

Según la notación internacional tenemos que:

- $c$ : velocidad absoluta del fluido en un determinado punto
- $w$ : velocidad relativa del fluido respecto al alabe
- $u$ : velocidad absoluta del rodete en ese punto
- $\alpha$ : ángulo que forman los vectores  $\vec{c}$  y  $\vec{u}$
- $\beta$ : ángulo que forman los vectores  $\vec{w}$  y  $-\vec{u}$
- $c_u$ : componente periférica de la velocidad absoluta
- $c_m$ : componente meridional de la velocidad absoluta

#### 2.4.2. Ecuación de Euler

La ecuación fundamental que explica el intercambio de energía que sucede en el rodete es la ecuación de Euler, la que relaciona la energía otorgada o consumida por el rodete en función de los componentes del triángulo de velocidades. En esta ecuación se utilizan cuatro hipótesis que son: régimen permanente, flujo ideal, flujo irrotacional y método unidimensional (Mataix, 1975: p.168). Así como la ecuación de Bernoulli es considerada la ecuación fundamental de la hidrodinámica, la ecuación de Euler se considera la ecuación fundamental de las turbomáquinas hidráulicas (Mataix, 1986: p.363).

La primera forma de la ecuación de Euler, denominada expresión en alturas y válida para bombas, ventiladores, turbocompresores, turbinas entre otros es:

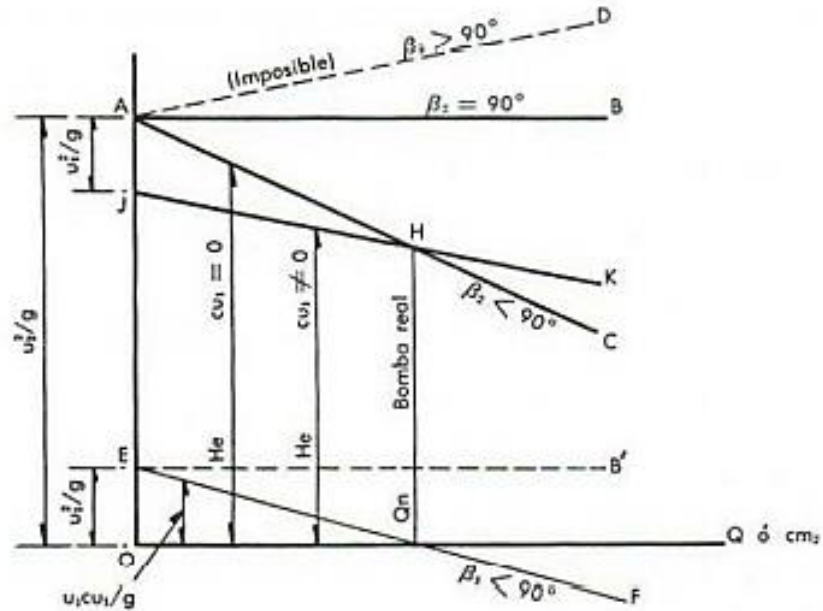
$$H_{\infty} = \pm \frac{u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}}{g}$$

#### 2.4.3. Curvas características teóricas

Para obtener las curvas teóricas de funcionamiento de una turbomáquina se hace uso de la primera forma de la ecuación de Euler, asumiendo de  $c_{1u} = 0$ , por lo que tendríamos:

$$H_{\infty} = \frac{u_2 c_{2u}}{g}$$

La ecuación anterior es una recta que relaciona la altura teórica de Euler con las velocidades en la entrada del rodete (se las puede tomar como el caudal proporcionado), por lo que en realidad tendríamos una gráfica de altura vs caudal.



**Gráfico 1-2:** Curva H vs Q de Euler

Fuente: (Viejo, 2000)

## 2.5. Teoría de diseño de las turbomáquinas radiales

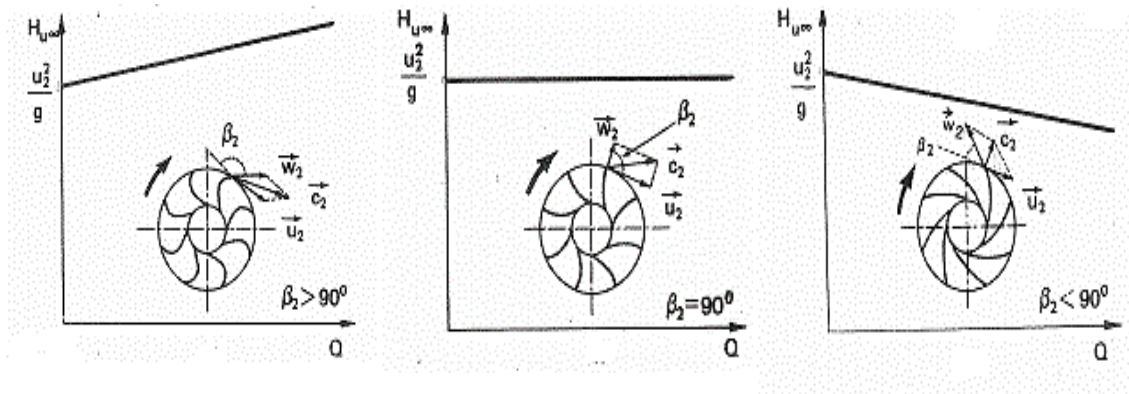
La metodología de diseño que se presenta a continuación es válida para cualquier tipo de turbomáquinas radial, he incluso aplicable a las turbomáquinas diagonales, sin embargo, el enfoque radica en las primeras. Tanto las bombas como los ventiladores centrífugos son turbomáquinas radiales, por lo tanto, la metodología se aplica para cualquiera de estos.

### 2.5.1. Criterios para el ángulo de entrada $\beta_1$

El ángulo de entrada  $\beta_1$  se lo determinará de tal forma que garantice un ángulo  $\alpha_1$  de  $90^\circ$ , esto debido a que según la ecuación de Euler el máximo incremento de energía sucede cuando la componente  $c_{1u}=0$ , y esto sucede cuando  $\alpha_1=90^\circ$ . En la práctica se ha observado que es conveniente usar un ángulo  $\beta_1 > 15^\circ$ , llegando como máximo a un  $\beta_1 = 30^\circ$  (Araujo, 1985: pp.32-34). El ángulo  $\beta_1$  en la práctica puede tomar valores entre  $15^\circ$  y  $50^\circ$  dependiendo de los requerimiento del diseñador (Viejo, 2000: p.59).

### 2.5.2. Criterios para el ángulo de salida $\beta_2$

El ángulo  $\beta_2$  es uno de los parámetros más importantes en el diseño de una turbomáquina radial, además de este valor dependen los demás parámetros geométricos de la máquina. La variación del ángulo de salida  $\beta_2$  está relacionado directamente con la gráfica H vs Q, y su elección correcta es decisiva para el diseño del rodete (Mataix, 1975: p.409).



**Gráfico 2-2:** Variación de curvas H vs Q según  $\beta_2$

Fuente: (Mataix, 1975)

En la práctica especialmente para el diseño de bombas el ángulo de salida  $\beta_2$  puede tomar una amplia gama de valores, que van desde los  $14^\circ$  y pudiendo llegar hasta los  $60^\circ$ , sin embargo, la gama más favorable de valores oscila entre los  $20^\circ$  y  $30^\circ$  (Mataix, 1975: p.416). En la práctica este ángulo puede tomar valores entre  $15^\circ$  y  $35^\circ$ , sin embargo, lo más normal es trabajar entre  $20^\circ$  y  $25^\circ$  para el diseño de rodetes de bombas (Viejo, 2000: p.59). Para el diseño de ventiladores usualmente se hace que  $\beta_2 = \beta_1 + 10^\circ$ , o bien si  $\beta_2 > 25^\circ$  se utiliza  $\beta_2 = \beta_1$  (Mataix, 1975: p.417).

### 2.5.3. Coeficiente de disminución de trabajo

La teoría de Euler idealiza el paso del fluido a través del rodete perfectamente guiado por un número infinito de álabes, sin embargo, esto es imposible en la práctica, por lo tanto, la energía intercambiada entre el rodete y el fluido se verá disminuida. Para que la fórmula de Euler se ajuste mejor a la práctica se recurre a un coeficiente de disminución, mismo que afecta a la altura teórica de Euler (Araujo, 1985: pp.35-36).

La ecuación que relaciona el factor de disminución y la altura teórica es:

$$H_u = H_\infty e_z$$

Donde:

- $H_u$ : es la altura teórica de Euler con número finito de alabes
- $H_\infty$ : es la altura teórica de Euler con número infinito de álabes
- $e_z$ : es el coeficiente de disminución de trabajo

Una forma rápida de determinar el coeficiente de disminución de trabajo únicamente en función del número de alabes, se presenta en la siguiente tabla:

**Tabla 2-2:** Coeficientes de disminución de trabajo para bombas centrífugas

Coeficientes de disminución de trabajo							
$N$	4	6	8	10	12	16	24
$e_z$	0,624	0,714	0,768	0,806	0,834	0,870	0,908

Fuente: (Zamora y Viedma, 2016)

Realizado por: Arias, D. 2021

El valor del coeficiente de disminución  $e_z$  también se lo puede calcular, y existen distintas metodologías para su cálculo, una de las ecuaciones más utilizadas es:

$$e_z = \frac{1}{1 + \frac{1,5 + \frac{(1,1)\beta_2}{90^\circ}}{z[1 - (r_1/r_2)^2]}}$$

#### 2.5.4. Número de álabes

La selección correcta del número de álabes de una turbomáquina es hasta cierto punto empírica, sin embargo, existen ciertas recomendaciones que limitan el campo de elección de esta variable, estas recomendaciones son producto de la experiencia y numerosos ensayos (Araujo, 1985: pp.35-36).

- Rodetes con álabes inclinados hacia adelante comúnmente usan entre 32 y 66 álabes.
- Rodetes con álabes curvados hacia atrás utilizan entre 14 y 24 álabes.
- Rodetes con álabes de doble curvatura oscilan entre 16 y 24 álabes.

Existen fórmulas empíricas que implican una ayuda para el diseñador para la correcta selección del número de álabes, la más utilizada, así como sencilla es la fórmula de Stepanoff, aplicable para bombas y ventiladores con ángulos  $\beta_2$  comprendidos entre  $25^\circ$  y  $90^\circ$  (Mataix, 1975: pp.439-440).

$$z = \frac{\beta_2}{3}$$

#### **2.5.5. Espesor de los álabes**

El espesor de los álabes naturalmente depende del esfuerzo al que están sometidos y del material empleado para su construcción. Se debe tomar en cuenta que álabes con menor espesor aumentan el rendimiento del equipo, sin embargo es más fácil que se deterioren en menor tiempo (Mataix, 1975: p.440).

#### **2.5.6. Coeficiente de obstrucción**

El espesor de los álabes implica también un factor de reducción, así como el número de álabes. El coeficiente de obstrucción relaciona básicamente la razón entre el área de entrada o salida teórica (álabes sin espesor) y la real (álabes con espesor) (Zamora y Viedma, 2016: pp.201-202).

La expresión que determina este coeficiente a la entrada es:

$$C_o = \frac{\pi D_1}{\pi D_1 - N \left( \frac{e}{\text{sen} \beta_1} \right)}$$

Para el cálculo del coeficiente a la salida se puede utilizar la misma fórmula, sin embargo lo más común es resolver este problema constructivamente, afilando las puntas de los álabes, con eso se puede asumir un factor de obstrucción de uno (Zamora y Viedma, 2016: p202).

## **2.6. Simulación**

El rodete es el elemento principal de una turbomáquina, por lo tanto, mediante la implementación de la simulación se puede interpretar de mejor manera su funcionamiento. La simulación de un rodete centrífugo es un proceso que requiere precisión. Las herramientas de simulación se han

convertido en un gran aliado del diseñador, ya que le permite diseñar partes mecánicas con mayor rapidez y exactitud (Choto, 2017: p27).

### 2.6.1. Dinámica de fluidos computacional

El análisis de la dinámica de fluidos computacional se la realiza mediante el método de volúmenes finitos, por medio de la división del fluido en números finitos de volúmenes de control. Los volúmenes de control facilitan la aplicación de la ecuación principal de los volúmenes finitos (Choto, 2017: p29).

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho \phi dV - dA = \oint_A \Gamma \Delta \phi. dA + \int_V S_\phi. dV$$

La ecuación principal de volúmenes finitos se reduce a una expresión más simple al tomar en cuenta las ecuaciones de la conservación que se muestran a continuación:

**Tabla 3-2:** Ecuaciones de conservación

Ecuación de conservación	$\phi$	$\Gamma$	$S_\phi$
Masa	1	0	0
Momento en x	u	$\mu$	$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \mu \Delta - \bar{u} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial x} \right)$
Momento en y	v	$\mu$	$\frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \mu \Delta - \bar{u} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial y} \right)$
Momento en z	w	$\mu$	$\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \mu \Delta - \bar{u} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right)$
Energía	T	kC <sub>o</sub>	0

Fuente: (Choto, 2017)

Realizado por: Arias, D. 2021

### 2.7. Automatización y control

Un sistema de control no es más que un conjunto de métodos o técnicas, aplicados en un determinado proceso para garantizar el correcto funcionamiento de las distintas variables que lo componen, haciendo que dichas variables permanezcan en los rangos de operación establecidos

por el diseñador (Vera y Cadena, 2019: p.9). Los sistemas de control se pueden dividir en: sistemas de control de lazo abierto y sistemas de control de lazo cerrado.

### ***2.7.1. Sistema de control de lazo abierto***

Son aquellos en los que la salida no tiene ningún efecto sobre la acción de control, en otras palabras, en un sistema de lazo abierto la salida no se mide con ningún sensor, por lo tanto, no existe realimentación del sistema. En estos sistemas la salida tiene una posición fija, por tal motivo este tipo de sistemas requieren de una buena calibración del sistema. Ante presencia de perturbaciones que modifiquen el funcionamiento normal de este sistema empezará a arrojar resultados no deseados, por lo tanto, este tipo de sistemas solo se aplica en procesos donde sea clara la relación entre la entrada y la salida del sistema (Ogata, 2010: p.8).

### ***2.7.2. Sistema de control de lazo cerrado***

En un sistema de control de lazo cerrado, se alimenta al controlador de una señal de error, que resulta de la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (misma señal de salida o una función de ella), con el fin de estabilizar el sistema en un valor deseado. Este tipo de control necesariamente necesita realimentación (Ogata, 2010: p.8).

### ***2.7.3. Componentes de control***

Los componentes de control son aquellos dispositivos eléctricos o electrónicos que permiten la automatización y control de un determinado proceso, con el objetivo de mejorar la calidad de este. Entre los componentes de control más comunes tenemos: autómatas programables, sensores, variadores de frecuencia, temporizadores, relés, contactores, pulsadores entre otros.

#### ***2.7.3.1. Variador de frecuencia***

Es un dispositivo electrónico que permite controlar motores de inducción, que tienen como objetivo variar la frecuencia de entrada al motor de inducción trifásico, esto conlleva a la disminución o aumento de la velocidad de este, estos dispositivos además de controlar la velocidad de un motor pueden también controlar el sentido de rotación de este. Estos dispositivos también son conocidos como inversores (Sanabria y Sánchez, 2016: pp. 21-22).



### *2.7.3.2. Relé Temporizador*

Un relé temporizador es un dispositivo electrónico que está diseñado para temporizar eventos en un determinado proceso industrial, abriendo o cerrando contactos en un tiempo ajustado por el programador, generalmente están compuestos por: un oscilador de pulsos, un contador, y una salida relé (Pillapa y Hurtado, 2010: p. 20).

## **2.8. Calidad del agua**

Ya que el agua es el medio en el que crece el camarón su mala calidad puede afectar severamente la supervivencia del camarón y por lo tanto disminuir drásticamente la producción, por tal motivo es necesario que esta esté libre de tóxicos, pesticidas y demás contaminantes, así como tener un PH y temperaturas adecuados, otro factor importante es la cantidad de oxígeno disuelto que esta contenga, ya que el oxígeno es el principal factor para el correcto desarrollo y supervivencia de la mayoría de especies acuáticas (Boyd 1998: pp.1-3).

### *2.8.1. Oxígeno disuelto*

Se define al oxígeno disuelto (OD) como la cantidad de oxígeno que se encuentre inmersa en el agua, la cual es fundamental para la supervivencia y reproducción de las especies acuáticas. Este parámetro generalmente se lo utiliza para medir la calidad del agua de los estanques (Goyenola, 2007: p.1).

#### *2.8.1.1. Influencia de la salinidad*

La cantidad de sales en el agua disminuye la capacidad de disolución del aire en el agua, lo que implica que el nivel de saturación de oxígeno disuelto disminuye conforme la salinidad del agua aumenta, por lo tanto con ayuda de tablas se puede predecir la concentración de saturación del oxígeno disuelto en función de la salinidad, a una temperatura y altitud dada (Boyd, 2018: p.1).

**Tabla** ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.**4-2:**

Niveles de saturación a distintas salinidades

Salinidad g/L	Saturación de oxígeno disuelto mg/L
0	9,08
10	8,56
20	8,07
30	7,60
40	7,17

Fuente: (Boyd, 2018)

Realizado por: Arias, D. 2021

### 2.8.1.2. Influencia de la temperatura

La solubilidad de los gases en el agua se ve afectada por la temperatura de forma no lineal. Al disminuir la temperatura aumenta considerablemente la solubilidad del oxígeno en el agua, mientras que a elevadas temperaturas la concentración de saturación del oxígeno disuelto disminuye (Rojas, 2010: p.4).

**Tabla 5-2:** Niveles de saturación a distintas temperaturas

Temperatura °C	Saturación de oxígeno disuelto mg/L
0	14,6
5	12,4
10	10,9
15	9,8
20	9,1
25	8,1
30	7,5

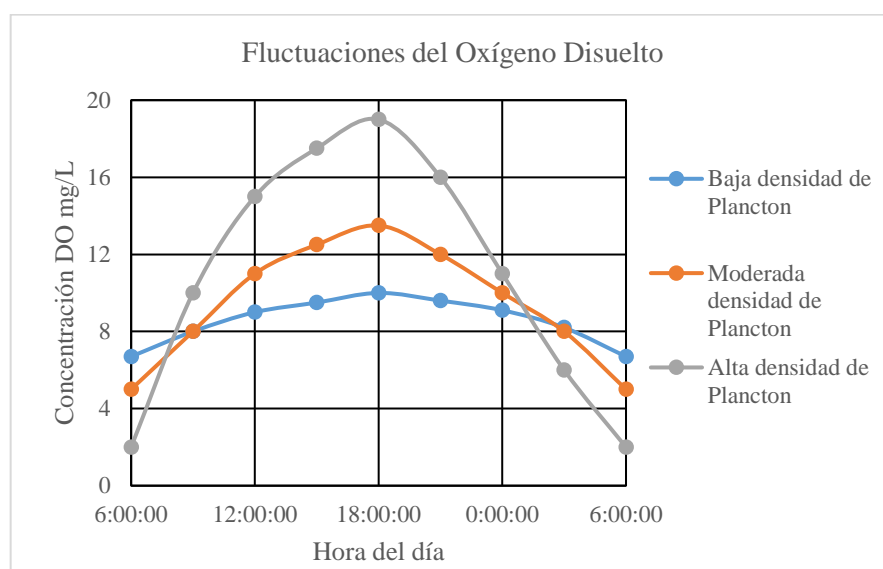
Fuente: (Rojas, 2010)

Realizado por: Arias, D. 2021

### 2.8.1.3. Fluctuaciones del oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto puede variar durante el transcurso del día debido a diversos factores, durante estas variaciones el oxígeno puede alcanzar concentraciones muy bajas, esto trae como

consecuencia la muerte de las especies cultivadas, sin embargo, también puede alcanzar concentraciones elevadas incluso sobre el nivel de saturación, provocando sobresaturación de oxígeno disuelto. Durante las horas del día en las que existe luz solar se promueve la fotosíntesis que es una generadora de oxígeno, por lo tanto, aumentan radicalmente los niveles de oxígeno disuelto en el agua, todo lo contrario, ocurre en la noche cuando desaparece la fotosíntesis y únicamente prevalece la respiración de las especies disminuyendo peligrosamente los niveles de oxígeno disuelto. Las fluctuaciones de oxígeno disuelto se ven intensificadas por los niveles de fitoplancton existentes en el fondo del estanque aumentando la distancia entre los niveles máximos y mínimos de oxígeno disuelto en función de la densidad del fitoplancton existente (Boyd, 2018: p.1).



**Gráfico 3-2:** Fluctuaciones del Oxígeno disuelto

Fuente: (Boyd, 2018)

### 2.8.2. Influencia en el camarón del oxígeno disuelto

Los niveles de OD en estanques dedicados a la cría del camarón generalmente oscilan entre 4 y 10 mg/L, si el nivel de OD se reduce significativamente puede causar estrés en el camarón en incluso la muerte de este cuando se lo expone prolongadamente a niveles de OD menores a 1 mg/L (Rúales, 2012: p.5). Los niveles de OD están relacionados directamente con la salud de las especies cultivadas como se muestra a continuación:

**Tabla 6-2:** Niveles de OD y consecuencias

Cantidad de OD	Consecuencia
0 a 1 mg/L	Letal
1 a 1.5 mg/L	Letal con exposición prolongada
1.7 a 3 mg/L	Crecimiento lento, poca resistencia a enfermedades
> a 4 mg/L	Óptimo

Fuente: (Nicovita, 1997)

Realizado por: Arias, D. 2021

## 2.9. Medición del oxígeno disuelto

El oxígeno no es muy soluble en el agua por lo que el agua puede retener concentraciones limitadas de oxígeno, además la tasa de consumo de oxígeno de las especies bióticas puede ser muy alta en determinados intervalos de tiempo ocasionando concentraciones mínimas de oxígeno disuelto. Es posible controlar los niveles de oxígeno disuelto con ayuda de aireación mecánica, sin embargo, siempre resulta imprescindible contar con un equipo confiable capaz de brindar una medida precisa de este parámetro (Hargreaves y Tucker, 2002: p.1).

### 2.9.1. Medidores de oxígeno disuelto

Los medidores de oxígeno generalmente están conformados por dos componentes principales; el sensor denominado sonda y el medidor. Existen varios tipos de medidores, pero su funcionamiento es prácticamente el mismo: la sonda al detectar el oxígeno reacciona enviando una señal eléctrica hacia el medidor, mismo que la interpreta y arroja un resultado proporcional a la señal recibida en forma de nivel de concentración de oxígeno disuelto, es decir estos sensores no miden directamente la concentración de oxígeno disuelto, sino que miden un voltaje que es directamente proporcional al nivel de oxígeno disuelto en el agua (Hargreaves y Tucker, 2002: p.1).

#### 2.9.1.1. Sensores polarográficos

En este tipo de sensores el ánodo se fabrica de oro o platino mientras que el cátodo es de plata. Al aplicar un voltaje de polarización al cátodo se provoca una reducción química dentro de la sonda que genera un voltaje que después se interpreta en la pantalla como un determinado nivel

de oxígeno. Este tipo de sensores tienen un tiempo de polarización determinado que se debe cumplir antes de realizar la medición, caso contrario puede dar resultados erróneos en la medición (Hargreaves y Tucker, 2002: p.2).

#### *2.9.1.2. Sensores galvánicos*

Este tipo de sensores utiliza plata o platino para el cátodo mientras que para el ánodo pueden utilizar hierro plomo o zinc. En este tipo de sensores no se aplica ningún voltaje de polarización, pues la reacción química sucede de manera espontánea. Este tipo de sensores tienen mejores tiempos de respuesta que los polarográficos, sin embargo, sus costos son más elevados (Hargreaves y Tucker, 2002: p.2).

#### *2.9.1.3. Sensores de fibra óptica*

Es tipo de sensores está conformado por una fibra óptica que contiene en la punta del sensor un tinte fluorescente sensible al oxígeno disuelto. La fibra óptica conduce un haz de luz emitida por un diodo Led al sensor, esto estimula a que el tinte emita una luz que regresa por la fibra óptica hasta un fotodetector. El oxígeno circundante en la punta del sensor opaca la luz, y este grado de extinción de luz está relacionado directamente con la cantidad de oxígeno disuelto en el agua (Hargreaves y Tucker, 2002: p.2).

### **2.10. Transferencia de oxígeno**

#### *2.10.1. Coeficiente de transferencia de oxígeno*

El coeficiente de transferencia de oxígeno  $K_L a$  es un parámetro que mide la velocidad de la transferencia de oxígeno desde la fase gaseosa hasta el medio líquido, este parámetro mide la capacidad de transferencia de oxígeno de determinado equipo de aireación (Zaragoza, 2009: p.9).

#### *2.10.2. Tasa de transferencia de oxígeno estándar*

La tasa de transferencia de oxígeno estándar mide el flujo másico de oxígeno que se disuelve en un cuerpo de agua, este parámetro es dependiente del volumen y muestra claramente la capacidad que tiene un mecanismo de disolver oxígeno en el agua. La tasa de transferencia de oxígeno es la cantidad de oxígeno que un aireador puede transferir al agua por unidad de tiempo en condiciones normales como: temperatura de 20° C y agua sin contenido de sólidos (Vela, 2009: p.72).

### ***2.10.3. Eficiencia de aireación estándar***

La eficiencia de aireación estándar SAE no es más que el cociente de la tasa de transferencia de oxígeno estándar y la potencia del aireador empleado, por lo que expresa la cantidad de oxígeno transferido por cada kilowatt/hora. Este parámetro permite comparar equipos de aireación independientemente de la potencia que puedan generar (Vela, 2009: p.72).

## CAPITULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Selección de alternativas

Para la selección del tipo de aireador difusor a diseñar se parte de tres alternativas preliminares. Estas alternativas surgen de modelos existentes en el mercado. La diferencia entre las alternativas radica en el rodete. Las alternativas planteadas son:

**Tabla 1-3:** Alternativas de selección

Alternativa 1	Rodete Radial
Alternativa 2	Rodete Axial
Alternativa 3	Rodete Helicoidal

Fuente: Arias D. 2021

Realizado por: Arias D. 2021

#### 3.1.1. Criterios de evaluación

Los criterios de valoración que se establecen para la selección son:

- Contaminación (remoción de sedimentos)
- Difusión (homogeneidad en la difusión)
- Mantenimiento
- Costo

A continuación, se evalúa el peso específico de cada criterio.

**Tabla 2-3:** Evaluación del peso específico de cada criterio

Criterio	Contaminación	Difusión	Mantenimiento	Costo	$\Sigma+1$	Ponderación
Contaminación		0.5	1	1	3,5	0,35
Difusión	0,5		1	1	3,5	0,35
Mantenimiento	0	0		0,5	1,5	0,15
Costo	0	0	0,5		1,5	0,15
					10	1

Fuente: Arias D. 2021

Realizado por: Arias D. 2021

Para el criterio de contaminación se desarrolla la siguiente tabla.

**Tabla 3-3:** Evaluación de soluciones respecto del criterio contaminación

Contaminación	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	1	3	0,5
Alternativa 2	0		0,5	1,5	0,25
Alternativa 3	0	0,5		1,5	0,25
				6	1

Fuente: Arias D. 2021

Realizado por: Arias D. 2021

Para el criterio de difusión se desarrolla la siguiente tabla.

**Tabla 4-3:** Evaluación de soluciones respecto del criterio difusión

Difusión	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	1	3	0,5
Alternativa 2	0		0,5	1,5	0,25
Alternativa 3	0	0,5		1,5	0,25
				6	1

Fuente: Arias D. 2021

Realizado por: Arias D. 2021

Para el criterio de mantenimiento se desarrolla la siguiente tabla.

**Tabla 5-3:** Evaluación de soluciones respecto del criterio Mantenimiento

Mantenimiento	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	0	1	0,17
Alternativa 2	1		1	3	0,5
Alternativa 3	1	0		2	0,33
				6	1

Fuente: Arias D. 2021

Realizado por: Arias D. 2021

Para el criterio de costo se desarrolla la siguiente tabla.



**Tabla 6-3:** Evaluación de soluciones respecto del criterio Costo

Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0,5	1	2,5	0,42
Alternativa 2	0,5		1	2,5	0,42
Alternativa 3	0	0		1	0,16
				6	1

Fuente: Arias D. 2021

Realizado por: Arias D. 2021

La selección de la alternativa más viable viene dada el desarrollo de la siguiente tabla.

**Tabla 7-3:** Soluciones de las alternativas

Alternativa	Contaminación	Difusión	Mantenimiento	Costo	$\Sigma$	Prioridad
Alternativa 1	0,175	0,175	0,0255	0,063	0,4385	1
Alternativa 2	0,0875	0,0875	0,075	0,063	0,313	2
Alternativa 3	0,0875	0,0875	0,0495	0,024	0,2485	3

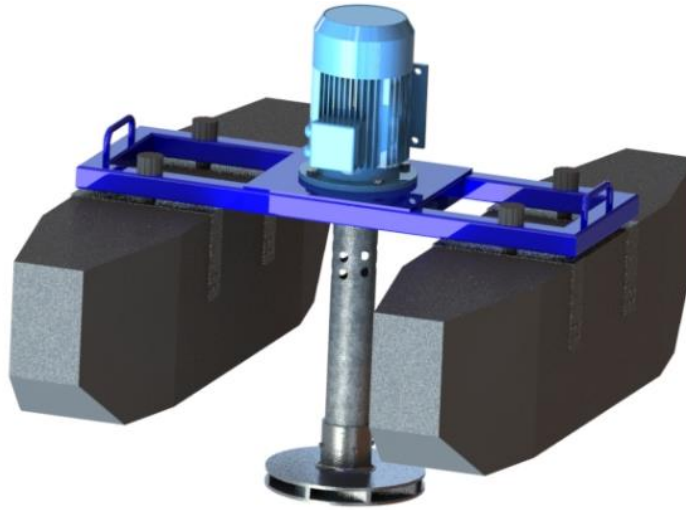
Fuente: Arias D. 2021

Realizado por: Arias D. 2021

Finalmente, la alternativa 1 se muestra como la mejor alternativa para el diseño del aireador, por lo tanto, se diseñará un aireador difusor con rodete radial.

### 3.2. Diseño aireador difusor tornado

El diseño de un aireador difusor tornado está dentro de la metodología dispuesta para las turbomáquinas hidráulicas radiales (centrífugas), puesto que su principal elemento es el rodete encargado de transferir el aire atmosférico hacia el interior del estanque. El diseño del rodete es crucial y por lo tanto se requiere precisión. El diseño del aireador se divide en diseño hidráulico (diseño del rodete) y diseño mecánico (resto de componentes sometidos a esfuerzos), para la primera etapa del diseño se utilizará los principios básicos de las turbomáquinas y para la segunda las metodologías de diseño tradicional. Para el modelado de la máquina se utilizó SolidWorks, a continuación, se muestra el modelado del aireador difusor tornado que se plantea en el presente trabajo.



**Figura 1-3:** Modelado del aireador difusor tornado

Realizado por: Arias, D. 2021

### ***3.2.1. Parámetros de funcionamiento***

A continuación, se determina en qué condiciones va a trabajar el aireador difusor, es decir los parámetros de funcionamiento que se requieren, esto mediante la recomendación de diversos autores y el análisis de equipos similares existentes.

### ***3.2.2. Profundidad de trabajo***

Estos equipos trabajan con el rodete inmerso en el agua, por lo tanto, la profundidad de trabajo es un valor importante para el posterior diseño del rodete, puesto que esta profundidad se traduce como la presión estática que debe vencer el aireador para permitir el ingreso del aire atmosférico. Esta profundidad en primera instancia está delimitada por la propia profundidad del estanque, estos estanques para sistemas intensivos son diseñados con una profundidad mínima de 1m (Akifumi, 2002: p. 4). Un aireador de hélice (similar principio de funcionamiento) fue evaluado a distintas profundidades, obteniendo que a una profundidad de inmersión de 14 cm se obtuvo el mejor desempeño (Kumar, 2010: p. 74).

Tomando en cuenta estos factores y tratando de eliminar la remoción de sedimentos se opta por utilizar una profundidad de inmersión conservadora de 20 cm.

### 3.2.3. *Potencia de funcionamiento*

La potencia requerida para el funcionamiento del aireador está en función de varios parámetros. Entre los principales parámetros tenemos: la profundidad de funcionamiento, la densidad del fluido, el caudal que trasiega por el rodete, las velocidades del rodete, las inercias de cada uno de los componentes que rotan y la rampa de aceleración que se disponga, sin embargo, además de esto, existen bibliografías que han desarrollado estudios en aireadores similares a distintas potencias. Estos estudios son de gran ayuda para la preselección de la potencia que se implementará.

Las potencias de funcionamiento de aireadores de hélice van desde los 0,125 Hp, pudiendo llegar hasta los 20 Hp, sin embargo los aireadores que otorgan mejor transferencia de oxígeno por unidad de potencia son los que oscilan entre los 2 y 3 Hp (Boyd y Ahmad, 1987: p.45).

Tomando en cuenta lo anteriormente expuesto se delimita la potencia de funcionamiento del equipo a diseñar a 2 Hp.

### 3.3. Selección de materiales

La selección de los materiales a utilizar se realiza con ayuda del software CES Edupack. El software ayuda a procesar los criterios ingenieriles propuestos. El objetivo es mostrar un material o conjunto de materiales que cumplen con los requerimientos establecidos.

#### 3.3.1. *Estrategia de selección*

La selección de los materiales se basa en primera instancia en determinar los requerimientos de diseño de la pieza, es decir condiciones de trabajo, aspecto constructivo, entre otros. Posteriormente se determina mediante filtros un grupo de materiales que cumplan con las condiciones establecidas al inicio. La selección definitiva del material es en función del objetivo que se busca del material, ya sea disminuir peso, bajar costos, entre otros.



**Figura 2-3:** Estrategia de selección

Realizado por: Arias, D. 2021

### 3.3.2. Metodología para la selección de los materiales

A continuación, se detallan los elementos y las funciones principales que cumplen, esta información es útil para mediante criterio ingenieril determinar las posibles restricciones en cada caso.

**Tabla 8-3:** Funciones de cada elemento

Elemento	Detalle
Rodete	Obtenido a partir de fundición Trabajo inmerso en agua salada Transfiere energía mecánica
Tubo de aspiración	Trasfiere potencia Trabajo inmerso en agua salada
Acople	Transfiere potencia Trabaja en ambiente salino
Estructura	Soporta peso Trabaja en ambiente salino
Flotador	Trabaja inmerso en ambiente salino

Fuente: Arias D. 2021

Realizado por: Arias D. 2021

Un problema recurrente ante la selección de un material es la disponibilidad de este, además del proceso constructivo que se quiera efectuar. Es necesario implementar restricciones generales que contemplen la disponibilidad del material en el país, así como factibilidad de implementar el proceso constructivo que conlleva la selección de determinado material. A continuación, se muestra en la siguiente tabla las restricciones adicionales y las posibles alternativas de selección para los distintos elementos, con ayuda del software CES EduPack.

**Tabla 9-3:** Preselección del material

Elemento	Restricciones	Objetivos	Alternativa
Rodete	Trabajo en agua salada Fundible Densidad Costo	Reducir costos Minimizar peso	Aluminio series: 3xxx, 4xxx Acero Inoxidable: ASTM CA-6NM
Tubo de aspiración	Propiedades mecánicas Trabajo en agua salada Perfil comercial	Reducir costos	Acero Inoxidable: 316L, 316, 316Ti, 316 LN

	Costo		
Acople	Trabajo en ambiente salino Maquinabilidad Densidad Costo	Reducir costos Minimizar peso Facilitar mecanizado	Aluminio series: 3xxx, 4xxx
Estructura	Propiedades mecánicas Trabajo en ambiente salino Maquinabilidad Costo	Garantizar resistencia Minimizar costos	Acero al carbono: 1015, 1020

Fuente: Arias D. 2021

Realizado por: Arias D. 2021

Finalmente, en base a aspectos como disponibilidad del material, facilidad constructiva, accesibilidad financiera, se opta por la selección de los siguientes materiales.

**Tabla 10-3:** Selección del material

Elemento	Detalle
Rodete	Aluminio comercial
Tubo de aspiración	Acero inoxidable 316L
Acople	Aluminio comercial
Estructura	Acero al carbono 1020

Fuente: Arias D. 2021

Realizado por: Arias D. 2021

### 3.4. Diseño hidráulico

Cuando el aireador se encuentra funcionando en régimen permanente, el rodete se comporta como un ventilador, puesto que en su interior únicamente existe aire, por lo tanto, se considerará como fluido el aire atmosférico.

Los datos iniciales para el diseño son los siguientes:

$Q = 75 \text{ L/s}$  (caudal de diseño)

$p_e = 200 \text{ mm.c.a}$  (presión estática, la misma que la profundidad de trabajo)

$\rho = 1,2754 \text{ kg/m}^3$  (densidad del aire a  $20^\circ$ )

$\psi = 1,2$  (coeficiente de presión)

$\phi = 0,3$  (coeficiente de caudal)

La altura de presión que debe vencer el rodete viene dada por:

$$H = \frac{\Delta P}{\rho g}$$

Donde:

H: altura de presión en [m]

$\Delta P$ : es la presión estática [Pa]

$\rho$ : densidad del aire [ $\text{kg/m}^3$ ]

g: gravedad [ $\text{m/s}^2$ ]

La altura de presión es:

$$H = \frac{200 * 9,806}{1,2754 * 9,8}$$

$$H = 156,91 \text{ m}$$

El cálculo de  $u_2$  viene dado por:

$$u_2 = \sqrt{\frac{2gH}{\psi}}$$

Donde:

$u_2$ : velocidad periférica a la salida del rodete [m/s]

g: gravedad [ $\text{m/s}^2$ ]

H: altura de presión en [m]

$\psi$ : coeficiente de presión

Por lo tanto,  $u_2$  es:

$$u_2 = \sqrt{\frac{2 * 9,8 * 156,91}{1,2}}$$

$$u_2 = 50,62 \text{ m/s}$$

El diámetro externo  $d_2$  lo se lo calcula así:

$$d_2 = \frac{60u_2}{\pi n}$$

Donde:

$d_2$ : diámetro exterior del rodete [m]

$u_2$ : velocidad periférica a la salida del rodete [m/s]

$n$ : velocidad del motor [rpm]

El diámetro exterior del rodete será:

$$d_2 = \frac{60 * 50,62}{\pi * 3600}$$

$$d_2 = 0,269 \text{ m}$$

Para el cálculo de la velocidad de aire en la boca de aspiración tenemos en primer lugar que determinar:

$$n_q = \frac{nQ^{1/2}}{H^{3/4}}$$

Donde:

$n_q$ : coeficiente adimensional

$n$ : velocidad del motor [rpm]

$Q$ : caudal [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$H$ : altura de presión en [m]

De esta forma tenemos que  $n_q$  es:

$$n_q = \frac{3600 * 0,075^{1/2}}{156,91^{3/4}}$$

$$n_q = 22,24$$

Ahora  $k_{ca}$  viene dado por:

$$k_{ca} = 0,55 \left( \frac{n_q}{100} \right)^{1/3}$$

Donde:

$k_{ca}$ : coeficiente adimensional

$n_q$ : coeficiente adimensional

por lo tanto,  $k_{ca}$  es:

$$k_{ca} = 0,55 \left( \frac{22,24}{100} \right)^{1/3}$$
$$k_{ca} = 0,33$$

El cálculo de la velocidad absoluta en la entrada de la boca de aspiración viene dado por:

$$c_a = k_{ca} \sqrt{2gH}$$

Donde:

$c_a$ : velocidad de aspiración [m/s]

$k_{ca}$ : coeficiente adimensional

$g$ : gravedad [m/s<sup>2</sup>]

$H$ : altura de presión en [m]

De esta forma la velocidad de aspiración es:

$$c_a = 0,33 \sqrt{2 * 9,8 * 156,91}$$
$$c_a = 18,48 \text{ m/s}$$

Finalmente, el diámetro de aspiración viene dado por la siguiente expresión:

$$Q = \frac{\pi}{4} d_a^2 \eta_v c_a$$

Despejando tenemos:

$$d_a = \sqrt{\frac{4 * Q}{\pi \eta_v c_a}}$$

Donde:

$d_a$ : diámetro de aspiración [m]

$Q$ : caudal [m<sup>3</sup>/s]

$\eta_v$ : eficiencia volumétrica

$c_a$ : velocidad de aspiración [m/s]

De esta forma tenemos que el diámetro de aspiración es:



$$d_a = \sqrt{\frac{4 * 0,075}{\pi * 1 * 18,48}}$$

$$d_a = 0,0719 \text{ m}$$

El valor del diámetro interno del rodete es decir  $d_1$  es 0,10 según el criterio del diseñador:

$$d_1 = 0,10 \text{ m}$$

Para el cálculo de  $u_1$  se hace uso de la siguiente expresión:

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{d_2}{d_1}$$

Despejando obtenemos:

$$u_1 = \frac{u_2 d_1}{d_2}$$

Donde:

$u_1$ : velocidad periférica a la entrada del rodete [m/s]

$u_2$ : velocidad periférica a la salida del rodete [m/s]

$d_1$ : diámetro interior del rodete [m]

$d_2$ : diámetro exterior del rodete [m]

De esta forma la velocidad periférica a la entrada del rodete es:

$$u_1 = \frac{55,46 * 0,10}{0,269}$$

$$u_1 = 18,85 \text{ m/s}$$

Para el cálculo de la velocidad absoluta a la entrada del álabe se utiliza la siguiente expresión:

$$c_{om} = m c_a$$

Siendo:

$$m = 0,5 * \left(\frac{100}{n_q}\right)^{1/6}$$

Donde:

$c_{om}$ : velocidad absoluta a la entrada del álabe [m/s]

$m$ : coeficiente adimensional

$c_a$ : velocidad de aspiración [m/s]

$n_q$ : coeficiente adimensional

Reemplazando los valores en las respectivas ecuaciones tenemos:

$$m = 0,5 * \left( \frac{100}{22,24} \right)^{1/6}$$

$$m = 0,642$$

$$c_{om} = 0,642 * 18,48$$

$$c_{om} = 11,87 \text{ m/s}$$

Para el cálculo del ancho del rodete en la entrada se usa la siguiente ecuación:

$$b_1 = \frac{Q}{\eta_v \pi d_1 c_{om}}$$

Donde:

$b_1$ : ancho del rodete en la entrada [m]

$Q$ : caudal [m<sup>3</sup>/s]

$\eta_v$ : eficiencia volumétrica

$d_1$ : diámetro interior del rodete [m]

$c_{om}$ : velocidad absoluta a la entrada del álabe [m/s]

De esta forma obtenemos el valor de  $b_1$ :

$$b_1 = \frac{0,075}{1 * \pi * 0,10 * 11,87}$$

$$b_1 = 0,02 \text{ m}$$

Para determinar inicialmente la velocidad  $c_1$  se asume que  $c_1=c_{om}$  con un coeficiente de obstrucción de 1,05, por lo que la expresión queda así:

$$c_1 = \tau_1 c_{om}$$

Donde:

$c_1$ : velocidad absoluta a la entrada [m/s]

$\tau_1$ : coeficiente de obstrucción

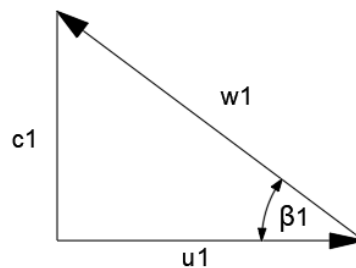
$c_{om}$ : velocidad absoluta a la entrada del álabe [m/s]

De esta manera obtenemos que:

$$c_1 = 1,05 * 11,87$$

$$c_1 = 12,46 \text{ m/s}$$

El ángulo  $\beta_1$  se lo obtiene del triángulo de velocidades que se forma a la entrada del rodete.



**Figura 3-3:** Triángulo de velocidades a la entrada

Realizado por: Arias, D. 2021

Por trigonometría se tiene que:

$$\beta_1 = \arctan \frac{c_1}{u_1}$$

Donde:

$\beta_1$ : es el ángulo de entrada [°]

$c_1$ : velocidad absoluta a la entrada [m/s]

$u_1$ : velocidad periférica a la entrada del rodete [m/s]

De esta manera el ángulo de entrada sería:

$$\beta_1 = \arctan \frac{12,46}{18,85}$$

$$\beta_1 = 33,47^\circ$$

Para el cálculo del ángulo de salida  $\beta_2$  se tiene la siguiente expresión:

$$\beta_2 = \beta_1 + 10^\circ$$

Donde:

$\beta_2$ : es el ángulo de salida [°]

$\beta_1$ : es el ángulo de entrada [°]

Por lo tanto, el ángulo de salida es:

$$\beta_2 = 33,47^\circ + 10^\circ$$

$$\beta_2 = 43,47^\circ$$

Para el cálculo del número de álabes, se utiliza la siguiente expresión:

$$z = k \frac{d_2 + d_1}{d_2 - d_1} \operatorname{sen} \left( \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \right)$$

Donde:

z: número de álabes

k: coeficiente de 3 a 10

$d_1$ : diámetro interior del rodete [m]

$d_2$ : diámetro exterior del rodete [m]

$\beta_1$ : es el ángulo de entrada [°]

$\beta_2$  ángulo de salida [°]

Por lo tanto, el número de álabes de nuestro rodete será:

$$z = 10 * \frac{0,269 + 0,10}{0,269 - 0,10} \operatorname{sen} \left( \frac{33,47 + 43,47}{2} \right)$$

$$z = 8$$

Al construir el rodete con un espesor de alabe de 5 mm se tiene que:

$$t_1 = \frac{\pi d_1}{z}$$

Donde:

$t_1$ : separación entre álabes [m]

$d_1$ : diámetro interior del rodete [m]

$z$ : número de álabes

Entonces la separación entre los álabes es:

$$t_1 = \frac{\pi * 0,10}{8}$$
$$t_1 = 0,0393 \text{ m}$$

El coeficiente de obstrucción viene dado por:

$$\tau_1 = \frac{t_1 \operatorname{sen}\beta_1}{t_1 \operatorname{sen}\beta_1 - s_1}$$

Donde:

$\tau_1$ : coeficiente de obstrucción

$t_1$ : separación entre álabes [m]

$\beta_1$ : es el ángulo de entrada [°]

$s_1$ : espesor de alabe a la entrada

Finalmente, el nuevo coeficiente de obstrucción será:

$$\tau_1 = \frac{0,0393 * \operatorname{sen} (33,47)}{0,0393 * \operatorname{sen} (33,47) - 0,005}$$
$$\tau_1 = 1,3$$

En este caso el factor de corrección es muy significativo debido a que el espesor de los alabes es considerable, por lo tanto, se deberá rectificar los valores anteriores, donde se partió asumiendo un coeficiente de obstrucción de 1,05, hasta que exista convergencia

A continuación, es la siguiente tabla se muestra el resumen de los resultados con el nuevo coeficiente de obstrucción:

**Tabla 11-3:** Resumen de cálculos con nuevo coeficiente de obstrucción

Variable	con $\tau=1,05$	con $\tau=1,3$	con $\tau=1,26$
$c_1$ : velocidad absoluta a la entrada [m/s]	12,46	15,43	14,96
$\beta_1$ : es el ángulo de entrada [°]	33,47	39,31	38,43
$\beta_2$ ángulo de salida	43,47	49,31	48,43
z: número de álabes	8	8	8
$t_1$ : separación entre álabes [m]	0,0393	0,0393	0,0393
$\tau_1$ : coeficiente de obstrucción	1,3	1,26	1,26

Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021

Al existir convergencia entre los coeficientes de obstrucción se puede seguir al siguiente punto, ahora se determina el coeficiente de disminución de trabajo con la siguiente ecuación:

$$e_z = \frac{1}{1 + \frac{\psi r_2^2}{z s}}$$

Siendo:

$$s = \frac{1}{2}(r_2^2 - r_1^2) \quad \& \quad \psi = 0,7 \left(1 + \frac{\beta_2}{60}\right)$$

Donde:

 $e_z$ : coeficiente de disminución de trabajo $\psi$ : coeficiente de presión $r_2$ : radio exterior del rodete [m] $r_1$ : radio interior del rodete [m]

z: número de álabes

 $\beta_2$  ángulo de salida [°]

Remplazando los valores en las respectivas ecuaciones tenemos:

$$s = \frac{1}{2}(0,134^2 - 0,05^2) \quad \& \quad \psi = 0,7 \left(1 + \frac{48,43}{60}\right)$$

$$s = 0,0077 \text{ m}^2 \quad \& \quad \psi = 1,265$$

Finalmente, el coeficiente de disminución de trabajo es:

$$e_z = \frac{1}{1 + \frac{1,265 * 0,077^2}{8 * 0,0077}}$$
$$e_z = 0,731$$

Conocido el coeficiente de disminución de trabajo, se puede calcular la altura teórica de Euler (asumiendo un rendimiento hidráulico de 0,9) con la siguiente fórmula:

$$H_{u\infty} = \frac{H}{\eta_H e_z}$$

Donde:

$H_{u\infty}$ : altura teórica de Euler [m]

H: altura de presión [m]

$\eta_H$ : rendimiento hidráulico

$e_z$ : coeficiente de disminución de trabajo

Entonces la altura teórica de Euler es:

$$H_{u\infty} = \frac{156,91}{0,9 * 0,731}$$
$$H_{u\infty} = 238,35 \text{ m}$$

Para el cálculo de la componente tangencial de la velocidad absoluta en la salida del rodete se usa la siguiente ecuación:

$$H_{u\infty} = \frac{u_2 c_{u2}}{g}$$

Despejando  $c_{u2}$  tenemos:

$$c_{u2} = \frac{H_{u\infty} g}{u_2}$$

Donde:

$c_{u2}$ : componente tangencial de la velocidad absoluta a la salida del rodete [m/s]

$H_{u\infty}$ : altura teórica de Euler [m]

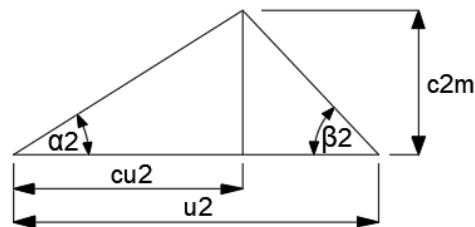
g: gravedad [m/s<sup>2</sup>]

u<sub>2</sub>: velocidad periférica a la salida del rodete [m/s]

Reemplazando los valores correspondientes tenemos:

$$cu_2 = \frac{238,35 * 9,8}{50,62}$$
$$cu_2 = 46,14 \text{ m/s}$$

La componente meridional de la velocidad absoluta a la salida del rodete se la termina en base a relaciones trigonométricas aplicadas al triángulo de velocidades de la salida.



**Figura 4-3:** Triángulo de velocidades a la salida

Realizado por: Arias, D. 2021

$$c_{2m} = (u_2 - c_{u2}) \tan \beta_2$$

Donde:

c<sub>2m</sub>: componente meridional de la velocidad absoluta a la salida del rodete [m/s]

u<sub>2</sub>: velocidad periférica a la salida del rodete [m/s]

c<sub>u2</sub>: componente tangencial de la velocidad absoluta a la salida del rodete [m/s]

β<sub>2</sub> ángulo de salida [°]

Finalmente, la componente de la velocidad meridional es:

$$c_{2m} = (50,62 - 46,14) \tan 48,43$$
$$c_{2m} = 5,06 \frac{m}{s}$$

A continuación, se procederá a determinar el ancho a la salida del rodete b<sub>2</sub> mediante la siguiente ecuación:



$$\pi d_1 b_1 c_{1m} = \pi d_2 b_2 c_{2m}$$

Despejando tenemos:

$$b_2 = \frac{d_1 b_1 c_{1m}}{d_2 c_{2m}}$$

Donde:

$b_2$ : ancho a la salida del rodete [m]

$b_1$ : ancho a la entrada del rodete [m]

$d_1$ : diámetro interior del rodete [m]

$d_2$ : diámetro exterior del rodete [m]

$c_{1m}$ : componente meridional de la velocidad absoluta a la entrada del rodete [m/s]

$c_{2m}$ : componente meridional de la velocidad absoluta a la salida del rodete [m/s]

El ancho a la salida del rodete es:

$$b_2 = \frac{0,10 * 0,02 * 14,95}{0,269 * 5,06}$$

$$b_2 = 0,02m$$

A continuación, se muestran las dimensiones principales que se utilizaran finalmente en la construcción del rodete.

**Tabla 12-3:** Resumen dimensiones de rodete

Denominación	Valor	Unidad
Diámetro externo	26,9	cm
Diámetro interno	10	cm
Ancho a la entrada	2	cm
Ancho a la salida	2	cm
Ángulo a la entrada	38,43	°
Ángulo a la salida	48,43	°
Número de álabes	8	
Espesor de álabes	5	mm

Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021

### 3.5. Diseño del álabe

Se realiza el diseño mediante el método de trazado del álabe por puntos conociendo de antemano las dimensiones principales del rodete así, como los triángulos de velocidad a la entrada y a la salida del rodete (Mataix, 1975: p.438).

Se determinan las velocidades relativas a la entra y salida del rodete con las siguientes ecuaciones:

$$w_1 = \frac{c_{1m}}{\text{sen } \beta_1} \quad \& \quad w_2 = \frac{c_{2m}}{\text{sen } \beta_2}$$

Donde:

$w_1$ : velocidad relativa a la entrada [m/s]

$c_{1m}$ : componente meridional de la velocidad absoluta a la entrada del rodete [m/s]

$\beta_1$ : es el ángulo de entrada [°]

$w_2$ : velocidad relativa a la salida [m/s]

$c_{2m}$ : componente meridional de la velocidad absoluta a la salida del rodete [m/s]

$\beta_2$  ángulo de salida [°]

Reemplazando los respectivos valores se tiene:

$$w_1 = \frac{14,96}{\text{sen } 38,43} \quad \& \quad w_2 = \frac{5,06}{\text{sen } 48,43}$$

$$w_1 = 24,1 \text{ m/s} \quad \& \quad w_2 = 6,7 \text{ m/s}$$

Se dividen el eje de las abscisas em partes iguales, haciendo uso de la siguiente fórmula:

$$\Delta_r = \frac{r_2 - r_1}{5}$$

Donde:

$\Delta_r$ : intervalo de división [m]

$r_2$ : radio exterior del rodete [m]

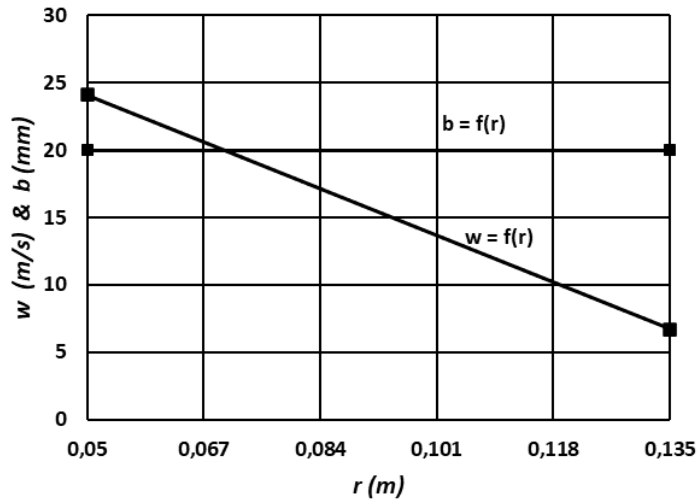
$r_1$ : radio interior del rodete [m]

Al reemplazar se obtiene lo siguiente:

$$\Delta_r = \frac{0,135 - 0,05}{5}$$

$$\Delta_r = 0,017 \text{ m}$$

Es necesario además trazar las curvas  $w=f(r)$  y  $b=f(r)$  como se muestra a continuación:



**Gráfico 1-3:** Variaciones de w y b en función de r

Fuente: (Arias, 2021)

Con la información previa se procede a construir la siguiente tabla:

**Tabla 13-3:** Resumen dimensiones de rodete

$r$	$w$	$s$	$t$	$b$	$\text{sen } \beta$	$\beta$	$\text{tg } \beta$	$\frac{1}{r \text{ tg } \beta}$	$\int_{r_1}^r \frac{dr}{r \text{ tg } \beta}$	$\frac{180}{\pi} \int_{r_1}^r \frac{dr}{r \text{ tg } \beta}$
0,05	24,1	0,005	0,039	0,02	0,623	38,5	0,796	25,14	0,000	0
0,067	20,6	0,005	0,053	0,02	0,527	31,8	0,620	24,07	0,419	24,0
0,084	17,1	0,005	0,066	0,02	0,490	29,4	0,563	21,16	0,804	46,0
0,101	13,7	0,005	0,079	0,02	0,496	29,7	0,571	17,35	1,135	65,0
0,118	10,2	0,005	0,093	0,02	0,551	33,4	0,660	12,84	1,393	79,8
0,135	6,7	0,005	0,106	0,02	0,749	48,5	1,131	6,55	1,558	89,3

Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021

En la primera columna de la tabla se colocan los radios de rodete, que van desde  $r_1$  hasta  $r_2$  con incrementos  $\Delta_r$ , en las columnas dos y cinco se colocan los valores correspondientes obtenidos de la gráfica, mientras que en la columna 3 se mantiene constante en 0,005 debido a que el espesor del alabe no varía.

La columna cuatro se construye a partir de la siguiente expresión:

$$t = \frac{2\pi z}{r}$$

Donde:

z: número de álabes

r: valores de columna 1

La columna seis, queda determinada a partir de la siguiente expresión:

$$\text{sen}\beta = \frac{s}{t} + \frac{Q}{2\pi \eta_v r b w}$$

Donde:

s: valores de columna 3

t: valores de columna 4

Q: caudal [m<sup>3</sup>/s]

$\eta_v$ : eficiencia volumétrica

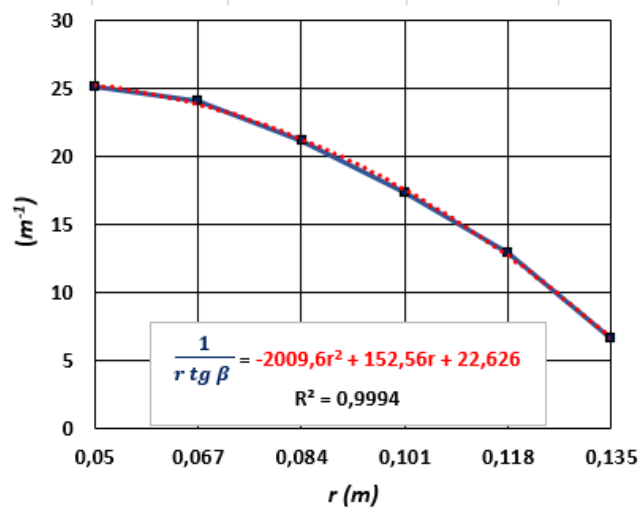
r: valores de columna 1

b: valore de la columna 5

w: valores de la columna 2

Las columnas siete se obtiene aplicando el seno inverso a la columna anterior, y la columna ocho se obtiene al aplicar la tangente a los valores de la columna seis, mientras que la columna nueve se obtiene a reemplazar los valores correspondientes en la ecuación planteada, estos valores arrojan una gráfica en función del radio.

La columna diez representa el área bajo la curva de la gráfica que formaron los puntos de la columna nueve. Se puede caer en un error a tratar de determinar la columna diez con la integral definida ahí planteada, debido a que no solo varía r, sino también el ángulo  $\beta$  es ocasionaría varias curvas a integrar en cada fila. Para solucionar este problema se suele graficar la curva de la columna nueve y con ayuda de un planímetro ir obtenido esas áreas. Para nuestro caso se plantea una función que se comporte de forma similar a la curva de la columna nueve para posteriormente integrarla. Se obtuvieron excelentes resultados con una función polinómica de segundo grado como se muestra a continuación:

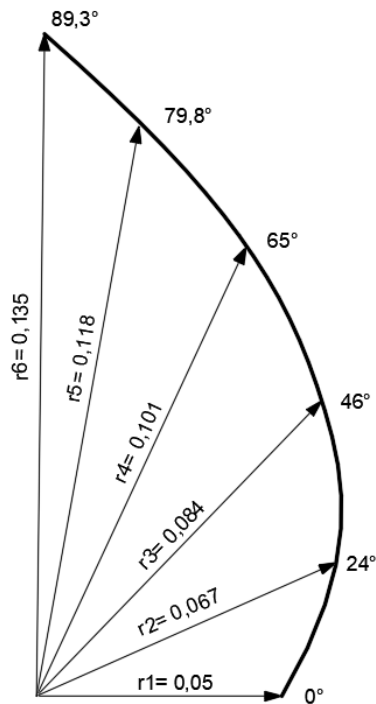


**Gráfico 2-3:** Curva  $(r \operatorname{tg} \beta)^{-1}$  vs  $r$

Fuente: (Arias, 2021)

Nótese el perfecto acoplamiento entre las dos curvas, por lo tanto, la integración de la curva polinómica arroja valores muy aproximados a los reales, siendo estos valores los que escribimos en la columna diez. La última columna representa únicamente la conversión de radianes a grados sexagesimales.

Finalmente, la geometría del alabe queda definida de la siguiente forma:



**Figura 5-3:** Desarrollo del álabe

Realizado por: Arias, D. 2021

### 3.6. Selección del motor

La potencia requerida del motor viene dada por la inercia que requiere vencer en el arranque y la fórmula de Euler con los valores anteriormente calculados. Para el cálculo del torque necesario en el arranque debido a la inercia se utilizan los siguientes valores:

**Tabla 14-3:** Datos iniciales

Denominación	Valor	Unidad
Momento de inercia	0,035	Kg/m <sup>2</sup>
Velocidad angular	3600	rpm
Rampa de aceleración	15	s

Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021

El valor del momento de inercia es obtenido a partir de una aproximación inicial del modelo de los componentes rotatorios, ya que después de la selección del motor se procede al dimensionamiento detallado de los mismos. El valor de la rampa de aceleración es determinado por el diseñador y se lo aplica mediante un variador de frecuencia.

Para determinar la potencia del motor empezamos con el cálculo de la aceleración angular, que viene dada por:

$$\alpha = \frac{w_f - w_o}{t}$$

Donde:

$\alpha$ : aceleración angular [rad/s<sup>2</sup>]

$w_f$ : velocidad angular final [rad/s]

$w_o$ : velocidad angular inicial [rad/s]

$t$ : tiempo de la rampa de aceleración [s]

Reemplazando los valores correspondientes obtenemos:

$$\alpha = \frac{377 - 0}{15}$$

$$\alpha = 25,13 \text{ rad/s}^2$$

El torque requerido para vencer la inercia de los componentes, de acuerdo con la dinámica rotacional viene dado por:

$$T_I = I\alpha$$

Donde:

$T_I$ : torque inercial [Nm]

$I$ : momento de inercia [Kg/m<sup>2</sup>]

$\alpha$ : aceleración angular [rad/s<sup>2</sup>]

Finalmente, el torque requerido para vencer la inercia es:

$$T_I = 0,035 * 25,13$$

$$T_I = 0,879 \text{ Nm}$$

A continuación, se determina el torque de Euler, mediante los valores obtenidos en el diseño hidráulico, utilizando la siguiente ecuación:

$$T_E = \rho Q(u_2 r_2 - u_1 r_1)$$

Donde:

$T_E$ : torque Euler [Nm]

$\rho$ : densidad del aire [Kg/m<sup>3</sup>]

$Q$ : caudal [m<sup>3</sup>/s]

$u_2$ : velocidad periférica a la salida del rodete [m/s]

$u_1$ : velocidad periférica a la entrada del rodete [m/s]

$r_2$ : radio exterior del rodete [m]

$r_1$ : radio interior del rodete [m]

Reemplazando los valores obtenemos:

$$T_E = 1,2754 * 0,075(50,62 * 0,134 - 18,85 * 0,05)$$

$$T_E = 0,560 \text{ Nm}$$

El torque requerido viene dado por:

$$T_r = T_I + T_E$$

Donde:

$T_r$ : torque requerido [Nm]

$T_I$ : torque inercial [Nm]

$T_E$ : torque Euler [Nm]

El torque total requerido será:

$$T_r = 1,439 Nm$$

La potencia requerida por el motor se determina de la siguiente manera:

$$P = T_r * w$$

Donde:

P: Potencia [W]

$T_r$ : torque requerido [Nm]

w: velocidad angular [rad/s]

La potencia requerida será:

$$P = 1,439 * 377$$

$$P = 542,5 W$$

$$P = 0,73 HP$$

Finalmente se opta por seleccionar un motor de 2 HP, con el fin de evitar sobrecalentamientos y mantener un coeficiente de seguridad adecuado.

### **3.6.1. Potencia de diseño**

La potencia de diseño es producto de la potencia del motor y un determinado factor de servicio (1,15 para nuestro caso) con esta potencia se realiza el dimensionamiento de los componentes mecánicos, se la calcula de la siguiente manera:

$$P_d = F_s * P_m$$

Donde:

$P_d$ : potencia de diseño [HP]

$F_s$ : factor de servicio

$P_m$ : potencia del motor [HP]

La potencia de diseño finalmente es:



$$P_d = 1,15 * 2$$

$$P_d = 2,3 \text{ HP}$$

De igual manera se puede determinar que el torque de diseño será:

$$T_d = 4,65 \text{ Nm}$$

### 3.7. Diseño mecánico

En primera instancia es necesario determinar los materiales que se han de utilizar. Para la fabricación del rodete, así como de los acoples se utiliza fundición de aluminio, mientras que para los demás componentes se utiliza acero estructural ASTM A36.

**Tabla 15-3:** Propiedades mecánicas

<b>Material</b>	<b>Resistencia a la fluencia MPa</b>	<b>Resistencia a la tensión MPa</b>
Aleación 1060	28	69
ASTM A36	250	400

Fuente: Arias, D. 2021

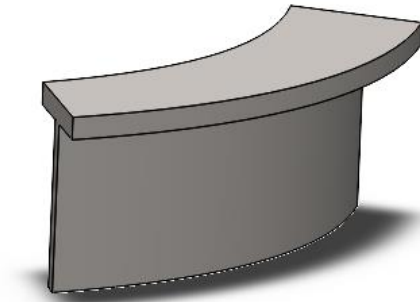
Realizado por: Arias, D. 2021

#### 3.7.1. Análisis de esfuerzos en el rodete

Anteriormente se determinó las dimensiones principales del rodete, sin embargo, en este apartado mediante el análisis de esfuerzos, se determinarán los coeficientes de seguridad de las partes que conforman en rodete.

##### 3.7.1.1. Esfuerzos en el álabe

En primera instancia determinaremos el esfuerzo que soporta el álabe que se esquematiza a continuación:



**Figura 6-3:** Porción del álabe

Realizado por: Arias, D. 2021

Analizando el extracto del rodete mostrado anteriormente se puede concluir que el esfuerzo principal es el esfuerzo de corte simple, que se produce en el área de contacto entre el álabe y el disco superior del rodete. Para determinar este esfuerzo se debe determinar la fuerza equivalente perpendicular a la cara del alabe, mismo que se determina de la siguiente manera:

$$T_d = zF \left( r_1 + \frac{r_2 - r_1}{2} \right)$$

Despejando tenemos:

$$F = \frac{T_d}{z \left( r_1 + \frac{r_2 - r_1}{2} \right)}$$

Donde:

F: fuerza perpendicular al centroide del álabe [N]

T<sub>d</sub>: torque de diseño [Nm]

z: número de álabes

r<sub>2</sub>: radio exterior del rodete [m]

r<sub>1</sub>: radio interior del rodete [m]

Finalmente, reemplazando los valores respectivos obtenemos:

$$F = \frac{4,65}{8 \left( 0,05 + \frac{0,134 - 0,05}{2} \right)}$$

$$F = 6,32 \text{ N}$$

Para determinar el esfuerzo en el álabe se utilizan las siguientes expresiones:

$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$A = e \cdot L$$

Donde:

$\tau$ : esfuerzo de corte [N/m<sup>2</sup>]

F: fuerza perpendicular al centroide del álabe [N]

A: área de corte [m<sup>2</sup>]

e: espesor del álabe [m]

L: longitud del arco del álabe [m]

Reemplazando los valores obtenemos:

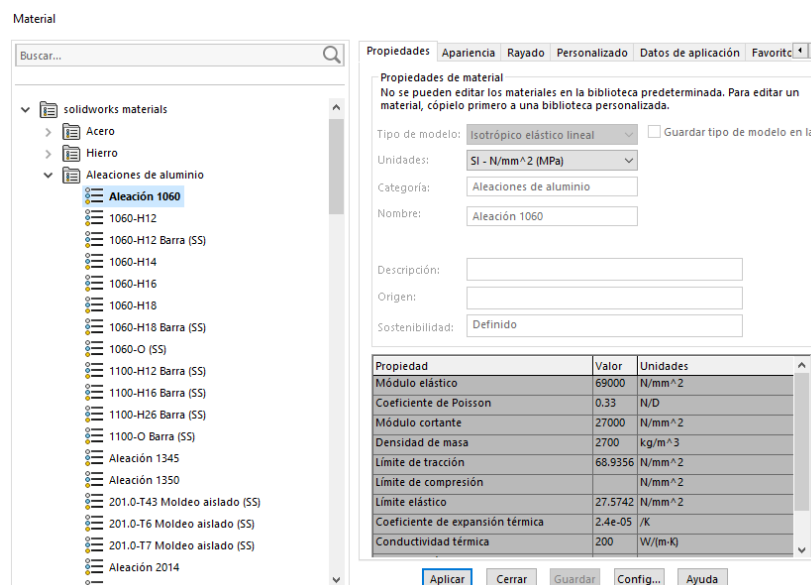
$$\tau = \frac{6,32}{0,005 * 0,157}$$

$$\tau = 8051 Pa$$

El esfuerzo resultante es muy pequeño en comparación con la resistencia del aluminio, debido al método constructivo el espesor se mantendrá en 5 mm.

### 3.7.1.2. Verificación de la resistencia de los álaves

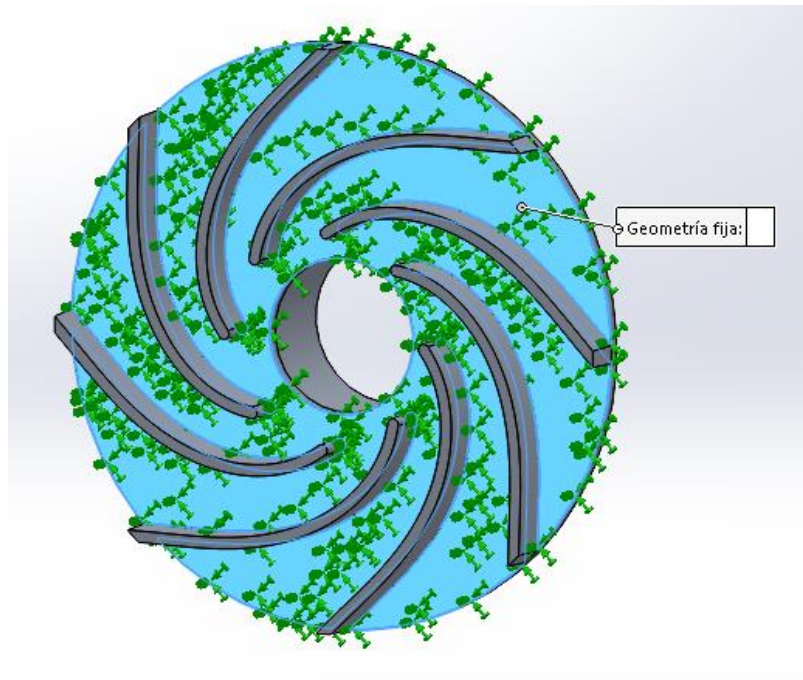
Para verificar los esfuerzos en el álabe se hará uso de SolidWorks Simulation, donde se realizará un análisis estático del elemento. En primera instancia se determina el material del elemento.



**Figura 7-3.** Material asignado

Realizado por: Arias, D. 2021

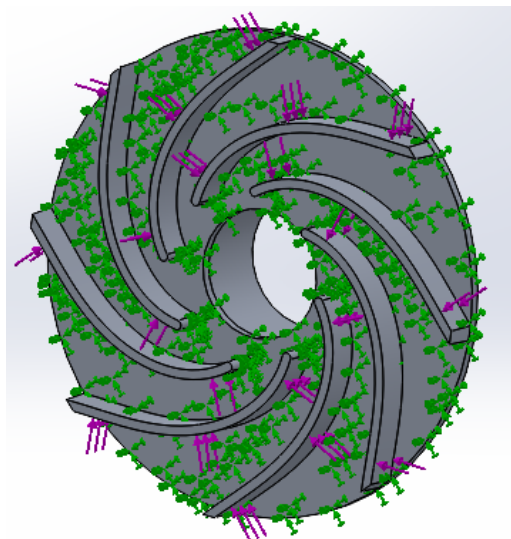
Posteriormente una vez inicializado el análisis estático se realiza la asignación de la cara fija del elemento, en nuestro caso la base del rodete.



**Figura 8-3:** Geometría fija

Realizado por: Arias, D. 2021

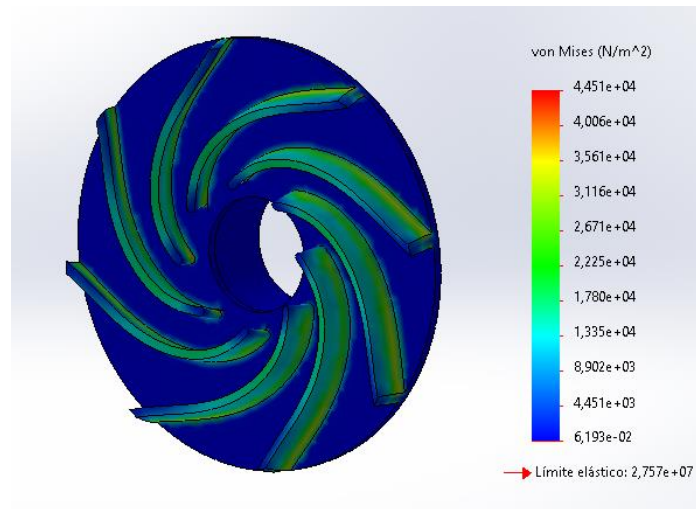
Posteriormente se determinan las cargas, que para nuestro caso son cargas normales a las caras de los álabes.



**Figura 9-3:** Asignación de carga

Realizado por: Arias, D. 2021

Finalmente despues del respectivo mallado se obtiene el analisis de esfuerzos en esquema de colores como se muestra a continuación:



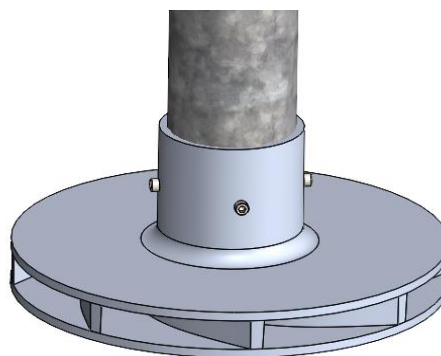
**Figura 10-3:** Esfuerzos resultantes

Realizado por: Arias, D. 2021

Como se mencionó anteriormente los esfuerzos son relativamente bajos, sin embargo, se aprecia concentraciones de esfuerzos en el nacimiento de los alabes, pero estas siguen siendo minúsculas, por tal motivo se deduce que los alabes del rodete no tienen problema con los esfuerzos de trabajo.

### 3.7.2. Dimensionamiento conexión eje-rodete

Para la conexión entre el rodete y el eje se plantea una conexión de tipo empernada, misma que facilitara el desmontaje del rodete para tareas de mantenimiento, a continuación, se bosqueja la conexión planteada.

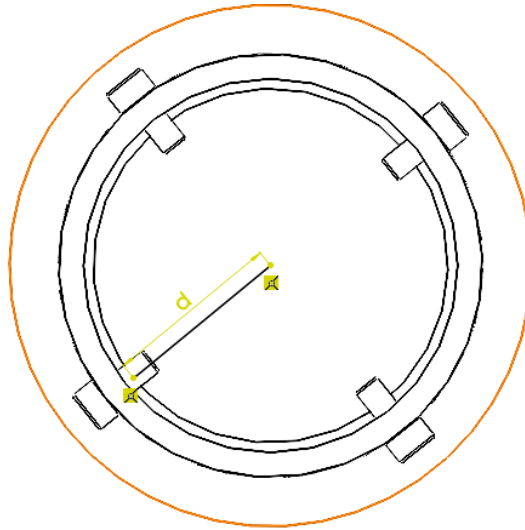


**Figura 11-3:** Conexión eje-rodete

Realizado por: Arias, D. 2021

### 3.7.2.1. Dimensionamiento de los pernos

Para calcular el diámetro requerido de los pernos partimos del momento máximo que nos puede entregar el motor antes seleccionado, la distancia desde el centro del eje del aireador hasta la base de contacto del perno es el radio interno del eje, que para nuestro caso es de 36 mm además se asumen cuatro pernos para la conexión.



**Figura 12-3:** Bosquejo de conexión

Realizado por: Arias, D. 2021

La fuerza que actúa en cada perno es una fuerza de corte, esta fuerza se la calcula de la siguiente forma:

$$V = \frac{T_d}{n_p d}$$

Donde:

V: fuerza de corte [N]

T<sub>d</sub>: torque de diseño [Nm]

d: distancia [m]

n<sub>p</sub>: número de pernos

Reemplazando los valores correspondientes obtenemos que la fuerza de corte en cada perno es:

$$V = \frac{4,65}{4 * 0,036}$$

$$V = 32,3 \text{ N}$$

El diámetro del perno viene dado por la siguiente ecuación:

$$V = \frac{1}{\eta} * S_{sy} * A_r$$

Despejando tenemos:

$$A_r = \frac{\eta V}{S_{sy}}$$

Donde:

$A_r$ : área de raíz [ $\text{mm}^2$ ]

$\eta$ : coeficiente de seguridad

$V$ : fuerza de corte [N]

$S_{sy}$ :  $0,5 S_y$  [MPa]

Reemplazando los valores tenemos:

$$A_r = \frac{6 * 32,3}{120}$$

$$A_r = 1,35 \text{ mm}^2$$

Finalmente, un perno de 2.5 mm cumple con el área requerida, sin embargo, es necesario chequear el aplastamiento que ocurre tanto en el eje como en la ceja del rodete para definir correctamente el diámetro del perno.

### 3.7.2.2. Chequeo de aplastamiento en el eje

El eje es de acero estructural, además es hueco con un espesor de 2 mm. Tomando en cuenta la fuerza de corte calculada anteriormente, ahora como fuerza normal a una superficie sometida a aplastamiento, se puede plantear la siguiente expresión.

$$\sigma_{\text{aplastamiento}} = \frac{F}{e d_p}$$

Donde:

$\sigma_{\text{aplastamiento}}$ : esfuerzo de aplastamiento [MPa]

$F$ : fuerza normal [N]

e: espesor [mm]

$d_p$ : diámetro del perno

Reemplazando los valores respectivos se obtiene:

$$\sigma_{\text{aplastamiento}} = \frac{32,3}{2 * 2,5}$$

$$\sigma_{\text{aplastamiento}} = 6,46 \text{ MPa}$$

### 3.7.2.3. Chequeo de aplastamiento en la ceja del rodete

Haciendo uso de lo expuesto anteriormente, con la diferencia de que ahora el material es aluminio, se tiene lo siguiente:

$$\sigma_{\text{aplastamiento}} = \frac{F}{e d_p}$$

Donde:

$\sigma_{\text{aplastamiento}}$ : esfuerzo de aplastamiento [MPa]

F: fuerza normal [N]

e: espesor [mm]

$d_p$ : diámetro del perno

Reemplazando los valores respectivos se obtiene:

$$\sigma_{\text{aplastamiento}} = \frac{32,3}{5 * 2,5}$$

$$\sigma_{\text{aplastamiento}} = 2,58 \text{ MPa}$$

Finalmente, el coeficiente de seguridad viene dado por:

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma_{\text{aplastamiento}}}$$

Donde:

$\eta$ : coeficiente de seguridad



$S_y$ : resistencia a la fluencia aluminio [MPa]

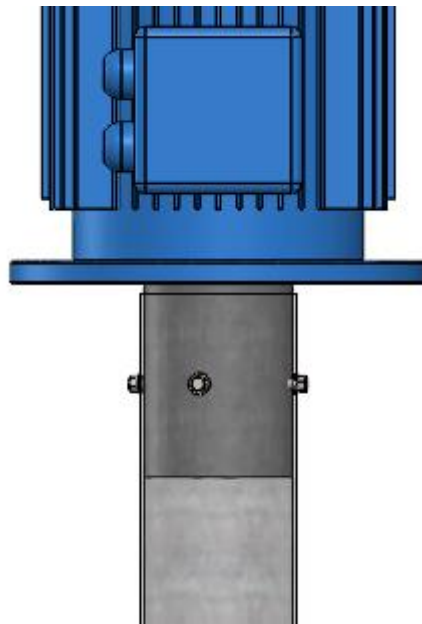
$\sigma_{\text{aplastamiento}}$ : esfuerzo de aplastamiento [MPa]

Reemplazando los valores correspondientes tenemos:

$$\eta = \frac{28}{2,58}$$
$$\eta = 10,8$$

### 3.7.3. Dimensionamiento acoplamiento con el motor

Para la conexión entre el rodete y el eje se plantea un acople rígido de mango, mismo que facilitara el desmontaje del rodete para tareas de mantenimiento, a continuación, se bosqueja la conexión planteada.



**Figura 13-3:** Conexión eje motor

**Realizado por:** Arias, D. 2021

#### 3.7.3.1. Dimensionamiento de los pernos

En este caso debido a que se utilizan la misma cantidad de pernos que en la conexión del eje con el rodete, estos se someten a la misma condición de esfuerzo, por lo que se utilizara el mismo diámetro de pernos para esta conexión.

### 3.7.3.2. Análisis de esfuerzos en la chaveta y el acople

La chaveta experimenta esfuerzos de corte y compresión, que se calcula con las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_c = \frac{4T_d}{dLh} \text{ y } \tau = \frac{2T_d}{dbL}$$

Donde:

$\sigma_c$ : Esfuerzo a compresión [MPa]

$T_d$ : Torque de diseño [Nmm]

$d$ : Diámetro del eje del motor [mm]

$h$ : Altura chaveta [mm]

$L$ : Longitud chaveta [mm]

$\tau$ : Esfuerzo cortante [MPa]

$b$ : Ancho [mm]

Conociendo que las dimensiones de la chaveta son de 8x7x40 y reemplazando los valores respectivos obtenemos:

$$\sigma_c = \frac{4 * 4650}{24 * 40 * 7} \text{ y } \tau = \frac{2 * 4650}{24 * 8 * 40}$$
$$\sigma_c = 2,76 \text{ MPa y } \tau = 1,21 \text{ MPa}$$

El acoplamiento experimenta torsión y aplastamiento, este último es el mismo que el esfuerzo de compresión en la chaveta, mientras que el primero se lo calcula por medio de la siguiente formula:

$$\tau = \frac{16 T_d D}{\pi(D^4 - d^4)}$$

Donde:

$\tau$ : Esfuerzo torsional [MPa]

$T_d$ : Torque de diseño [Nmm]

$D$ : Diámetro externo del acople [mm]

$d$ : Diámetro del eje del motor [mm]

Reemplazando los valores respectivos se obtiene:

$$\tau = \frac{16 * 4650 * 72}{\pi(72^4 - 24^4)}$$

$$\tau = 0,064 \text{ MPa}$$

### 3.7.4. Diseño flotadores

El diseño de los flotadores se basa en función del principio de Arquímedes y debe de ser diseñado de tal forma que soporte el peso de todos los componentes, además de dejar una luz entre el borde superior del flotador y el nivel del agua, esto con el fin de evitar que el agua entre por los agujeros dispuestos en el eje y que están destinados únicamente para el ingreso del aire.

En primera instancia es necesario determinar el peso de cada uno de los componentes de la máquina, como se muestra a continuación:

**Tabla 16-3:** Peso de los elementos

Cantidad	Elemento	Peso unitario [N]	Peso total [N]
1	Motor 2 Hp	230,3	230,3
1	Estructura metálica	59,7	59,7
1	Eje	17,6	17,6
1	Rodete	24,2	24,2
1	Acople	9,1	9,1
2	Flotador	64,9	129,8
1	Otros	32,6	32,6
		TOTAL	503,3

**Fuente:** Arias, D. 2021

**Realizado por:** Arias, D. 2021

El cálculo del volumen requerido por cada flotador viene dado por la siguiente ecuación:

$$W = 2 \rho gV$$

Donde:

W: Sumatoria de los pesos totales [N]

$\rho$ : densidad del agua [kg/m<sup>3</sup>]

g: gravedad [m/s<sup>2</sup>]

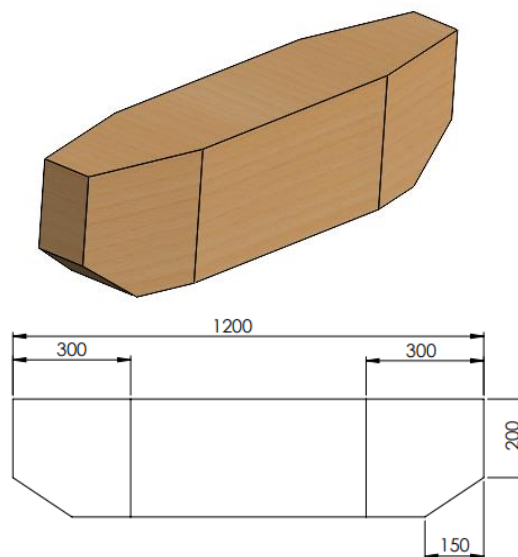
V: volumen mínimo [m<sup>3</sup>]

Despejando el volumen y reemplazando los valores correspondientes obtenemos:

$$V = \frac{503,3}{2 * 1000 * 9,8}$$

$$V = 0,0257 \text{ m}^3$$

Este volumen calculado es el volumen que cada flotador necesita desplazar para que la maquina logre flotar, por lo tanto, el volumen de cada flotador debe ser mayor que éste. Para el cálculo del volumen total que debe desplazar cada rodete, se limita la inmersión del flotador a un tercio de su volumen total, es decir que se requiere que solo la tercera parte del flotador se hunda, por lo tanto, se debe triplicar el volumen calculado, teniendo así un volumen final de 0,0771 metros cúbicos. A continuación, se muestra el modelo propuesto para los flotadores cumpliendo la condición de volumen establecida anteriormente.



**Figura 14-3:** Modelado del flotador

Realizado por: Arias, D. 2021

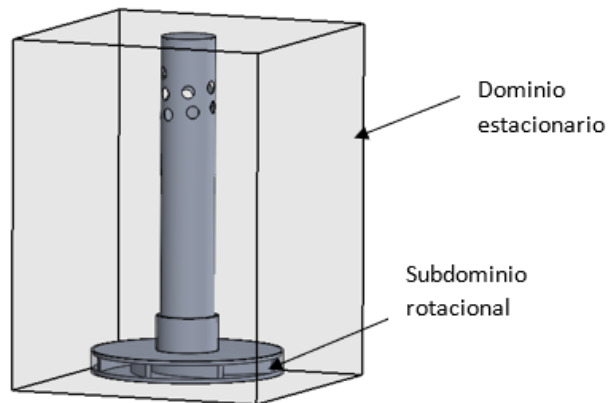
El volumen total de este flotador es de 0,0766 m<sup>3</sup> lo que nos garantiza una luz de

### 3.8. Simulación del rodete

La simulación mediante elemento finito es una herramienta computacional que otorga un análisis más detallado de un determinado problema. En este estudio se hace uso de la dinámica de fluidos computacional (CFD), para esto se usa el módulo Flow Simulation de SolidWorks, el cual por su amigable interfaz y confiabilidad despuntó como el software idóneo.

#### 3.8.1. Dominio computacional

Para este estudio se consideró un dominio estacionario y un subdominio rotacional, se dimensionaron de tal forma que permitan observar de manera correcta la simulación de la máquina sin incurrir en gasto computacional excesivo.

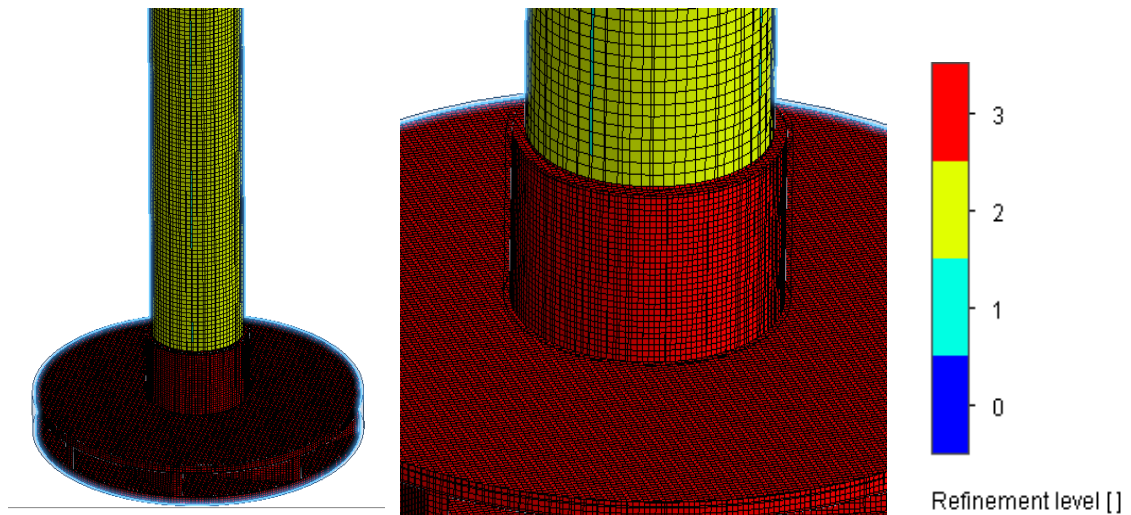


**Figura 15-3:** Dominio computacional

**Realizado por:** Arias, D. 2021

#### 3.8.2. Discretización del modelo

Para el mallado del elemento se utilizó una malla global que abarca el dominio estacionario, y una malla local que abarca el subdominio rotacional, el objetivo de crear una malla local en el volumen que rodea el rodete es obtener un refinamiento de esta, para de esta forma obtener resultados más precisos en el rodete que es la parte de mayor interés de la simulación. Finalmente se obtuvieron 538614 nodos, de los cuales 152153 están en contacto con el sólido.

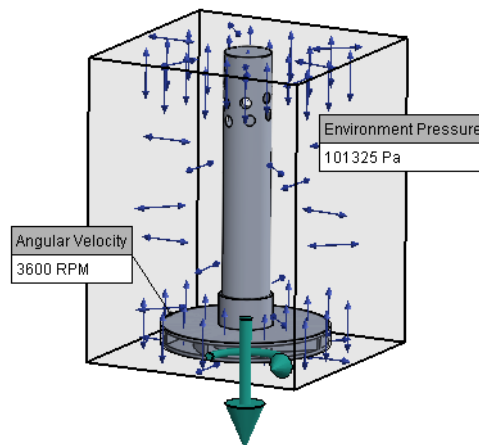


**Figura 16-3:** Discretización del modelo

Realizado por: Arias, D. 2021

### 3.8.3. Condiciones de contorno

Para el dominio estacionario se aplica la condición de presión atmosférica en todas sus paredes, mientras que en el subdominio se utiliza una región de rotación, la cual gira a 3600 rpm, creando una malla rotatoria que simulará el efecto de rotación del rodete.



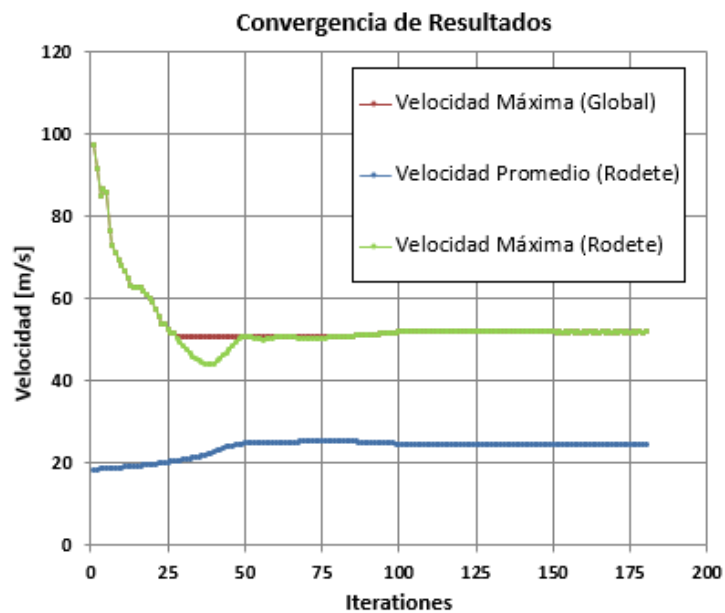
**Figura 17-3.** Condiciones de contorno

Realizado por: Arias, D. 2021

### 3.8.4. Convergencia de resultados

Para el análisis de resultados se colocan goals (sensores) en el modelo, para este caso se utilizaron únicamente sensores de velocidad en el dominio (velocidad máxima) y subdominio (velocidad

máxima y velocidad promedio). Finalmente, en las gráficas de convergencia se observa que las curvas convergen a las 180 iteraciones, lo que conlleva un tiempo de solución de 1550 segundos.



**Gráfico 3-3:** Convergencia de resultados

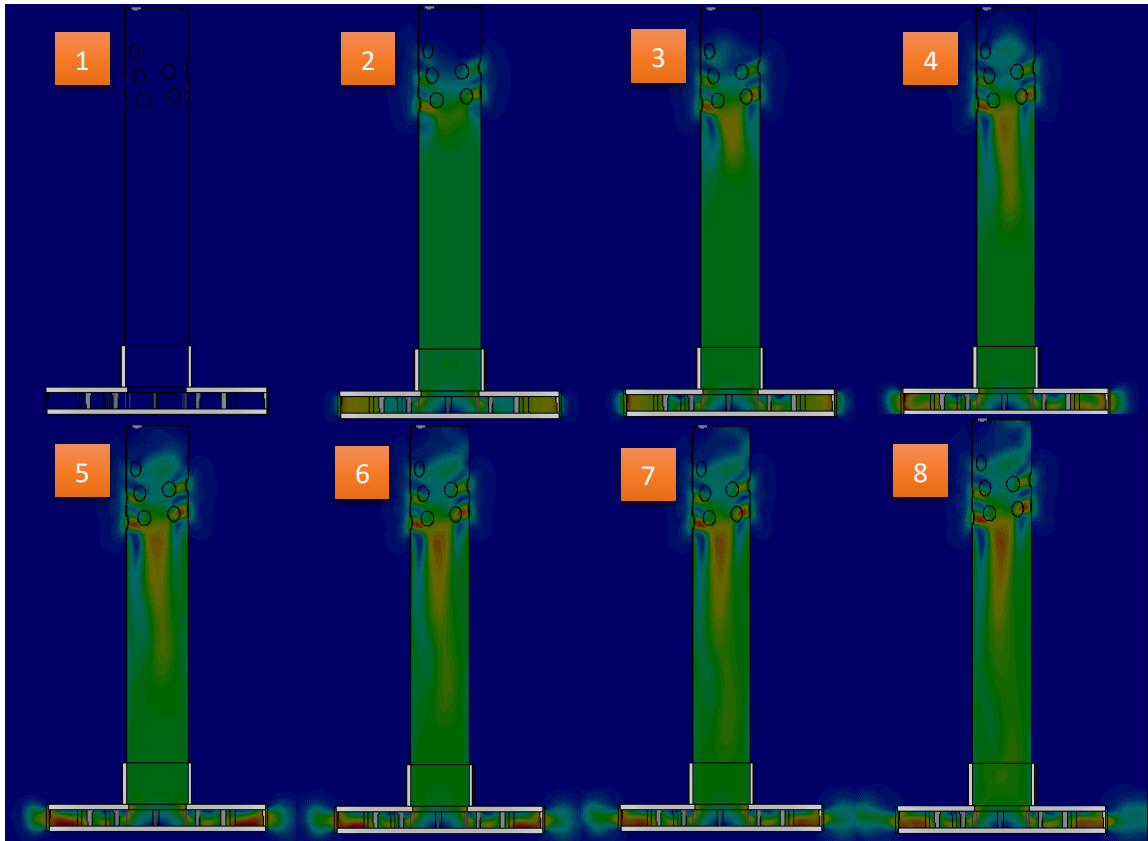
Fuente: (Arias, 2021)

### 3.8.5. Análisis de resultados

El módulo Flow Simulation tiene diversas formas de mostrar resultados de la simulación. Los resultados se presentan de forma gráfica con códigos de colores que facilitan la interpretación de estos, con lo que se puede ver a detalle el fenómeno físico que ocurre en la máquina. Otra forma de analizar los resultados es mediante los goals (sensores) colocados en modelo, estos en cambio arrojan valores numéricos de la simulación. En este estudio se analiza primordialmente la velocidad del fluido a través de los sólidos, con el objetivo de contrastar los resultados obtenidos de la simulación con los obtenidos de forma manual.

#### 3.8.5.1. Régimen transitorio.

Flow simulation da la posibilidad de analizar la variabilidad de los parámetros físicos en el régimen transitorio, es decir antes de que el comportamiento del fluido sea estable. En este apartado mediante un conjunto de imágenes del plano de corte lateral se pretende mostrar la variabilidad del fluido en distintos instantes de tiempo durante el régimen transitorio.



**Figura 18-3:** Análisis transitorio de la velocidad del fluido

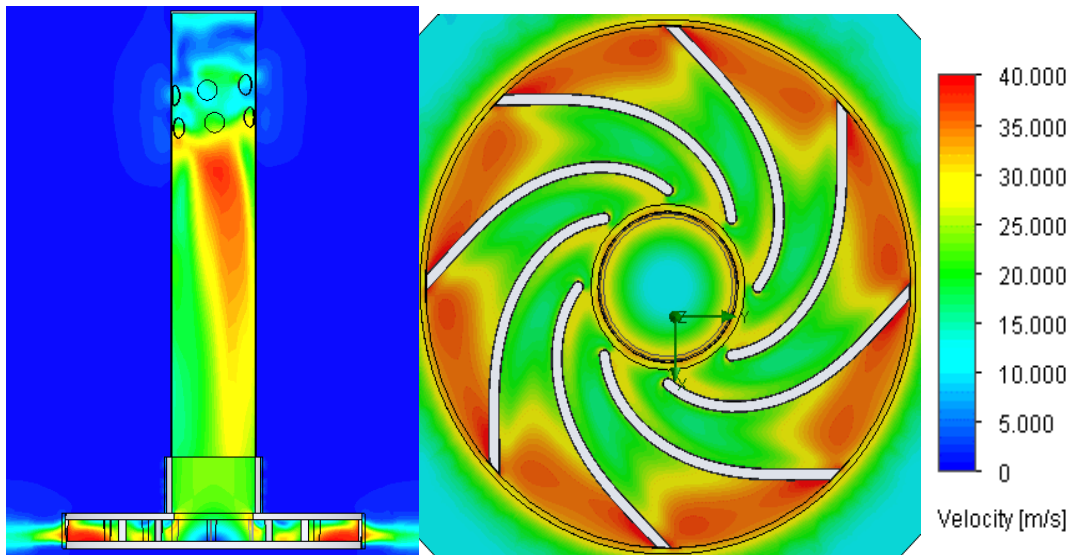
**Realizado por:** Arias, D. 2021

Se puede observar cómo se desarrolla el fluido a través del conducto, la velocidad en la zona media de la aspiración aumenta paulatinamente hasta llegar al equilibrio, se observa que en los orificios de entrada inferiores existe una mayor velocidad que en el resto de los orificios de aspiración. La velocidad en el ojo del rodete prácticamente permanece constante, mientras que en los extremos del rodete se observa fluctuaciones de la velocidad hasta que finalmente alcanza el equilibrio.

### 3.8.5.2. Régimen permanente

El análisis de la velocidad absoluta del fluido se realiza con ayuda de un plano lateral y uno de planta, para esto se utilizó planos de corte con contornos que facilitarían la interpretación de los resultados, a continuación, se muestra el análisis de velocidades obtenido.



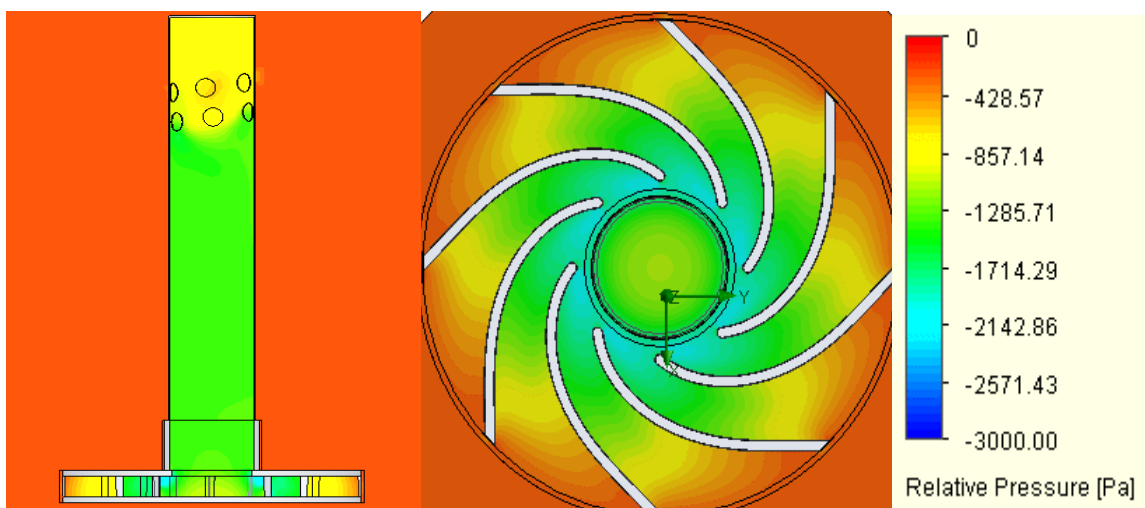


**Figura 19-3:** Velocidades en régimen permanente

Realizado por: Arias, D. 2021

Se observa que el fluido presenta las velocidades más elevadas en los orificios de aspiración y en la salida del rodete. En la vista lateral se observa cierta variabilidad de la velocidad en la aspiración, sin embargo, el fluido se torna uniforme justo a la entrada del rodete. La vista de planta nos muestra una distribución de velocidades en concordancia con lo calculado, puesto que las velocidades a la salida son mayores que a la entrada.

Para el estudio de presiones relativas de igual manera se utilizaron dos planos, uno lateral y otro de planta para su análisis, se usó planos de corte con contornos para interpretar los resultados como se muestra a continuación:



**Figura 20-3:** Presiones relativas en régimen permanente

Realizado por: Arias, D. 2021

En la vista lateral se observa en la succión una distribución uniforme de la presión relativa, mientras que en la vista de planta se observa que la presión relativa es mínima justo al comienzo del alabe, y es máxima al final del álabe.

### 3.9. Selección de componentes eléctricos

#### 3.9.1. Variador de frecuencia

Para el accionamiento del motor con rampas de aceleración y desaceleración se utiliza un variador de frecuencia de la marca POWTRAN, cuyas características se detallan en la siguiente tabla:

**Tabla 17-3:** Variador de frecuencia

	<p>Modelo : PI150 1R5G1          Marca : POWTRAN</p>
Especificaciones	
Potencia nominal	1,5 Kw
Voltaje alimentacion	Monofásico 220-240 V AC
Frecuencia alimentación	50/60 Hz
Voltaje de salida	Trifásico 0-Vin AC
Frecuencia de salida	0/400 Hz
Dimensiones	138x72x123,5 mm
Peso	1,1 Kg


Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021

### 3.9.2. Temporizador digital

Para el control automático del aireador se utiliza un temporizador digital, al que se le programa la hora de encendido y apagado.

**Tabla 18-3:** Temporizador digital

	Modelo: TCH15A Marca : Lavoll
Especificaciones	
Voltaje alimentacion	Monofásico 220-240 V AC
Frecuencia alimentación	50/60 Hz
Frecuencia de salida	0/400 Hz
Salidas relé	Una salida N.A
Carga máxima en la salida	1500 W
Dimensiones	94x36x89 mm
Número de acciones diarias	16
Intervalo mínimo entre acciones	60 s

Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021

### 3.9.3. Selector de dos posiciones

Para la selección entre los modos de control manual o automático, se usa un selector de dos posiciones.

**Tabla 19-3:** Selector de dos posiciones

	Modelo : XB4BD21 Marca : Schneider Electric
Especificaciones	
Diámetro de montaje	22 mm
Tipo de cabezal	Estandar
Protección contra cortocircuito	10 A
Tensión máxima	600 V AC
Temperatura de funcionamiento	-40 a 70 °C
Dimensiones	47x30x68 mm
Peso	0,095 Kg


Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021

#### 3.9.4. Interruptor

Para el control automático del aireador se utiliza un interruptor doble, el cual enciende o apaga el equipo.

**Tabla 20-3:** Interruptor doble

	Modelo : XB4BW73731M5 Marca : Schneider Electric
Especificaciones	


Diámetro de montaje	22 mm
Tensión máxima	600 V AC
Temperatura de funcionamiento	-40 a 70 °C
Peso	0,13 Kg
Contactos	1NA 1NC

Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021

### 3.9.5. Luz piloto

**Tabla 21-3:** Luz piloto

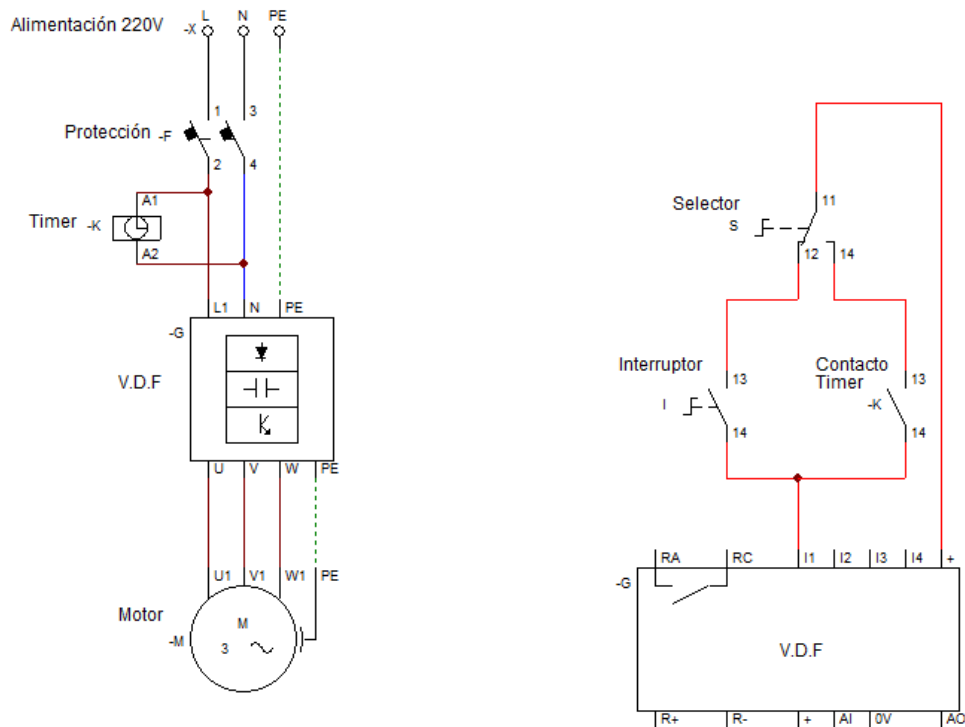
	Modelo :	AD16-22D/S
	Marca :	Camsco
Especificaciones		
Diámetro	22 mm	
Forma del cabezal	Redondo	
Voltaje	110-120 AC/DC	

Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021

### 3.10. Control de la máquina

El control del aireador difusor tornado puede ser tanto manual como automático, para el control manual únicamente a través de un interruptor accionado por el operario se enciende o apaga la máquina, mientras que para el control automático no existe intervención del operario, sino que un timer digital a través de una salida relé enciende o apaga la máquina en los tiempos establecidos por el diseñador.



**Figura 21-3:** Circuitos de fuerza y control

Realizado por: Arias, D. 2021

### 3.10.1. Parámetros del variador de frecuencia

Para la puesta en marcha del variador de frecuencia POWTRAN PI150 1R5G1 se ingresa a la interfaz del variador de frecuencia y se modifican los parámetros que se muestran a continuación:

**Tabla 22-3:** Parámetros modificados del variador de frecuencia

Parámetro	Función	Rango de ajuste	Valor definido
F 0.13	Rampa aceleración	0-3600 s	15 s
F 0.14	Rampa desaceleración	0-3600 s	15 s
F 0.19	Frecuencia de salida máxima	50 -320 Hz	60 Hz
b 0.01	Potencia nominal	0,1 – 1,5 kW	1,5 kW
b 0.02	Tensión nominal	1-2000 V	220 V
b 0.03	Corriente nominal	0,01-655 A	6,8 A
b 0.04	Frecuencia nominal	0-F0,19	60 Hz
b 0.05	Velocidad nominal	1-3600 rpm	3600

Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021

### 3.11. Construcción y montaje

#### 3.11.1. Método constructivo

##### 3.11.1.1. Máquinas y herramientas

Para la construcción del aireador difusor tornado se utilizaron las máquinas que se muestran a continuación:

**Tabla 23-3:** Máquinas utilizadas

Máquinas
Tronzadora
Soldadora de arco eléctrico
Torno convencional
Taladro de pedestal
Amoladora
Esmeril
Taladro de mano
Horno de crisol
Impresora 3D
Caladora de mano

Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021

Las herramientas utilizadas en la construcción íntegra del aireador difusor tornado se detallan a continuación:

**Tabla 24-3:** Herramientas utilizadas

Herramientas
Brocas
Cuchillas de torno
Calibrador
Juego de llaves
Desarmadores
Alicates
Escuadra

Tornillo de banco
Martillo
Multímetro
Flexómetro

Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021

### 3.11.1.2. Elementos constitutivos

En este apartado se detallan los elementos que componen la máquina, así como los materiales que se utilizan para su fabricación, además se especifica la cantidad de elementos utilizados.

**Tabla 25-3:** Elementos constitutivos del aireador

Conjunto	Elemento	Cantidad	Material
Estructural	Soporte	1	Tubo estructural A36 40x40x2 mm
	Agarradera	2	Varilla A36 ½ in
	Base Motor	1	Plancha estructural 6 mm
Rotativo	Motor	1	Trifásico WEG 2HP @ 3600 rpm
	Eje aspiración	1	Tubo galvanizado 3 in
	Rodete	1	Fundición de aluminio
	Acople	1	Aluminio
Estabilidad	Flotador	2	Contrachapado de 9 mm recubierto con fibra de vidrio
	Sujetador	4	Platina A36 50x3 mm

Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021



3.11.1.3. Operaciones y tiempo de construcción

**Tabla 26-3:** Tiempos de fabricación del conjunto estructural

<b>Conjunto estructural</b>		
<b>Elemento</b>	<b>Operación</b>	<b>Tiempo (min)</b>
Soporte	Medición	40
	Corte	60
	Punteado	45
	Soldado	60
	Perforado	45
	Pulido	60
	Pintado	45
Agarradera	Medición	10
	Corte	10
	doblado	15
	Soldado	20
	Pulido	10
	Pintado	10
Placa motor	Medición	15
	Corte	30
	Soldado	30
	Pulido	45
	Perforado	45
	pintado	15

Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021

**Tabla 27-3:** Tiempos de fabricación del conjunto rotativo

<b>Conjunto rotativo</b>		
<b>Elemento</b>	<b>Operación</b>	<b>Tiempo (min)</b>
Eje de aspiración	Medición	30
	Corte	10
	Perforado	120
Rodete	Modelado molde	120
	Impresión molde	540

	Conformado del molde	120
	Fundición	300
	Torneado	360
Acople	Medición	10
	Corte	20
	Torneado	240

Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021

**Tabla 28-3:** Tiempos de fabricación del conjunto de estabilidad

<b>Conjunto de estabilidad</b>		
<b>Elemento</b>	<b>Operación</b>	<b>Tiempo (min)</b>
Flotador	Medición	240
	Corte	360
	Ensamble	240
	Enfibrado	600
	Pintado	60
Sujetador	Medición	20
	Corte	30
	Doblado	45
	Perforado	60
	Soldado	30
	Pulido	15
	Pintado	10

Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021

**Tabla 29-3:** Tiempos de fabricación del conjunto de control

<b>Conjunto de control</b>		
<b>Elemento</b>	<b>Operación</b>	<b>Tiempo (min)</b>
Tablero de control	Perforado	120
	Armado	180
	Cableado	120
	Programación	300

Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021

### 3.11.2. Montaje de la máquina

Los tiempos empleados para el ensamble de cada uno de los componentes que conforman el aireador difusor tornado se detallan a continuación:

**Tabla 30-3:** Tiempos de montaje

Conjunto	Operación	Tiempo (min)
Estabilidad	Alineamiento de flotadores	15
	Montajes sujetadores	30
	Ajuste tornillos	30
Estructural	Montaje soporte	20
	Ajuste tuercas	20
Rotativo	Montaje motor	15
	Ajuste pernos	30
	Montaje acople	45
	Ajuste prisioneros	15
	Montaje eje de aspiración	45
	Ajuste de pernos	15
	Montaje rodete	45
	Ajuste de pernos	15
Control	Empotramiento Tablero	30
	Conexión con el motor	30

Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021

### 3.11.3. Tiempo total de construcción y montaje

En la tabla que se muestra a continuación se detalla el tiempo total requerido para la fabricación y ensamble del aireador difusor tornado.

**Tabla 31-3:** Tiempos totales

Proceso	Tiempo (min)	Tiempo (h)
Construcción y control	4910	81,83
Ensamblaje	400	6,67
Total	5310	88,5

Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021

Como se observa el tiempo total de construcción, control y ensamblaje asciende hasta las 88,5 horas, valor que, convirtiendo a una jornada laboral de 8 horas diarias, nos da un total de 12 días laborables.

### 3.12. Manual de operación y mantenimiento de la máquina

#### 3.12.1. Especificaciones técnicas

En la siguiente tabla se muestran las especificaciones técnicas del aireador difusor tornado construido.

**Tabla 32-3:** Especificaciones técnicas del aireador difusor tornado

<b>Aireador Difusor Tornado</b>	
<b>Parámetros eléctricos</b>	
Voltaje de alimentación	220-240 V
Frecuencia de alimentación	50-60 Hz
Potencia Nominal	1,5 kW
<b>Parámetros físicos</b>	
Ancho	900 mm
Largo	1200 mm
Alto	800 mm
Peso con flotadores	55,5 kg
Peso sin flotadores	38,1 kg
Peso máximo de carga adicional	100 kg
Velocidad de rotación	3600 rpm
Profundidad de estanque mínima	0,5 m
<b>Parámetros de oxigenación</b>	
Radio de acción máximo	8 m
Profundidad de acción máxima	2 m
Oxígeno por hora	1,641 kgO <sub>2</sub> /h
Eficiencia SAE	1,094 kgO <sub>2</sub> /kWh

Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021

#### 3.12.2. Manual del operador

Antes de proceder a encender el aireador difusor tornado se recomienda tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Asegurarse que todos los elementos de unión mantengan un correcto ajuste, caso contrario ajustar los componentes flojos.
- Ubicar la maquina en una zona cuya profundidad sea mayor a 60 cm, esto ayudara a evitar la remoción de sedimento del suelo.
- Anclar la maquina mediante el uso de cables, cadenas o cuerdas desde las agarraderas hasta pilotes fijos, normalmente ubicados en los extremos de la piscina, con el fin de evitar la rotación de la máquina sobre s propio eje.
- Ubicar el tablero de control en un lugar seco y abierto.
- Evitar el tensado de los cables de alimentación del motor.
- Verificar que no exista musgo o algún otro agente extraño alrededor del rodete que pueda ocasionar enredamiento.

Después de realizar las actividades anteriores, se puede proseguir con la manipulación normal de la máquina como se detalla a continuación:

- Conectar la máquina a la toma de 220V, utilizando guantes y calzado adecuado.
- Para control manual es necesario colocar el selector en la posición “Manual”, y posteriormente presionar el pulsador de encendido, apagar cuando crea necesario presionando el pulsador de apagado.
- Para control automático colocar el selector en la posición “Automático”, en este método de control la máquina se encenderá y apagará en horas establecidas por el diseñador.
- Para desactivar cualquier modo de control de debe colocar el selector en la posición de “Apagado”.
- Para detener la máquina en caso de emergencia se debe pulsar el paro de emergencia.

### **3.12.3. Manual de mantenimiento**

Para prolongar la vida útil de la máquina, así como también obtener el mejor rendimiento de esta, se propone un plan de mantenimiento periódico que pretende minimizar por daños a la máquina producidos por el funcionamiento de esta.

**Tabla 33-3:** Plan de mantenimiento

<b>Plan de Mantenimiento</b>					
Actividad	Diario	Semanal	Mensual	Semestral	Anual
Inspección visual general	X				
Chequeo elementos de unión			X		
Limpieza de rodete			X		
Limpieza tablero control (externa)		X			
Chequeo de contactos				X	
Pintado estructura					X
Chequeo de temperatura del variador		X			
Inspección de los flotadores				X	

Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021

**3.13. Análisis de costos****3.13.1. Costos directos**

En este apartado se incluyen los gastos relacionados con materia prima, equipos de control y automatización, materiales y equipos utilizados, así como también la mano de obra, además se detalla la cantidad de material utilizado, sus costos unitarios y sus costos totales.

**Tabla 34-3:** Materiales mecánicos

<b>Materiales mecánicos</b>			
Detalle	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Tubo estructural A36 40x40x3	0,5 u	26,55	13,28
Varilla lisa A36 ½ in	0,25 u	6,66	1,66
Plancha A36 e= 6 mm	0,25 u	175,48	43,87
Tubo galvanizado d= 3in	0,5 u	43,92	21,96
Platina A36 50x3	0,5 u	8,85	4,43
Perno Inox 7/16 x1 1/2	4 u	1	4
Eje aluminio 3in	0,2 m	50	10
Tuerca Inox 7/16	4 u	0,25	1
Perno Inox 1/2 x 2 1/2	4 u	1,25	5
Tuerca Inox 1/2	4 u	0,3	1,2

Perno Inox 10x40	1u	1	1
Prisionero 1/4x1	2u	0,25	0,5
Perno Inox 5x20	8u	0,25	2
Contrachapado e= 9 mm	1u	50	50
Resina	20 L	3	60
Fibra de vidrio	4 kg	2,5	10
Pintura	1 L	5	5

Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021

**Tabla 35-3:** Materiales eléctricos

<b>Materiales eléctricos</b>			
<b>Detalle</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor unitario</b>	<b>Valor total</b>
Gabinete 300x300x200	1	35	35
Variador de frecuencia	1	300	300
Timer digital	1	25	25
Selector	1	5	5
Interruptor	1	4	4
Para emergencia	1	5	5
Luz Piloto	3	2	6
Enchufe 220 V	1	4	4
Toma 220V	1	3	3
Motor	1	220	220
Cable flexible 12AWG	1	30	30

Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021

**Tabla 36-3:** Mano de obra

<b>Mano de obra</b>			
<b>Detalle</b>	<b>Horas</b>	<b>Valor unitario</b>	<b>Valor total</b>
Mecánico	50	5	250
Torneado	10	15	150
Impresión 3D	9	6	54
Fundición	7	15	105
Maestro fibrero	25	6	150

Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021

**Tabla 37-3:** Costos de pruebas

<b>Pruebas</b>			
<b>Detalle</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor unitario</b>	<b>Valor total</b>
Medidor Oxígeno Disuelto	1	300	300
Químico	1	100	100

Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021

**Tabla 38-3:** Costos de transporte

<b>Transporte</b>			
<b>Detalle</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor unitario</b>	<b>Valor total</b>
Transporte	1	200	200

Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021

**3.13.2. Costos indirectos****Tabla 39-3:** Costos indirectos

<b>Detalle</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor unitario</b>	<b>Valor total</b>
Imprevistos	1	200	200
Utilidad	0	0	0

Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021

**3.13.3. Costos totales****Tabla 40-3:** Costos totales

<b>Detalle</b>	<b>Valor</b>
Costos directos	2180
Costos Indirectos	200
Total	2380

Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021



## CAPITULOS IV

### 4. RESULTADOS

#### 4.1. Determinación de parámetros de oxigenación

Las pruebas para determinar los parámetros de oxigenación se realizaron en un estanque de cemento con un volumen de agua de 12,5 metros cúbicos, al cual se le agregó un secuestrante de oxígeno con el objetivo de disminuir hasta 0 mg/L la concentración de oxígeno disuelto, para posteriormente encender el aireador y monitorear con el aumento de oxígeno disuelto. Para la medición de los niveles de oxígeno disuelto se utilizó un medidor polarográfico de la marca Milwaukee modelo MW 600.

##### 4.1.1. Transferencia de oxígeno

Una vez que el nivel de oxígeno en estanque tiende 0 mg/L se procede en encender el aireador difusor tornado, con el Medidor de oxígeno disuelto se registra la concentración de oxígeno en intervalos de un minuto, dando como resultado la siguiente tabla:

**Tabla 1-4:** Resultados de la prueba de transferencia de oxígeno

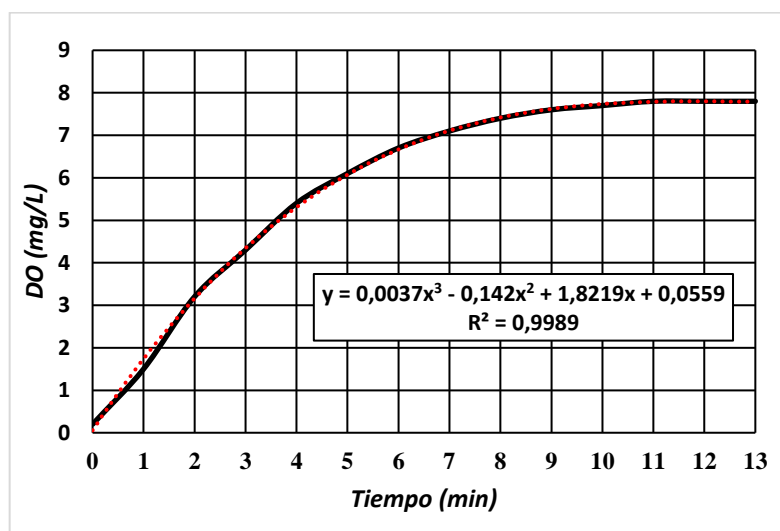
N°	Tiempo (min)	DO medido (mg/L)	Déficit DO (mg/L)	Saturación (%)
1	0	0,2	8,1	2,4
2	1	1,5	6,8	18,1
3	2	3,2	5,1	38,6
4	3	4,3	4	51,8
5	4	5,4	2,9	65,1
6	5	6,1	2,2	73,5
7	6	6,7	1,6	80,7
8	7	7,1	1,2	85,5
9	8	7,4	0,9	89,2
10	9	7,6	0,7	91,6

11	10	7,7	0,6	92,8
12	11	7,8	0,5	94,0
13	12	7,8	0,5	94,0
14	13	7,8	0,5	94,0

Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021

Se obtuvieron 14 puntos de análisis en intervalos de 1 minuto, lo que implicó un tiempo de prueba de 13 minutos, hasta que la medida se estabilizo cerca del nivel de saturación de oxígeno disuelto al nivel del mar y temperatura de 25 °C. Finalmente con los datos de la tabla se construye la gráfica de transferencia de oxígeno.



**Gráfico 1-4:** Oxígeno disuelto vs Tiempo

Fuente: (Arias, 2021)

En la gráfica se observa un comportamiento lineal de la curva de transferencia de oxígeno hasta alcanzar los 5 mg/L, después los incrementos se reducen considerablemente con un comportamiento asintótico cerca del porcentaje de saturación del oxígeno disuelto a presión atmosférica y temperatura de 24°C.

#### 4.1.2. Coeficiente de transferencia de oxígeno

El cálculo del coeficiente de transferencia de oxígeno ( $K_{La}$ ), en primera instancia se lo realiza a temperatura de prueba del agua ( $K_{La}$ )<sub>T</sub>, para posteriormente corregirlo y obtener el coeficiente a una temperatura normalizada de 20 °C ( $K_{La}$ )<sub>20</sub>.

$$(K_L a)_T = \frac{\text{Ln}(\text{déficit } 10) - \text{Ln}(\text{déficit } 70)}{(t_{70} - t_{10})/60}$$

Donde:

$(K_L a)_T$ : coeficiente de transferencia de oxígeno a temperatura de prueba [ $h^{-1}$ ]

déficit 10: déficit DO al 10% de saturación [mg/L]

déficit 70: déficit DO al 70% de saturación [mg/L]

$t_{10}$ : tiempo para llegar al 10% de saturación [min]

$t_{70}$ : tiempo para llegar al 70% de saturación [min]

Reemplazando los respectivos valores obtenemos el siguiente coeficiente de transferencia de oxígeno:

$$(K_L a)_T = \frac{\text{Ln}(7,46) - \text{Ln}(2,42)}{(4,71 - 0,45)/60}$$

$$(K_L a)_T = 15,86 \text{ h}^{-1}$$

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de oxígeno corregido a 20 °C se utiliza la siguiente expresión:

$$(K_L a)_{20} = \frac{(K_L a)_T}{1,024^{T-20}}$$

Donde:

$(K_L a)_{20}$ : coeficiente de transferencia de oxígeno a 20 °C [ $h^{-1}$ ]

$(K_L a)_T$ : coeficiente de transferencia de oxígeno a temperatura de prueba [ $h^{-1}$ ]

T: temperatura del estanque de prueba [°C]

Finalmente reemplazando los valores obtenemos:

$$(K_L a)_{20} = \frac{15,86}{1,024^{24-20}}$$

$$(K_L a)_{20} = 14,43 \text{ h}^{-1}$$

#### 4.1.3. Tasa de transferencia de oxígeno estándar

La tasa de transferencia de oxígeno estándar se la determina mediante la siguiente expresión matemática:

$$OT_S = (K_L a)_{20} * DO_{20} * V$$

Donde:

$OT_S$ : tasa de transferencia de oxígeno estándar [g O<sub>2</sub>/h]

$(K_L a)_{20}$ : coeficiente de transferencia de oxígeno a 20 °C [h<sup>-1</sup>]

$DO_{20}$ : concentración DO a saturación a 20 °C [mg/L]

$V$ : volumen de agua del estanque de prueba [m<sup>3</sup>]

Reemplazando los valores correspondientes obtenemos:

$$OT_S = 14,43 * 9,1 * 12,5$$

$$OT_S = 1641,41 \text{ gO}_2/h$$

$$OT_S = 1,641 \text{ kgO}_2/h$$

#### 4.1.4. Eficiencia de aireación estándar

La eficiencia de aireación estándar (SAE) se calcula con la siguiente expresión:

$$SAE = \frac{OT_S}{P_e}$$

Donde:

SAE: eficiencia de transferencia de oxígeno [kg O<sub>2</sub>/kWh]

$OT_S$ : tasa de transferencia de oxígeno estándar [kg O<sub>2</sub>/h]

$P_e$ : potencia de entrada [kW]

Sustituyendo los valores respectivos en la ecuación se tiene que la eficiencia de aireación estándar es:

$$SAE = \frac{1,641}{1,5}$$

$$SAE = 1,094 \text{ kg O}_2/kWh$$

Diversos estudios se enfocan en determinar la eficiencia de aireación estándar SAE en distintos modelos de aireadores, a continuación, se muestra una tabla resumen con los resultados arrojados por estos.

## 4.2. Pruebas de funcionamiento en campo

Las pruebas se efectuaron en un estanque de 3000 m<sup>2</sup> que albergaba alrededor de 80000 camarones que tenían 45 días de cultivo. Las pruebas se realizaron desde las 4:30 a.m. hasta las 6:00 a.m., a continuación, se muestra el lugar donde se realizaron las pruebas.

**Tabla 2-4:** Comparación eficiencias SAE

Modelo	SAE kg O <sub>2</sub> /kWh	Fuente
Propulsor-aspirador	1,73	(Boyd & Martinson, 1984)
Paletas Taiwanés	0,6	(Tunsutapanich et al, 2006)
Paletas Tailandés 1	1,1	(Tunsutapanich et al, 2006)
Paletas Tailandés 2	1,6	(Tunsutapanich et al, 2006)
Propulsor-aspirador	0,42	(Kumar et al, 2010)
Difusor Tornado	1,094	Presente estudio

Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021



**Figura 1-4:** Lugar de pruebas

Fuente: (Arias, 2021)

### 4.2.1. Niveles de OD en función de la distancia

Se tomaron mediciones de oxígeno disuelto a distintas distancias desde el centro de la máquina, en primera instancia se determinaron los niveles de concentración de oxígeno disuelto en diez puntos distintos separados en intervalos de un metro a una profundidad de 25 centímetros, después

se encendió la máquina durante una hora y de volvió a tomar las mediciones en los mismos puntos, a continuación, se muestra los valores obtenidos en la prueba.

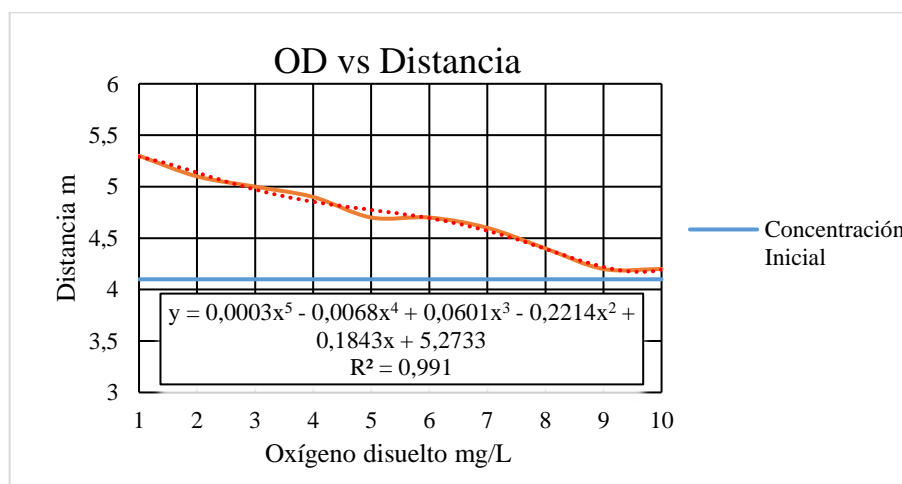
**Tabla 3-4:** Niveles de OD en función de la distancia

Distancia	OD Inicial	OD Final	Ganancia
1	4,1	5,3	1,2
2	4,1	5,1	1
3	4,1	5	0,9
4	4,1	4,9	0,8
5	4,1	4,7	0,6
6	4,1	4,7	0,6
7	4,1	4,6	0,5
8	4,1	4,4	0,3
9	4,1	4,2	0,1
10	4,1	4,2	0,1

Fuente: Arias, D. 2021

Realizado por: Arias, D. 2021

La tabla muestra una ganancia de oxígeno disuelto una vez transcurrida una hora de funcionamiento, la relación entre la ganancia de oxígeno disuelto y la distancia resulta ser inversamente proporcional, se observa que a partir del punto nueve (9 metros de distancia) la ganancia resulta ser ínfima, por lo que se puede limitar el rango de acción de la máquina a los 8 metros de distancia, lo que implicaría un radio diámetro de acción de 16 metros.



**Gráfico 2-4:** Niveles de OD en función de la distancia

Fuente: (Arias, 2021)

La gráfica OD vs Distancia muestra de forma más clara la ganancia respecto de la medición inicial, se aprecia que esta ganancia disminuye conforme aumenta la distancia a la que se realiza la medición. Además, se ajustó dicha curva a una función exponencial de grado cinco con un  $R^2$  de 0,991.

#### 4.2.2. Niveles de OD en función de la profundidad

Para determinar la relación entre la profundidad y el oxígeno disuelto se realizaron mediciones a distintas profundidades, primero se determinó la concentración de oxígeno disuelto a profundidades en intervalos de 25 centímetros a una distancia de un metro respecto de la máquina, después de que la maquina funciono por una hora se tomaron nuevamente las mediciones.

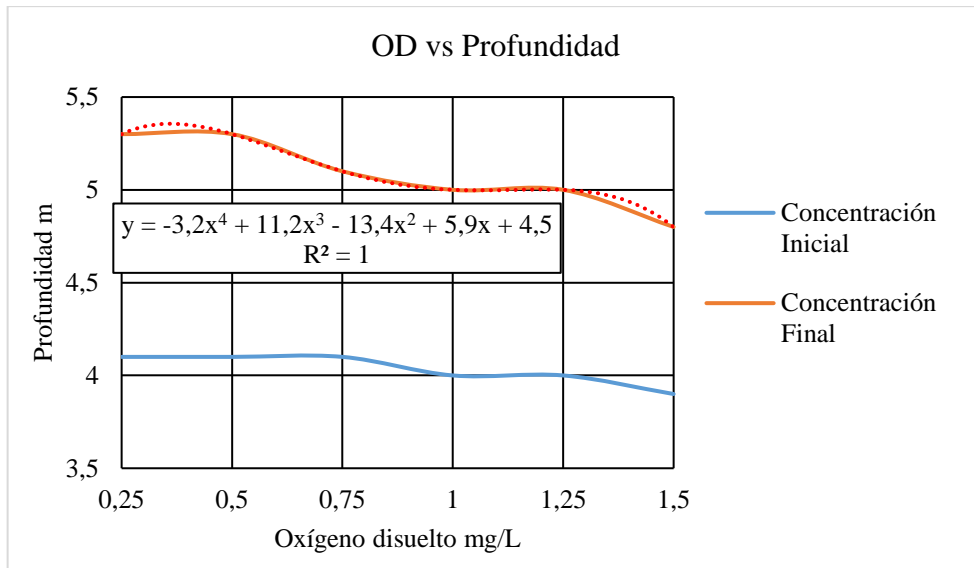
**Tabla 4-4:** Niveles de OD en función de la profundidad

<b>Profundidad</b>	<b>OD Inicial</b>	<b>OD Final</b>	<b>Ganancia</b>
0,25	4,1	5,3	1,2
0,5	4,1	5,3	1,2
0,75	4,1	5,1	1
1	4	5	1
1,25	4	5	1
1,5	3,9	4,8	0,9

**Fuente:** Arias, D. 2021

**Realizado por:** Arias, D. 2021

Las concentraciones de oxígeno disuelto varían inversamente proporcional en función de la profundidad en la que se toma la medida. La ganancia de oxígeno de igual manera varia de forma inversa se observa que mantienen cambios significativos de oxígeno disuelto, por lo tanto, el aireador difusor tornado puede trabajar incluso a profundidades mayores.



**Gráfico 3-4:** Niveles de OD en función de la profundidad

**Fuente:** (Arias, 2021)

La OD vs profundidad muestra claramente el incremento de la concentración de oxígeno disuelto, producto del funcionamiento del aireador. La relación entre la concentración de OD y la profundidad es principalmente inversa, y esta se ajusta a una curva polinómica de cuarto grado.



## CONCLUSIONES

- Con ayuda de la investigación bibliográfica se pudo aplicar una metodología para el diseño del rodete del aireador difusor tornado, obteniendo de esta forma la geometría de este. SolidWorks se convirtió en herramienta importante en el modelado, permitiendo optimizar las dimensiones de la máquina. La simulación por elementos finitos permitió interpretar y comparar resultados, identificando en el perfil de velocidades zonas de alta velocidad de hasta 50 m/s.
- La construcción del rodete implicó el uso de impresión 3D para la fabricación del molde para la posterior fundición. La pieza fundida tiene un acabado superficial muy pobre, por lo que es necesario tornearse el elemento. La mala alineación de las conexiones eje-rodete y eje-motor genera vibraciones no deseadas. El empleo del timer digital permite el encendido de la máquina en momentos críticos cuando el oxígeno disuelto cae, de igual manera controla la desconexión cuando el oxígeno disuelto mantiene niveles adecuados. El variador de frecuencia permite aplicar rampas de aceleración, que minimizan el efecto del arranque.
- Mediante las pruebas en laboratorio del aireador difusor tornado se determinó la tasa de transferencia de oxígeno que es de 1,641 kgO<sub>2</sub>/h, además la eficiencia SAE del equipo es de 1,094 kg O<sub>2</sub>/kWh. Las pruebas en campo determinaron el alcance y profundidad máximos del aireador, siendo estos de 8 y 1,5 metros respectivamente.

## RECOMENDACIONES

- Proteger el motor de las lluvias, implementando una cubierta o una carcasa que cree un ambiente hermético, con el fin de evitar la corrosión y de esta manera prolongar la vida útil del equipo.
- Reemplazar el timer digital por un controlador de oxígeno disuelto, que proceda a encender el equipo únicamente cuando detecte bajos niveles de oxígeno y que lo apague cuando estos sean normales.
- Construir el equipo enteramente en acero inoxidable para disminuir los efectos de la corrosión y aumentar considerablemente la vida útil del equipo.
- Garantizar que los flotadores del equipo sean completamente herméticos, es decir, que no presenten fisuras o grietas que provoquen el ingreso de agua hacia su interior. Esto garantizará la flotabilidad a largo plazo del flotador, evitando daños causados por el hundimiento de la máquina.
- Realizar pruebas de funcionamiento con otras velocidades distintas a la de funcionamiento, con el fin de comprobar la incidencia de esta sobre la capacidad de transferir oxígeno del aireador.
- Analizar la influencia de la turbulencia generada por el aireador sobre la actividad de los camarones ubicados en las cercanías.
- Verificar el alineamiento y balanceo del conjunto eje-rodete con el objetivo de disminuir lo máximo posible las vibraciones no deseadas.

## GLOSARIO

**Acuicultura:** Cultivo de organismos acuáticos, comprendidos peces, moluscos, crustáceos y plantas (FAO, 2003).

**Aireación mecánica:** En acuicultura la aireación nos es más que la acción de dotar de oxígeno al agua con algún método artificial generalmente con el uso de aireadores (Boyd, 1998: p.10).

**Aireador:** Es el quipo utilizado para introducir aire al agua de forma artificial, estos aireadores pueden ser mecánicos, gravitacionales y de difusión (Boyd, 1998: p.10).

**Álabe:** Elemento constitutivo de un rodete, es el encargado de transferir la energía mecánica al fluido (Mataix, 1975: p.38).

**Difusión:** La difusión es el acto de propagar un soluto en un solvente, mide la capacidad de mezcla del oxígeno con el agua (Goyenola, 2007: p.2).

**Difusor:** Equipo mecánico que promueve el ingreso de un flujo masico de aire a un cuerpo de agua, promoviendo así la difusión (Boyd, 1998: p.13).

**Oxígeno disuelto:** Se define al oxígeno disuelto (OD) como la cantidad de oxígeno que se encuentre inmersa en el agua la cual es fundamental para la supervivencia de las especies acuáticas. Este parámetro generalmente se lo utiliza para medir la calidad del agua estanques (Goyenola, 2007: p.1).

**Régimen permanente:** Estado de un sistema que se conserva después de que, permaneciendo constantes las variables de entrada, todos los efectos transitorios hayan desaparecido (Viejo, 2000: p.30).

**Régimen transitorio:** Estado de un sistema que no alcanza la estabilidad de las variables, por lo que su funcionamiento es caótico (Viejo, 2000: p.30).

**Rodete:** Elemento provisto de alabes que transforma energía mecánica en energía hidráulica y viceversa (Mataix, 1975: p.39).

**Salinidad:** Parámetro que mida la concentración de sales en el agua (Boyd, 2018: p.1).

**Saturación:** Nivel de concentración en el que la disolución pierde la capacidad de disolver más soluto (Boyd, 2018: p.1).

**Secuestrante de oxígeno:** Elemento químico, puede ser liquido o sólido, que tiene como objetivo disminuir los niveles de oxígeno disuelto de un cuerpo de agua (Tunsutapanich et al, 2006: p.3).

**Sensor:** Un sensor es un dispositivo que, a partir de la energía del medio donde se mide, da una señal de salida que es en función de la variable medida (Pallás, 2003, p.3).

**Turbomáquina:** Las turbomáquinas hidráulicas son máquinas de fluido que le otorgan una determinada energía a un fluido, debido a la variación del momento cinético del fluido, que se produce al pasar por conductos que se mueven con movimiento de rotación, dotado con alabes, que se lo denomina comúnmente como rotor (Mataix, 1975: p.30).

## BIBLIOGRAFÍA

**AHMAD, T.; & BOYD, C.** “Design and Performance of Paddle Wheel Aerators”. *Journal of Aquacultural Engineering* [en línea], 1988 (USA) 7 (1), pp. 39-62. [Consulta: 5 abril 2020]. ISSN 01448609 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0144860988900374>

**AKIFUMI, E et al.** *Construcción de Estanques y de Estructuras para Cultivos de Peces* [en línea]. Dirección de Acuicultura, 2002 Buenos Aires-Argentina. [Consulta: 1 octubre 2020]. Disponible en: [http://www.produccion-animal.com.ar/produccion\\_peces/piscicultura/39-estanques\\_parte2.pdf](http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_peces/piscicultura/39-estanques_parte2.pdf)

**ANONGPONYOSKUN, M; et al.** “Dissolved oxygen budget for pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) culture in earthen ponds”. *Journal of Natural Science* [en línea], 2012 (Tailandia) 46 (5), pp. 751-758. [Consulta: 14 diciembre 2020]. ISSN 00755192 Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/288220552\\_Dissolved\\_oxygen\\_budget\\_for\\_pacific\\_white\\_shrimp\\_Litopenaeus\\_vannamei\\_culture\\_in\\_earthen\\_ponds](https://www.researchgate.net/publication/288220552_Dissolved_oxygen_budget_for_pacific_white_shrimp_Litopenaeus_vannamei_culture_in_earthen_ponds)

**AQUATOOLS.** *Catalogo de equipamento acuicola* [en línea]. Oradea-Romania: Aquatools 2020. [Consulta: 12 abril 2020]. Disponible en: [http://www.aquaculture-partners.com/catal\\_FRUKES\\_v22.pdf](http://www.aquaculture-partners.com/catal_FRUKES_v22.pdf)

**ARAUJO RODRIGUEZ, Fernando.** Diseño, Construcción y Pruebas de un Ventilador Centrífugo de Alto Caudal- Baja Presión y Estudio del Efecto de Entrada [En línea] (Trabajo de titulación). (Pregrado Escuela Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería Mecánica, Guayaquil, Ecuador. 1985. pp. 1-304. [Consulta: 27 abril 2020]. Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/41806>

**ATIA, D; et al.** “Design and Control Strategy of Diffused Air Aeration System”. *Journal of Electrical and Computer Engineering* [en línea], 2012 6 (3), pp. 385-389. [Consulta: 18 febrero 2020]. ISSN 091950263 Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1014.4553&rep=rep1&type=pdf>

**BANCO CENTRAL DEL ECUADOR.** *Exportaciones FOB por grupo de productos. Datos Estadísticos.* [en línea]. BCE, 2019. [Consulta: 26 febrero 2020]. Disponible en: <https://contenido.bce.fin.ec/home1/estadisticas/bolmensual/IEMensual.jsp>.

**BARBA JARAMILLO, Carlos Andrés.** Aireación de las piscinas de cultivo de Tilapia Roja (*Oreochromis sp.*) y su influencia en la productividad [En línea] (Trabajo de titulación). (Pregrado Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, Quito, Ecuador.

2015. pp. 1-79. [Consulta: 4 marzo 2020]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/10324/3/CD-6152.pdf>

**BIOAQUAFLOC.** *Aireadores de paleta en acuicultura. Ventajas y Desventajas* [en línea]. Bioaquafloc, 2018. [Consulta: 15 diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.bioaquafloc.com/maquinaria-equipos-e-instrumental-acuicola/aireador-de-paleta-en-acuicultura-ventajas-y-desventajas/>

**BOYD, C.** “Pond water aeration systems”. *Journal of Aquacultural Engineering* [en línea], 1998 (USA) 18 (1), pp. 9-40. [Consulta: 18 diciembre 2020]. ISSN 01448609 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0144860998000193>

**BOYD, C.** *Dinámica del oxígeno disuelto*. [en línea]. Global Aquaculture, 2018. [Consulta: 25 mayo 2020]. Disponible en: <https://www.aquaculturealliance.org/advocate/dinamica-del-oxigeno-disuelto/>

**BOYD, C.** *Water quality in ponds for aquaculture* [en línea]. Alabama-USA: Alabama Agricultural Experiment Station Auburn University, 1998. [Consulta: 10 febrero 2020]. Disponible en: <http://aurora.auburn.edu/handle/11200/49690>

**BOYD, C.; & AHMAD, T.** *Evaluation of Aerators for Channel Catfish Farming* [en línea]. Alabama-USA: Alabama Agricultural Experiment Station Auburn University 1987. [Consulta: 20 marzo 2020]. Disponible en: <http://aurora.auburn.edu/handle/11200/2501>

**BOYD, C.; & MARTINSON, D.** “Evaluation of propeller-aspirator-pump aerators”. *Journal of Aquaculture* [en línea], 1984 (USA) 36 (3), pp. 283-292. [Consulta: 27 noviembre 2020]. ISSN 00448486 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0044848684902436>

**CASTELLO, F.** *Acuicultura Marina: Fundamentos biológicos y tecnología de la producción*. [en línea] Barcelona-España: Libertype, 1993. [Consulta: 12 enero 2020]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=hjwMNMgh1cQC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

**CHOTO, S et al.** “Modelación y simulación por volúmenes finitos de un impulsor de una bomba centrífuga”. *Revista de Investigación Científica* [en línea], 2017 (Ecuador) 18 (2), pp. 27-34. [Consulta: 5 mayo 2020]. ISSN 24779105 Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/9367>

**DOBBS CORPORATION INC.** *Evaporators* [en línea]. Texas-USA: Dobbs 2020. [Consulta: 12 abril 2020]. Disponible en: <https://dobbspumps.com/evaporators>

**ESPAE.** *Orientación estratégica para la toma de decisiones. Industria de Acuicultura*. [en línea]

Guayaquil-Ecuador: ESPA-E-SPOL, 2018. [Consulta: 25 febrero 2020]. Disponible en: [https://www.espa.eapol.edu.ec/wp-content/uploads/2018/01/ei\\_acuicultura.pdf](https://www.espa.eapol.edu.ec/wp-content/uploads/2018/01/ei_acuicultura.pdf)

**FAO.** *Acuicultura: principales conceptos y definiciones.* [en línea]. FAO, 2003. [Consulta: 11 enero 2020]. Disponible en: <http://www.fao.org/spanish/newsroom/focus/2003/aquaculture-defs.htm>.

**FAO.** *Desarrollo de la acuicultura. 4. Enfoque ecosistémico a la acuicultura* [en línea]. Roma-Italia: FAO, 2011. [Consulta: 10 marzo 2020]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/i1750s/i1750s00.htm>

**FAO.** *El estado mundial de la pesca y la acuicultura.* [en línea]. Roma-Italia: FAO, 2018. [Consulta: Consulta: 10 marzo 2020]. Disponible en: <http://cepessa.es/wp-content/uploads/2018/07/Informe-SOFIA-2018-espa%C3%B1ol.pdf>

**FAO.** *Visión general del sector acuícola nacional: Ecuador.* [en línea]. FAO, 2019. [Consulta: 11 diciembre 2019]. Disponible en: [http://www.fao.org/fishery/countrysector/naso\\_ecuador/es](http://www.fao.org/fishery/countrysector/naso_ecuador/es)

**GAD PEDERNALES.** *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón Pedernales* [en línea]. GAD Pedernales, 2017. [Consulta: 5 marzo 2020]. Disponible en: [http://gobiernodezapotillo.gob.ec/?page\\_id=265](http://gobiernodezapotillo.gob.ec/?page_id=265).

**GOYENOLA, G.** *Oxígeno Disuelto.* [en línea]. Uruguay: RED MAPSA, 2007. [Consulta: 12 enero 2020]. Disponible en: [http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/curso\\_2007/cartillas/tematicas/OD.pdf](http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/curso_2007/cartillas/tematicas/OD.pdf)

**HARGREAVES, J.; & TUCKER, C.** *Measuring Dissolved Oxygen Concentration in Aquaculture.* [en línea]. USA: Southern Regional Aquaculture Center, 2002. [Consulta: 20 junio 2020]. Disponible en: [http://counties.agrilife.org/liveoak/files/2011/07/Measuring\\_Dissolved\\_Oxygen\\_Concentration\\_7.pdf](http://counties.agrilife.org/liveoak/files/2011/07/Measuring_Dissolved_Oxygen_Concentration_7.pdf)

**KUMAR, A; et al.** “Performance evaluation of propeller-aspirator-pump aerator”. *Journal of Aquacultural Engineering* [en línea], 2010 (India) 42 (2), pp. 70-74. [Consulta: 1 octubre 2020]. ISSN 01448609 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S01448609001009>

**KUMAR, A; et al.** “Selection of aerators for intensive aquacultural pond”. *Journal of Aquacultural Engineering* [en línea], 2013 (India) 56 (1), pp. 71-78. [Consulta: 14 enero 2020]. ISSN 01448609 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0144860913000617>

**LI, Y; et al.** “The effects of dissolved oxygen concentration and stocking density on growth and non-specific immunity factors in Chinese shrimp, *Fenneropenaeus chinensis*”. *Journal of Aquaculture* [en línea], 2006 (China) 256 (1), pp. 608-616. [Consulta: 10 marzo 2020]. ISSN 00448486 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0044848606001359>

**MATAIX, C.** *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*. 2ª ed. Madrid-España: Ediciones del Castillo S.A., 1986, p.355.

**MATAIX, C.** *Turbomáquinas Hidráulicas: turbinas hidráulicas, bombas, ventiladores*. Madrid-España: ICAI, 1975, p.39.

**MOLINOS CHAMPION, S.A.** *Cria de camarones en agua dulce* [en línea]. Guayaquil-Ecuador: MOLINOS CHAMPION S.A, 2020. [Consulta: 12 abril 2020]. Disponible en: <https://www.molinoschampion.com/cria-camarones-en-agua-dulce/>

**MUÑOZ BAZURTO, Galo Javier.** Evaluación de la calidad del agua y sedimento de piscinas camaroneras durante un ciclo productivo del cultivo semintensivo en la parroquia Cojimies, canton Pedernales, provincia de Manabí, Ecuador [En línea] (Trabajo de titulación). (Pregrado Universidad de Especialidades Espíritu Santo, Facultad de Artes Liberales y Ciencias de la Educación, Samborondón, Ecuador. 2017. pp. 1-35. [Consulta: 5 marzo 2020]. Disponible en: [http://repositorio.uees.edu.ec/bitstream/123456789/2181/1/Paper\\_Final\\_Galo\\_Mu%C3%B1oz.pdf](http://repositorio.uees.edu.ec/bitstream/123456789/2181/1/Paper_Final_Galo_Mu%C3%B1oz.pdf)

**NICOVITA.** *Interrelaciones de la temperatura, oxígeno y amoníaco tóxico en el cultivo de camarón en tumbes* [en línea]. Nicovita, 1997 [Consulta: 10 junio 2020]. Disponible en: [http://www.nicovita.com/extranet/Boletines/ago\\_97\\_02.pdf](http://www.nicovita.com/extranet/Boletines/ago_97_02.pdf)

**NONWACHAI, T et al.** “Effects of Dissolved Oxygen Levels on Growth, Survival and Immune Response of Juvenile Pacific White Shrimp *Litopenaeus vannamei*”. *Journal of Fisheries and Environment* [en línea], 2011 (Tailandia) 35 (3), pp. 1-10. [Consulta: 15 diciembre 2019]. ISSN 26300702 Disponible en: <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/JFE/article/view/80778>

**OGATA, K.** *Ingeniería de control moderna* . 5ª ed. Madrid-España: Pearson Educación S.A., 2010, p.53.

**OROXÓN FUENTES, José Lisandro.** Diseño de oxigenador de agua programable para estanques [en línea] (Trabajo de titulación). (Pregrado Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Ciudad de Guatemala, Guatemala. 2017. pp. 1-122. [Consulta: 14 febrero 2020]. Disponible en:



<http://www.repositorio.usac.edu.gt/8241/1/Jos%C3%A9%20Lisandro%20Orox%C3%B3n%20Fuentes.pdf>

**PALLÁS, R.** *Sensores y Acondicionadores de Señal* [en línea]. 4ª ed. Barcelona-España: Marcombo, 2003. [Consulta: 14 enero 2021]. Disponible en: [https://books.google.es/books?id=Eevyk28\\_fVkC&printsec=frontcover&hl=es](https://books.google.es/books?id=Eevyk28_fVkC&printsec=frontcover&hl=es)

**PILLAPA TIBAMQUIZA, Oscar Wilfrido & HURTADO GUAMBIANGO, Edison Geovanny.** Diseño, construcción e implementación de tableros didácticos para el laboratorio de control eléctrico y plc de la Espe extensión Latacunga [En línea] (Trabajo de titulación). (Pregrado Escuela Politécnica del Ejército), Carrera de Electrónica e Instrumentación, Latacunga, Ecuador. 2010. pp. 1-108. [Consulta: 5 mayo 2020]. Disponible en: <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/4422/1/M-ESPEL-0043.pdf>

**ROJAS, H.** “Aplicación de un modelo de correlación entre las variables temperatura, densidad y oxígeno disuelto para la identificación de termoclina en la estratificación térmica”. *Revista de Ciencias Naturales* [en línea], 2010 (Paraguay) 1 (2), pp. 1-14. [Consulta: 6 junio 2020]. ISSN 22242702 Disponible en: <http://scielo.iics.una.py/pdf/rcfacen/v1n2/v1n2a02.pdf>

**RUALES CARPIO, Andrés Fabricio.** Evaluación del rendimiento del camarón (*Litopenaeus vannamei*) en cautiverio a través de un sistema de producción tradicional y un sistema de producción con aireadores de paletas estanques [En línea] (Trabajo de titulación). (Pregrado Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo, Guayaquil, Ecuador. 2012. pp. 1-112. [Consulta: 24 marzo 2020]. Disponible en: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/991>

**SACASQUI, M.** Control avanzado sobre un el cultivo de langostinos (*Litopenaeus vannamei*), usando modelos matemáticos disuelto en acuicultura [En línea] (Trabajo de titulación). (Maestría) Universidad de Piura. Piura, Perú. 2017. pp. 1-119. [Consulta: 24 febrero 2020]. Disponible en: [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/3013/MAS\\_IME\\_AUT\\_018.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/3013/MAS_IME_AUT_018.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

**SANABRIA, E.; & SÁNCHEZ, J.** *Sistema de control de velocidad de un motor trifásico mediante un variador de frecuencia y sistema scada.* [En línea].UTP, 2016 [Consulta: 15 mayo 2020]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/84108358.pdf>

**TAPARHUDEE, W.** “Applications of Paddle Wheel Aerators and Diffused-Air System in Closed Cycle Shrimp Farm System” *Journal of Natural Science* [en línea], 2002 (Tailandia) 36 (4), pp. 408-419. [Consulta: 2 febrero 2020]. ISSN 00755192 Disponible en: <https://li01.tci->

thaijo.org/index.php/anres/article/view/242774

**TAPARHUDEE, W; et al.** “Application Study of Paddle-wheel Aerators Using Motors and Engines in Intensive Pacific White Shrimp (*Litopenaeus vannamei*) Culture Ponds” *Journal of Natural Science* [en línea], 2007 (Tailandia) 41 (3), pp. 522-530. [Consulta: 14 diciembre 2020]. ISSN 00755192 Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/286350248\\_Comparative\\_study\\_on\\_paddle-wheel\\_aerators\\_using\\_electric\\_motors\\_and\\_diesel\\_engines\\_in\\_Pacific\\_white\\_shrimp\\_Litopenaeus\\_vannamei\\_culture\\_ponds](https://www.researchgate.net/publication/286350248_Comparative_study_on_paddle-wheel_aerators_using_electric_motors_and_diesel_engines_in_Pacific_white_shrimp_Litopenaeus_vannamei_culture_ponds)

**TECNOACUA.** *Catalogo de Aireadores de Paleta Diva*[en línea]. Duran-Ecuador: Tecnoacua 2020. [Consulta: 12 abril 2020]. Disponible en: <http://www.tecnoacua.com.ec/CATALOGO.pdf>

**TUNSUTAPANICH, S; et al.** *Energy Performance Evaluation of Aerators for Shrimp Farming.* [en línea]. Bangkok-Tailandia: The 2nd Joint International Conference on “Sustainable Energy and Environment, 2006. [Consulta: 11 marzo 2020]. Disponible en: <https://fdocuments.in/document/energy-performance-evaluation-of-aerators-for-shrimp-farming-systems-have-raised.html>

**TUNSUTAPANICH, S; et al.** *Energy Performance Evaluation of Aerators for Shrimp Farming.* [en línea] Bangkok-Tailandia: The 2nd Joint International Conference on “Sustainable Energy and Environment SEE 2006”, 2006. [Consulta: 27 noviembre 2020]. Disponible en: <https://fdocuments.in/document/energy-performance-evaluation-of-aerators-for-shrimp-farming-systems-have-raised.html>

**VAN WYK, P et al.** *Farming Marine Shrimp in Recirculating Freshwater Systems* [en línea]. Florida-USA: Harbor Branch Oceanographic Institution, 1999. [Consulta: 20 marzo 2020]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/John\\_Scarpa/publication/242621708\\_Farming\\_Marine\\_Shrimp\\_in\\_Recirculating\\_Fresh\\_Water\\_Systems/links/574c4f0508ae8d6e6a7b678c.pdf](https://www.researchgate.net/profile/John_Scarpa/publication/242621708_Farming_Marine_Shrimp_in_Recirculating_Fresh_Water_Systems/links/574c4f0508ae8d6e6a7b678c.pdf)

**VELA MELO, Herna Alberto.** Evaluación de la eficiencia de dos equipos de aireación para acuicultura, en la transferencia de oxígeno atmosférico en cultivos intensivos de tilapia roja (*Oreochromis sp.*), en jaulones, en la represa de Betania, Departamento del Huila, Colombia [En línea] (Trabajo de titulación). (Pregrado Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Pecuarias, Pasto, Colombia. 2009. pp. 1-88. [Consulta: 10 agosto 2020]. Disponible en: [https://www.academia.edu/39400858/EVALUACION\\_DE\\_LA\\_EFICIENCIA\\_DE\\_DOS\\_EQUIPOS\\_DE\\_AIREACION\\_PARA\\_ACUCULTURA\\_copia](https://www.academia.edu/39400858/EVALUACION_DE_LA_EFICIENCIA_DE_DOS_EQUIPOS_DE_AIREACION_PARA_ACUCULTURA_copia)

**VERA CABANILLA, Bryan Ignacio & CADENA MITE, Edison Marcelo.** Diseño e implementación de un prototipo controlador de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto para la

supervivencia del camarón usando controladores p, pi, pid y lógica difusa [En línea] (Trabajo de titulación). (Pregrado Universidad Politécnica Salesiana), Carrera de Ingeniería Electrónica, Guayaquil, Ecuador. 2019. pp. 1-122. [Consulta: 14 febrero 2020]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17262/1/UPS-GT002576.pdf>

**VIEJO, M.** *Bombas: teoría, diseño y aplicaciones*. 2ª ed. Mexico D.F-Mexico: Editorial Limusa S.A., 2000, p.53.

**ZAMORA, B.; & VIEDMA, A.** *Máquinas Hidráulicas: Teoría y Problemas*. [en línea]. Cartagena-Colombia: CRAI, 2016. [Consulta: 29 abril 2020]. Disponible en: <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/5476/isbn9788416325191.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

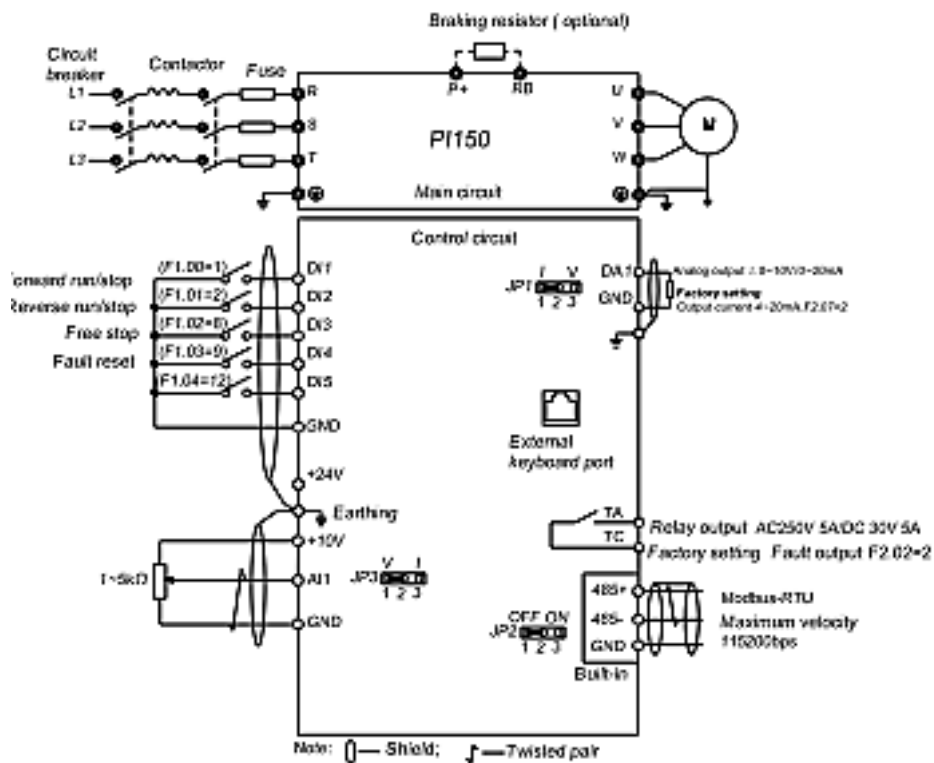
**ZARAGOZA, R.** Modelo para la estimación de la tasa de respiración en un SBR [En línea] (Trabajo de titulación). (Maestría) Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México. 2009. pp. 1-50. [Consulta: 19 julio 2020]. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/3316/zaragozaper ez.pdf?sequence=1>

# ANEXOS

## ANEXO A: FICHA TÉCNICA VARIADOR DE FRECUENCIA

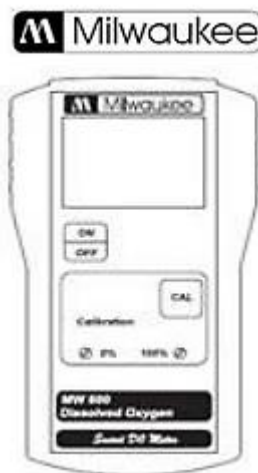
Items		Specifications	
Power Input	Rated voltage	AC 1PH 220V(-15%)~240V(+10%) AC 3PH 220V(-15%)~240V(+10%) AC 3PH 380V(-15%)~440V(+10%) AC 3PH 480V(-15%)~480V(+10%)	
	Input frequency	50Hz/60Hz	
	Allowing fluctuations	Voltage continued volatility: $\pm 10\%$ Input frequency fluctuation: $\pm 5\%$	Less than 3% of voltage unbalance rate 3%; Distortion satisfy IEC61800-2 standard
Control system	Control system	High performance vector control inverter based on DSP	
	Control method	V/F control, vector control W/O PG	
	Automatic torque boost function	Realize low frequency (1Hz) and large output torque control under the V/F control mode.	
	Acceleration/deceleration control	Straight or S-curve mode. Four times available and time range is 0.0~6500.0s.	
	V/F curve mode	Linear, square root/m-th power, custom V/F curve	
	Over load capability	G type: Rated current 150% - 1 minute, rated current 180% - 2 seconds	
	Maximum frequency	1. Vector control: 0~300Hz; 2. V/F control: 0~3200Hz	
	Carrier frequency	0.5~16kHz; automatically adjust carrier frequency according to the load characteristics.	
	Input frequency resolution	Digital setting: 0.01Hz minimum analog: Maximum frequency*0.025%.	
	Start torque	G type: 0.5Hz/150% (Vector control W/O PG)	
	Speed range	1:100 (Vector control W/O PG)	
	Steady-speed precision	Vector control W/O PG: $\leq \pm 0.5\%$ (Rated synchronous speed)	
	Torque response	$\leq 40\text{ms}$ (Vector control W/O PG)	
	Torque boost	Automatic torque boost; manual torque boost(0.1%~30.0%)	
	DC braking	The built-in PID adjusts the braking current to ensure sufficient braking torque without over-flow. DC braking frequency: 0.0Hz to max. frequency, braking time: 0.0~100.0 seconds, braking current value: 0.0%~100.0%	
	Jogging control	Jog frequency range: 0.00Hz to max. frequency; jog Acc/deceleration time: 0.0~6500.0s.	
	Built-in PID	Easy to realize closed-loop control system for the process control.	
Automatic voltage regulation(AVR)	Automatically maintain a constant output voltage when the voltage of electricity grid changes.		
Speed tracking method	Automatically track current motor speed when the inverter starts		
Personalization function	Self-inspection of peripherals after power-on	After powering on, peripheral equipment will perform safety testing, such as ground, short circuit, etc.	
	Quick current limiting	The current limiting algorithm is used to reduce the inverter over current probability, and improve whole unit anti-interference capability.	
	Timing control	Timing control function: Time setting range(0m~6500m)	
Running	Input Signal	DI Input terminal	5 digital input terminals
		All analog input	1 analog All input terminal, select 0~10V or 0~20mA input

Items		Specifications	
	Multi-speed	At most 16-speed can be set(Run by using the multi-function terminals or program)	
		Emergency stop	Interrupt controller output
		Fault reset	When the protection function is active, you can automatically or manually reset the fault condition.
		PID feedback signal	Including DC(0~10V), DC(0~20mA)
	Output Signal	Output terminal	1 way relay output terminal; 1 way DA1 analog output terminal
		Relay output	There are 40 kinds of signals to choose from each way. Contact capacity of the relay: Normally open contact 5A/AC 250V; 5A/DC 30V
		DA1 analog output	1 way analog output, you can select 16 kinds of signals such as frequency, current, voltage, etc. The output signal range can be set arbitrarily within 0~10V,0~20mA.
	Running command channel	Three channels: Operation panel, control terminals and serial communication port. They can be switched through a variety of ways.	
	Frequency source	Total 7 frequency sources: Digital, analog voltage, multi-speed, and serial port.	
	Run function	Limit frequency, jump frequency, frequency compensation, auto-tuning, PID control	
Protection function	Inverter protection	Overvoltage protection, undervoltage protection, overcurrent protection, overload protection, overheat protection, overcurrent stall protection, overvoltage stall protection, losing-phase protection (Optional), communication error, PID feedback signal abnormalities, and short circuit to ground protection.	
Display	LED display keyboard	Running information	Monitoring objects including: Running frequency, set frequency, bus voltage, output voltage, output current, output power, output torque, input terminal status, output terminal status, analog AI1 value , motor Actual running speed ,PID set value percentage, PID feedback value percentage.
		Error information	At most save three error message, and the time, type, voltage, current, frequency and work status can be queried when the failure is occurred.
	Key lock and function selection	Lock part or all of keys, define the function scope of some keys to prevent misuse.	
	IGBT temperature	Display current IGBT temperature inside the inverter.	
Communication	RS485	Built-in 485	
Environment	Environment temperature	-10~40℃ (The environment temperature in 40~50 ℃, please derating use)	
	Storage temperature	-20~65 ℃	
	Environment humidity	Less than 90% R.H, no condensation.	
	Vibration	Below 5.9m/s <sup>2</sup> (= 0.6g)	
	Application sites	Indoor where no sunlight or corrosive, explosive gas and water vapor, dust, flammable gas, oil mist, water vapor, drip or salt, etc.	
	Altitude	Use below 1000m without derating, 1% for each 100m increasing above 1000m, the highest altitude is 3000m	
	Protection level	IP20	
Product standard	Product adopts safety standards.	IEC61800-5-1:2007	
	Product adopts EMC standards.	IEC61800-3:2005	



**Enlace:** <https://www.powtran.com/upload/202012/15/202012151754258451.pdf>

**ANEXO B: FICHA TÉCNICA MEDIDOR DE OCÍGENO DISUELTO**



Rango : 0,0 a 19,9 mg/L

Resolución : 0,1 mg/L

Precisión : ± 1,5%

Compensación de Temperatura : Automática

Electrodo : MA840

Pila : 9V alcalina (incluida)

MA840 : Electrodo OD

MA841 : Kit de 5 membranas

MA9071 : Solución Electrolite

MA9070 : Solución cero oxígeno

**Enlace:** <https://milwaukee.cat/wp-content/uploads/2016/02/MW600-Manual-de-Usuario.pdf>

## ANEXO C: PLANOS



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE  
CHIMBORAZO**



**DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL  
APRENDIZAJE**

**UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS**

**REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA**

**Fecha de entrega:** 25 / 05 / 2021

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> DANIEL ALEJANDRO ARIAS MONTERO
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>Facultad:</b> MECÁNICA
<b>Carrera:</b> MECÁNICA
<b>Título a optar:</b> INGENIERO MECÁNICO
<b>f. Analista de Biblioteca responsable:</b> Lcdo. Holger Ramos, MSc.



Firmado electrónicamente por:  
**HOLGER GERMAN  
RAMOS UVIDIA**

0955-DBRA-UPT-2021