

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO  
USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

Bombas utilizadas como Turbinas (PATs) Micro Generadoras de  
Electricidad para pequeñas comunidades

**Francisco Javier Beltrán Moreira  
Juan José Erazo Revelo  
Diego Adrian Luzuriaga Aveiga  
Luca Alberto Silva Romero**

**Ingeniería Mecánica**

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Ingeniero Mecánico

Quito, 28 de diciembre de 2022

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**  
**USFQ**  
**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**HOJA DE CALIFICACIÓN**  
**DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

Bombas utilizadas como Turbinas (PATs) Micro Generadoras de  
Electricidad para pequeñas comunidades

**Francisco Javier Beltrán Moreira**

**Nombre del profesor, Título académico    Juan Sebastián Proaño Aviles, PhD**

Quito, 28 de diciembre de 2022

## © DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Francisco Javier Beltrán Moreira  
Código: 00201467  
Cédula de identidad: 1719735225

Nombres y apellidos: Juan José Erazo Revelo  
Código: 00207080  
Cédula de identidad: 0401578091

Nombres y apellidos: Diego Adrian Luzuriaga Aveiga  
Código: 00135522  
Cédula de identidad: 1726619818

Nombres y apellidos: Luca Alberto Silva Romero  
Código: 00209953  
Cédula de identidad: 1752192896

Lugar y fecha:

Quito, 28 de diciembre de 2022

## **ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN**

**Nota:** El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

## **UNPUBLISHED DOCUMENT**

**Note:** The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

## RESUMEN

En este trabajo se busca generar electricidad a partir de bombas hidráulicas, las cuales realizan la función de bomba y turbina (PAT), utilizamos la bomba con los mismos componentes originales con mínimas variaciones que ayudan al funcionamiento de la turbina. Esta investigación parte del trabajo desarrollado por el compañero Víctor Gallo de ingeniería civil (ICV), el cual tuvo problemas para la generación eléctrica con carga de agua, por lo que decidimos tomar un camino distinto. Se construyó un prototipo de PAT con un circuito cerrado que se retroalimenta mediante una segunda bomba, la cual suministra un flujo constante creando las condiciones óptimas de funcionamiento del modo turbina, eliminando la necesidad de utilizar un reservorio elevado que, para futuras aplicaciones en el campo, si será necesario poseer la capacidad de represamiento al igual que caída de agua. Descartando varias propuestas, nos decidimos en un diseño que parte de una bomba en la que se busca potenciar el modo turbina mejorando su capacidad de generación, usamos la ley de inducción de Faraday Lenz, en la que se agrega imanes permanentes en el rotor para crear un campo magnético, como factor en contra se reduce el funcionamiento de la bomba. El proyecto está diseñado para aplicaciones en comunidades aisladas las cuales no se encuentran conectadas a la red eléctrica nacional, este sistema genera energía eléctrica y a la vez puede bombear agua para el consumo humano, se obtuvieron resultados satisfactorios al poder generar electricidad sin necesidad de una gran capacidad de represamiento, con pocas revoluciones por minuto y a un precio ligeramente superior al de una bomba, volviendo a esta investigación atractiva por ser económica y sencilla de replicar. Esto se puede mejorar a futuro con el uso de más unidades, mejorando los materiales de los rodetes y de la voluta y mejorando el almacenamiento energético usando más baterías.

**Palabras clave:** PAT, Bomba, Turbina, flujo, energía, eléctrica, circuito.

## ABSTRACT

In this work we seek to generate electricity from hydraulic pumps, which perform the function of pump and turbine (PAT), we use the pump with the same original components with minimal variations that improve the operation of the turbine. This investigation is based on the work carried out by Víctor Gallo, a civil engineering comrade (ICV), who had problems generating electricity with a water load, for which reason we had to take a different path. A PAT prototype was built with a closed circuit that is fed back by a second pump which supplies a constant flow creating the optimal operating conditions for the turbine mode, eliminating the need to use an elevated reservoir that, in future applications, is necessary to have the capacity of damming as well as waterfall. Discarding several proposals, we choose a design that starts from a pump that seeks to enhance the turbine mode by improving its generation capacity, we use Faraday Lenz's induction law, in which permanent magnets are added to the rotor to create a magnetic field, but the performance of the pump is reduced. The project is designed for applications in isolated communities which are not connected to the national electricity grid. This system generates electricity and at the same time can pump water for human consumption, satisfactory results were obtained by being able to generate electricity without the need for a large damming capacity, with few revolutions per minute and a price slightly higher than that of a pump, making this research attractive because it is cheap and easy to replicate. This can be improved in the future with the use of more generation units, improving the materials of the impellers and the volute and increasing the energy storage by using more batteries.

**Key words:** PAT, Pump, Turbine, flow, energy, electrical, circuit.

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE GENERAL.....</b>	<b>7</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>8</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>13</b>
<b>Solución .....</b>	<b>16</b>
<b>Conceptos de diseño.....</b>	<b>18</b>
Bomba y Turbina.....	18
Conectados por el eje.....	19
Sistemas Independientes.....	20
Usando embragues .....	4
<b>Análisis de criterios ponderados.....</b>	<b>7</b>
Criterios:.....	7
<b>Estándares de Interés .....</b>	<b>13</b>
<b>Organización de actividades .....</b>	<b>13</b>
<b>Materiales y componentes .....</b>	<b>19</b>
<b>Diseño para Construcción .....</b>	<b>26</b>
Diseño para Fin de Vida Útil.....	33
<b>Reporte de diseño .....</b>	<b>34</b>
<b>Diagrama de proceso .....</b>	<b>40</b>
<b>Hojas de proceso.....</b>	<b>41</b>
<b>Seguridad a través del diseño .....</b>	<b>46</b>
Análisis de riesgos: .....	46
<b>Manual de mantenimiento y operaciones .....</b>	<b>49</b>
<b>Análisis ingenieril .....</b>	<b>50</b>
<b>Rendimiento del Sistema.....</b>	<b>58</b>
<b>Simulaciones .....</b>	<b>63</b>
<b>Pruebas del sistema .....</b>	<b>67</b>
<b>Costos del prototipo:.....</b>	<b>68</b>
<b>Resultados .....</b>	<b>69</b>
<b>Conclusiones:.....</b>	<b>70</b>
<b>Pasos Futuros: .....</b>	<b>71</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>73</b>
<b>ANEXO A: TABLAS PARA CALCULOS.....</b>	<b>78</b>
<b>ANEXO B: PLANOS .....</b>	<b>80</b>
<b>ANEXO C: BOMBA RECOMENDADA, PARA APLICACIONES FUTURAS .....</b>	<b>88</b>

<b>ANEXO D: PRUEBAS MECÁNICAS E HIDRÁULICAS.....</b>	<b>90</b>
<b>ANEXO E: CÁLCULOS MANUALES.....</b>	<b>92</b>
<b>ANEXO F: REUNIONES Y MINUTAS DE GRUPO .....</b>	<b>94</b>
<b>ANEXO G: DIAGRAMA DE PROCESOS.....</b>	<b>97</b>
<b>ANEXO H: DIAGRAMA DE GANTT .....</b>	<b>98</b>
<b>ANEXO I: MANUAL DE OPERACIONES .....</b>	<b>99</b>
<b>Tabla de ilustraciones .....</b>	<b>100</b>
<b>Preparación.....</b>	<b>101</b>
<b>Conexiones eléctricas .....</b>	<b>102</b>
<b>Complementos.....</b>	<b>104</b>
<b>Mantenimiento.....</b>	<b>105</b>
<b>ANEXO J: NORMAS DE BOMBA LEO.....</b>	<b>106</b>
<b>ANEXO K: COSTOS.....</b>	<b>107</b>
<b>ANEXO L: BOMBA PEDROLLO DATA SHEET .....</b>	<b>110</b>
<b>ANEXO M: CODIGO DE EFICIENCIAS EN MATLAB.....</b>	<b>113</b>

### ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Criterios según importancia. ....</i>	<i>7</i>
<i>Tabla 2: Evaluación de cada criterio. ....</i>	<i>8</i>
<i>Tabla 3: Evaluación de precios .....</i>	<i>8</i>
<i>Tabla 4: Evaluación del criterio precio.....</i>	<i>9</i>
<i>Tabla 5: Evaluación del criterio Construcción.....</i>	<i>9</i>
<i>Tabla 6: Evaluación del criterio Generación.....</i>	<i>10</i>
<i>Tabla 7: Evaluación del criterio Mantenimiento.....</i>	<i>10</i>
<i>Tabla 8: Evaluación de criterios. ....</i>	<i>10</i>
<i>Tabla 9: Componentes críticos por orden de importancia .....</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 10: Cronograma general .....</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 11: actividades del mes de noviembre .....</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 12: Turbinas (Lesics, 2013).....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 13: Dispositivos críticos .....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 14: Programa de mantenimiento .....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 15: horario de iteración .....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 16: Proceso de fabricación impulsor .....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 17: Hoja de proceso impulsor 2. ....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 18: Hoja de proceso rotor.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 19: Proceso de Voluta.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 20: Tolerancias y costos de manufactura .....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 21: Análisis de riesgos .....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 22: Análisis cualitativo .....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 23: Análisis cuantitativo .....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 24: Gestión de riesgos.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 25: Costos.....</i>	<i>69</i>

<i>Tabla 26: Resultados de pruebas en sistema PAT</i> .....	70
<i>Tabla 27: Pruebas de campo</i> .....	91
<i>Tabla 28: Cálculos vs resultados</i> .....	92
<i>Tabla 29: Iteración realizada por Víctor Gallo (ICV)</i> .....	92
<i>Tabla 30: Pérdidas calculadas por Víctor Gallo (ICV).</i> .....	93
<i>Tabla 31: Perdidas mayores y menores de nuestra iteración</i> .....	93
<i>Tabla 32: Datos de iteración fallida usando teoría de condensadores asíncronos</i> .....	93
<i>Tabla 33: Minuta 1</i> .....	94
<i>Tabla 34: Minuta 2</i> .....	94
<i>Tabla 35: Minuta 3</i> .....	95
<i>Tabla 36: Minuta 4</i> .....	95
<i>Tabla 37: Minuta 5</i> .....	95
<i>Tabla 38: Minuta 6</i> .....	96
<i>Tabla 39: Minuta 7</i> .....	96
<i>Tabla 40: Minuta 8</i> .....	96
<i>Tabla 41: Diagrama de Gantt General</i> .....	98
<i>Tabla 42: Horario de actividades noviembre</i> .....	98
<i>Tabla 43: Facturas</i> .....	108
<i>Tabla 44: Costo de ejecución del proyecto</i> .....	109
<i>Tabla 45: Precios de dispositivos similares en el mercado</i> .....	109

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Ilustración 1: “Mapa hidrográfico de la provincia de Orellana” (IGM, 2020)</i> .....	14
<i>Ilustración 2: Esquema del sistema. (Elaboración propia)</i> .....	14
<i>Ilustración 3: Esquema replicable del sistema. (Elaboración propia)</i> .....	15
<i>Ilustración 4: Bomba y Turbina</i> .....	18
<i>Ilustración 5: Esquema de sistema hibrido</i> .....	18
<i>Ilustración 6: Bomba y Turbina conectados por el eje</i> .....	19
<i>Ilustración 7: Bomba y Turbina conectados por un eje pasante</i> .....	20
<i>Ilustración 8: Bomba y Turbina funcionando independientemente</i> .....	20
<i>Ilustración 9: Bomba y Turbina funcionando independientemente</i> .....	21
<i>Ilustración 10: Bomba y Turbina funcionando independientemente con embragues</i> .....	4
<i>Ilustración 11: Bomba y Turbina funcionando independientemente con embragues</i> .....	4
<i>Ilustración 12: Bomba y Turbina funcionando independientemente con engranes</i> .....	5
<i>Ilustración 13: Bomba y Turbina funcionando independientemente con engranes</i> .....	6
<i>Ilustración 14: Interfaz de arduino. (TinkerCAD)</i> .....	7
<i>Ilustración 15: Dispositivos para generadores asíncronos</i> .....	12
<i>Ilustración 16: Rotor con imanes permanentes</i> .....	12
<i>Ilustración 17: Ley de inducción de Faraday Lenz</i> .....	12
<i>Ilustración 18: Bomba y PAT (Applied Flow Technology, 2022)</i> .....	15
<i>Ilustración 19: rendimiento de distintos impeler. (Mentalidad de ingeniería, 2021)</i> .....	16
<i>Ilustración 20: Opciones de impeler. (GrabCAD)</i> .....	17
<i>Ilustración 21: Tip calculado</i> .....	17
<i>Ilustración 22: curva de energía. (Mentalidad de ingeniería, 2021)</i> .....	18
<i>Ilustración 23: curva de eficiencia. (Mentalidad de ingeniería, 2021)</i> .....	18
<i>Ilustración 24: Impulsores realizados (Elaboración Propia)</i> .....	20
<i>Ilustración 25: Triangulo de velocidades</i> .....	21
<i>Ilustración 26: Rodete de reacción 1</i> .....	21
<i>Ilustración 27: Turbina Pelton (Universitat Politècnica de Valencia, Modesto Pérez)</i> .....	22
<i>Ilustración 28: Tipos de plantas hidroeléctricas según su generación</i> .....	22
<i>Ilustración 29: Altura vs caudal. (Lesics, 2013)</i> .....	24
<i>Ilustración 30: Eficiencia vs velocidad de rotación. (Lesics, 2013)</i> .....	24
<i>Ilustración 31: Área de ingreso del caudal. (Lesics, 2013)</i> .....	25
<i>Ilustración 32: Rodete tipo Francis</i> .....	25
<i>Ilustración 33: Rendimiento de Impeler. (Cavarretta, 2011)</i> .....	26
<i>Ilustración 34: Turbina con impeler modificado</i> .....	27
<i>Ilustración 35: Triángulos de Fuerza. (Universitat Politècnica de Valencia, Modesto Pérez)</i> .....	27
<i>Ilustración 36: Zona del estator, intervención a realizar. (Universitat Politècnica de Valencia, Modesto Pérez)</i> .....	28
<i>Ilustración 37: Bomba trifásica (Universitat Politècnica de Valencia, Modesto Pérez)</i> .....	28
<i>Ilustración 38: Ensamble de eje</i> .....	29
<i>Ilustración 39: Conexiones</i> .....	29
<i>Ilustración 40: Sistema</i> .....	34
<i>Ilustración 41: Rotámetro</i> .....	35
<i>Ilustración 42: Rotor con imanes</i> .....	36
<i>Ilustración 43: Impulsor mejorado</i> .....	36
<i>Ilustración 44: Impulsor tipo francis</i> .....	37

<i>Ilustración 45: conexiones Bomba</i> .....	37
<i>Ilustración 46: Pruebas</i> .....	38
<i>Ilustración 47: Esquema Voluta</i> .....	38
<i>Ilustración 48: Diagrama de proceso</i> .....	40
<i>Ilustración 49: dimensiones [mm]</i> .....	41
<i>Ilustración 50: Bomba centrífuga leo</i> .....	45
<i>Ilustración 51: Portada de manual de operaciones (Anexo I)</i> .....	50
<i>Ilustración 52: Esquema</i> .....	50
<i>Ilustración 53: Diagrama de moody</i> .....	52
<i>Ilustración 54: Diagrama de moody online</i> .....	53
<i>Ilustración 55: Reservorio sin elevación</i> .....	55
<i>Ilustración 56: Vectores de velocidad</i> .....	56
<i>Ilustración 57: Entrada y salida de las cuchillas</i> .....	57
<i>Ilustración 58:Diferentes métodos de predicción de rendimiento investigados por Williams (1994)</i> .....	59
<i>Ilustración 59:Gráfica de rendimiento de una bomba, y de una turbina</i> .....	60
<i>Ilustración 60:Gráfica H-Q del sistema PAT</i> .....	61
<i>Ilustración 61:Gráfica de eficiencia del sistema PAT</i> .....	62
<i>Ilustración 62: Código de MatLab</i> .....	63
<i>Ilustración 63:Corte de la Voluta para Simulación</i> .....	64
<i>Ilustración 64: líneas de flujo</i> .....	64
<i>Ilustración 65: Trayectoria del fluido</i> .....	65
<i>Ilustración 66: Reacción del impulsor</i> .....	66
<i>Ilustración 67: Simulación de paleta de rodete</i> .....	67
<i>Ilustración 68: Requerimientos</i> .....	68
<i>Ilustración 69: Pruebas</i> .....	68
<i>Ilustración 70: Rotor y estator de un generador</i> .....	71
<i>Ilustración 71: Baterías en paralelo.( Tierras Insólitas)</i> .....	72
<i>Ilustración 72: Tabla de longitudes equivalentes</i> .....	78
<i>Ilustración 73: Tabla de tamaños y perdidas menores</i> .....	78
<i>Ilustración 74: Tabla de longitudes equivalentes</i> .....	79
<i>Ilustración 75: Tabla de rugosidades</i> .....	79
<i>Ilustración 76: Plano de voluta</i> .....	80
<i>Ilustración 77: Plano de ensamble final</i> .....	81
<i>Ilustración 78: Ensamble de soporte</i> .....	82
<i>Ilustración 79: Ensamble de PAT</i> .....	83
<i>Ilustración 80: Plano de rodete</i> .....	84
<i>Ilustración 81: Plano de rodete tipo francis</i> .....	85
<i>Ilustración 82: Plano de reservorio</i> .....	86
<i>Ilustración 83: Plano de rotor</i> .....	87
<i>Ilustración 84: Bomba centrífuga de eje libre</i> .....	88
<i>Ilustración 85: Parámetros de interés</i> .....	89
<i>Ilustración 86: Cálculos en Excel</i> .....	92
<i>Ilustración 87: Diagrama de procesos</i> .....	97
<i>Ilustración 88</i> .....	101
<i>Ilustración 89</i> .....	101
<i>Ilustración 90</i> .....	102
<i>Ilustración 91</i> .....	102
<i>Ilustración 92</i> .....	102

<i>Ilustración 93</i> .....	102
<i>Ilustración 94</i> .....	103
<i>Ilustración 95</i> .....	103
<i>Ilustración 96</i> .....	104
<i>Ilustración 97: Normas de Bomba Leo</i> .....	106
<i>Ilustración 98: Bomba Pedrollo Cm650 Data Sheet</i> .....	112

## INTRODUCCIÓN

Para poder determinar la dirección que debíamos seguir para nuestro proyecto integrador, fue necesario el recurso de la investigación incluyendo el análisis y desarrollo realizado por nuestro compañero de ingeniería civil Víctor Gallo (ICV), esta es la continuación de su propuesta de proyecto. En teoría el análisis para el desarrollo de la bomba-generador era muy sencilla, sin embargo, los principios y el funcionamiento de estas por separadas no son las mismas. De antemano se reporto que existio problemas con la PAT para generación eléctrica con carga de agua (con el movimiento del rotor dado por la caída del agua), pero si generaba a través de energía mecánica (pudiendo ser por giro manual, mediante un eje, compresor, taladro, etc...). En el desarrollo de la investigación anterior lo que necesitaban para que la bomba pueda funcionar y generar energía fue mediante la teoría de generadores asíncronos, la cual consiste en que la bomba debe superar su velocidad nominal para producir energía, mediante la energía de reacción obtenida de la red eléctrica. Se logró cumplir este principio al interconectar dos bombas [(Bomba N°1) generadora de energía y (Bomba N°2) utilizada para girar el rotor de la (Bomba N°1)], tras superar la velocidad nominal de la bomba, se apagaba el generador de la red, pero no la bomba 2, dándole energía mecánica, la cual podía suministrar electricidad a componentes de interés a partir de dispositivos electrónicos como condensadores o capacitores, logrando el objetivo, pero a un precio muy alto en términos energéticos.

El cliente propuso tres etapas para verificar el desempeño de nuestro prototipo, (i) generar energía mecánicamente a bajas revoluciones no superando de esta forma la velocidad nominal, (ii) generar energía hidráulicamente esto se da por medio de la relación rotor-impeler con la presión del agua y (iii) alimentar accesorios eléctricos para evidenciar la generación de energía, logrando usar dispositivos de bombeo como turbinas PATs (Pump as turbine) debido al costo reducido en comparación a una turbina dedicada a generación hidroeléctrica convencional. Para nuestro análisis, es necesario retomar el problema que buscamos solucionar, el cual es poder generar electricidad de forma económica para comunidades que se encuentran alejadas de las ciudades, este escenario nos pone directamente en la zona oriental del país, en la región amazónica, la cual posee un ecosistema y una ubicación geográfica que le otorga mucha riqueza hídrica, con estaciones lluviosas prácticamente perpetuas y con ríos que poseen extensiones considerables, por lo que nuestro sistema aprovechándose de esta riqueza, pero a la vez, de esta lejanía con respecto al resto de poblados, que dificulta considerablemente el poder proporcionar servicios básicos estables, nos entrega el escenario ideal para usar nuestro sistema de generación y bombeo. Uno de los principales objetivos que tenemos es que este sistema sea económicamente rentable, lo que hace que, sea necesario no recurrir a los elementos de generación convencionales.



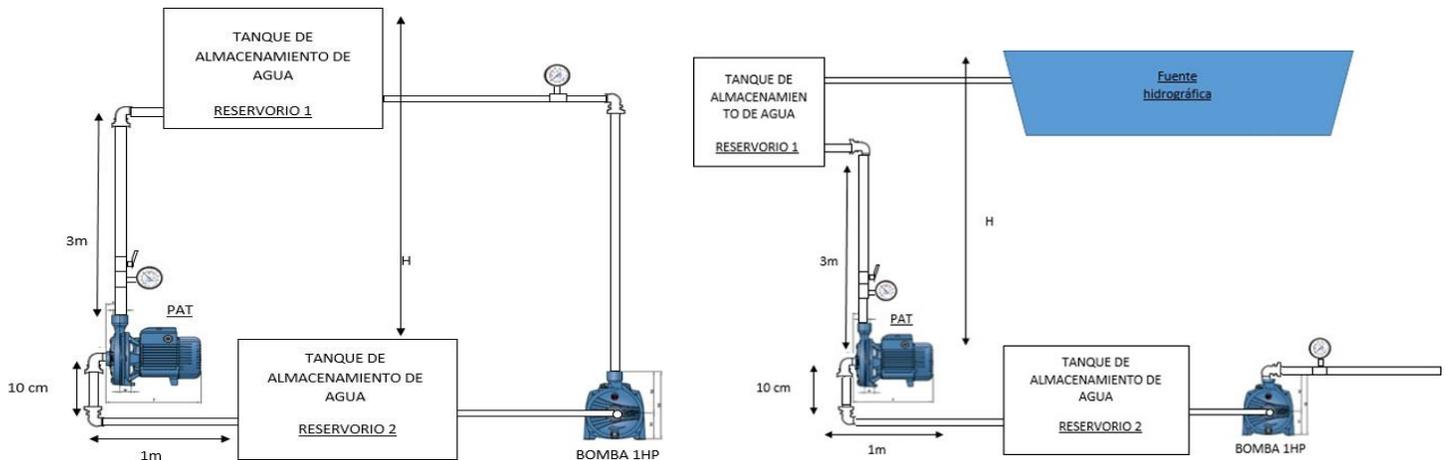
**Ilustración 1: “Mapa hidrográfico de la provincia de Orellana” (IGM, 2020)**

Con esta primera suposición, tendríamos la idea de que se posee acceso a fuentes hídricas prácticamente de forma continua. Partimos de la idea que, nuestro sistema tiene como finalidad primordial, poder generar electricidad con una bomba que puede ser usada como una turbina (PAT). Este criterio es importante debido a la facilidad de encontrar bombas a precios económicos y los repuestos de estas, lo que le da una ventaja precio-beneficio considerablemente mayor que una turbina de generación. Para aprovechar la energía potencial se puede utilizar un reservorio elevado, el cual ayuda a llevar el fluido hacia el ingreso de la voluta, pero en nuestro caso se ingresará caudal directamente en nuestra PAT. Por lo que realizaremos un circuito a modo de prototipo el cual es replicable y adaptable según sea necesario.



**Ilustración 2: Esquema del sistema. (Elaboración propia)**

En este esquema lo que se está exponiendo es un sistema que suple la necesidad de poseer un reservorio elevado al tener una inyección directa de caudal proporcionada por una bomba. En un futuro en aplicaciones de campo, se puede recrear el siguiente sistema que a nivel de pérdidas son equivalentes.



**Ilustración 3: Esquema replicable del sistema. (Elaboración propia)**

Se debe considerar el tipo de bombas que son utilizadas, ya que las características de estas son importantes al momento de hacer modificaciones para crear la PAT y para el caudal necesario que es movido hacia la PAT. Para iniciar con los cálculos, se necesita conocer algunos datos como algunas alturas y demás dimensiones del sistema, para tener continuidad con lo realizado anteriormente, se ocupó las bombas que se poseen en el laboratorio de hidráulica (USFQ), las cuales son de 1HP, y adjuntaremos la ficha técnica de la misma en la sección de anexos. Con estos accesorios se calculó las pérdidas mayores y menores propias de este sistema, cabe destacar que este sistema mostrado en la ilustración 3, corresponde a un circuito cerrado, sin embargo, todos los componentes expuestos en este, son equivalentes al sistema que será utilizado en el campo, ya que tiene los mismos accesorios y dimensiones de las tuberías, las cuales tendrán únicamente una distribución distinta.

### PROBLEMA

En Ecuador existen varias comunidades en aislamiento voluntario, las cuales por su propia condición de aislamiento acompañada de una posición geográfica compleja, no pueden acceder a servicios básicos, especialmente a lo que son sistemas de suministro de agua, al igual que a la red eléctrica nacional, razón por la cual tienen la obligación de poseer sistemas de auto gestión energética, los cuales suelen ser generadores convencionales a combustible, que aparte de ser contaminantes y de emitir mucho ruido, son dependientes de un suministro constante de combustible cuyo suministro se encuentra en poblados alejados de estas zonas, por otro lado está el hecho de que muchas comunidades utilizan paneles solares, pero estos son dependientes de las

condiciones climáticas, y debido a que se encuentran en la selva amazónica, donde se dan precipitaciones de manera constante, hacen que el aprovechamiento de las celdas fotovoltaicas no sea eficiente ni continuo, además que, los precios de generadores al igual que de los paneles son bastante elevados.

## **SOLUCIÓN**

Como se mencionó anteriormente, una de las características de esta zona, es la gran cantidad de recursos hídricos, lo que hace que la generación hidroeléctrica sea atractiva. La utilización de un dispositivo que transforme el movimiento del agua en energía, ayudará a suministrar electricidad a las comunidades que tienen un acceso deficiente del mismo. La idea es proponer la utilización de una turbina PAT (Pump As Turbine) para generar energía con carga hidráulica, la cual gracias a los múltiples recursos hídricos que tienen disponibles las comunidades, hacen que esta alternativa sea óptima, debido su bajo coste, variedad y disponibilidad de bombas al igual que fabricantes y a la eficiencia que, pese a no ser igual a la de un generador convencional, resulta ser de utilidad y no requiere usar una turbina convencional. El funcionamiento de una PAT es similar al de una turbina, puesto a que aprovecha el caudal a través de las cuchillas del rodete interno del sistema. Se busca optimizar la generación eléctrica en una bomba de agua, produciendo un funcionamiento inverso para hacer que la bomba genere energía. Para ello, se deben cambiar ciertas funciones y realizar ciertas modificaciones, que le otorgarán a la bomba esta característica, sin embargo, al volver a colocar los componentes originales, volvería a funcionar en su función de bomba.

### **1. Objetivos**

#### **Objetivo General:**

- Crear un sistema autónomo y auto sustentable de bomba y turbina con dispositivos PATs.

#### **Objetivos Específicos:**

- Comprender el funcionamiento de un dispositivo PAT.
- Realización de una investigación exhaustiva en la que se busca conocer el uso, beneficios y funcionamiento de las PAT (Pump-as-turbine). Y de sus variantes, tomar una alternativa para desarrollarla.
- Hacer modificaciones pequeñas a una bomba para que funcione como turbina PAT.
- Lograr generar electricidad a través de movimiento.
- Investigación y análisis de los beneficios económicos y energéticos que tendríamos si se aplicase el sistema PAT dentro de una comunidad.

### **2. Requerimientos.**

El objetivo principal de nuestro proyecto es el abastecer mediante una PAT energéticamente a comunidades pequeñas, lo cual va a ser de utilidad, beneficio y ayuda. Podemos comprender que los beneficios de usar las PAT, es principalmente la generación de energía a bajo costo, y con la posibilidad de utilizar bombeo de agua que se complementaría con el uso de la bomba y lo más importante es el aprovechamiento de los recursos disponibles en la comunidad.

Tenemos los siguientes requerimientos:

- Crear un sistema a partir de una bomba, capaz de generar electricidad con modificaciones mínimas.
- A través de distintos métodos, comprobar que la generación eléctrica es viable tanto con energía mecánica como hidráulica.
- Las modificaciones del sistema deben adaptarse a la estructura original de la bomba, sin comprometer el funcionamiento original de la misma, en caso de que se desee, se puede usar la bomba de manera original.
- El sistema debe ser económico, por lo que en total debe costarse por debajo de un generador o alternativa convencional, pero si puede ser más costoso que una bomba.
- Debe ser adaptable y replicable en distintos escenarios, no se debe considerar sistemas complementarios como represas, reservorios o tomas de agua de fuente natural en esta etapa de la investigación, se debe considerar que se tiene caudal constante.

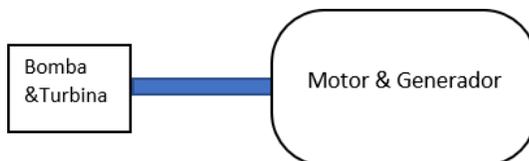
## **DESARROLLO DEL TEMA**

Para el desarrollo de nuestro prototipo, primero se estudio el sistema de Victor Gallo y se analizo las distintas razones por las cuales el prototipo no cumplio con el funcionamiento esperado, por lo que decidimos realizar un análisis a las distintas alternativas de diseño que tuvimos a lo largo del proyecto, con el fin de poder cumplir tanto con el funcionamiento de bombeo, al igual que con la generación que en términos de importancia, es de mayor relevancia frente al modo bomba, tenemos:

## CONCEPTOS DE DISEÑO

Para obtener el diseño final, se realizó un análisis sobre algunas variantes y a través del método de criterios ponderados, se obtuvo el diseño que resultaba más beneficioso en funcionalidad, economía y en la forma de fabricarse, a continuación, se presenta el desglose de dichas alternativas.

### *Bomba y Turbina*



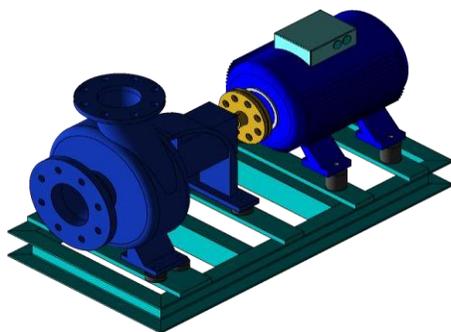
*Ilustración 4: Bomba y Turbina*

#### Descripción:

En este sistema buscamos crear una hibridación entre los dos elementos más importantes del mismo, es decir una bomba y una turbina, donde tenemos que conseguir un generador con capacidad suficiente para a la vez, poder generar electricidad de manera hidroeléctrica, recibiendo un caudal de ingreso y poder utilizar el mismo caudal para rellenar un reservorio o simplemente direccionar esta cantidad de agua, para que sea aprovechable.

#### A considerar.

Sabemos que el comportamiento de ambos dispositivos son distintos y que las gráficas del sistema nos muestran que, no podríamos generar la misma cantidad de energía que consumimos, pero podría llegar a compensarse con algunas modificaciones de los componentes de la bomba y aprovechando la disposición de los elementos en la instalación del sistema, para poder reducir las pérdidas y al menos compensar en parte el performance de la bomba para poder rellenar el reservorio, de ser necesario, si el objetivo no sería recargar el reservorio, podríamos únicamente re direccionar el caudal de la bomba para el uso doméstico.



*Ilustración 5: Esquema de sistema híbrido*

## Subsistemas

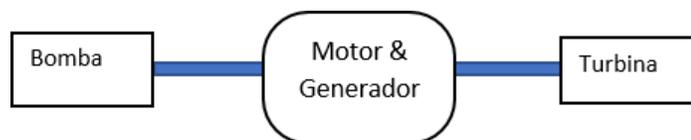
Sistema bomba/turbina: En este sistema consta de una bomba convertida en turbina es decir una PAT, la cual para poder tener este carácter híbrido requiere de algunas modificaciones como cambiar el impeler, el cual debe tener una disposición de sus aspas contraria a la original y ser entre un 20-30% más grandes, pero el aspa de la succión debe mantener su misma forma original.

Sistema motor y generador: Este sistema tiene modificaciones en el eje que se encuentra pasante al estator. La principal modificación es que necesitamos la presencia de imanes en una distribución radial al cilindro principal para lograr un efecto electromagnético.

Sistema de control.: En este caso necesitaremos un controlador del tipo arduino uno con algunos sistemas adicionales que se acoplaran a la interfaz, como dos luces led indicadoras, una alarma, cables y dos sensores de volumen para los reservorios.

Reservorios: Para los reservorios necesitaremos dos que nos ayuden a mantener la cadena de suministro de agua a nuestro sistema completo, al haber recibido modificaciones nuestra PAT, es probable la necesidad de uso de una bomba auxiliar para compensar el llenado del reservorio principal que alimenta a nuestra PAT.

### *Conectados por el eje*



***Ilustración 6: Bomba y Turbina conectados por el eje.***

### Descripción:

En este sistema se busca interconectar con un eje pasante ambos sistemas críticos, es decir nuestra bomba por un extremo y nuestra turbina por el otro, con esto buscamos que, a través de un eje de rotación interconectado, logremos mantener a ambos sistemas funcionando por separado, con esto evitamos la necesidad de mantener a dos sistemas híbridos, evitando problemas de funcionamiento de este.

### A considerar.

Se sabe que un inconveniente se encuentra en el hecho de que al usar un eje pasante, ambos sistemas rotarían al mismo tiempo, lo cual es una desventaja considerando que, al existir la necesidad de modificar el impulsor de la bomba que usaremos como turbina, sabemos que el impulsor es al menos un 20% más grande que el de la bomba, por lo que al estar interconectados, no sería posible que ambos sistemas giren al mismo tiempo por el hecho de que al no ser del mismo tamaño, rotarían a velocidades diferentes, y uno al tener función de generación y

otra al mover caudal, necesitarían funcionar de formas distintas, en caso de haber vibraciones inesperadas, podría haber daños en todo el sistema.



*Ilustración 7: Bomba y Turbina conectados por un eje pasante.*

### Subsistemas

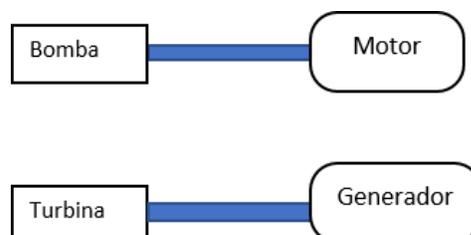
Sistema bomba: En este sistema consta de una bomba que posee la función de rellenar el reservorio superior, o en caso de poseer una distribución que no requiera de rellenar el reservorio 1, se puede utilizar para bombear el agua para uso doméstico.

Sistema PAT: Este sistema tiene modificaciones en el impeler, por lo que gira a un tiempo distinto que la bomba, lo que puede producir problemas de llenado de reservorio, en caso de que el sistema sea indiferente a la necesidad de rellenar un reservorio y se pueda usar de forma doméstica, podría no haber inconvenientes.

Sistema de control.: En este caso necesitaremos un controlador del tipo arduino uno con algunos sistemas adicionales que se acoplarán a la interfaz, como dos luces led indicadoras, una alarma, cables y dos sensores de volumen para los reservorios y un monitor de la cantidad de generación eléctrica.

Reservorios: Para los reservorios necesitaremos dos que nos ayuden a mantener la cadena de suministro de agua a nuestro sistema completo, al existir la bomba de manera interconectada, pero sin modificaciones, no habría problemas de suministro, salvo la cantidad de caudal que se puede mover.

### *Sistemas Independientes.*



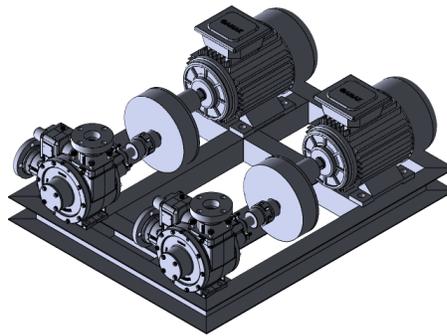
*Ilustración 8: Bomba y Turbina funcionando independientemente.*

Descripción:

En esta opción el objetivo es interconectar ambos sistemas funcionando por separado, lo que nos da la ventaja de que, al ser sistemas independientes, no tendremos problemas de adaptar ambos componentes y facilitando el mantenimiento y la instalación completa del equipo.

A considerar.

Podemos centrarnos en el funcionamiento de cada uno de los sistemas, facilitando la operatividad completa, haciendo ajustes respectivos con los reservorios garantizando el suministro del caudal necesario para la funcionalidad de ambos sistemas.



***Ilustración 9: Bomba y Turbina funcionando independientemente.***

Subsistemas

Sistema bomba: En este sistema consta de una bomba que posee la función de rellenar el reservorio superior, o en caso de poseer una distribución que no requiera de rellenar el reservorio 1, se puede utilizar para bombear el agua para uso doméstico.

Sistema PAT: Este sistema tiene modificaciones en el impeler para generación eléctrica, al funcionar interconectados, pero no dependientes, se puede generar y bombear sin tener problemas de coordinación de velocidades de rotación.

Sistema de control.: En este caso necesitaremos un controlador del tipo arduino uno con algunos sistemas adicionales que se acoplarán a la interfaz, como dos luces led indicadoras, una alarma, cables y dos sensores de volumen para los reservorios y un monitor de la cantidad de generación eléctrica.

Reservorios: Para los reservorios necesitaremos dos que nos ayuden a mantener la cadena de suministro de agua a nuestro sistema completo, al existir la bomba independiente, pero sin modificaciones, no habría problemas de suministro, salvo la cantidad de caudal que se puede mover.

### *Usando embragues*



### *Ilustración 10: Bomba y Turbina funcionando independientemente con embragues.*

#### Descripción:

En esta opción podemos dar versatilidad al sistema, alimentando a la bomba para llenar los reservorios y operar como generador cuando sea necesario.

#### A considerar.

Sabemos que, en sí, esta es una modificación de nuestro sistema 2, el problema aquí es el encarecimiento general del sistema, ya que es necesario agregar un controlador y añadir el sistema de embrague, sin embargo, se resuelve el problema de la velocidad angular, ya que ambos sistemas funcionarían prácticamente de forma independiente, pero requiere de mayor mantenimiento.



### *Ilustración 11: Bomba y Turbina funcionando independientemente con embragues.*

#### Subsistemas

Sistema bomba: En este sistema consta de una bomba que posee la función de rellenar el reservorio superior, o en caso de poseer una distribución que no requiera de rellenar el reservorio 1, se puede utilizar para bombear el agua para uso doméstico.

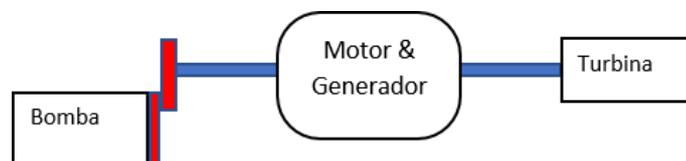
Sistema PAT: Este sistema tiene modificaciones en el impeler para generación eléctrica, al funcionar interconectados, pero no dependientes, se puede generar y bombear sin tener problemas de coordinación de velocidades de rotación.

Sistema de control.: En este caso necesitaremos un controlador del tipo arduino uno con algunos sistemas adicionales que se acoplaran a la interfaz, como dos luces led indicadoras, una alarma, cables y dos sensores de volumen para los reservorios y un monitor de la cantidad de generación eléctrica, además en contraste con los otros sistemas, el control en este caso nos ayudaría a conectar o desconectar a través de losembragues la bomba y la turbina según se desee.

Sistema de embragues: En este subsistema hay que considerar que debe implementarse en el eje pasante que comunica a voluntad.

Reservorios: Para los reservorios necesitaremos dos que nos ayuden a mantener la cadena de suministro de agua a nuestro sistema completo, al existir la bomba independiente, pero sin modificaciones, no habría problemas de suministro, salvo la cantidad de caudal que se puede mover.

### Usando engranes



#### *Ilustración 12: Bomba y Turbina funcionando independientemente con engranes.*

##### Descripción:

En esta opción podemos tratar de compensar la velocidad ralentizando la bomba con la ayuda de engranes, así al menos ambos componentes tendrán igual velocidad de operación y funcionarían a la vez.

##### A considerar.

Sabemos que al usar engranes de tamaños determinados podemos igualar la velocidad de operación de ambos sistemas, el problema es que no llegaríamos a compensar el consumo energético de uno y afectaríamos la eficiencia del otro, sin embargo, es una solución más económica que la de los embragues y a la vez nos ayuda a mantener ambos sistemas operando.



***Ilustración 13: Bomba y Turbina funcionando independientemente con engranes.***

### Subsistemas

Sistema bomba: En este sistema consta de una bomba que posee la función de rellenar el reservorio superior, o en caso de poseer una distribución que no requiera de rellenar el reservorio 1, se puede utilizar para bombear el agua para uso doméstico.

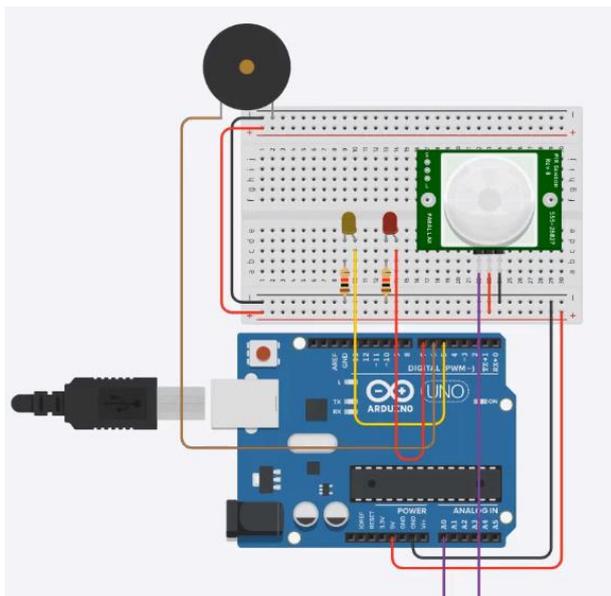
Sistema PAT: Este sistema tiene modificaciones en el impeler para generación eléctrica, al funcionar interconectados, pero no dependientes, se puede generar y bombear sin tener problemas de coordinación de velocidades de rotación.

Sistema de control.: En este caso necesitaremos un controlador del tipo arduino uno con algunos sistemas adicionales que se acoplarán a la interfaz, como dos luces led indicadoras, una alarma, cables y dos sensores de volumen para los reservorios y un monitor de la cantidad de generación eléctrica.

Sistema de engranes: En este subsistema hay que considerar que debe implementarse en el eje pasante, que conecta la bomba con el objetivo de ralentizarla y conseguir una velocidad de operación igual en ambos sistemas bomba y turbina.

Reservorios: Para los reservorios necesitaremos dos que nos ayuden a mantener la cadena de suministro de agua a nuestro sistema completo, al existir la bomba independiente, pero sin modificaciones, no habría problemas de suministro, salvo la cantidad de caudal que se puede mover.

Para el control, se puede usar la interfaz programable del sistema arduino que nos controle nuestros reservorios usando sensores de volumen, el cual enviara señales a la bomba de agua para mantener el llenado del caudal del mismo.



*Ilustración 14: Interfaz de arduino. (TinkerCAD)*

### ANÁLISIS DE CRITERIOS PONDERADOS.

*Criterios:*

- Precio.
- Facilidad de construcción.
- Mayor generación eléctrica.
- Mantenimiento.
- Partimos de la siguiente consideración de importancia:

Facilidad de construcción > precio > Generación eléctrica = Mantenimiento

Igual importancia	0.5
Menor importancia	0
Mayor importancia	1

*Tabla 1: Criterios según importancia.*

Criterio	Precio	construccion	Generacion Electrica	Mantenimiento	$\Sigma+1$	Ponderados
Precio		0	1	1	3	0,3
Construccion	1		1	1	4	0,4
Generacion electrica	0	0		0,5	1,5	0,15
Mantenimiento	0	0	0,5		1,5	0,15
				<b>TOTAL</b>	<b>10</b>	<b>1</b>

**Tabla 2: Evaluación de cada criterio.**

Para el análisis del criterio precio, consideraremos que, entre más complejo sea la realización del sistema, será más costoso, nuestro valor mayor se asignara al más económico, por lo que se llegó a las siguientes consideraciones:

	Precio aproximado	Total
Sistema 1	Control 80\$ Bomba centrífuga 250\$ Impeler modificado 30\$	360\$
Sistema 2	Control 50\$ Bomba centrífuga 200\$ PAT 100\$	350\$
Sistema 3	Control 80\$ Bomba centrífuga 250\$ Impeler modificado 30\$	360\$
Sistema 4	Control 80\$ Bomba centrífuga 250\$ Impeler modificado 30\$ 2 embragues 90\$	450\$
Sistema 5	Control 80\$ Bomba centrífuga 250\$ Impeler modificado 30\$	360\$

**Tabla 3: Evaluación de precios**

**Solución 2 > Solución 5 = Solución 3 = Solución 1 > Solución 4**

Precio	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	$\Sigma+1$	Ponderados
Solución 1		0	0,5	1	0,5	3	0,18181818
Solución 2	1		1	1	1	5	0,3030303
Solución 3	0,5	0		1	0,5	3	0,18181818
Solución 4	0	0	0		0	1	0,06060606
Solución 5	1	1	0,5	1		4,5	0,27272727
					<b>TOTAL</b>	16,5	1

**Tabla 4: Evaluación del criterio precio**

En este caso, el valor ponderado mayor, representa a la opción más económica, para el criterio de construcción, de igual manera, consideraremos que el sistema más complejo será el que tendrá el mayor grado de dificultad, por lo que nuestro objetivo es que el valor mayor haga referencia al más fácil de construir, con esa consideración ordenaremos de menor a mayor dificultad.

**Solución 1 = Solución 3 > Solución 2 = Solución 5 > Solución 4**

Construcción	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	$\Sigma+1$	Ponderados
Solución 1		1	0,5	1	1	4,5	0,27272727
Solución 2	0		0	1	0,5	2,5	0,15151515
Solución 3	0,5	1		1	1	4,5	0,27272727
Solución 4	0	0	0		0	1	0,06060606
Solución 5	1	0,5	0	1		3,5	0,21212121
					<b>TOTAL</b>	16	0,96969697

**Tabla 5: Evaluación del criterio Construcción**

Para continuar con el análisis, donde el valor mayor representa el más económico, aquí igual, el valor mayor representa el más sencillo de construir. Sin embargo, nosotros realizaremos también el esquema 1, ya que se busca usar una PAT en estado puro y otra con geometría optimizada.

Obviamente aun no poseemos datos, por lo que nuestro análisis de valor será más teórico, pero partiendo de esta idea, usaremos sistemas que consideramos que generan mayor energía, tenemos:

**Solución 3 > Solución 1 > Solución 2 = Solución 5 = Solución 4**

Generacion	Solucion 1	Solucion 2	Solucion 3	Solucion 4	Solucion 5	$\Sigma+1$	Ponderados
Solucion 1		1	0	0	0	2	0,12121212
Solucion 2	0		0	0,5	0,5	2	0,12121212
Solucion 3	1	1		1	1	5	0,3030303
Solucion 4	0	0,5	0		0,5	2	0,12121212
Solucion 5	0	0,5	0	0,5		2	0,12121212
<b>TOTAL</b>						13	0,78787879

**Tabla 6: Evaluación del criterio Generación.**

Para el criterio mantenimiento, partiremos de un análisis similar al de construcción, donde el más complejo será el más difícil, aplicando el criterio inverso, daremos prioridad al que tenga un mantenimiento más sencillo, tenemos:

**Solución 1 = Solución 3 > Solución 2 = Solución 5 > Solución 4**

Mantenimiento	Solucion 1	Solucion 2	Solucion 3	Solucion 4	Solucion 5	$\Sigma+1$	Ponderados
Solucion 1		1	0,5	1	1	4,5	0,27272727
Solucion 2	0		0	1	0,5	2,5	0,15151515
Solucion 3	0,5	1		1	1	4,5	0,27272727
Solucion 4	0	0	0		0	1	0,06060606
Solucion 5	1	0,5	0	1		3,5	0,21212121
<b>TOTAL</b>						16	0,96969697

**Tabla 7: Evaluación del criterio Mantenimiento.**

Procedemos a realizar la tabla de conclusiones, partiendo del análisis estudiado en el libro de Riba, la opción más óptima según los criterios analizados será aquella que tenga los valores más altos en la suma de sus criterios ponderados que se multiplican por el valor total

Conclusion	Precio	Construccion	Generacion	Mantenimiento	$\Sigma$	Prioridad
Solucion 1	0,05454545	0,109090909	0,018181818	0,040909091	0,222727273	2
Solucion 2	0,09090909	0,060606061	0,018181818	0,022727273	0,192424242	4
Solucion 3	0,05454545	0,109090909	0,045454545	0,040909091	0,25	1
Solucion 4	0,01818182	0,024242424	0,018181818	0,009090909	0,06969697	5
Solucion 5	0,08181818	0,084848485	0,018181818	0,031818182	0,216666667	3

de cada criterio.

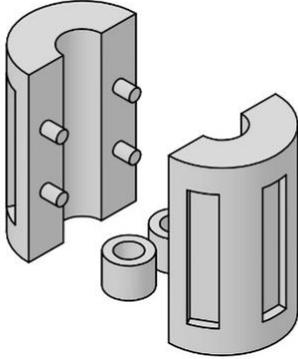
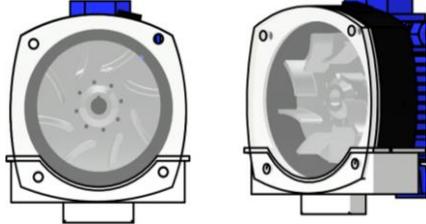
**Tabla 8: Evaluación de criterios.**

Por lo tanto, concluimos que el sistema seleccionado será la solución 3, que consiste en la Bomba y Turbina funcionando independientemente, por ser el sistema que mayores beneficios de los otros sistemas estudiados en términos generales, cumpliendo con los requerimientos consumiendo la menor cantidad de recursos.

De este análisis, podemos concluir que la mejor opción será recrear un generador a partir de una bomba, priorizando este modo, del cual para volver a funcionar como bomba será

necesario únicamente reemplazar las partes modificadas con las partes originales. Queríamos hacer énfasis en que dentro de lo que fue el estudio anterior, del cual nosotros partimos tomando una variante.

Procederemos a describir los 3 subsistemas más importantes de este concepto de diseño, tenemos:

Nº	PAT	Imágenes	Función y componentes críticos	Peso	Costo [USD]
1	Rotor con imanes permanentes		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reemplaza al núcleo de jaula de ardilla por uno de imán permanente, compuesto por el núcleo con 6 muescas y 6 imanes de neodimio.</li> <li>• Alta importancia, produce el campo magnético necesario para la generación eléctrica.</li> </ul>	400 g	10\$
2	Impulsores de reacción		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Impulsor de reacción con curvatura de rodete invertida.</li> <li>• Impulsor de reacción con disposición de cuchillas similar a una turbina Francis.</li> <li>• Importancia media, reciben el caudal de tal forma que producen movimiento en el eje que se comunica con el estator.</li> </ul>	250 g (c/u)	13\$ (c/u)
3	Voluta de reacción		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voluta que busca canalizar el caudal hacia la zona de reacción con salida en la parte inferior.</li> <li>• Importancia baja, canaliza el ingreso y salida del caudal.</li> </ul>	600 g	27\$

**Tabla 9: Componentes críticos por orden de importancia**

Nuestra investigación parte de un concepto distinto al realizado por Víctor Gallo, quien abordó el problema desde la teoría de los generadores asíncronos, la cual explica que todo motor puede ser utilizado como un generador bajo determinadas circunstancias.



*Ilustración 15: Dispositivos para generadores asíncronos.*

Esta iteración resulta demasiado demandante en términos eléctricos razón por la cual decidimos simplemente tomar una variante distinta que resulta más práctica en términos eléctricos, por lo que abordamos el tema con la implementación de imanes permanentes, interviniendo directamente en el rotor de la bomba, con el uso de imanes de neodimio. Para esto se reemplazó el núcleo de jaula de ardilla por uno diseñado a la medida con un núcleo de PLA impreso en 3D, el cual posee 6 muescas para crear 6 polos magnéticos los cuales iban a interactuar directamente en el estator de la bomba.



*Ilustración 16: Rotor con imanes permanentes*

Esta decisión se tomó para crear el efecto magnético necesario en el interior del motor, partiendo de la ley de inducción de Faraday Lenz, la cual es dependiente del número de espiras de las bobinas, y de la velocidad de rotación del campo magnético.

$$\varepsilon = -N \frac{\phi_f - \phi_i}{t}$$

*Ilustración 17: Ley de inducción de Faraday Lenz*

## ESTÁNDARES DE INTERÉS

Dentro de la teoría de bombas como turbinas, no se posee en si normas para estos dispositivos modificados, pero si hay normas que son de ayuda, como lo son, nomás para bombas al igual que para turbinas, partiendo de este hecho poseemos la siguiente información:

- **Norma INEN 1374:** Esta norma nos ayuda a poder utilizar e identificar las dimensiones comerciales de tuberías y accesorios de PVC que en nuestra aplicación son de crucial interés, ya que el circuito se compone por tuberías las cuales representan tanto perdidas mayores como menores, por lo que se utiliza esta norma para su selección e identificación de las mismas.
- **Norma API 610/ISO 13709:** Esta norma está más orientada en bombas con finalidades industriales, pero a su vez, posee recomendaciones, características, planos y procesos de mantenimiento al igual que de instalación de bombas centrifugas que resultan de utilidad dentro de nuestra aplicación, los cuales nos sirvieron de pauta para la creación de la voluta por la posición de la zona de ingreso del caudal.
- **Norma ASME B73.1:** Norma que describe a bombas centrifugas, de diseño horizontal al igual que los problemas relacionados a cavitación, reflujo y mantenimiento de las mismas, que nos dieron pautas para el desarrollo de la sección mantenimiento del sistema (Anexo I).
- **Norma NTE INEN-IEC 61366-6:** Norma que describe a las turbinas hidráulicas de interés, planos, características de las mismas, especificaciones técnicas y recomendaciones de uso.
- **Norma IEC 60609-1:** Norma que nos ayuda a prevenir problemas relacionados con cavitación, golpe de ariete y en si se habla acerca del almacenamiento correcto de bombas y turbinas hidráulicas.

## ORGANIZACIÓN DE ACTIVIDADES

Dentro de la organización, se tiene una estructuración que busca cumplir objetivos dentro de los límites de entregas y de defensa del proyecto, donde se prioriza la construcción del prototipo, para poder obtener datos de operación y la realización de pruebas de campo antes de la defensa final y entrega completa del proyecto.

Proyecto de Bomba utilizada como turbina para generacion electrica.													
No	ACTIVIDADES	20-26 ago	29ago -2sep	3 - 10 sep	12-20 sep	26-29 sep	1-10 oct	16 Oct - 7 Nov	7-9 Nov	9-14 Nov	20-24 Nov	25-29 Nov	12-16 Dic
1	Conformacion del grupo												
2	Propuesta de tema												
3	Analisis de papers y datos tecnicos												
4	Importancia del proyecto												
5	Revision de fuentes literarias												
6	Concepto de diseño												
7	Realizacion de calculos												
8	Calculos 2												
9	Calculos 3												
10	Investigacion sobre manufactura												
11	Verificacion de calculos												
12	Analisis de riesgos												
13	Reporte de progreso												
14	Construccion y simulaciones												
15	Planos												
16	Planos de construccion												
17	Plan de manufactura												
18	Prototipo final												
19	mantenimiento y operación												
20	Feria de ingeniería												
21	Examen de etica												
22	Presentacion final												
23	Defensa del proyecto												

**Tabla 10: Cronograma general**

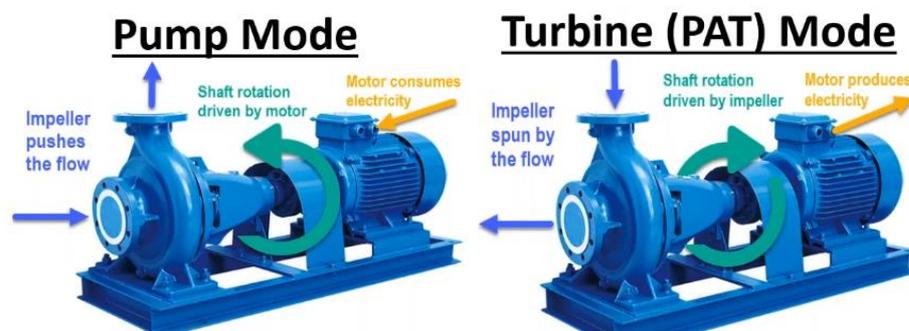
Es necesario mantener una modificación a las actividades del mes de noviembre para cumplir con los objetivos de manera organizada y consistente, por lo que se realiza una modificación, expandiendo la cantidad de actividades previstas en un principio, se obtuvo:

Mes de Noviembre.										
No	ACTIVIDADES	7	10	12	15	21	25	26	28	30
1	Construccion y simulaciones									
2	Planos									
3	Planos de construccion									
4	Plan de manufactura									
5	Prototipo final									

**Tabla 11: actividades del mes de noviembre**

## ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y CRITERIO INGENIERIL

Una vez que ya escogimos nuestro sistema el cual consiste en la realización de un circuito con dos bombas, una cuya única función sea bombear agua y otra con una función que se ve limitada a la generación eléctrica. Debemos considerar algunos aspectos, para esto debemos realizar algunas modificaciones, una de ellas es cambiar el impeler o impulsor original de la bomba por uno cuya geometría viene de forma invertida, para poder realizar la función inversa, es decir ajustar nuestra bomba para que esta, pueda recibir caudal y convertir esta energía, en electricidad. Pero a la vez es necesario modificar el tamaño de la misma, ya que no sería conveniente mantener las dimensiones originales, tenemos:

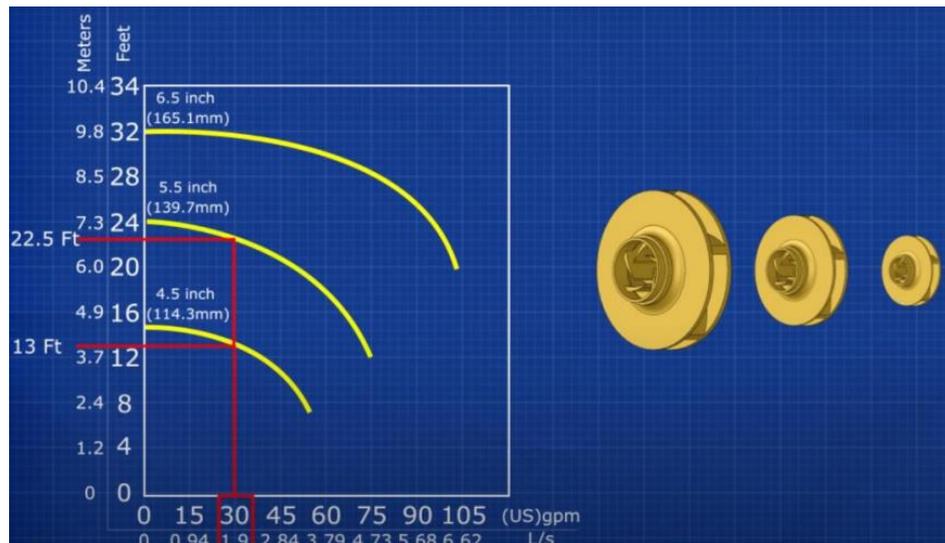


*Ilustración 18: Bomba y PAT (Applied Flow Technology, 2022)*

Para la modificación del impeler de nuestra bomba, utilizaremos la siguiente ecuación para el cálculo del diámetro del impeler:

$$\text{Diámetro nuevo} = \text{Diámetro viejo} * \frac{\text{Taza de flujo nuevo}}{\text{taza de flujo viejo}}$$

Este dato es muy importante para lograr obtener los valores de generación deseados, donde la eficiencia se verá directamente afectada por la relación entre los tamaños de impeler considerando que usaremos el motor en su forma original.



***Ilustración 19: rendimiento de distintos impeler. (Mentalidad de ingeniería, 2021)***

En la ilustración 19, podemos observar tres graficas de la cantidad de flujo que se puede aprovechar dependiendo del tamaño del impeler. Es necesario mantener la concordancia con los tamaños y no exagerar con un impeler extremadamente grande ya que el movimiento no generaría la electricidad suficiente para compensar en parte su uso, ni extremadamente pequeño ya que aumentaría las pérdidas al no ser eficiente en la tarea de mover caudales.

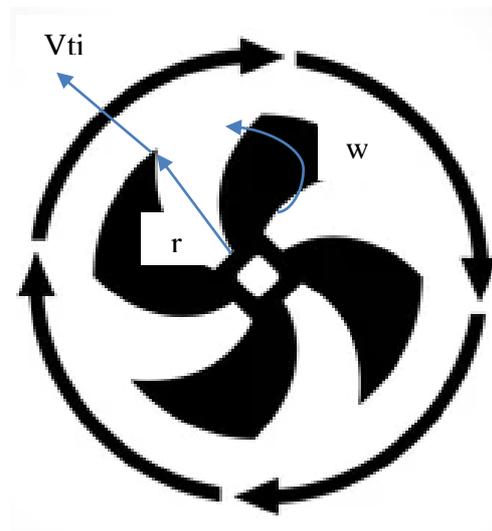
Una de las ventajas al trabajar con PATs, es el hecho de que tenemos un rango de libertad de crear distintos tipos de circuitos que nos ayudan a obtener resultados mejores que otras disposiciones, se puede llegar a tener un rendimiento distinto incluso por la disposición del reservorio, ya que es necesario poseer estos puntos de almacenamiento y no tener un contacto directo a la fuente de agua natural, por problemas que se pueden presentar con suciedad y cambios bruscos del suministro, esto nos ayuda a tener un control de la cantidad de agua que ingresa a la PAT y aplicar accesorios que puedan mejorar la generación eléctrica. (Barbarelli, 2017)

Sabemos que hay algunas funciones y datos a considerar, donde principalmente resalta la generación eléctrica, eficiencia, la altura de la cabeza de bomba, detalles como las pérdidas por accesorios y dimensiones de las tuberías, para mantener un rendimiento óptimo, buscamos mejorar la geometría de un impeler, ya que queremos aprovechar la geometría para producir un movimiento óptimo y en si mantener una generación constante, dentro de nuestras opciones tenemos:



***Ilustración 20: Opciones de impeler. (GrabCAD)***

Para garantizar un rendimiento correcto, haremos simulaciones que las realizaremos en el programa Autodesk CFD. Debido a la programación propia de la interfaz del programa, debemos hacer algunas consideraciones, ya que, al realizar una simulación en estado puro, un fluido pasa a través de una geometría, pero no considera que la geometría está girando, por lo que tenemos que recalculamos algunas variables partiendo del siguiente esquema:



***Ilustración 21: Tip calculado.***

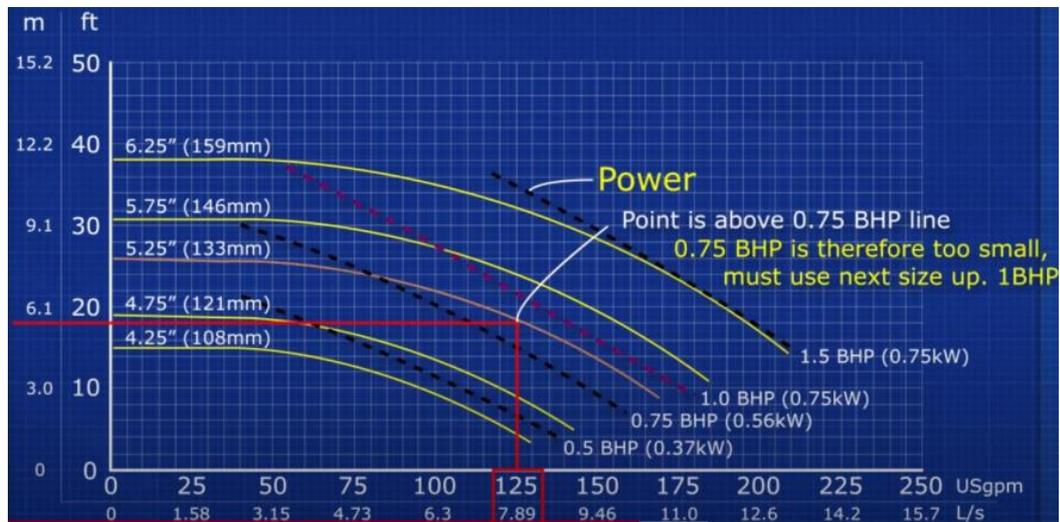
Con esta aclaración, sabiendo a que debemos obtener el Tip speed ratio, con la siguiente ecuación:

$$TSR = \frac{V_e}{V_f}$$

Donde  $V_f$  es la velocidad del fluido, que con estos datos obtenemos la velocidad angular  $\omega$ , este dato es el necesario para poder realizar correctamente la simulación en CFD, el cual nosotros podemos medir en las pruebas del sistema, obteniendo correctamente el comportamiento del fluido a través de la turbina, y así poder contemplar cual será el diseño que mejor rendimiento tiene.

La energía es una de las especificaciones técnicas más importantes en este proyecto, es un cálculo primordial que debemos hacer para comprender la naturaleza propia de nuestro

generador, donde comprendemos que la cantidad de energía que vamos a utilizar, se puede apreciar con la siguiente grafica un comportamiento según la cantidad de fluido que se mueve, respecto a la energía necesaria para que funcione.

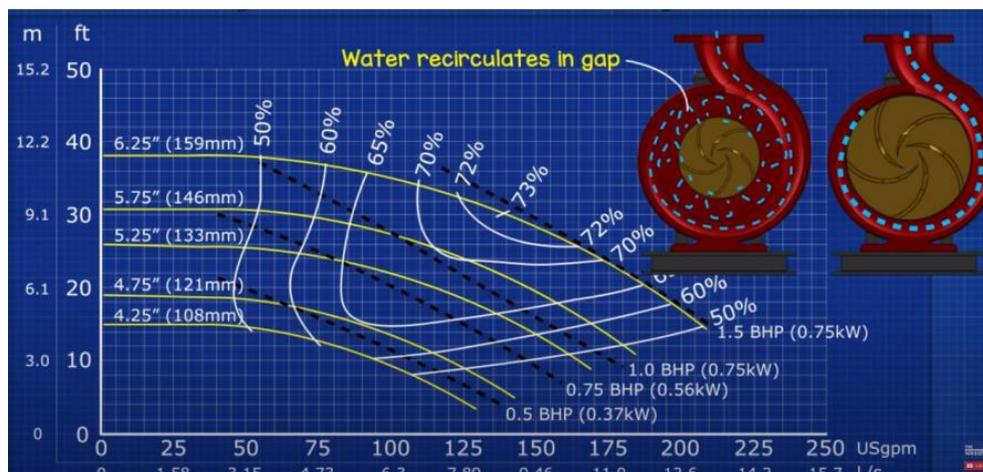


**Ilustración 22: curva de energía. (Mentalidad de ingeniería, 2021)**

Por lo que podemos usar la siguiente ecuación para determinar la cantidad de energía que consumimos según la cantidad de revoluciones que tenemos:

$$Power = RPM\ nuevas^3 * \frac{Power\ old}{RPM\ old^3}$$

La importancia de esta ecuación se debe a que sabemos que transformamos energía mecánica rotacional que tomamos del fluido, a energía eléctrica, y aunque en un caso hipotético donde nuestra PAT fuera 100% eficiente, la energía cinética, sería equivalente a la energía eléctrica generada pero siempre existe perdidas y nunca se obtiene una conversión 100% eficiente.



**Ilustración 23: curva de eficiencia. (Mentalidad de ingeniería, 2021)**

Como se muestra en la ilustración 23, el tamaño del impeler debe ser óptimo porque si no podemos tener pérdidas por la recirculación interna de agua en la carcasa de la bomba. Es necesario calcular la eficiencia tanto de una bomba como de una turbina, primero por el hecho de que poseemos ambos sistemas y ya que, al comprender la naturaleza de uno, nos ayudara a comprender las diferencias con cálculos teóricos respecto a los datos reales.

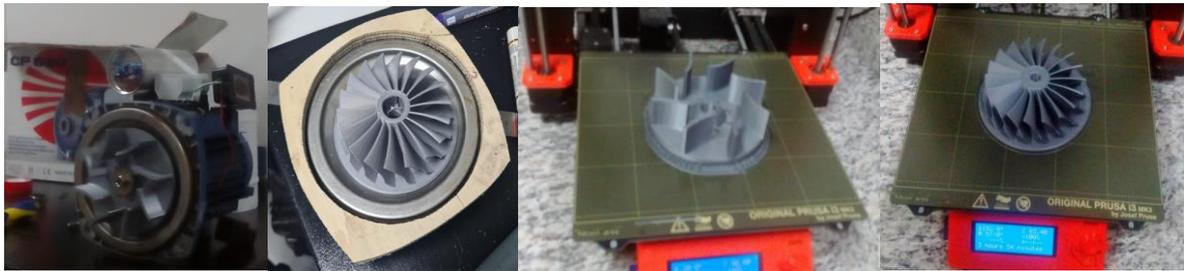
## **MATERIALES Y COMPONENTES**

Partiendo de la selección del diseño más conveniente, sabemos que usaremos un generador que se optimizará para ser usado como una turbina, el cual, si el usuario desea usar en su función original, deberá retirar la voluta modificada, el rotor modificado, el impulsor de reacción y colocar los dispositivos originales, con esto se tendrá la función original. Los subsistemas de interés por lo tanto son: Impulsor de reacción, voluta de reacción y rotor intervenido. Uno de los componentes más importantes para la generación eléctrica, por medio de generadores con magnetismo permanente, son los imanes, lo cuales van a proporcionar el campo magnético que va a alternar en los embobinados de la bomba, y esto generará un voltaje y corriente en las bobinas, el cual se basa en la ley de Faraday Lenz, en nuestro sistema se usaron barras de imanes de neodimio n35 para los polos del rotor, con dimensiones de 50x10x3 mm y con una densidad de campo magnético individual de 6000 gauss, se usaron pares de imanes en cada polo, dando como resultado 12000 gauss por polo, además que el rotor fue impreso con filamento 3D para tener una geometría simétrica y poder colocar cada polo magnético dentro de las mismas, en la Tabla 66, se puede observar el diagrama de proceso de fabricación del rotor.

Junto a estos componentes se puede relacionar el puente de diodos que se usó para transformar la corriente alterna de salida de la PAT, en DC y poder cargar nuestra batería de 12 V y 5A, la cual se conectó a un regulador de voltaje para poder conectar cualquier tipo de dispositivo eléctrico de 0 a 12V DC, y se usa un potenciómetro de precisión para regularlo. Para la creación de la voluta, se creó a partir de las dimensiones de la zona de reacción donde se asienta el impulsor original, el cual colocamos en la zona de unión original, donde se buscó mejorar el ingreso de agua a partir de una boquilla de manguera que será el acceso del caudal, y la salida se colocó en la zona baja de la misma evitando problemas con estrangulamientos y represamiento de agua interno que perjudican al rendimiento del rodete dentro de la voluta.

Para la lectura de datos y control del sistema, se utilizó dos manómetros colocados en el ingreso de agua a la PAT y a la salida de la bomba emisora, para analizar la naturaleza de la presión en el sistema, un rotámetro que permite medir el caudal y dos válvulas de globo en la salida de la bomba emisora y otra en el ingreso a la PAT para poder regular o cerrar el flujo del caudal cuando el usuario así lo requiera.

Otro de los sistemas más importantes a considerar al crear estos sistemas, es los impulsores de reacción los cuales deben tener una geometría que favorezca a la obtención de energía a través del fluido, Usaremos los siguientes impulsores para realizar las pruebas del sistema:

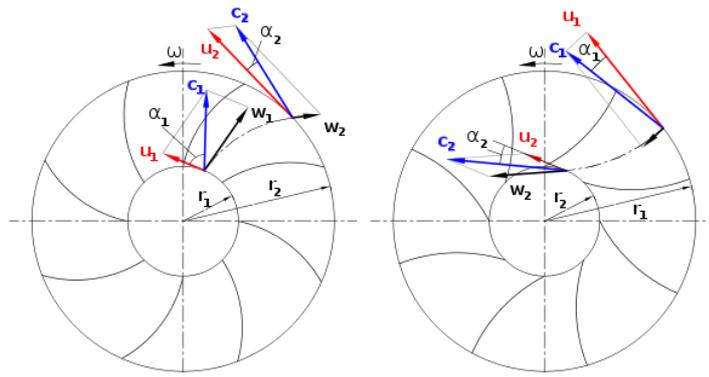


***Ilustración 24: Impulsores realizados (Elaboración Propia)***

Estas variaciones se prestan a investigación puesto a que no se tiene suficientes datos para crear estos dispositivos por lo que se da bastante libertad al diseñador para usar un criterio frente a otro según su criterio.

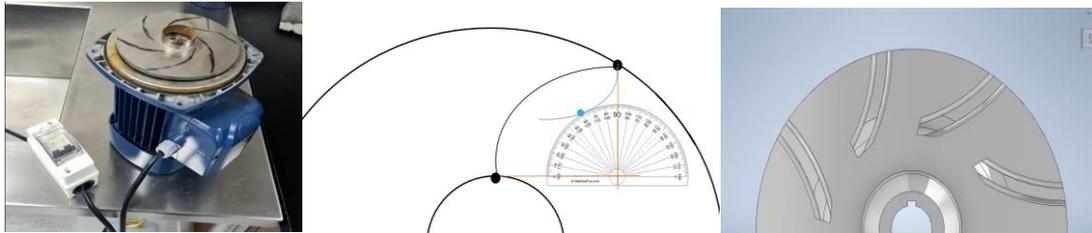
“Varias PATS en paralelo pueden llegar a tener un rendimiento impresionante, pero existen problemas por falta de datos y que no se especifica las múltiples modificaciones que se tiene, y se parte más de datos experimentales.” (Spedaletti, 2021). Se puede apreciar las hojas de proceso de nuestros impulsores en las tablas 64 y 65 en las secciones siguientes.

El primer impulsor obtenido se crea gracias a las recomendaciones proporcionadas por el libro de Turbomachinery Dynamics de Rangwala, el cual usa al triángulo de velocidades de la ecuación de Euler como referencia:



**Ilustración 25: Triangulo de velocidades.**

Se utilizó la sugerencia de aprovechar la disposición de un impulsor de referencia, el cual nos aconseja invertir la curva ya que se nos proporciona la curvatura del impulsor original.



**Ilustración 26: Rodete de reacción 1**

La recomendación que nos da el texto es que, al tener un rodete de referencia, se puede invertir la disposición de las cuchillas del impulsor para así tener un dispositivo de reacción, pero que, a su vez, se puede trazar una línea perpendicular a la salida, otra tangencial a la entrada y en el punto donde estas se interceptan, se puede usar como referencia para tomar un ángulo de  $120^\circ$ , con la finalidad de crear una cuchilla de reacción rápida.

Se tiene también las recomendaciones desde el punto de vista de la turbo maquinaria, es importante considerar que, cuando hablamos de los impulsores, nosotros tenemos una gran variedad de opciones con distintas geometrías y ángulos de ataque que pueden ser de interés, lo que nos da varias alternativas con características propias, por ejemplo, el dato de la caída de agua es muy importante en caso de utilizar una turbina Pelton, ya que la eficiencia de esta geometría aumenta, según mayor sea la caída de agua.



***Ilustración 27: Turbina Pelton (Universitat Politècnica de Valencia, Modesto Pérez)***

Cabe destacar que para realizar de manera correcta el análisis de las turbinas, debemos tener en cuenta para que comportamientos están pensados originalmente cada una de las turbinas. Tenemos algunas opciones para generación hidroeléctrica, entre ellas, para poder ocupar un rango de generación aceptable, debemos considerar lo siguiente:

Type	Capacity (kW)
Small hydropower station	<5000
Mini hydropower station	<500
Micro hydropower station	<50
Pico hydropower station	<5

***Ilustración 28: Tipos de plantas hidroeléctricas según su generación.***

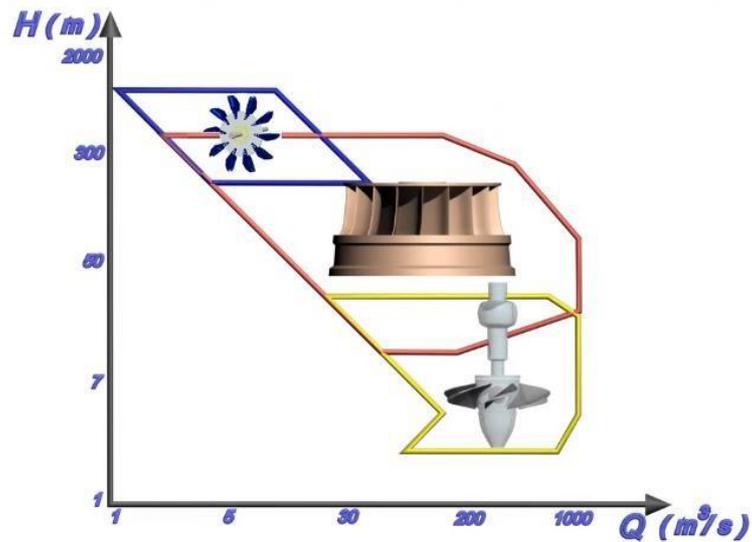
***Fuente: PAT. Carravetta, Derakchan, Ramos. (2011)***

Nosotros deseamos recrear un sistema portable que sea capaz de generar una cantidad de energía entre una micro y pico generadoras según la Ilustración 28, por lo que no poseemos una gran caída, pero si podemos recrear un caudal relativamente fuerte, tenemos:

Turbina Pelton	 <p>HIGH HEAD (300 - 4000 m) LOW FLOW RATE</p>
Turbina Kaplan	 <p>LOW HEAD ( 2 - 25 m) HIGH FLOW ( 70 - 800 m3/s)</p>
Turbina Francis	 <p><math>F_{\text{REACTION}}</math> <math>F_{\text{IMPULSE}}</math></p>

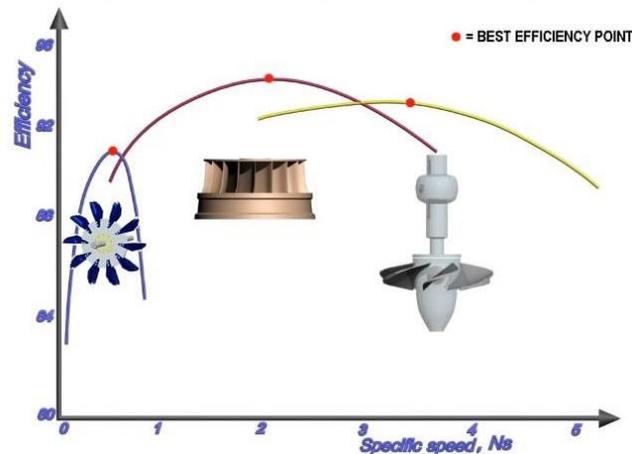
*Tabla 12: Turbinas (Lesics, 2013)*

Un dato determinante es la altura disponible que nos ayudara a conducir un caudal desde el reservorio elevado hasta nuestra PAT, ya que la forma como estas turbinas se desempeñan, hacen que unas sean más óptimas para su uso que para otras.



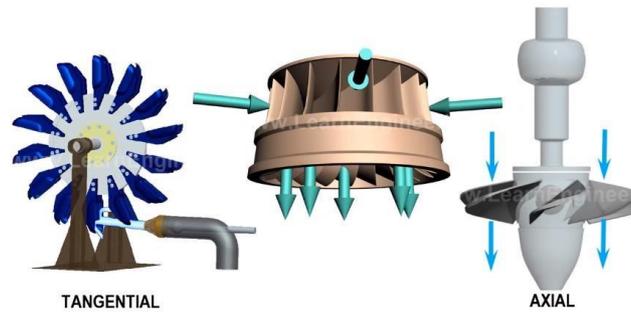
**Ilustración 29: Altura vs caudal. (Lesics, 2013)**

Este comportamiento marca directamente qué tan viable es cada tipo de turbina según las condiciones de la zona de aplicación, obviamente nuestro circuito cerrado es aplicable bajo varios escenarios, pero témenos una altura limitada. Para que sea replicable, pero a la vez puede sufrir modificaciones según las necesidades del cliente, témenos:



**Ilustración 30: Eficiencia vs velocidad de rotación. (Lesics, 2013)**

Es importante tener una zona de ingreso de caudal, ya que sus geometrías están hechas bajo determinadas condiciones de operación:



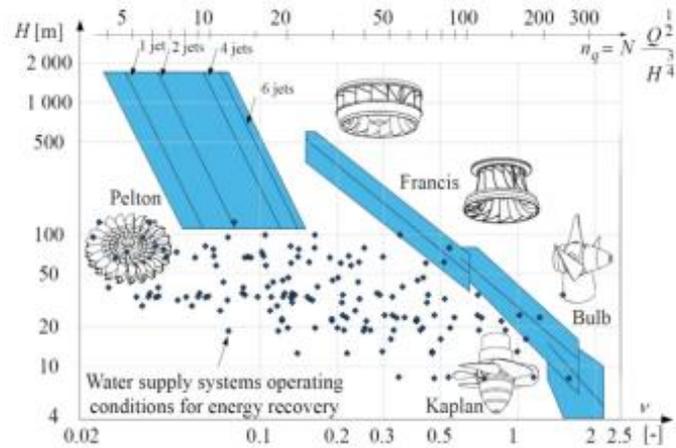
*Ilustración 31: Área de ingreso del caudal. (Lesics, 2013)*

Por mayor practicidad en la fabricación, instalación, análisis y por encontrarse en un punto medio de requerimientos de operación, utilizaremos una geometría similar a la turbina francis, la cual nos permite robar energía al fluido con condiciones portables como es nuestro caso, se recomienda utilizar de 10 a 34 cuchillas en este tipo de geometrías. En nuestro caso, obtuvimos un rodete de la web GrabCAD, que emulaba la disposición de los alabes de una turbina Francis, la cual imprimimos en 3D con PLA para crear iteraciones.



*Ilustración 32: Rodete tipo Francis*

Conectando con la sección anterior, las geometrías de los impeler son determinantes a la hora de apreciar cuanto se aprovecha del fluido dependiendo de la presión con la que entra el agua a la turbina, ya que algunos ángulos de ataque pueden ayudar al rendimiento, además por otro lado un detalle que hace bastante atractivo al uso de PATs es el costo, ya que no solo es del sistema en general, sino es el hecho de que existe una gran cantidad de repuestos y un mantenimiento relativamente simple, por ser equivalente al mantenimiento del sistema original (Delgado, J. et al 2019)



**Ilustración 33: Rendimiento de Impeler. (Cavarretta, 2011)**

“Debido a la diferencia de tamaño entre una PAT y una turbina de funciones similares surge de la geometría de la bomba como tal, donde al enfrentarse a un flujo de desaceleración, requiere un impulsor al menos 30% más grande la original, con gradualmente divergentes canales. La curvatura invertida de las palas PAT se debe a la necesidad de tener un ángulo a la salida en modo bomba para estabilidad” (Alatorre-Frenk, C., 1994). Por cuestiones de ensamble decidimos mantener las dimensiones originales del impulsor que viene de serie en la bomba para poder adaptar nuestras modificaciones a la bomba y no al revés.

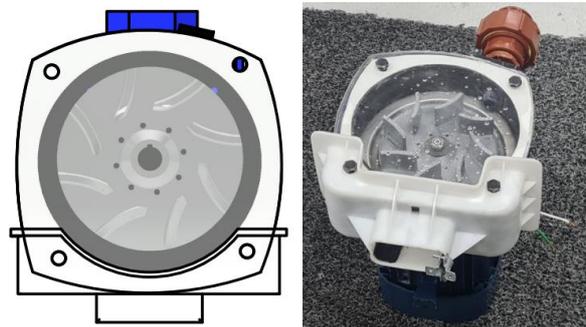
### DISEÑO PARA CONSTRUCCIÓN

Como se sabe, partimos de una bomba, y a lo largo de este proyecto, la intervención en la estructura de la misma, es mínima, lo cual es viable ya que tanto una comba como una turbina son máquinas hidráulicas que poseen las mismas partes, ya que se compone de uno o más rodetes que van en conjunto a los alabes, un eje el cual cumple con la función de mover caudal en el sistema elevando la presión del fluido, una cámara a presión o carcasa que protege de los agentes externos y una voluta que mediante un buen estudio sirve o complementa a la turbina para que en esta no se produzcan turbulencias y perdida del fluido que, como bien sabemos, es la energía cinética-potencial que se genera por medio de los alabes.

Nuestro proyecto no consiste en la construcción de la bomba y la turbina, si no en que una bomba funcione como turbina para lo cual, necesariamente se deben realizar cambios en la parte electro-mecánica siendo los más importantes a realizar, la modificación del impeler para que este pueda acaparar mayor fluido teniendo así, un mayor aprovechamiento de la caída de agua, los sellos mecánicos al igual que los rodamiento se mantienen intactos, ya que

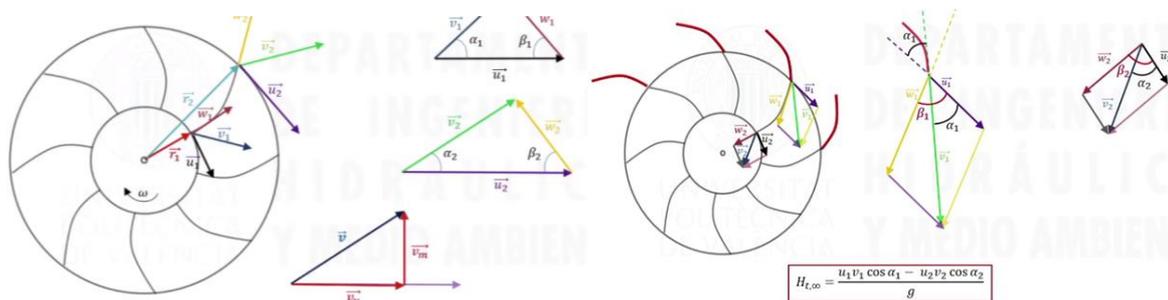
buscamos reemplazar el núcleo de jaula de ardilla por uno con muescas para poder colocar imanes generando electricidad por medio de las ondas electromagnéticas. (Valderrama, 2018)

El diseño para el impeler fue realizado en AutoDesk Inventor, como hablamos anteriormente uno de los cambios que necesariamente debíamos realizar es el cambio del impeler, ya que al recibir una mayor cantidad de agua este podrá girar con mayor velocidad generado así mayor electricidad. Atrás del diseño del impeler para la turbina esta una ciencia compleja como podemos observar en la ilustración 33. existen alabes curvados, ángulos con inclinación o inclusive alabes que se encuentran intermedios en ambos casos.



**Ilustración 34: Turbina con impeler modificado.**

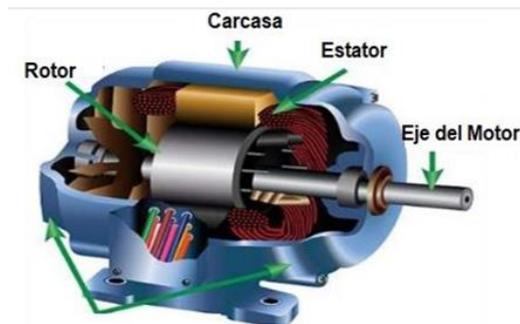
Para encontrar la curvatura o los ángulos necesarios para los alabes es necesario aplicar varios conceptos/teorías como la ecuación de Euler ya que por medio de los triángulos de fuerzas (ángulo  $\beta$  y ángulo  $\alpha$ ) tenemos los ángulos de entradas y salidas del rodete podemos encontrar la velocidad de la rotación del rodete determinando mediante este concepto, la inclinación con la que ingresa el fluido.



**Ilustración 35: Triángulos de Fuerza. (Universitat Politècnica de Valencia, Modesto Pérez)**

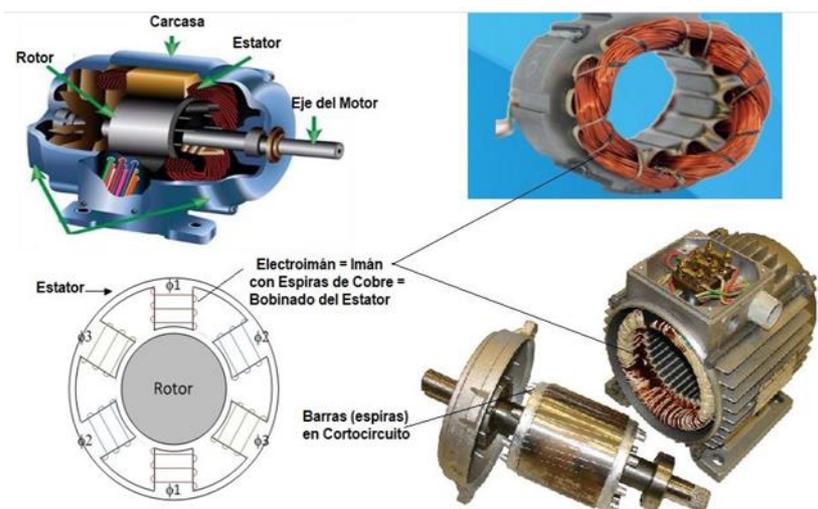
Mencionamos que otro de los puntos a estudiar es el rodamiento axial, se eligió una bomba monofásica especialmente porque este fusiona con los fenómenos de inducción electromagnética, robustez y fácil mantenimiento. Los sistemas monofásicos tienen una

ventaja a diferencia de los otros sistemas, estos son capaces de transportar, distribuir y producir energía eléctrica, en el estator se van a generar perforaciones donde se van a colocar imanes, van a ser útiles ya que los motores monofásicos cuentan con tres bobinas en serie y una que se comunica con el capacitor y con un circuito en cada una con lo que el inductor del sistema inducirá la corriente por se encuentra enrollado de forma espiral ya que de esta manera la energía será mayor. (Galvis, 2019).



**Ilustración 36: Zona del estator, intervención a realizar. (Universitat Politècnica de Valencia, Modesto Pérez)**

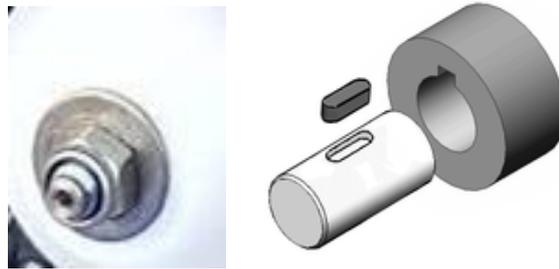
En si es recomendable también ocupar motores trifásicos, los cuales no poseen capacitores para el arranque inicial, pero tienen la ventaja de producir inducción directamente en el estator, puede aplicarse del mismo modo que un motor monofásico, pero estos poseen un mayor costo en el mercado.



**Ilustración 37: Bomba trifásica (Universitat Politècnica de Valencia, Modesto Pérez)**

### **Diseño para Ensamblar.**

Para los ensambles de los componentes es necesario tomar en cuenta las condiciones de uso, para lo cual se analizará el sistema por secciones, empezando por la PAT, en la cual para su ensamble se requiere una correcta lubricación del eje, pues después de haber modificado el rotor, es necesario poner nuevo lubricante en los rodamientos para tener una fricción reducida, aumentando la eficiencia. Otro aspecto del PAT es que debe estar aislada o cerrada herméticamente, para que el ambiente o posibles fugas no corroan la máquina. Se pueden usar siliconas frías para sellar posibles entradas.



*Ilustración 38: Ensamble de eje*

Para el acople de la turbina se escogieron 2 tipos de sujeciones por chavetero y tuerca en el final del eje. Para el acople de la estructura, se requiere realizar soldadura de cualquier tipo, pero con aporte de material. Esto para reducir la posibilidad de falla y evitar concentradores de esfuerzo en las esquinas.



*Ilustración 39: Conexiones*

Para las conexiones hidráulicas se recomienda el uso de cinta teflón en las uniones (en caso de ser mangueras) o pegamento para tuberías de agua fría (si se usan tubos), esto con el fin de evitar fugas y tener un cierre hermético evitando tener pérdidas de presión.

Las partes que conforman la voluta modificada, se unen con 4 pernos, los cuales se adaptan a la geometría original de la bomba que, a su vez, nos permite unir todo el

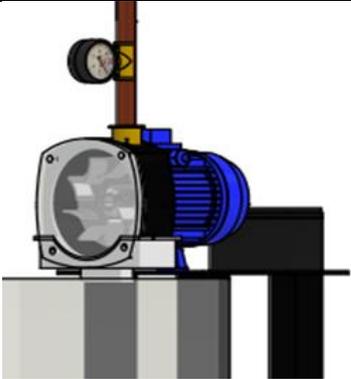
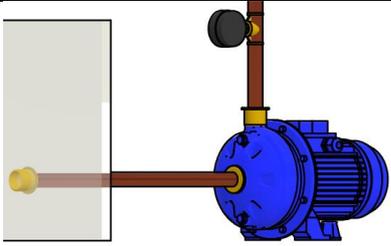
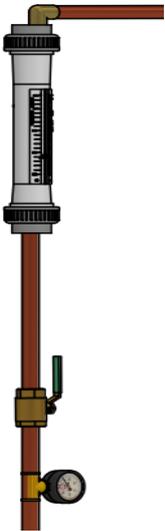
subsistema voluta a presión. Se utilizó todos los sellos mecánicos originales para evitar fugas y para evitar problemas relacionados al diseño de los mismos, los cuales se unen con tuercas y a presión se realizan los cierres.

### **Diseño para Mantenimiento.**

El mantenimiento es un procedimiento crucial para la correcta operación de cualquier máquina, planta o proceso. Este es un paso obligatorio debido a que nos permite garantizar una operación segura y que obtendremos el resultado deseado en el proceso o producto a fabricar. Existe diversos tipos de mantenimiento, pero todos poseen una característica similar que es mantener las condiciones originales u optimizar los componentes base que fueron diseñados previamente. Intuitivamente sabemos que, dentro de un buen proceso de mantenimiento, será necesario hacer un barrido de información que nos indique como se encuentra el estado de operación de la maquinaria o dispositivos que son cruciales, por lo que estamos hablando de ajustes, lubricación, calibración, reemplazar por un repuesto o el simple hecho de mantener limpio las máquinas y el área de trabajo, que pueden marcar una gran diferencia al momento de prolongar la vida útil de una máquina. (Valdivieso, 2010)

Para ser consistentes, tenemos que hacer énfasis en que el primer paso para poder hablar de un plan de mantenimiento, es la inspección, ya que existen algunos pasos en el mantenimiento que parten principalmente, dependiendo del estado del sistema a mantener, ya que podemos hablar de un mantenimiento de prevención que busca evitar que llegue a existir fallos de operación o arriesgar a los operadores, o simplemente evitar pérdidas económicas debido a fallas en el resultado final, por lo que esta parte, de inspecciones constantes. En esta clasificación, es importante también realizar un análisis en el mercado, esto se debe a que la industria crece constantemente y des actualizarse es un paso crítico que provoque el cese de operaciones, es por esto que no solo nos referimos a la prevención como tal, sino también a la actualización de los distintos componentes para mantener la competitividad. También existe el mantenimiento correctivo, el cual es un tipo de mantenimiento que surge después de un notorio deterioro, falla, reducción de calidad del producto o parada completa del mismo, es aquí donde el mantenimiento se encarece ya que no es de ajuste o de calibración, sino que se debe reemplazar piezas importantes que pudieron llegar a afectar a otros componentes y pérdidas económicas por alto de producción. (Quintana, 2019)

Es necesario describir correctamente y capacitar al usuario final para la realización de este mantenimiento, en el caso de nuestro proyecto, tenemos 3 elementos sensibles que son los siguientes:

Dispositivos	Nombre	Descripción
	Sistema PAT con rodete de reacción	Sistema requiere de inspecciones visuales por posible cavitación que dañaría los alabes del rodete.
	Bomba de 1 HP	Revisión de cavitación y de componentes eléctricos.
	Manómetros, rotámetro y válvulas	Calibración y Chequeo de los mismos, al igual que se tenga lecturas coherentes.

**Tabla 13: Dispositivos críticos**

Por lo tanto, es necesario que el mantenimiento para nuestro sistema se lo realice de manera preventiva, ya que algunos componentes pueden ser reemplazados, pero otros fueron realizados específicamente para su funcionamiento como el rodete de la PAT, ya que su geometría emula a una turbina francis en un caso y en otro posee una distribución de alabes no convencional, se recomienda considerar el siguiente esquema para mantener los componentes:

Programa de mantenimiento		
Semanal	mensual	anual
inspeccion visual	Calibracion de sensores	Revision de rodete
limpieza	Revision de datos de generacion	Limpieza de reservorio
Asegurarse de impermeabilidad del modulo del controlador	revisar operabilidad de controlador	Analizar posibles actualizaciones.

**Tabla 14: Programa de mantenimiento**

Es recomendable realizar la limpieza de ambos reservorios cuando el sistema se encuentre en la parada completa de uso, es por esto que es necesario considerar que la parada de este sistema afectaría al abastecimiento de agua del mismo, salvo que el sistema se instale de forma paralela a otro. El usuario debe ser consciente de que las posibles fallas, deben apegarse al diagrama de procesos que se encuentra como (Anexo I).

Es importante tomar en cuenta las siguientes recomendaciones para la correcta operación del sistema en el tiempo:

- Se recomienda engrasar o cambiar los rodamientos cada año con grasa de rodamientos de grado 1 pues las revoluciones de uso no son muy altas.
- Los imanes de neodimio deben ser remplazados cada 8-10 años en caso de presentar fisuras, este tipo de imanes pierde fuerza magnética en aproximadamente 30 años de uso continuo.
- En caso de presentarse una caída en la generación eléctrica, debe revisarse el rotor, puesto a que las fisuras en los imanes pueden llevar a una pérdida de fuerza para la creación del campo magnético necesario, lo que haría necesario reemplazar los imanes de los polos magnéticos.
- Para evitar problemas relacionados con roturas en alabes de los impulsores es importante considerar el uso de filtros en el ingreso de agua de la voluta, para evitar roturas o perdidas de paletas de los rodetes.
- Se recomienda inspección visual del rodete tras una semana de uso continuo para verificar que no exista daños en los mismos.
- Para evitar la formación de algas en el rotámetro y manómetros, es recomendable agregar 10 ml de hipoclorito de sodio por semana de uso en el reservorio de caída por cada metro cubico de agua.

- El represamiento resulta ser crítico para el sistema, ya que, si se almacena más de 2 metros cúbicos de agua, puede existir un daño en los impulsores por la caída agresiva del agua por lo que debe verificarse siempre que se mantenga menos de esta carga de agua en el reservorio emisor principalmente si es elevado.
- Debe realizarse una inspección visual del reservorio para verificar que no exista problemas con cuerpos no deseados ingresando al sistema, que puede desencadenar en daños en los componentes críticos.
- Para evitar el golpe de ariete, debe evitar cerrarse las válvulas de manera abrupta, sino que debe hacerse de manera continua pero no a gran velocidad.

Se puede encontrar un manual de mantenimiento y operaciones en el (Anexo I) donde se da varias recomendaciones partiendo de las normas establecidas en la sección de estándares de interés.

### **Diseño para Fin de Vida Útil.**

Una bomba de agua ofrece una función principal, como es el bombeo de agua para un fin en común. En modo turbina, la bomba pasa de suministrar presión de agua, a suministrar energía. Sin embargo, el mantenimiento y el cuidado que se debe tener para la PAT es similar al cuidado de una bomba de agua normal, como se discutió en el apartado anterior. El fin de vida útil de una PAT depende enormemente de la vida útil del impulsor. Las variables que causan el desgaste de una PAT, es la velocidad de rotación con la que oscila la bomba, el fluido que utiliza, y las propiedades del mismo. En cuanto a las variables de consecuencias, tenemos el flujo de caudal y la disponibilidad de generación de energía del proceso (Valles, España, & Serrato, 2020).

Según estudios realizados en diferentes bombas centrífugas, el factor de utilización (FU) del impulsor durante su utilización en el tiempo se puede definir con la siguiente ecuación:

$$FU = 2 \cdot 10^{-5} T \quad FU = 2 \cdot 10^{-5} T$$

En donde T es el tiempo en horas.

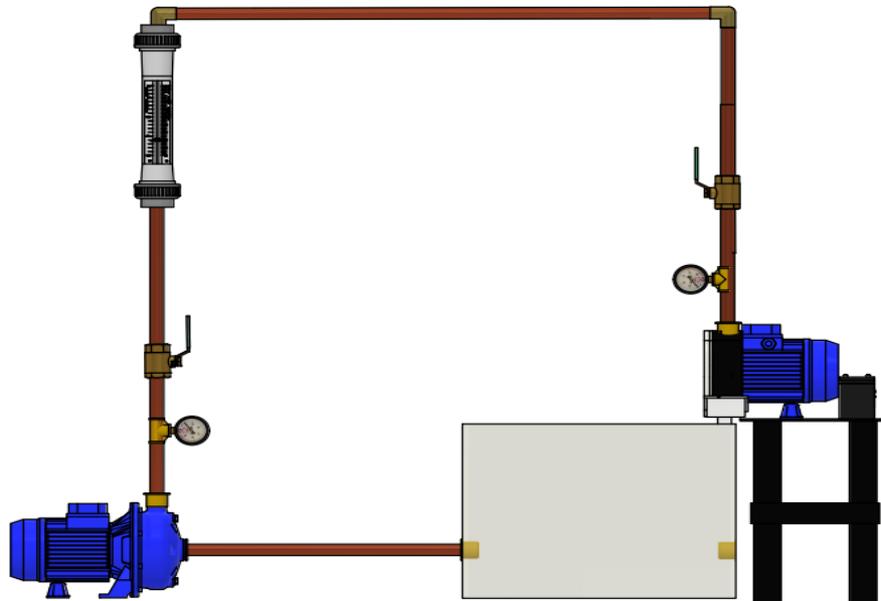
Adicionalmente, la vida útil del impulsor se relaciona con las partículas que se concentran en suspensión, dado por la siguiente ecuación:

$$VU = \% - 1 * 1000 \quad VU = \% - 1 * 1000$$

El desgaste del impulsor en cuanto al material del que está hecho, representa un comportamiento lineal y descendiente en el tiempo. Adicionalmente, para mayor durabilidad del impulsor, es importante que el fluido en cuestión entre a la bomba sin partículas residuales, como la arena, que aumenta el fin de la vida útil del impulsor (Valles, España, & Serrato, 2020).

## REPORTE DE DISEÑO

Para los componentes involucrados dentro del diseño final, se tiene distintas formas de realizar el ensamble, algunos componentes tienen ensambles simplificados por la presencia de accesorios de tuberías que nos ayudan a su montaje. Solo es necesario tener los accesorios correctos para el ensamble debido a que son fabricados justamente para ser de fácil acople gracias a la utilización de áreas roscadas. El esquema final tendrá esta disposición:



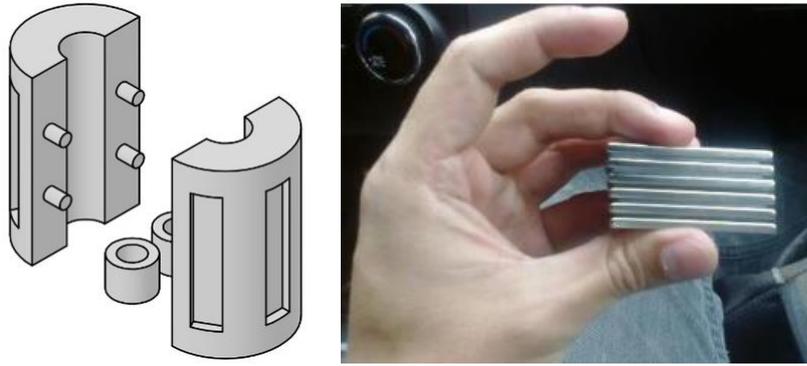
*Ilustración 40: Sistema*

Dentro de los accesorios poseemos dos manómetros, dos bombas, el reservorio intermedio y un rotámetro, el cual posee el montaje más complejo ya que al no estar roscado requiere de pegamento. Los planos de cada uno de los componentes del sistema con sus respectivas dimensiones, al igual que de los sub ensambles como del ensamble final, se encuentran en el (Anexo B), tenemos:



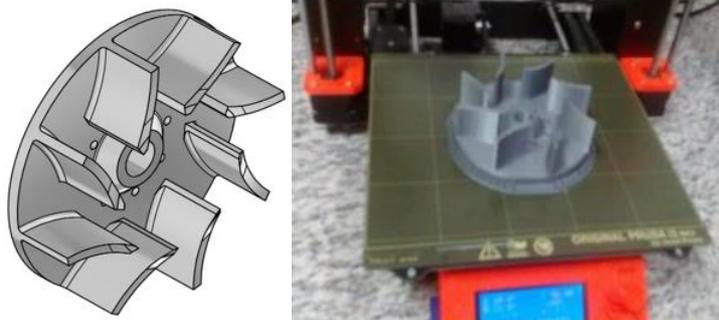
***Ilustración 41: Rotámetro***

Es necesario hacer énfasis en que la bomba que usaremos para generación debe tener algunas modificaciones para no recaer en el error del estrangulamiento. Por lo que abordaremos este problema de manera similar a la de un problema de generación eólica y no tanto hidroeléctrica, ya que, para poder generar con modificaciones mínimas, es necesario superar la velocidad nominal de la bomba que es de aproximadamente 3450 rpm, lo cual bajo condiciones regulares de operación, al no poseer forma de represar un cauce de río o con una gran caída de bomba, se optó por aumentar los polos en el rotor de la bomba y así poder inducir a una mayor fuerza electromotriz, con esta modificación, no sería necesario llegar a superar la velocidad nominal de la bomba ni poseer un caudal constante, es decir dándole poder electromagnético al rotor a través de imanes de neodimio. Para esta aplicación nos centramos en la creación de un núcleo de rotor, el cual no sea una jaula de ardilla, ya que esta está diseñada específicamente para responder al efecto electromagnético ganando movimiento y no generando energía, por lo que diseñamos un rotor con muescas que brinda facilidad en un ensamblaje de 6 unidades magnéticas.



***Ilustración 42: Rotor con imanes***

A esta modificación, también se hace especialmente énfasis en tener una velocidad suficiente para mantener relación de generación con la velocidad angular del impulsor, por lo que, haciendo el triángulo de velocidades de la ecuación de Euler, concluimos que, por recomendación del texto, el impulsor debe tener un ángulo de 120 grados entre la entrada y salida del flujo, por lo que decidimos partir de un diseño con impulsor mejorado y recrearlo con impresión 3D.



***Ilustración 43: Impulsor mejorado***

También optaremos por un impulsor que posee unas aletas similares a las de una turbina Francis de reacción, de la cual ya se posee el diseño, pero es necesario manufacturar bajo el mismo acabado de impresión 3D, por ser económico, ligero y resistente.



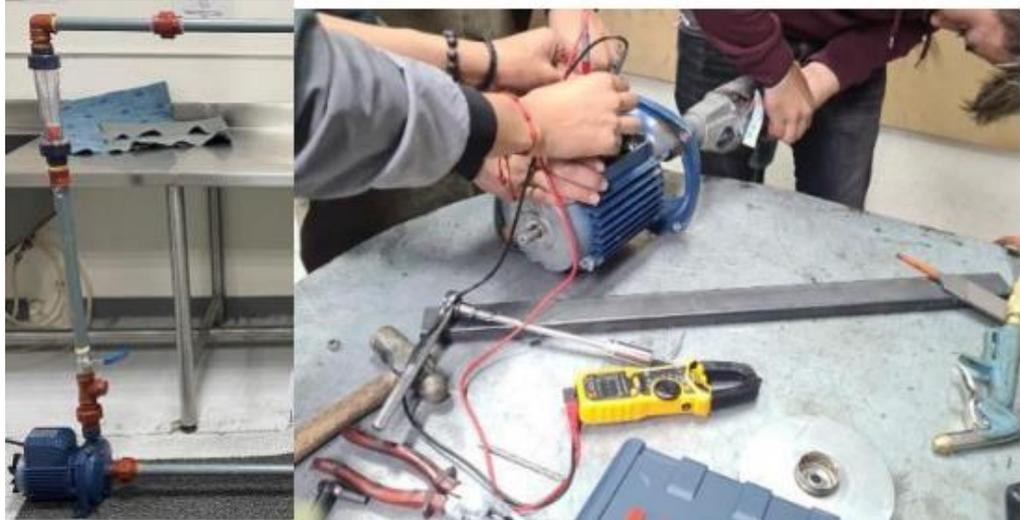
***Ilustración 44: Impulsor tipo francis***

Para mejorar la generación eléctrica, se optó por usar un capacitor electrolítico, el cual posee un material dieléctrico mejor que el original, al igual que el valor de la capacitancia mayor que es de  $80\mu\text{F}$ . El cual influía directamente en cuanto se podía generar en términos de campo electromagnético.



***Ilustración 45: conexiones Bomba***

Dentro del ensamble convencional, partimos de la unión de los distintos tubos e interconectándolos.



***Ilustración 46: Pruebas***

Para evitar el estrangulamiento usaremos acrílico para observar la respuesta del rodete y madera para recrear una voluta que nos permita mantener entradas y salidas del fluido de buen tamaño, así buscaremos crear una geometría que nos permitan mantener una correcta conducción del fluido, evitando problemas futuros por inconvenientes de índole hidráulica.



***Ilustración 47: Esquema Voluta***

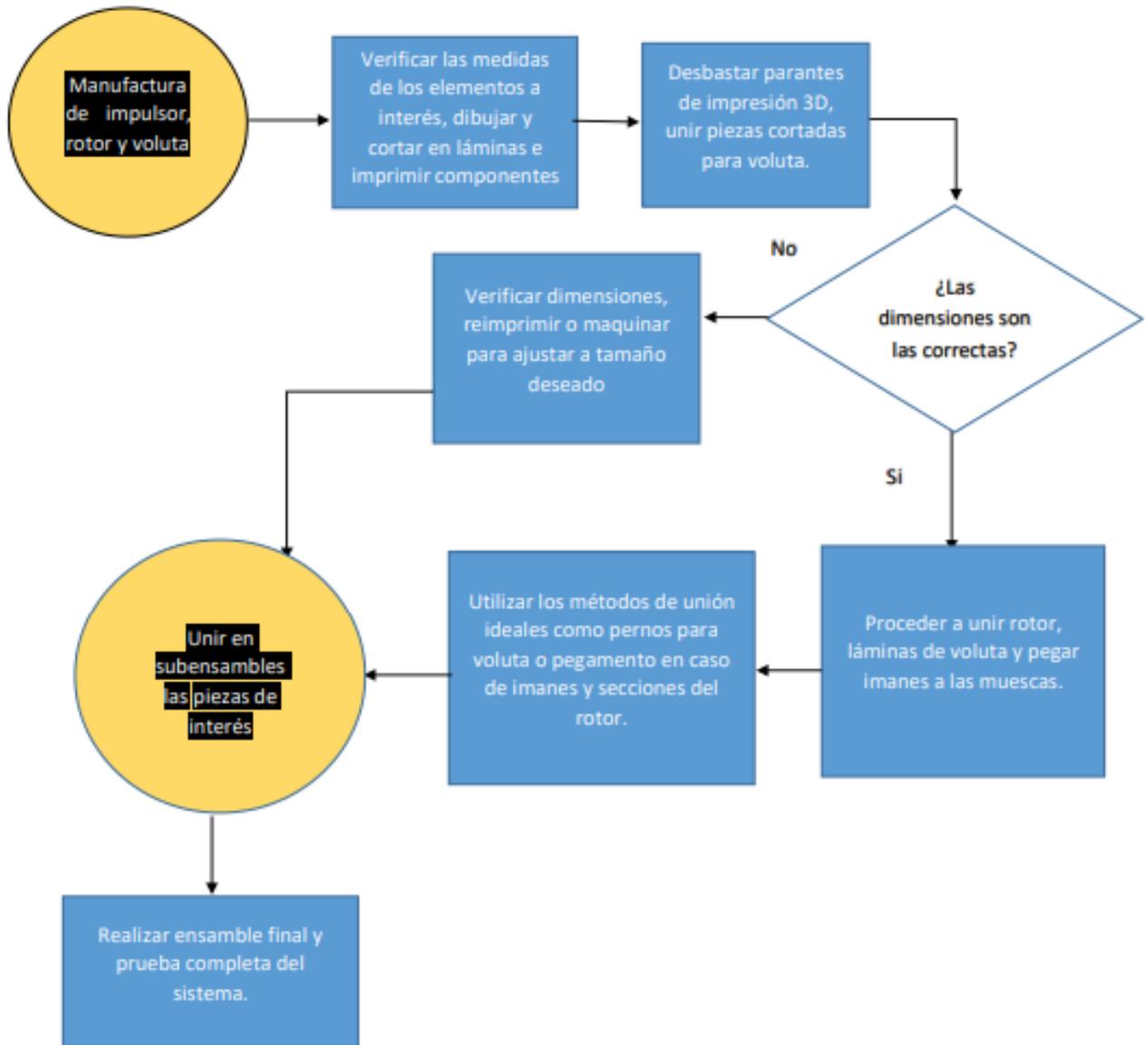
## Horario de ensamble y armado. Noviembre 2022.

Actividad	Noviembre	1 al 5	7 al 12	14 al 19	21 al 26	29 al 30
1	Investigación y requerimientos de armado para voluta e impulsores, considerando geometría y relación de ambas. Materiales= Acrilica+madera (10\$ c/u). Impulsores = PLA. Laboratorio de hidráulica	(Francisco y Diego)				
2	impresión en 3D de impulsores y rotor con muescas para imanes de neodimio. (costo = 0 \$, impresión en laboratorio de la universidad)		(Francisco y Diego)			
3	Testeo de sistema de generación eléctrica con multímetro, desarme de voluta original y prueba con impulsores mejorados.			(Juan José, Diego y Francisco)		
4	Cambio de capacitores de bomba PAT, armado de voluta y ensamble de sistema (laboratorio de hidráulica USFQ) armado de manómetros, válvulas, tubos, uniones y rotámetro.				(Juan José, Diego, Luca y Francisco)	
5	Armado final para presentación de prototipo. (laboratorio de hidráulica USFQ). Armado y testeo de generación.					(Juan José, Diego, Luca y Francisco)

**Tabla 15: horario de iteración**

A este esquema debemos complementar con el horario planeado para el mes de noviembre, el cual se encuentra más generalizado, pero el presentado en la tabla 15, es más detallado, con costos durante el mes y responsables, pero se complementa con la planificación original.

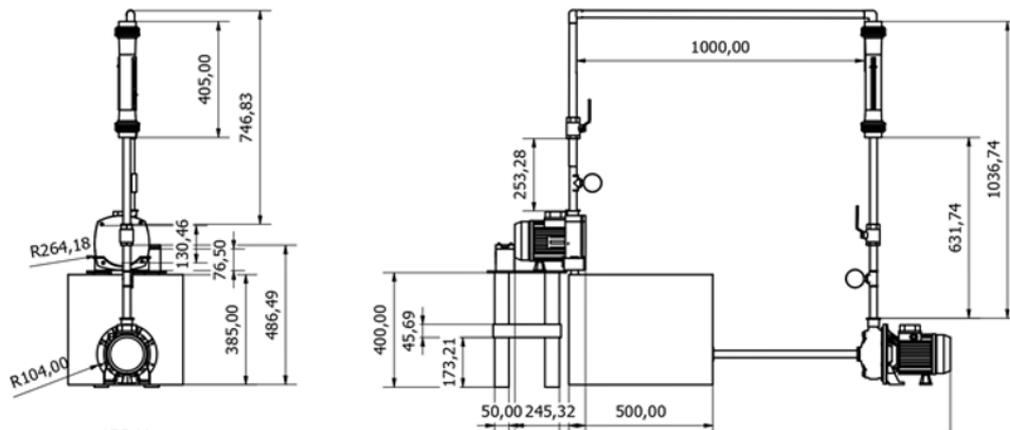
## DIAGRAMA DE PROCESO



*Ilustración 48: Diagrama de proceso*

**HOJAS DE PROCESO.**

Es necesario conocer las dimensiones totales del prototipo, las cuales son las siguientes, en base a ellas, buscaremos mantener una tolerancia de dos hilos en cada rosca para evitar fallas en la junta que pueden causar fugas y demás información que será adjuntada.

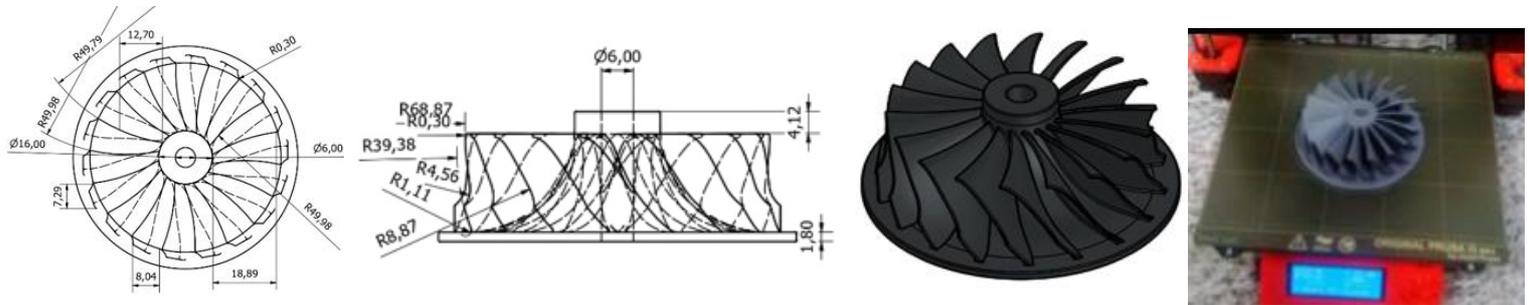


*Ilustración 49: dimensiones [mm]*

Hoja de proceso				
Pieza	Impulsor 1	Plano 1	Fabricacion por impresión 3D	1
Tareas	herramientas		Operador	Tiempo
Medir	Impresora prusa	Verificar que la impresora tenga material suficiente e iniciar el proceso de impresión	Diego	120
imprimir 3d	Calibrador	Tras impresión verificar las dimensiones según el plano.		5
desbastar parantes	Cinzel	Retirar parantes auxiliares de la base del impulsor impreso		30
acoplar a eje	tuerca	Ajustar impulsor al eje de la maquina		5
				minutos

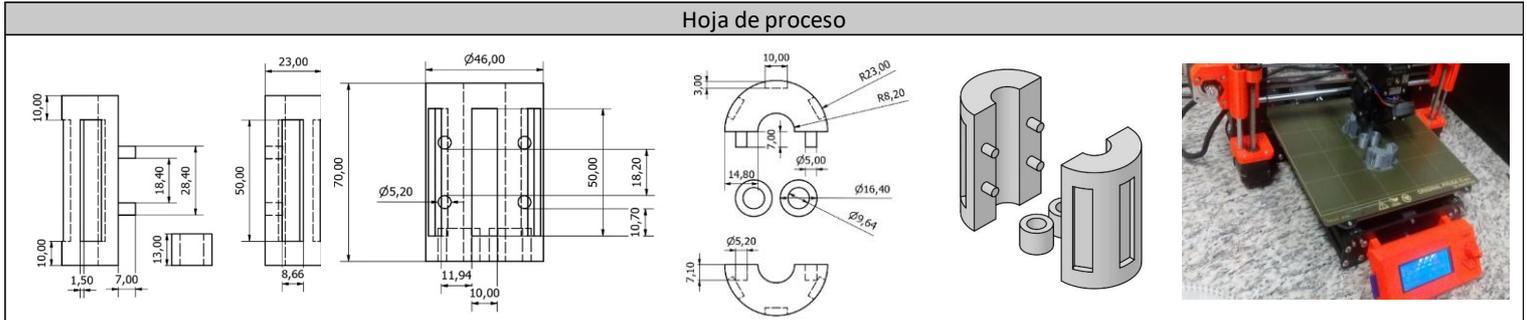
*Tabla 16: Proceso de fabricación impulsor*

## Hoja de proceso



Pieza	Impulsor 2	Plano 1	Fabricacion por impresión 3D		1
Tareas	herramientas		Operador	Tiempo	
Medir	Impresora prusa	Verificar que la impresora tenga material suficiente e iniciar el proceso de impresión	Diego	180	minutos
imprimir 3D	Calibrador	Tras impresión verificar las dimensiones según el plano.		5	
desbastar parantes	cincel	Retirar parantes auxiliares de los alabes del impulsor impreso		30	
acoplar a eje	tuerca	Ajustar impulsor al eje de la maquina		5	

**Tabla 17: Hoja de proceso impulsor 2.**



Hoja de proceso							
Pieza	rotor	Plano 1		Cantidad	1	Fabricacion por impresión 3D	1
Tareas	herramientas				Operador	Tiempo	
Medir	Impresora prusa	Verificar que la impresora tenga material suficiente e iniciar el proceso de impresión			Diego	180	minutos
imprimir 3d	Calibrador	Tras impresión verificar las dimensiones según el plano.				5	
desbastar parantes	cinzel	Retirar parantes de las muescas y secciones vacantes del rotor				30	
acoplar a eje	tuerca	Unir las dos secciones impresas en el centro del eje.				5	

**Tabla 18:Hoja de proceso rotor.**

La hoja de proceso de la voluta, Consiste en corte, adaptación, y unión de voluta a la bomba, tenemos:

Hoja de proceso							
<b>Pieza</b>	<b>Voluta</b>	<b>Plano 1</b>	<b>Cantidad</b>	<b>1</b>	<b>Fabricacion por corte de madera y pegado con prensado</b>		<b>1</b>
<b>Tareas</b>	<b>herramientas</b>			<b>Procesos</b>	<b>Operador</b>	<b>Tiempo</b>	
Cortar	Cierra	Recrear la geometria dela voluta para adaptavilidad y cortar con cierra circular			Diego	120	minutos
Pegar	Cemento de contacto y goma de carpintero	Tras verificar las dimensiones de la voluta según el plano, se une con cola de carpintero.				15	
Prensar	Prensa	Para garantizar una buena adhesion se usa una prensa para pegar los 3 pedazos de madera cortada.				360	
Pegar cello de caucho	Cemento de contacto	Se une una tira de caucho en la zona del circulo inmterno de la voluta				60	
Cortar acrilico	Corte laser	Tras vectorizar en un CAD las dimensiones del acrilico, se procede a solicitar el corte				30	
Perforar	Taladro	Se realizan 4 perforaciones con una broca del tamaño expuesto en el plano es decir diametro de 10 mm				10	
Unir Voluta	Pernos a presion	Se une la voluta completa con pernos a presion para garantizar el cello				15	

**Tabla 19: Proceso de Voluta**

La Bomba de la ilustración 56 es la bomba que será convertida en PAT, la bomba emisora de caudal es la siguiente:



*Ilustración 50: Bomba centrífuga leo*

Cabe destacar que las tolerancias en este tipo de geometrías, es dependiente de la precisión de la impresora, la cual, de estar bien calibrada, nos arrojaría una precisión excelente, la cual puede ser verificada con medidas del calibrador.

Hoja de procesos con dimensiones			
<b>Tiempo de impresión</b>			
120 minutos	180 minutos	180 minutos	560 minutos
<b>Considerar</b>			
<b>Costo de material por kilo</b>	30\$	<b>Costo de hora de trabajo</b>	0,60\$
<b>Costo Total voluta</b>			
27\$			
<b>costo[USD]</b>			
31,2	16,8	31,8	
Diámetro mayor = 12 ±0,1 cm	Altura = 7 ±0,1cm	Diámetro mayor = 12 ±0,1 cm	Altura máxima = 19 ±0,1 cm
Diámetro menor = 1,64 ±0,1 cm	Altura muestra = 5 ±0,1 cm	Diámetro menor = 1,64±0,1 cm	Longitud = 19 ±0,1 cm
Espesor de aletas= 3 ± 1 mm	Lateral muesca = 1 ±0,1 cm	Espesor de aletas= 1 ± 1mm	Espesor total = 8,5 ±0,1 cm
Espesor base = 3 ± 1 mm	Profundidad= 3 ± 1 mm	Espesor base = 3 ± 1 mm	Espesor base = 3 ± 1 mm
Altura aletas = 4 ±0,1 cm	Orificios= 5 ± 1 mm	Altura aletas = 4 ±0,1 cm	Diámetro círculo interno = 16 ±0,1 cm

*Tabla 20: Tolerancias y costos de manufactura*

Dentro del proceso de mantenimiento, es necesario mantener un monitoreo constante de valores de presión manométrica al igual que el caudal que se ingresa o sale, para tener constancia del funcionamiento de las bombas, que se puede ver afectado por cavitación o desgaste propio de las cuchillas del impulsor. Estas pueden llegar a producir vibraciones muy fuertes al punto de llegar a averiar al sistema. Para el fin de vida útil, tendremos un performance considerablemente reducido, lo que puede ser alargado cambiando piezas clave como los impulsores, o reparando las volutas, lo que hace importante un monitoreo periódico cada 3 meses, ya que el agua suele ser muy abrasiva con componentes plásticos que se encuentran en revolución constante. Justificación Al realizar una impresión 3D realizamos

los pasos de desbaste, corte, restricción y verificación de medidas el mismo software Inventor es quien reduce la necesidad de maquinado en un torno, agilizando tiempos y reduciendo costos. Como pueden observar en la Ilustración 66, Ilustración 67 e Ilustración 68, el único paso adicional que se realiza una vez impresa la pieza es quitar los parantes que necesita la impresora para concebir una pieza de geometría complicada, es por eso que consideramos el no describir un proceso de desbaste o maquinado debido a la no presencia del mismo

### SEGURIDAD A TRAVÉS DEL DISEÑO

Para poder hablar acerca de mitigación de riesgos, control o reducción de los mismos, primero es necesario identificarlos, tenemos:

#### Análisis de riesgos:

Para el análisis de los riesgos y de cómo reducir su impacto en caso de que se dieran durante el desarrollo del prototipo o de una posible fabricación futura, es necesario tomar en cuenta los siguientes riesgos:

Riesgos	Tipo	Descripción
R1	Tecnico	Riesgo de manufactura
R2	Ambiental	interferir en ecosistemas
R3	Tecnico	Caudal fluctuante
R4	Operacional	Accidentes por partes móviles
R5	Legal	Similitudes con impulsores modificados
R6	Técnicos	Problemas de instalación
R7	Técnicos	partículas ingresan al sistema
R8	Técnicos	Problemas de corrosión
R9	Técnicos	Problemas por falta de mantenimiento
R10	Legal	Problemas debidos a la propiedad del lugar
R11	Operacional	Falla en conexión de accesorios
R12	Operacional	Posible cavitación
R13	Tecnico	Posibles vibraciones no deseadas
R14	Instalación	Posibles fugas

*Tabla 21: Análisis de riesgos*

Utilizaremos códigos, los cuales parten con la letra R, que significa riesgo y la numeración hace referencia a la ubicación del riesgo en la tabla 21, a partir de esto procederemos a hacer el análisis de valor en las siguientes tablas, tenemos:

Análisis cualitativo					
Impacto	Severo			R7 ; R9	R1
	Mediano		R4	R3 ; R8	R6;R12
	Bajo		R2	R5 ; R10	
	Nulo		R11;R13;R14		
			Baja	Media	Alta
Probabilidad					

**Tabla 22: Análisis cualitativo**

Análisis cuantitativo						
Impacto	5					R1
	4		R9		R7	
	3	R4		R3 ; R8		R6;R12
	2					
	1	R5		R2;R10;R11;R13;R14		
		1	2	3	4	5
Probabilidad						

**Tabla 23: Análisis cuantitativo**

Tras este análisis procederemos a colocar la posible gestión de los riesgos para eliminar o reducir la probabilidad al igual que la gravedad de la exposición de los usuarios ante la presencia de estos riesgos en la siguiente tabla:

Gestion de riesgos						
<i>Codigo</i>	<i>Prioridad vs impacto</i>	<i>Descripcion</i>	<i>Responsable</i>	<i>Descision tomada</i>	<i>Estatus</i>	<i>Observaciones</i>
R1	5x5=25	Posibles problemas al realizar manufactura de impulsor y voluta con geometria optimizada.	Diego	Mandar a manufacturar elimpulsor a taller con experiencia	Finalizado	Verificar costo accesible.
R2	2x1=2	Posible problema de impacto ambiental ante la toma de agua de fuente hidrica cercana	Diego	Tomar una ramificacion de un rio, que no sea invasiva	Vigente	Verificar en el terreno, las condiciones de instalacion
R3	2x3=6	Posible falla de suministro de caudal que se traduce en falla desuministro electrico.	Diego	Utilizar un impulsor y una bateria para almacenar dicha energia	Finalizado	Investigar funcionalidad y disponibilidad de dispositivo.
R4	1x3=3	Posible problema de daño del operador no capacitado al entrar encontacto con partes moviles	Diego	Restringir acceso del usuario a las partes rotativas	Finalizado	Correcta elaboracion de voluta.
R5	2x1=2	Posible esquema patentado, debido a las multiples geometrias libres existentes de impulsores.	Diego	Verificar que sean geometrias de libre acceso	Vigente	Consultar si existe sistemas patentados.
R6	4x3 =12	Posibles problemas en la instalación del sistema por disposición geográfica del lugar de trabajo	Juan	Solicitar fotos del lugar donde se planea usar el sistema	Vigente	Verificar el lugar antes de enviar los componentes y enviar los necesarios
R7	3x4=12	Posible problema con los residuos que se encuentran en el agua que entra al sistema	Juan	Aplicar una serie de mallas filtradoras para elementos gruesos	Vigente	Impedir El Paso de residuos de tamaño hasta mínimo 1/6 del diámetro del impeler
R8	2x3=6	Posible efecto corrosivo por ambientes abrasivos para el sistema	Juan	Utilizar una carcasa protectora o un recubrimiento anti corrosivo	Vigente	Investigar los ambientes más corrosivos y buscar una protección óptima para dicho entorno
R9	2x4=8	Posible desgaste acelerado por falta de mantenimiento en la turbina y ejes	Juan	Entregar planilla de mantenimientos sellados a los usuarios	Vigente	Usar correctamente los lubricantes y grasas para los elementos giratorios
R10	2x1=2	Posibles problemas de propiedad con el lugar de instalación	Juan	Verificar que el lugar de instalación y la fuente de agua sea del propietario o de uso común	Vigente	Solicitar todos los permisos necesarios Antes de la instalación
R11	2x1=2	Posible falla en el uso de tuberías y codos por falta de un correcto empaque	Francisco	Mediante pruebas comprobar que no existan fugas en el sistema	Vigente	Investigar que las tuberías y codos sean las correctas a utilizar
R12	4x3 =12	Posible pérdida por caviación en los alabes de nuestra turbina	Francisco	Mandar a manufacturar elimpulsor a taller con experiencia	Vigente	Correcta simulacion para observar el funcionamiento del impeller
R13	2x1=2	Posible exceso de vibraciones por mala colocacion del equipo	Francisco	Verificar que el lugar de instalacion sea adecuado	Vigente	Observar el lugar en el cual se instalara el equipo, que se encuentre plano fuera de preferencia.
R14	2x1=2	Posibles perdidas por fugas en los empaques	Francisco	Verificar los empaque o colocar nuevos que se encuentran en la bomba	Vigente	Usar empaques adecuados para evitar perdidas por la entrada de aire o fluido.

**Tabla 24: Gestión de riesgos**

Dentro de las modificaciones que se pueden considerar para reducir los riesgos se debe considerar cada uno de los temas a tratar. Cuando hablamos de riesgos derivados de la

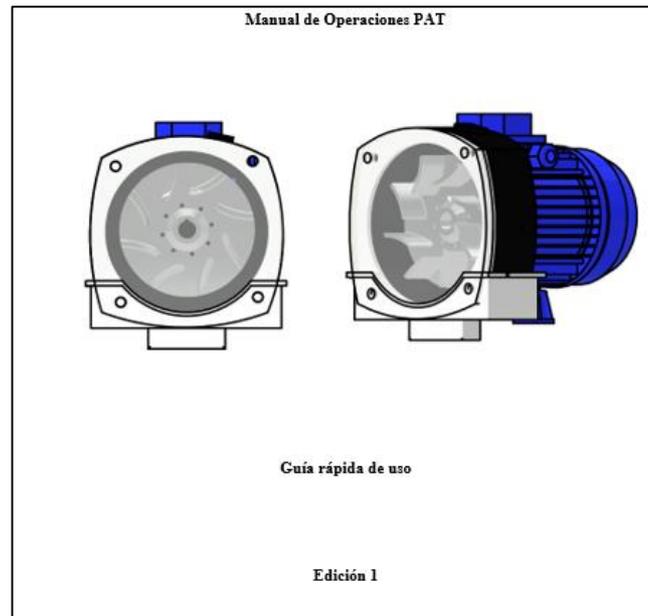
manufactura, hacemos énfasis en el hecho de que en caso de no re construir el prototipo bajo las especificaciones indicadas, puede ser causante de errores en el ensamble que puede resultar en una operación no deseada o en inconvenientes que lleven a la destrucción total o parcial del sistema, por lo que debe verificarse en etapas si la construcción del sistema está saliendo de forma correcta como se puede apreciar en el diagrama de procesos de la ilustración 51. Por otro lado, si hablamos de los riesgos operacionales, debemos crear el prototipo de tal forma que se mantenga con las conexiones eléctricas fuera del alcance del usuario final ya que la manipulación segura de dispositivos eléctricos requiere de personal altamente capacitado. Para evitar los problemas de instalación al igual que los problemas de corrosión, una vez que se recree el sistema para el campo, se debe usar los materiales propios con los que está hecha la bomba, así como se puede ver en la ficha técnica de la bomba Pedrollo (Anexo L) se requiere de hierro fundido con tratamiento de cataforesis, así se podría recrear las condiciones de seguridad tipo 4-4 que indica, que la bomba toleraría condiciones de humedad, pero no para estar dentro de agua.

Para mitigar la falta de mantenimiento o problemas relacionados a partículas que puedan afectar a la operación del sistema, es necesario una inspección visual del reservorio al igual que de la generación, al haber un desempeño inferior en el uso cotidiano, podría deberse a daños en los impulsores, lo que requeriría del alto en el uso del sistema hasta conseguir un repuesto del mismo. Los diseños de estos no deberían presentar conflicto en temas legales puesto que la mayoría de sistemas PAT son usados para experimentación e investigación por lo que no existiría problemas para replicar el sistema. Acerca de problemas de legales en cuestión de instalación en zonas donde están establecidas las comunidades, debe verificarse la legalidad del asentamiento, por lo que debe mantenerse con un lineamiento legal para instalación del sistema en el área de aplicación evitando conflictos entre las propias comunidades.

Para un correcto uso del sistema, es necesario tomar en cuenta la operación para la que fue modificada y considerar la revisión del manual de operaciones (Anexo I) Para evitar cualquier problema con la máquina.

## **MANUAL DE MANTENIMIENTO Y OPERACIONES**

Para esta sección se desarrolló un manual completo de operaciones que se puede encontrar en el (Anexo I), con recomendaciones de uso y mantenimiento.



**Ilustración 51: Portada de manual de operaciones (Anexo I)**

### ANÁLISIS INGENIERIL

Partimos de la idea que, nuestro sistema tiene como finalidad primordial, poder generar electricidad con una bomba transformada en turbina (PAT). Este criterio es importante debido a la facilidad de encontrar bombas a precios económicos y los repuestos de las mismas, lo que le da una ventaja precio-beneficio considerablemente mayor que una turbina de generación. Para aprovechar la energía potencial, utilizaremos un reservorio elevado, el cual nos ayuda a llevar nuestro fluido hacia el ingreso a la voluta modificada de nuestra PAT. Por lo que realizaremos el siguiente circuito a modo de prototipo el cual es replicable y adaptable según sea necesario.



**Ilustración 52: Esquema**

Como primer cálculo, calcularemos las pérdidas del sistema, tenemos:

Usando la ecuación de Darcy-Weisbach

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

L es la longitud de las tuberías, v es la velocidad del fluido, D es el diámetro de la tubería, g es gravedad, f es el factor obtenido del diagrama de Moody, para el cual necesitamos realizar un cálculo adicional que es la obtención del número de Reynolds.

Primero conocemos el valor del diámetro de nuestras tuberías, usaremos la siguiente ecuación, pero ya conocemos su dimensión por lo que:

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}}$$

$$D = 0.0254 \text{ m}$$

Ahora reemplazamos en la ecuación del número de Reynolds

$$R_e = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu}$$

Donde las variables son iguales que en el caso anterior, pero tenemos dos nuevas, la densidad del agua que es  $\rho = 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  y  $\mu$ , es la viscosidad que para el agua es 0.001 Pa.s.

Transformamos las unidades al sistema internacional, y partimos del dato de que las tuberías son de una pulgada de diámetro, primero calculamos la velocidad del fluido.

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$v = \frac{0.00105 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\frac{\pi(0.0254\text{m})^2}{4}} = 2,073 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Ya que el valor de la velocidad se encuentra dentro de los parámetros esperados de velocidad dentro de tuberías, es decir, mayor a 0,3 y menor a 5 m/s considerando que el material asumimos como plástico, podemos concluir que el diámetro usado es correcto, ahora reemplazamos en la ecuación del número de Reynolds:

$$R_e = \frac{2.073 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.0254 \text{ m} * 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0.001 \text{ Pa.s}} = 52502.6 > 2300 \text{ flujo turbulento}$$

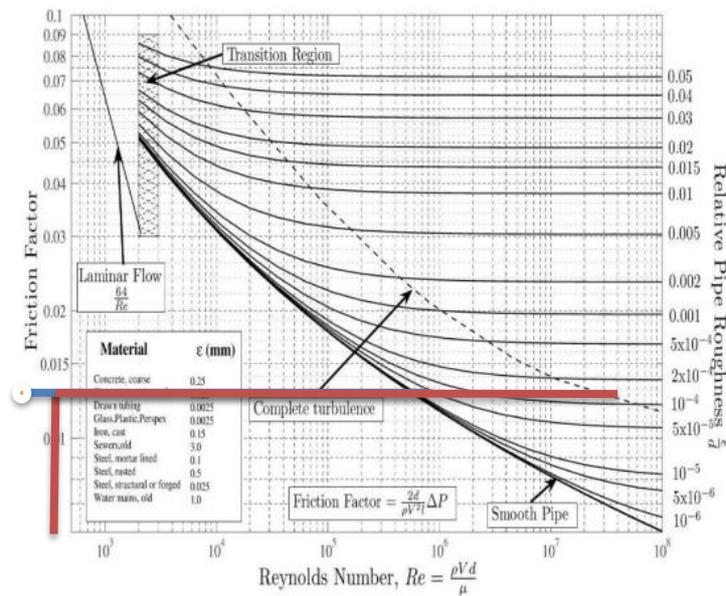
Por lo tanto, para la obtención del factor de fricción  $f$ , podemos usar la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

Sin embargo, optaremos por utilizar el diagrama de moody, por lo que usamos los valores de rugosidad, considerando que el material de las tuberías es de plástico. De la tabla 8.1 (Anexo A)

$$\frac{\varepsilon}{D} = 1.181 \times 10^{-5}$$

Podemos obtener el valor  $f$  directamente del diagrama de moody con los datos del número de Reynolds y de la rugosidad.



**Ilustración 53: Diagrama de moody**

Nos da un valor aproximado de 0.014, pero usando “moody chart online”, obtuvimos el siguiente valor:

## Moody Chart Calculator

Reynolds number:

relative roughness:

friction factor:

**Ilustración 54: Diagrama de moody online.**

**Fuente:** [https://www.advdelpphisys.com/michael\\_maley/moody\\_chart/](https://www.advdelpphisys.com/michael_maley/moody_chart/)

Por lo tanto,  $f=0,02$  aproximadamente, considerando que la longitud neta de las tuberías es 3 m aproximadamente, reemplazamos:

$$h_f = 0.0207 \frac{3 \text{ m}}{0.0254 \text{ m}} \frac{2.073^2}{2 * 9.81} = 0,535 \text{ m}$$

Para las pérdidas menores por fricción:

$$h_v = k \frac{v^2}{2g}$$

Donde k es:

$$k = ft \frac{Le}{D}$$

La longitud equivalente es de  $90Le/D$  que corresponde al valor de los 3 codos a 90 grados de la tabla 8.2 de la sección de anexos + La válvula la consideramos de globo, por lo que tendrá un  $Le/D$  de 340, en total tenemos  $400Le/D$

$$k = 0.0207(430) = 8,901 \text{ Le/D}$$

$$h_v = 8.901 * \frac{(2.073)^2}{2 * 9.81} = 1.95 \text{ m}$$

Partimos de que nuestro sistema va a mover un caudal de  $0.00105 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ , valor que es proporcionado por la bomba emisora agrícola LEO. Sabemos que tenemos los siguientes accesorios: 3 codos de  $90^\circ$ , citando la tabla 8.3(Anexo A) de longitudes equivalentes que está en nuestra sección de anexos, consideramos que, entre los 3 codos de interés, la longitud equivalente es de  $60Lc/D$ . Asumimos que la entrada del reservorio, es de borde redondo con  $k=0,5$ , dado que la salida estaría en el reservorio por debajo del nivel del agua, asumimos  $k=1$ , La válvula la consideramos de globo, por lo que tendrá un  $Lc/D$  de 340. Con temperatura ambiente la densidad del agua será de  $998 \text{ kg/m}^3$ , la viscosidad es de  $1.01 \times 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$ , la longitud neta de las tuberías es 3.1m. También consideramos que el diámetro de las tuberías es de 1 pulgada, por lo que el diámetro interno es de 0.0254m.

Z2, representa la altura de un reservorio 2, pero como solo poseemos un circuito cerrado donde solo hay un reservorio, este valor será 0, debido a que es la distancia de referencia y lo mismo podemos decir de la altura Z1, ya que el reservorio se encuentra al nivel del suelo,  $h_t$  es las pérdidas que tenemos en la turbina.

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + h_p = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_l + h_v + h_t$$

$$z_1 = h_l + h_v + h_t$$

$$-0.714m - 1.95m = h_t$$

$$h_t = -2.664m$$

Calculamos el caudal en el punto A, que es de salida de agua hacia el reservorio:

$$da = 0,0254m$$

$$A = \frac{\pi}{4} da^2 = 5,0671 \times 10^{-4} m^2$$

$$Q = AA \cdot VA = 5,0671 \times 10^{-4} m^2 \cdot 7,67 \frac{m}{s}$$

$$Q = 3,886 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s}$$

Con estos datos, procedemos a calcular la potencia generada por la turbina con la siguiente formula:

$$Pot = \gamma \cdot Q \cdot \Delta H \cdot \eta$$

En este aspecto realizaremos algunas suposiciones hasta tener la geometría definitiva de nuestra turbina, por lo que la eficiencia de la turbina la calcularemos con la siguiente formula:

$$\eta_{turbina} = \frac{\dot{W}_{eje}}{\rho * g * Q * hT}$$

donde  $\dot{W}_{eje} = T_{eje} * \omega$ , es decir el torque en el eje por la velocidad angular, y hT es la altura de caída.

Sabemos que el trabajo en el eje también se escribe con la siguiente formula:

$$\dot{W}_{eje} = \rho * Q * \frac{V_1^2}{2}$$

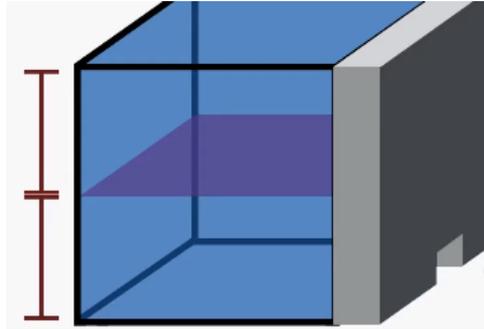
$$\dot{W}_{eje} = 9810 \frac{N}{m^3} * 3,886 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s} * \frac{\left(2,073 \frac{m}{s}\right)^2}{2}$$

$$\dot{W}_{eje} = 395,13 \frac{N * m}{s}$$

$$\eta_{turbina} = \frac{395,13}{998 * 9,81 * 0,00108 * 2,64} = 14,15\%$$

Este valor será contrastado con la teórica de Pumps as Turbines para calcular la eficiencia del sistema.

Debido a que usamos un reservorio a la altura del piso, tenemos algunas modificaciones, ya que el esquema cambia, tenemos:



**Ilustración 55: Reservorio sin elevación.**

En este caso tenemos, la altura del contenedor del reservorio es  $h = \frac{1}{2}(1,20m) = 0,6m$

Para calcular el hydroelectric power, usamos la siguiente ecuación:

$$Ep = \rho \cdot V \cdot g \cdot h$$

reemplazamos en la formula:

$$Ep = \rho \cdot V \cdot g \cdot h$$

$$Ep = \frac{1000\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2,184\text{m}^3 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,6\text{m} = 12,86 \times 10^3 \text{J}$$

$$E_{out} = E_{in} \cdot \eta_{turbina}$$

$$E_{out} = 12,86 \times 10^3 \text{J} \cdot 0,4 = 5,14 \times 10^3 \text{J}$$

Ahora para calcular la cantidad de energía mecánica usamos la siguiente formula:

$$e_{mecanica} = \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz$$

(gz) Hace referencia a la cabeza de la bomba impulsora, es decir la bomba LEO centrifuga Debido a que no se posee un reservorio elevado ni caída de agua, la altura es dada por la bomba emisora.

$$e_{mecanica} = \frac{p}{\rho} + \frac{(0,0207 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2} + 9,81 \cdot 30\text{m}$$

$$e_{mecanica} = \frac{997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{\rho} + \frac{(0,0207 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2} + 9,81 \cdot 30\text{m}$$

$$e_{mecanica} = 294,6$$

### Potencia eléctrica generada

Para calcular la velocidad angular usamos la siguiente ecuación:

$$\omega_i = \frac{v \cdot 60}{\pi \cdot D_i}$$

Donde  $D_i$  = diámetro del impulsor de la PAT, que es  $D_i = 12\text{cm} = 0.12\text{m}$

$$\omega_i = \frac{2.073 * 60}{\pi * 0.12} = 329.928 \left(\frac{1}{\text{min}}\right)$$

La velocidad en el eje de la PAT es:

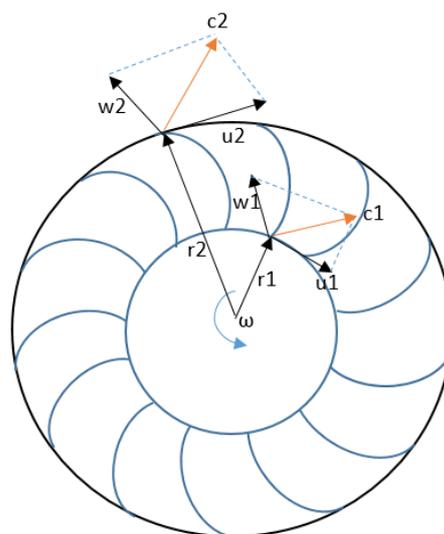
$$\omega_E = \frac{\omega_i * D_i}{D_e}$$

Donde  $D_e$  es el diámetro del eje, en nuestro caso 1,64cm

$$\omega_E = \frac{329.928 * 0.12}{0.0164} = 2414.11 \left(\frac{1}{\text{min}}\right)$$

### Ecuación de Euler:

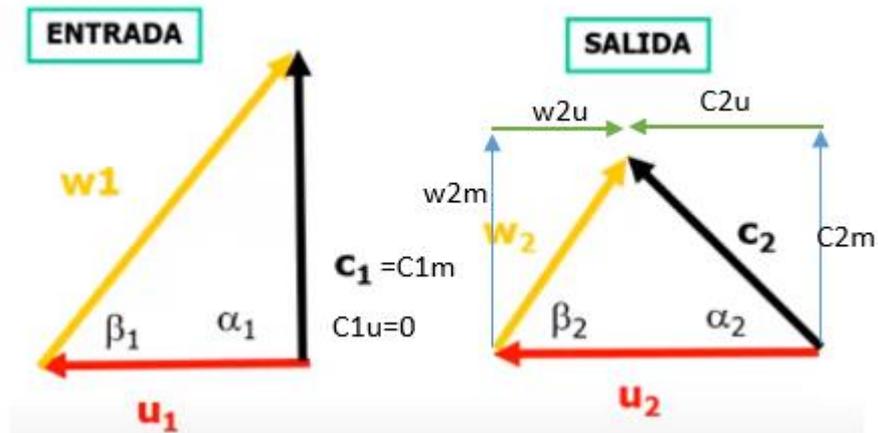
Dentro de nuestro análisis sabemos que con un impulsor de bomba convencional se busca aumentar la velocidad del fluido, la altura hasta donde se podría alcanzar con esas velocidades se denomina altura de Euler, en nuestro caso, al utilizar el proceso contrario, la altura final proporcionada se llega a conocer como altura de aprovechamiento, es decir la caída para mantener al rodete girando bajo las velocidades utilizadas. En nuestro caso este dato es un valor mínimo y si se incrementa la altura de caída del fluido se tendrá una mejor respuesta del rodete. Partimos de la ecuación de Euler para turbo maquinas, donde como primer paso obtenemos los triángulos de fuerzas en la entrada de nuestro rodete que corresponde a los datos con el número 1, y la salida corresponde a los datos con el número 2. Vector posición  $r_1$ , con velocidad  $v_1$ , salida en posición  $r_2$  y velocidad absoluta de salida  $v_2$ ,  $u_1$  = componente tangencial por la rotación del rodete y  $w_1$  es velocidad relativa,  $u_2$  = velocidad lineal de arrastre por rotación de rodete,  $w_2$  = velocidad tangente a salida del alabe.



**Ilustración 56: Vectores de velocidad**

Cabe destacar que, partimos de algunas suposiciones, primero necesitamos un rodete rápido por lo que, por recomendación, necesitamos cumplir con los siguientes parámetros, tenemos:

Consideramos que  $\alpha_1=30$  y  $\beta_1=120$ , nuestro  $D_2 = 18,2$  cm y  $D_1 = 8$  cm,  $\alpha_2=30$  y  $\beta_2=60$ ,  $n$  es la velocidad de rotación



*Ilustración 57: Entrada y salida de las cuchillas*

Considerando que  $B_1=120+a_1=30$ , sabemos que el Angulo superior será 30  
 Para calcular el caudal,  $Q=\pi*D_1*b_1(\text{ancho del rodete}) *C_{1\text{meridional}}=\pi*D_2* b_2(\text{ancho del rodete}) *C_{2\text{meridional}}$

Calculamos  $u_1$  que es la velocidad periférica 1

$$U_1 = \frac{\pi * D_1 * n}{60} = \frac{\pi * 0.08\text{m} * 500\text{rpm}}{60} = 2,064 \text{ m/s}$$

Calculamos  $u_2$  que es la velocidad periférica 2

$$U_2 = \frac{\pi * D_2 * n}{60} = \frac{\pi * 0.18\text{m} * 500\text{rpm}}{60} = 4,71 \text{ m/s}$$

$$U_1 = C_1 = C_{1m} = 2,064 \text{ m/s}$$

Sabemos que el ancho del rodete  $b_1=b_2=50\text{mm}$

$$Q=\pi*0.08\text{m}*0.05*2,064 \text{ m/s}=0.0259 \text{ m}^3/\text{s}$$

Altura de Euler

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

Consideramos que  $c_{1u}=0$ , para coincidir con los ejemplos de aplicación de la formula.

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

Esta altura es la que cae con el peso del fluido sobre el impeler.

$$u_2 = w_2 u + c_2 u, \text{ consideramos que } w_2 m = c_2 m$$

$$\tan \beta_2 = \frac{c_2 m}{w_2 u}$$

De la ecuación de continuidad sabemos:

$$Q = \pi * D_1 * b_1 (\text{ancho del rodete}) * C_{1\text{meridional}} = \pi * D_2 * b_2 (\text{ancho del rodete}) * C_{2\text{meridional}}$$

$$c_2 m = \frac{D_1}{D_2} * c_1 m = \frac{8}{18.2} * 2,064 \frac{m}{s} = 0.91 m/s$$

Ahora

$$c_2 u = u_2 - w_2 u$$

$$w_2 u = \frac{c_2 m}{\tan \beta_2} = \frac{0.91 m}{\tan 60} = 2.83 m/s$$

Reemplazamos:

$$c_2 u = 4,71 \frac{m}{s} - \frac{2.83 m}{s} = 1.88 m/s$$

Procedemos a calcular la altura de Euler

$$H_{R\infty} = \frac{u_2 * c_2 u}{g} = \frac{4,71 \frac{m}{s} * 1.88 m/s}{9.81 m/s^2} = 0.903 m$$

Por lo tanto, la altura mínima de aprovechamiento es de 0.903 m pero al existir una mayor altura, el rendimiento del rodete aumentará.

## RENDIMIENTO DEL SISTEMA

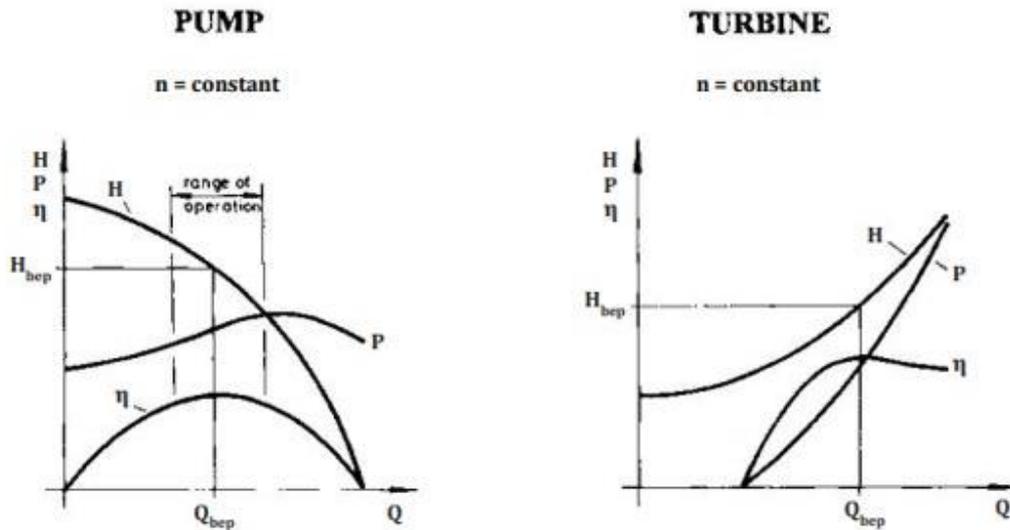
Para encontrar la eficiencia del sistema, partimos del concepto del punto de diseño o Best Efficient Point, o BEP, el cual nos relaciona el caudal necesario para llegar a mantener la mejor operación de nuestro sistema:

Una de las principales desventajas de crear una bomba como turbina es poder caracterizar el rendimiento que tendrá la PAT al funcionar, debido a que no existe como tal una fórmula o ecuaciones estandarizadas que demuestren el rendimiento que tendrá una bomba al funcionar como turbina. Frente a esto, se han producido una gran variedad de correlaciones empíricas diferentes, que a su vez producen una amplia gama de resultados. Sin embargo, un factor común es que el punto de funcionamiento óptimo de una PAT es superior, tanto en altura como en caudal, al de la bomba de la que procede, debido principalmente a la reducción de altura causada por las distintas pérdidas (1). En los últimos años, el rendimiento de las turbinas se ha predicho mediante CFD, pero estos resultados no son fiables a menos

que se verifiquen con datos experimentales. Los dos enfoques empíricos principales que se han adoptado para predecir el rendimiento de las turbinas son, o bien relacionar las relaciones de altura y caudal con el rendimiento de la bomba, o bien utilizar su velocidad específica [1]. En 1994, el autor Williams en su paper “The Turbine Performance of Centrifugal Pumps: A Comparison of Prediction Methods” investigó un total de ocho técnicas de predicción diferentes y comparó la precisión de los modelos. En la siguiente tabla se muestran las investigaciones realizadas en base al cálculo del rendimiento de una bomba funcionando como turbina.

Name of method/investigator	Based on	Head correction factor $\tilde{h}$	Discharge correction factor $\tilde{q}$
Childs	BEP	$\frac{1}{\eta_p}$	$\frac{1}{\eta_p}$
Hancock	BEP	$\frac{1}{\eta_t}$	$\frac{1}{\eta_t}$
Stepanoff	BEP	$\frac{1}{\eta_p}$	$\frac{1}{\sqrt{\eta_p}}$
Sharma	BEP	$\frac{1}{\eta_p^{1.2}}$	$\frac{1}{\eta_p^{0.8}}$
Alatorre-Frenk	BEP	$\frac{1}{0.85\eta_p^5 + 0.385}$	$\frac{0.85\eta_p^5 + 0.385}{2\eta_p^{9.5} + 0.205}$
Schmiedl	BEP	$-1.4 + \frac{2.5}{\eta_{hp}}$	$-1.5 + \frac{2.4}{\eta_{hp}^2}$
Grover	Specific speed	$2.693 - 0.0229N_{st}$	$2.379 - 0.0264N_{st}$
Hergt	Specific speed	$1.3 - \frac{6}{N_{st} - 3}$	$1.3 - \frac{1.6}{N_{st} - 5}$

*Ilustración 58: Diferentes métodos de predicción de rendimiento investigados por Williams (1994).*



*Ilustración 59: Gráfica de rendimiento de una bomba, y de una turbina.*

Para el desarrollo de la tabla de ecuaciones de rendimiento, se basó principalmente en encontrar el punto de mayor eficiencia (Best Efficient Point BEP) de la turbina, el cual muestra principalmente el mejor punto de funcionamiento del mismo, haciendo referencia a la cantidad de caudal que circula por la turbina (1).

Hasta ahora sólo se ha abordado el rendimiento en el punto de mejor eficiencia. Sin embargo, es muy interesante poder predecir cómo se comportará la PAT a ambos lados de este punto, ya que el funcionamiento BEP es difícil de mantener para una PAT sin álabes guía. Para realizar el rendimiento de nuestro sistema PAT, se utilizará la ecuación dimensional del momento presentada por Nielsen, donde se extraerán las principales dos ecuaciones de altura de cabeza de bomba, y caudal para realizar las gráficas de rendimiento del sistema:

$$H_t = \frac{\left(\frac{nD_2}{n_{ed}}\right)^2}{g}$$

$$Q_t = Q_{ed} D_2 \sqrt{g H_t}$$

Donde:

$Q_t$  = Caudal que ingresa a la turbina.

$H_t$  = Altura de cabeza de bomba de la turbina.

$Q_{ed}$  = Factor de caudal.

$D_2$  = Diámetro interno de ingreso.

$n_{ed}$  = Factor de velocidad.

$n$  = velocidad rotacional.

$g$  = Gravedad.

Para calcular la eficiencia de la PAT, se realizaron las pruebas mediante diferentes flujos de caudal, en donde se analiza principalmente el voltaje que se genera, y las revoluciones por minuto a las que está sometido el rotor de la bomba. Todos estos datos se preparan en una tabla en Excel, para posteriormente utilizarlos en las ecuaciones, y analizar las gráficas de altura de cabeza de bomba, y eficiencia del sistema.

Para calcular la potencia, se utilizará la siguiente fórmula:

$$P = V * I$$

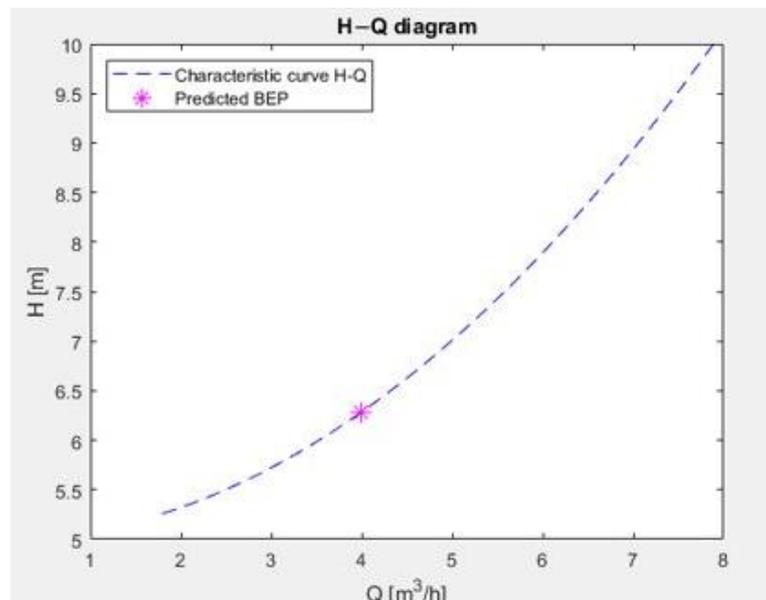
Donde:

$V$  = Voltaje

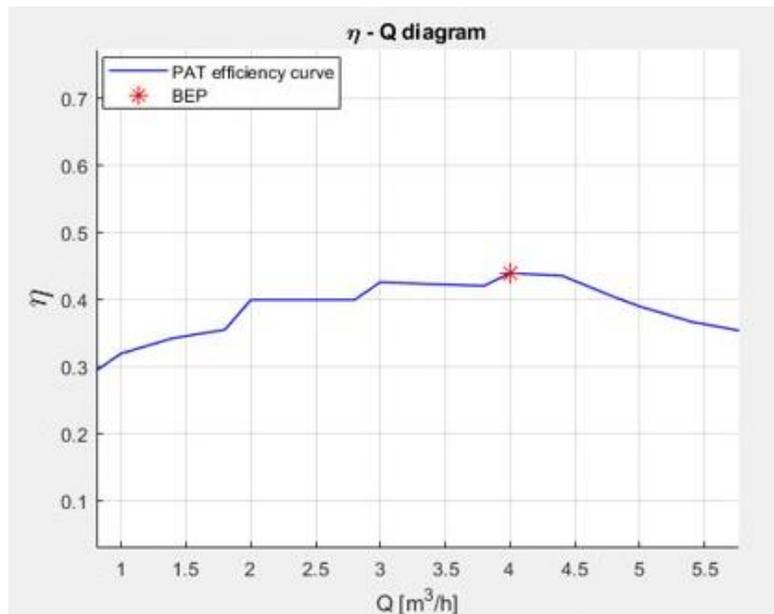
$I$  = Corriente

El proceso para calcular los valores de voltaje y corriente se realizaron mediante pruebas hidráulicas, donde se utilizará un multímetro en las terminales de la PAT, para observar el valor de voltaje y corriente al funcionar el sistema, con diferentes valores de caudal que se proporciona, para analizar la tendencia de la potencia.

Las diferentes ecuaciones y gráficas se desarrollaron utilizando el software MATLAB, donde se obtuvieron los siguientes resultados:



**Ilustración 60: Gráfica H-Q del sistema PAT**



**Ilustración 61: Gráfica de eficiencia del sistema PAT**

La característica de altura de bomba vs caudal H-Q de la PAT se estableció ajustando la válvula y el caudal de entrada. Se puede observar que esta gráfica tiene tendencia exponencial, debido a que la operación en modo turbina es contraria al funcionamiento como bomba. Una bomba de agua al tener más caudal en el sistema es más difícil que obtenga más alcance de altura, debido a que necesitaría más potencia para lograr superar la altura máxima, entonces, en una bomba, a más caudal de ingreso, menos altura proporcionará. En cambio, en el funcionamiento como turbina, mientras más caudal ingrese, la altura de cabeza de bomba será mayor, debido a que su funcionamiento genera potencia, y la altura crece similar a un ritmo exponencial, como se muestra en la figura y, además, nos indica que nuestro sistema está funcionando de manera adecuada.

En cuanto a la gráfica de eficiencia, se puede apreciar un crecimiento de la gráfica hasta llegar a un caudal de 4 [m³/h] se obtiene el pico más alto de eficiencia, el cual es del 44%, valor que coincide con la explicación teórica de bombas como turbinas, donde nunca se excede del 60% de eficiencia al ser una modificación. La gráfica se comporta de manera creciente, con diferentes picos y secuencia constante. La explicación que se puede dar en cuanto a este comportamiento de la gráfica es debido al refluo de agua que se crea en la voluta de la bomba, el cual provoca un ligero cambio en la velocidad del impeler por la dirección contraria del paso de agua cuando existe el refluo, sin embargo, al aumentar el caudal, también aumentan las revoluciones por minuto del rotor del sistema. A partir de los 4.5 [m³/h] podemos observar una ligera caída de caudal, debido al estrangulamiento que se

genera al pasar más flujo de agua, lo que provoca una ligera caída de voltaje, y por ende, de eficiencia.

Para obtener las gráficas del sistema se utilizó el siguiente código en MatLab

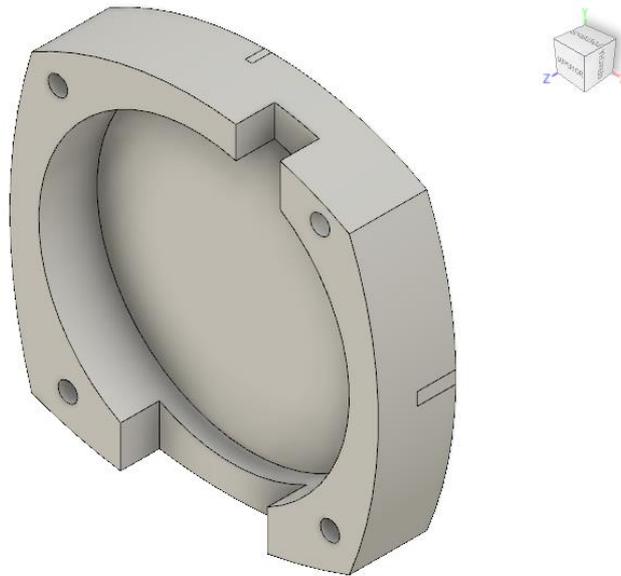
```
n=[950:1:2150];
%PAT
for i=1:length(n)
    if (1-(sigma*((n(i)/n_R)^2-1)))<0
        q(i)=-sqrt(abs(1-(sigma*((n(i)/n_R)^2-1))));
        Q(i)=q(i)*Q_R;
        n_ed(i)=n(i)*(D2/sqrt(g*H_R));
        Q_ed(i)=Q(i)/(D2^2*sqrt(g*H_R));
        H(i)=((n_R*D2)/n_ed(i))^2/g;
        Q(i)=Q_ed(i)*D2^2*sqrt(g*H(i));
    else
        q(i)=sqrt(1-(sigma*((n(i)/n_R)^2-1)));
        Q(i)=q(i)*Q_R;
        n_ed(i)=n(i)*(D2/sqrt(g*H_R));
        Q_ed(i)=Q(i)/(D2^2*sqrt(g*H_R));
        H(i)=((n_R*D2)/n_ed(i))^2/g;
        Q(i)=Q_ed(i)*D2^2*sqrt(g*H(i));
    end
end
```

***Ilustración 62: Código de MatLab.***

El resto del código para obtener la eficiencia del sistema, se encuentra en el (Anexo M).

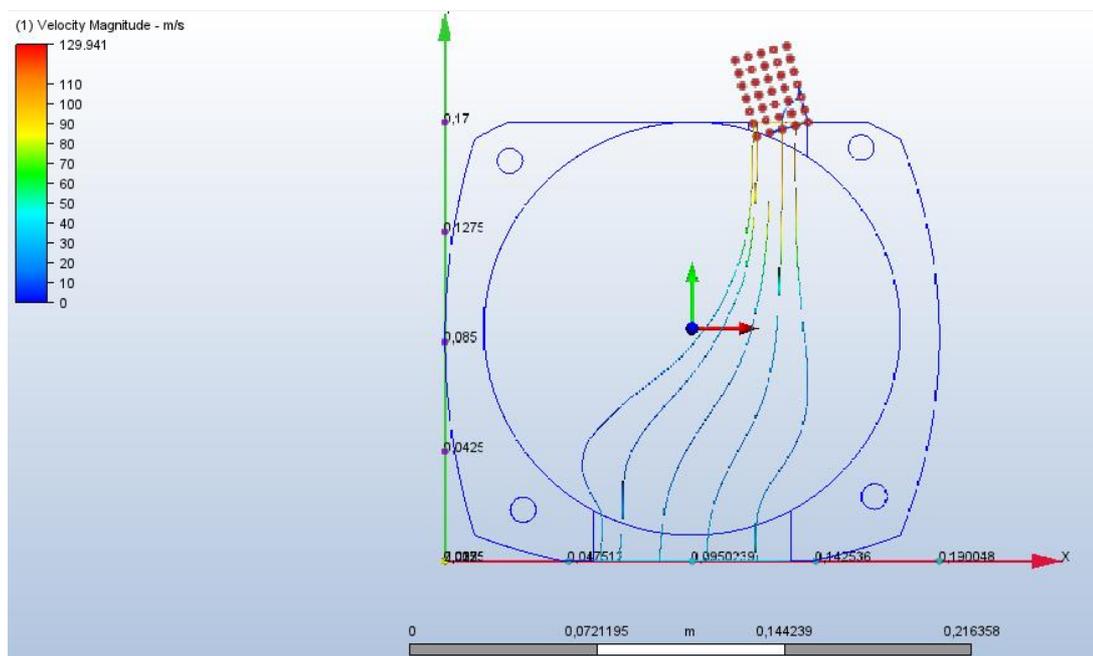
## SIMULACIONES

Para la realización de las simulaciones, decidimos hacer un corte en la sección transversal de la voluta, que nos permite apreciar el ingreso y la salida del fluido, a través de la sección de simulación para carga estática del programa Fusión 360, se recreó dos cuerpos, uno de ellos que es la voluta y otro interno que representa al fluido, partiendo del cuerpo de la ilustración 66, se procedió a llevar al diseño a la interfaz de Autodesk CFD, para realizar las simulaciones dinámicas de ingreso y salida del agua.



***Ilustración 63: Corte de la Voluta para Simulación***

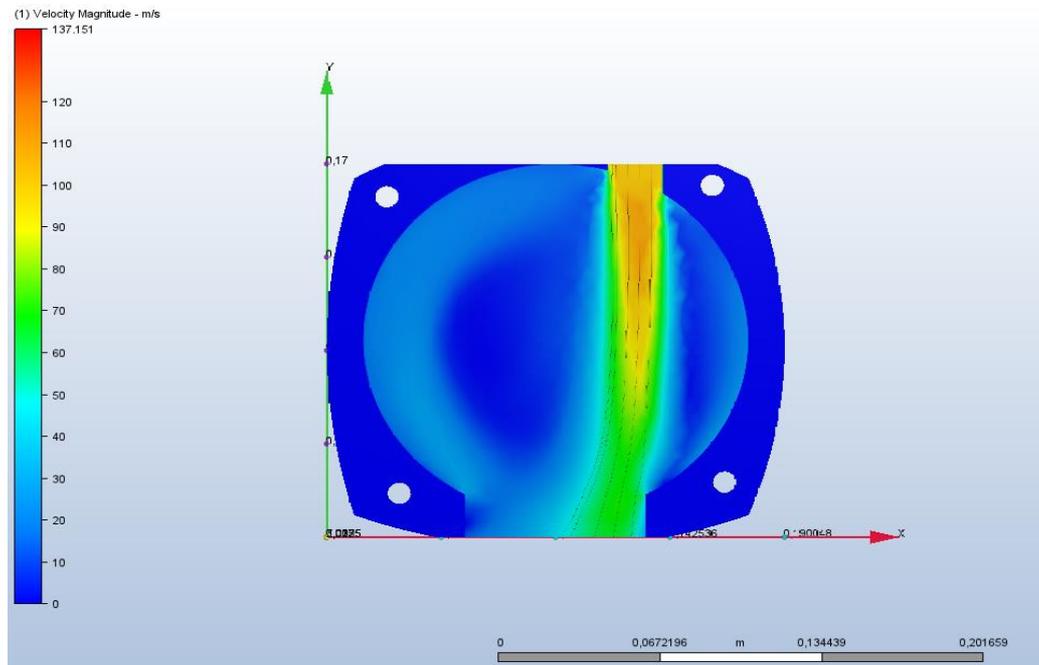
Dentro de nuestras iteraciones en el taller, se pudo constatar la existencia de un estrangulamiento y un almacenamiento no deseado de agua dentro de la voluta, razón por la que se decidió reducir este efecto a través de una abertura en la zona baja de la voluta, para comprobar el comportamiento de los fluidos dentro de la misma se realizó simulaciones en CFD, se obtuvo lo siguiente:



***Ilustración 64: líneas de flujo***

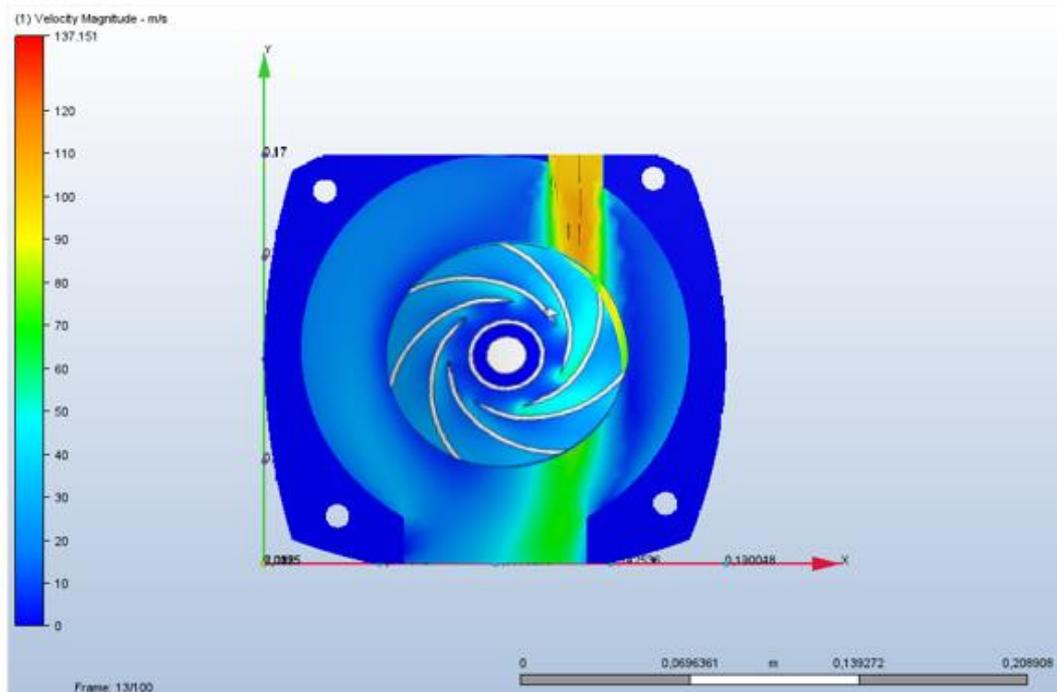
Ahora procedemos a observar el comportamiento del fluido según su velocidad de ingreso, se puede apreciar las líneas de flujo que recorren el cuerpo de la voluta, Para realizar

un escenario que, con condiciones críticas, mantenga una salida en la zona deseada, sin afectar al el rendimiento del rodete, se decidió usar un valor de velocidad de ingreso del fluido de 100 m/s, lo cual es exagerado si se compara con los datos reales, donde el fluido viaja en nuestro sistema con una velocidad de 2 m/s, tras simular las líneas de flujo se procedió a observar el comportamiento de la masa de agua donde se obtuvo lo siguiente:



***Ilustración 65: Trayectoria del fluido***

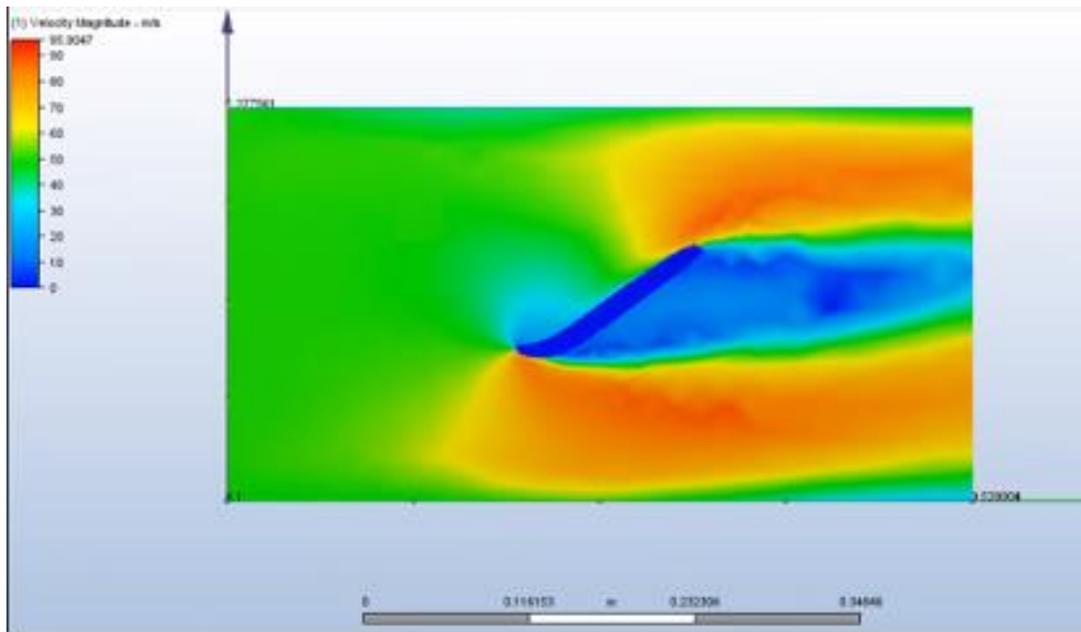
Al observar el comportamiento del fluido desde el ingreso hacia la salida de la voluta, a través de la paleta de colores, podemos apreciar donde las zonas con colores más cálidos, representan, las partes donde el fluido ingresa a mayor velocidad, que es un comportamiento esperado debido a la reducción de área, provocando un efecto Venturi en el ingreso, pero esta se ve reducida tras el cambio de sección, donde no se llega a superar valores superiores a los 110 m/s, y la velocidad del fluido cae rápidamente hacia la salida con una sección de salida de mayores dimensiones.



***Ilustración 66: Reacción del impulsor***

En la ilustración 69 se puede apreciar el cambio en términos de velocidad del comportamiento del fluido tras entrar en contacto con el rodete, el cual reduce rápidamente la velocidad, distribuyéndose a través de la geometría de las cuchillas del rodete, dirigiendo la trayectoria del fluido, sin embargo, en la salida de la misma se puede observar como al llegar a la zona de salida de la voluta, se llega a un comportamiento similar al de la ilustración 68 donde la velocidad cae a la mitad de la velocidad de ingreso, es decir a 50 m/s.

Se buscó observar la respuesta de la geometría de una de las cuchillas del rodete de reacción al suministrarle caudal directamente, proceso similar a las simulaciones de perfiles alares donde el fluido es disparado directamente a las mismas en condiciones ideales, donde obtuvimos el siguiente comportamiento:



*Ilustración 67: Simulación de paleta de rodete.*

Se suministró una velocidad de fluido de 50 m/s de ingreso a la zona de ataque del perfil de la cuchilla, donde se puede observar cómo tras la zona de contacto con la cuchilla, se presenta un comportamiento de fluido más laminar y a menor velocidad, mientras en el ingreso al igual que en la salida, la velocidad del fluido incrementa a un valor de 80 m/s, este comportamiento se da por el cambio de dirección del fluido respecto a la geometría de contacto que obliga a el fluido a distribuirse fuera del cuerpo de la cuchilla, lo que hace que se presente un aumento en la velocidad en ambas zonas libres del contacto.

### PRUEBAS DEL SISTEMA

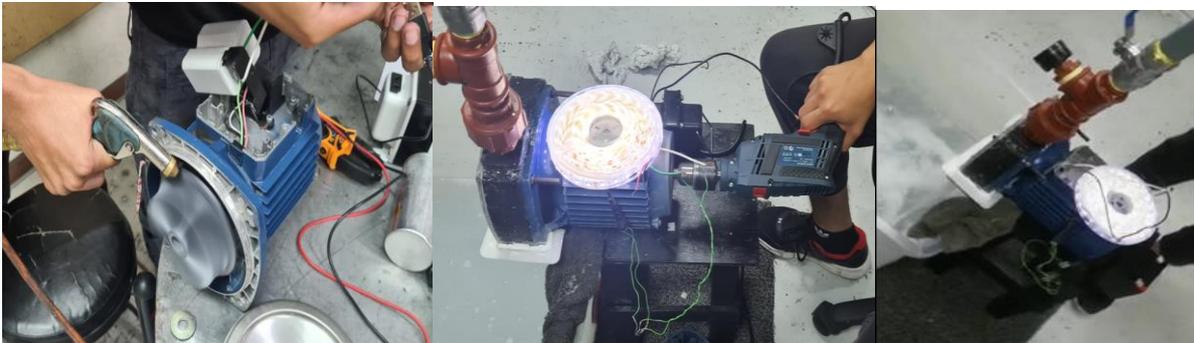
Partiendo de los siguientes requerimientos de nuestro cliente:

Requerimientos
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Crear un sistema a partir de una bomba, capaz de generar electricidad con modificaciones mínimas.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• A través de distintos métodos, comprobar que la generación eléctrica es viable tanto con energía mecánica como hidráulica.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las modificaciones del sistema deben adaptarse a la estructura original de la bomba, sin comprometer el funcionamiento original de la misma, en caso de que se desee, se puede usar la bomba de manera original.</li> </ul>

- El sistema debe ser económico, por lo que en total debe costearse por debajo de un generador o alternativa convencional, pero si puede ser más costoso que una bomba.
- Debe ser adaptable y replicable en distintos escenarios, no se debe considerar sistemas complementarios como represas, reservorios o tomas de agua de fuente natural en esta etapa de la investigación, se debe considerar que se tiene caudal constante.

***Ilustración 68: Requerimientos***

Se realizaron tres tipos de pruebas, una prueba final hidráulica, donde se proporciona caudal con la ayuda de una bomba centrífuga de agua marca LEO de 1 HP, que proporcionaba un caudal fijo, al igual que se realizó pruebas mecánicas con un compresor y con un taladro:



***Ilustración 69: Pruebas***

Se puede encontrar a mayor detalle las pruebas del sistema en el (Anexo D) al igual que cálculos complementarios realizados en Excel en el (Anexo E).

Se pudo constatar que ambos impulsores llegaban a valores muy similares de rpm, por lo que se decidió mantener el impulsor de reacción con cuchillas invertidas como el rodete oficial, por tener alabes más robustos que el impulsor tomado de GrabCad.

**COSTOS DEL PROTOTIPO:**

El costo de los componentes que forman parte de nuestro prototipo Se presentan en la tabla, de los cuales existe las letras N/A que significa no aplica, al retomar una investigación previa, pudimos ocupar varias de las tuberías y accesorios del sistema de la investigación anterior, de la cual podemos contrastar con los costos totales de fabricación de la misma, tenemos:

Costos			
Articulo	Cantidad	Prototipo (USD)	Final (USD)
Bomba pedrollo Cent 1 HP	1	N/A	235
Bomba Leo agrigola 1HP	1	182	182
Mano de obra	1	N/A	14,06
Rotor 6 muescas	1	N/A	11,5
Imanes neodimio	24	45	30
Impulsor rapido	1	N/A	15
Manómetros	2	N/A	50
Tubo PVC 3 m (1 Pulg)	2	N/A	7,6
Inversor	1	20	20
Luces LED	1	10	10
Puente de diodos	1	4	4
Batería 12 V- 5 A	1	10	10
Pernos M12 (10mm x 160mm)	4	8	8
Unión universal	6	N/A	7,44
Codos 90 (1 pulg)	2	N/A	3,68
Reservorio	1	N/A	10,99
Retazo de acrilico	1	5	5
Madera	3	3	3
Tira de caucho (1 m)	1	3	3
Reductor de voltaje	1	3,9	3,9
Ventilados 12 V	1	2,9	2,9
Silicon	1	5	5
Total [USD]		301,8	642,07

**Tabla 25: Costos**

Se puede contrastar estos precios con equipos que se encuentran en el mercado, donde se puede apreciar la diferencia en precios de nuestro sistema en comparación a otros más convencionales, lo que hace realmente atractiva a esta opción, debido a que dispositivos similares cuestan considerablemente más que el desarrollado por nuestro equipo, el cual hace más viable el utilizar varias unidades de nuestra variante de bomba como turbina (PAT), respecto a otros sistemas por su complejidad y su alto costo, podemos apreciar los precios de referencia de sistemas de micro generación eléctrica en el (Anexo K).

## RESULTADOS

Con las iteraciones descritas en la sección de pruebas del sistema se obtuvo los siguientes resultados:

Pruebas hidráulicas								
Caudal Q		RPM (prom)	Presion	Pruebas	Corriente (A)	Potencia (W)	Voltaje AC (V)	Voltaje DC (V)
0,0010897	m <sup>3</sup> /s	1819	P1=6 psi ; 0,41 bar	Con transformador	0,07	0,98	14	22,45
65,217	l/min		P2= 14 psi ; 0,85 bar	Sin Transformador	0,14	1,12	8	15,12
Pruebas mecánicas (Taladro)								
RPM (Prom)		Pruebas		Corriente (A)	Potencia (W)	Voltaje AC (V)	Voltaje DC (V)	
2954		Con transformador		0,37	7,6997	20,81	33,12	
		Sin Transformador		0,476	4,96468	10,43	17,15	
Pruebas mecánicas (Compresor)								
RPM (Prom)		Pruebas		Corriente (A)	Potencia (W)	Voltaje AC (V)	Voltaje DC (V)	
3122		Con transformador		0,212	5,09224	24,02	31,34	
		Sin Transformador		0,523	6,34922	12,14	19,54	

**Tabla 26: Resultados de pruebas en sistema PAT**

Tras la realización de pruebas se puede apreciar como al tener pruebas mecánicas, produciendo movimiento directamente en el eje del rotor, se produce más voltaje que con las pruebas hidráulicas, esto se puede dar por el hecho de tener cierto reflujo y que el caudal de 65,7 l/min resulta ser muy agresivo para el sistema. También se puede observar que con transformador aumenta el voltaje al doble del valor obtenido sin el mismo, sin embargo, el amperaje, es decir el valor de corriente cae, lo que hace que en términos de potencia tengamos apenas unas cuantas unidades por encima de del valor calculado sin transformador. Se puede apreciar como durante la realización de las pruebas del sistema, nunca se llega a superar la velocidad nominal de la bomba que se encuentra por arriba del 3450 rpm, lo cual es uno de los objetivos planteados, ya que el sistema puede responder con generación en condiciones de poco represamiento y de un bajo ingreso de caudal, con las pruebas hidráulicas se logró 1,12W con apenas 1819 rpm, que es muy importante para nosotros porque describe una naturaleza que posiblemente se llegue a tener en la zona de aplicación de la misma. Los datos de corriente se calcularon a través de la ley de Ohm, donde potencia es igual a voltaje por corriente, razón por la que se midió tanto corriente como voltaje en todas las pruebas.

Nosotros logramos reducir las pérdidas del sistema respecto a el trabajo realizado por Victo Gallo (ICV) debido a que reducimos los tamaños de las tuberías para perdidas mayores y usamos menos accesorios, que nos da valores menores de perdidas menores, habiendo un mayor aprovechamiento del sistema.

### CONCLUSIONES:

- Las bombas utilizadas como turbinas son una fuente energética barata en comparación a otras opciones comerciales, que resulta atractiva por su bajo costo.

- Se logró cumplir el objetivo, generando electricidad sin necesidad de un alto consumo energético previo, ya que se decidió usar un rotor de imán permanente en lugar de la teoría de generadores asíncronos, lo que hace que se pueda generar electricidad sin necesidad de arrancar el motor consumiendo electricidad de la red.
- Al partir de una bomba, se puede conseguir una gran cantidad de repuestos económicos y que se puedan adaptar a nuestra escala, al estar destinada a comunidades con abundancia de recursos hídricos, se puede mantener al sistema bajo operación constante, sin embargo, por tener 6 polos magnéticos es posible generar electricidad con menos RPMs haciendo viable su uso sin necesidad de gran capacidad de represamiento.
- Se llegó a completar la parte electrónica, complementando un dispositivo de regulación para variar el voltaje según se desee, de la misma forma se incorporó una batería para ofrecer al usuario energía cuando este lo desee sin necesidad de mantener al equipo trabajando.
- Se optimizó la generación reduciendo las pérdidas que serán de importancia para la futura adaptación del sistema en el campo.

### **PASOS FUTUROS:**

Para aplicaciones futuras o para la continuación de esta investigación nosotros recomendamos primero para aumentar la capacidad de la generación eléctrica, se debe rebobinar la bomba, ya que de esta manera se aumentarían las espiras de las bobinas, lo que implícitamente hace necesario a su vez aumentar el número de polos magnéticos, donde se podría mejorar la generación con menos revoluciones, partiendo de un esquema similar al de un generador.



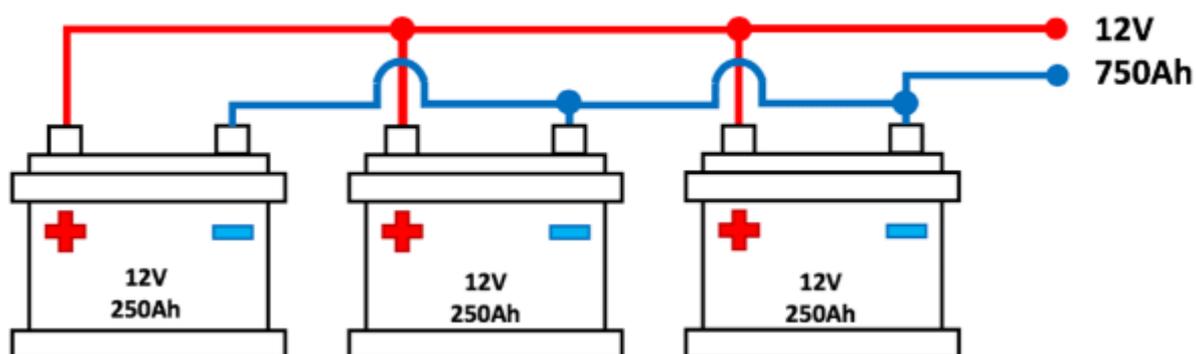
***Ilustración 70: Rotor y estator de un generador***

**Fuente:** [https://es.made-in-china.com/co\\_yamadaparts/product\\_High-Quality-2-2kVA-3kw-168f-Power-Generator-Motor-Rotor-Stator\\_rgnigirhg.html](https://es.made-in-china.com/co_yamadaparts/product_High-Quality-2-2kVA-3kw-168f-Power-Generator-Motor-Rotor-Stator_rgnigirhg.html)

Esta modificación es viable si no se desea tener las capacidades de la bomba original, ya que prácticamente al realizar este tipo de modificaciones nos centraríamos en que esta bomba se convierta en un generador. Para una aplicación dentro de las condiciones ambientales y de represamiento adecuadas, recomendamos el uso de la bomba centrífuga de eje libre, está tiene la geometría de la concha de la voluta que beneficia el movimiento del fluido operando en ambos sentidos siendo la única que posee datos de operación en sentido inverso (Anexo C). Al tener un ingreso y una salida que se comunican con una brida de 3 pulgadas no existe ningún tipo de estrangulamiento haciéndola ideal para condiciones de bombeo, necesitando si un alto volumen de caudal, es un sistema ideal para redes de distribución de agua donde es más aprovechable este sistema.

En cuestión de la aplicación, es necesario estudiar los materiales más atractivos para su uso en el campo, ya que nosotros utilizamos materiales que hacen viable su ejecución en condiciones de laboratorio, pero para evitar tener problemas de desgaste, corrosión y una posible falla, debe usarse un material similar en la voluta al que se posee en el cuerpo de la bomba, como lo es el hierro fundido con tratamiento de cataforesis con bocas roscadas ISO 228/1 (Anexo L). Con estas adaptaciones podría llegar a aumentar el costo sin embargo no llegaría a ser más costosa que una de las alternativas comerciales por su tamaño y tipo de bomba.

Para mejorar el rendimiento se podría conectar varias baterías en paralelo, ya que así se podría aumentar el amperaje, pero usando el mismo voltaje.



**Ilustración 71: Baterías en paralelo. ( Tierras Insólitas)**

Esta modificación debe ser instalado exclusivamente por personal altamente capacitado, ya que, al elevar el amperaje, hay riesgo de muerte si llega a haber una descarga,

por lo que estas baterías deben estar fuera del alcance del usuario y fuera de contacto con el medio ambiente.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agarwal, T. (2012). Review of pump as turbine (PAT) for micro hydropower. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(11), 163-169.
- Alatorre-Frenk, C. (1994). Minimización de costes en microsistemas hidroeléctricos utilizando bombas como turbinas.
- Applied Flow Technology. (7 de abril del 2022) Pumps as Turbines PAT [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=5RBaxrBQAIY&t=976s>
- American Society of Mechanical Engineers (2001). Specification for Horizontal End Suction Centrifugal Pumps for Chemical Process (ASME B73.1). <https://es.scribd.com/doc/277071397/ASME-B73-1-2001>
- Barbarelli, S., M. Amelio, and G. Florio. “Experimental Activity at Test Rig Validating Correlations to Select Pumps Running as Turbines in Micro Hydro Plants.” *Energy conversion and management* 149 (2017): 781–797. Web.
- Binama, M., Su, W. T., Li, X. B., Li, F. C., Wei, X. Z. y An, S. (2017). Investigación sobre los aspectos técnicos de la bomba como turbina (PAT) para esquemas de micro hidroelectricidad: una revisión del estado del arte. *Revisiones de energía renovable y sostenible*, 79, 148-179.
- Carraveta, Derakshan et.al (2011). *Pumps as Turbines Fundamentals and applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-67507-7>
- Cabelllo, J. (2022) Motores eléctricos Características Cómo Seleccionarlos Elegir: HP RPM Volts Monofásicos o Trifásicos. *Servicios Control y Automatización*. Youtube. [Video]. <https://www.youtube.com/watch?v=aZn5RPrVfB0>
- Munson, Bruce Roy, 1940-. (2013). *Fundamentals of fluid mechanics*. Hoboken, NJ :John Wiley & Sons, Inc.
- Spedaletti, Samuele et al. “Energy Recovery in Gravity Adduction Pipelines of a Water Supply System (WSS) for Urban Areas Using Pumps-as-Turbines (PaTs).” *Sustainable energy technologies and assessments* 45 (2021): 101040–. Web.

- Çetin, N. S., Yurdusev, M. A., Ata, R., & Özdamar, A. (2005). Assessment of optimum tip speed ratio of wind turbines. *Mathematical and Computational Applications*, 10(1),147-154.
- Parada, W. (2021). GENERADOR ASÍNCRONO. YouTube. [Video].  
[https://www.youtube.com/watch?v=LcGNLV\\_hcis](https://www.youtube.com/watch?v=LcGNLV_hcis)
- Oviedo, E. (2020). Diferencias entre motor Síncrono y motor asíncrono. YouTube. [Video].<https://www.youtube.com/watch?v=hFRHI-06cIw>
- S/A. (2021). ¿Cómo funciona la Electricidad Trifásica? Principios básicos ↯ - Bien explicado. *AcademiaDII*. [Video].  
<https://www.youtube.com/watch?v=RXV0amXcOWg>
- López, A. (2021). ¿Qué es una bomba funcionando como turbina (PAT)? || UPV. *Universitat Politècnica de Valencia UPV*. [Video].  
<https://www.youtube.com/watch?v=GnLX6jcxvpU&t=24s>
- S/A. (2018). Mantenimiento de turbinas. *Renovetec*. Recuperado el 23 de octubre del 2022 de <https://www.renovetec.com/590-mantenimiento-industrial/110-mantenimiento-industrial/308-mantenimiento-de-turbinas-de-vapor>
- S/A. (2018). Mantenimiento de turbinas. *Renovetec*. Recuperado el 23 de octubre del 2022 de <https://www.renovetec.com/590-mantenimiento-industrial/110-mantenimiento-industrial/308-mantenimiento-de-turbinas-de-vapor>
- Valdivieso, J. (2010). diseño de un plan de mantenimiento preventivo para la empresa extruplas s.a.. Recuperado el 23 de octubre del 2022 de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/831/12/UPS-CT001680.pdf>
- Quintana, N. (2019). Diseño de un plan de mantenimiento y elaboración de propuestas de mejora para el proceso productivo en la empresa indubolsas. Recuperado el 23 de octubre del 2022 de <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/8694ff12-2171-4551-bff5-7254f918d99e/content>
- Galvis Montero, S. J. (2019). Diseño e implementación de dispositivo de conmutación para el funcionamiento del sistema bomba-turbina.
- International Organization for Standardization (2010). Centrifugal pumps for petroleum petrochemical and natural gas industries (ISO 13079).  
<http://www.rashidipumpag.com/files/API%20610%20,%2011th.pdf>

- Instituto Ecuatoriano de Normalización- INEN (2009), Tubería plástica. tubería de pvc rígido para usos sanitarios en sistemas a gravedad. requisitos. (INEN - 1374) <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/1374.pdf>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización- INEN (2014), Turbinas hidráulicas, bombas de acumulación y turbinas-bombas. documentación de petición de ofertas. parte 6: recomendaciones para las especificaciones técnicas de las turbinas-bombas. (NTE INEN-IEC 61366-6).  
[https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/NTE\\_INEN\\_IEC\\_61366\\_6.pdf](https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/NTE_INEN_IEC_61366_6.pdf)
- Instituto Ecuatoriano de Normalización- INEN (2014), turbinas hidráulicas, bombas de acumulación y turbinas - cavitación evaluación picaduras - parte 1: evaluación de las turbinas de reacción, bombas de acumulación y turbinas (nte inen-iec 60609- 1).  
[https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/NTE\\_INEN\\_IEC\\_60609\\_1.pdf](https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/NTE_INEN_IEC_60609_1.pdf)
- Rodríguez Mier, A. (2017). Mejoramiento de la eficiencia de una bomba operando como turbina.
- Laín Beatove, S., García Ruiz, M. J., Quintero Arboleda, B., & Orrego Bustamante, S. (2008). Simulación numérica del flujo en turbo máquinas hidráulicas. Estado del arte y fuentes de error. Aplicación a turbinas francis. *Revista Universidad EAFIT*, 44(152), 90-114.
- Cely Valderrama, E. J., & Pérez Carreño, J. M. (2018). Evaluación del desempeño de una bomba centrífuga operando como turbina.
- Valles, L., España, L., & Serrato, C. (2020). *Predicción para el reemplazamiento de bombas*. Obtenido de <http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/v10n2/10-2-2.pdf>
- Valdivieso, J. (2010). diseño de un plan de mantenimiento preventivo para la empresa extruplas s.a.. Recuperado el 23 de octubre del 2022 de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/831/12/UPS-CT001680.pdf>
- Quintana, N. (2019). Diseño de un plan de mantenimiento y elaboración de propuestas de mejora para el proceso productivo en la empresa indubolsas. Recuperado el 23 de octubre del 2022 de

<https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/8694ff12-2171-4551-bff5-7254f918d99e/content>

Tierras Insolitas. (2022). Conectar BATERÍAS en PARALELO, peligros y soluciones.

Recuperado el 20 de diciembre del 2022 del

<https://www.tierrasinsolitas.com/conectar-baterias-en-paralelo/>

Galvis Montero, S. J. (2019). Diseño e implementación de dispositivo de conmutación para el funcionamiento del sistema bomba-turbina.

Rodríguez Mier, A. (2017). Mejoramiento de la eficiencia de una bomba operando como turbina.

Laín Beatove, S., García Ruiz, M. J., Quintero Arboleda, B., & Orrego Bustamante, S. (2008). Simulación numérica del flujo en turbo máquinas hidráulicas. Estado del arte y fuentes de error. Aplicación a turbinas francis. *Revista Universidad EAFIT*, 44(152), 90-114.

Cely Valderrama, E. J., & Pérez Carreño, J. M. (2018). Evaluación del desempeño de una bomba centrífuga operando como turbina.

Valles, L., España, L., & Serrato, C. (2020). *Predicción para el reemplazamiento de bombas*. Obtenido de

<http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/v10n2/10-2-2.pdf>

Delgado, J. et al. "Variable Speed Operation of Centrifugal Pumps Running as Turbines. Experimental Investigation." *Renewable energy* 142 (2019): 437–450. Web.

Giosio, D. R., Henderson, A. D., Walker, J. M., Brandner, P. A., Sargison, J. E., & Gautam, P. (2015). Design and performance evaluation of a pump-asturbine micro- hydro test facility with incorporated inlet flow control. *Renewable Energy*, 78, 1-6.

Mentalidad De Ingeniería. (6 de febrero de 2021) Conceptos Básicos del Gráfico de una Bomba Explicados gráfico de bomba. [Video]. YouTube.

<https://www.youtube.com/watch?v=wz20Ug5t5c0>

Munson, Bruce Roy, 1940-. (2013). *Fundamentals of fluid mechanics*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.

Raman, N., Hussein, I., Palanisamy, K., & Foo, B. (2013, June). An experimental investigation of pump as turbine for micro hydro application. In IOP conference series: Earth and environmental science (Vol. 16, No. 1, p. 012064). IOP Publishing.

Spedaletti, Samuele et al. "Energy Recovery in Gravity Adduction Pipelines of a Water Supply System (WSS) for Urban Areas Using Pumps-as-Turbines (PaTs)." *Sustainable energy technologies and assessments* 45 (2021): 101040–. Web.



**TABLA 10.4** Resistencia de válvulas y acoplamientos, expresada como longitud equivalente en diámetros de tubería  $L_e/D$ .

Tipo	Longitud equivalente en diámetros de tubería $L_e/D$
Válvula de globo—abierta por completo	340
Válvula de ángulo—abierta por completo	150
Válvula de compuerta—abierta por completo	8
— $3/4$ abierta	35
— $1/2$ abierta	160
— $1/4$ abierta	900
Válvula de verificación—tipo giratorio	100
Válvula de verificación—tipo bola	150
Válvula de mariposa—abierta por completo, 2 a 8 pulg	45
—10 a 14 pulg	35
—16 a 24 pulg	25
Válvula de pie—tipo disco de vástago	420
Válvula de pie—tipo disco de bisagra	75
Codo estándar a $90^\circ$	30
Codo a $90^\circ$ de radio largo	20
Codo roscado a $90^\circ$	50
Codo estándar a $45^\circ$	16
Codo roscado a $45^\circ$	26
Vuelta cerrada en retorno	50
Te estándar—con flujo directo	20
—con flujo en el ramal	60

Fuente: Crane Valves, Signal Hill, CA.

### Ilustración 74: Tabla de longitudes equivalentes

**TABLA 8.2** Valores de diseño de la rugosidad de tubos.

Material	Rugosidad $\epsilon$ (m)
Vidrio	Liso
Plástico	$3.0 \times 10^{-7}$
Tubo extruido; cobre, latón y acero	$1.5 \times 10^{-6}$
Acero, comercial o soldado	$4.6 \times 10^{-5}$
Hierro galvanizado	$1.5 \times 10^{-4}$
Hierro dúctil, recubierto	$1.2 \times 10^{-4}$
Hierro dúctil, no recubierto	$2.4 \times 10^{-4}$
Concreto, bien fabricado	$1.2 \times 10^{-4}$
Acero remachado	$1.8 \times 10^{-3}$

### Ilustración 75: Tabla de rugosidades

ANEXO B: PLANOS

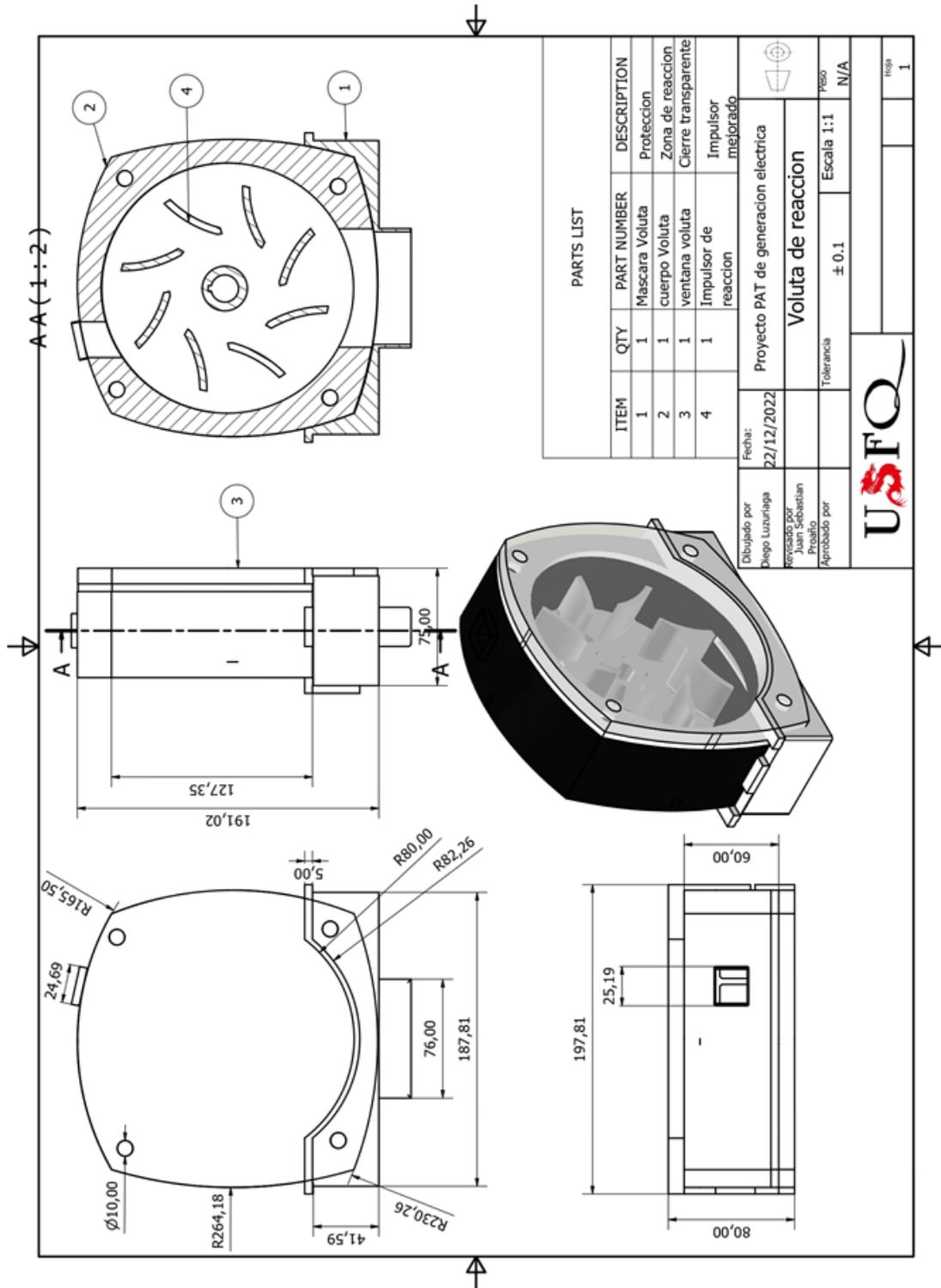


Ilustración 76: Plano de voluta

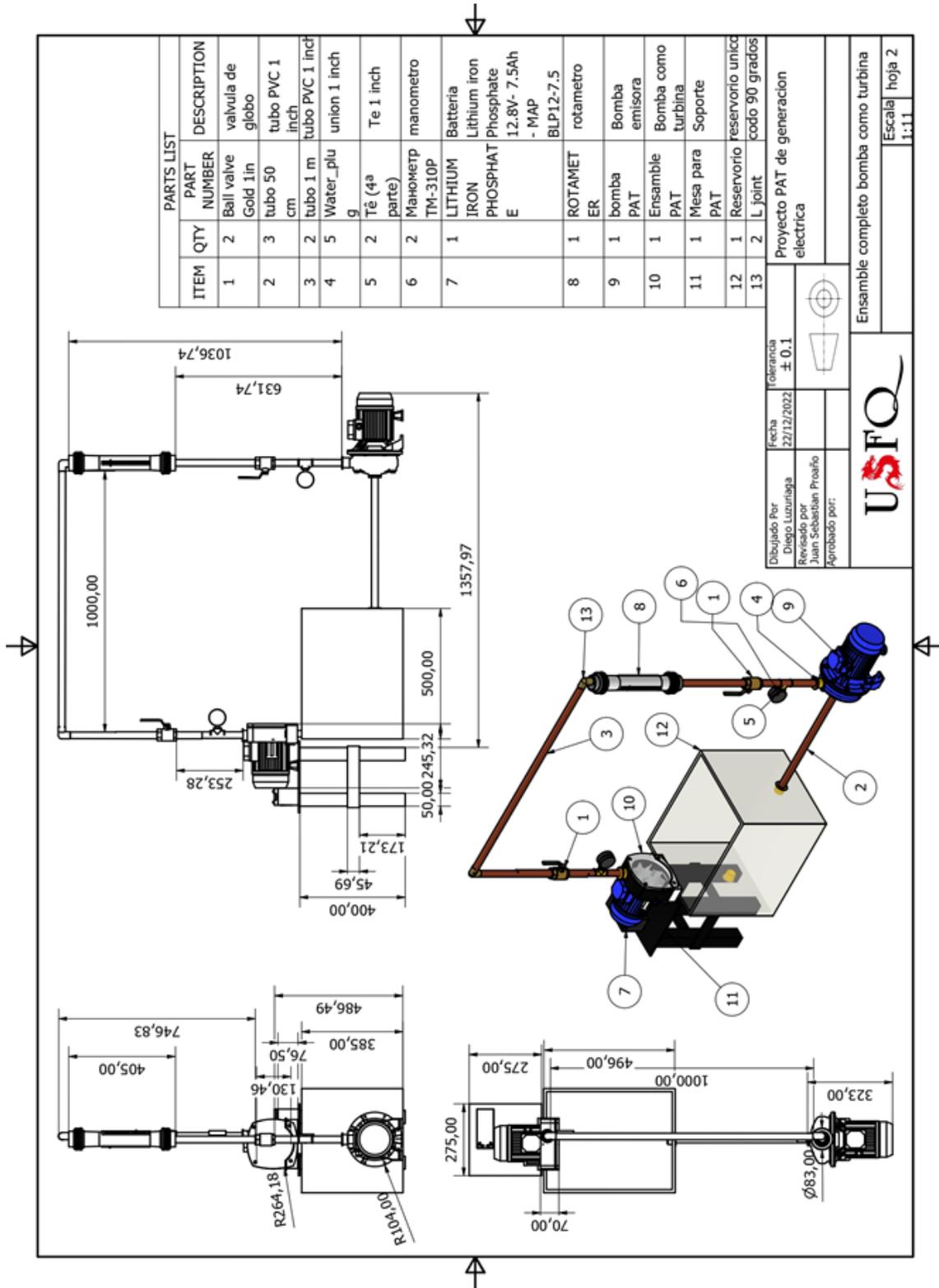
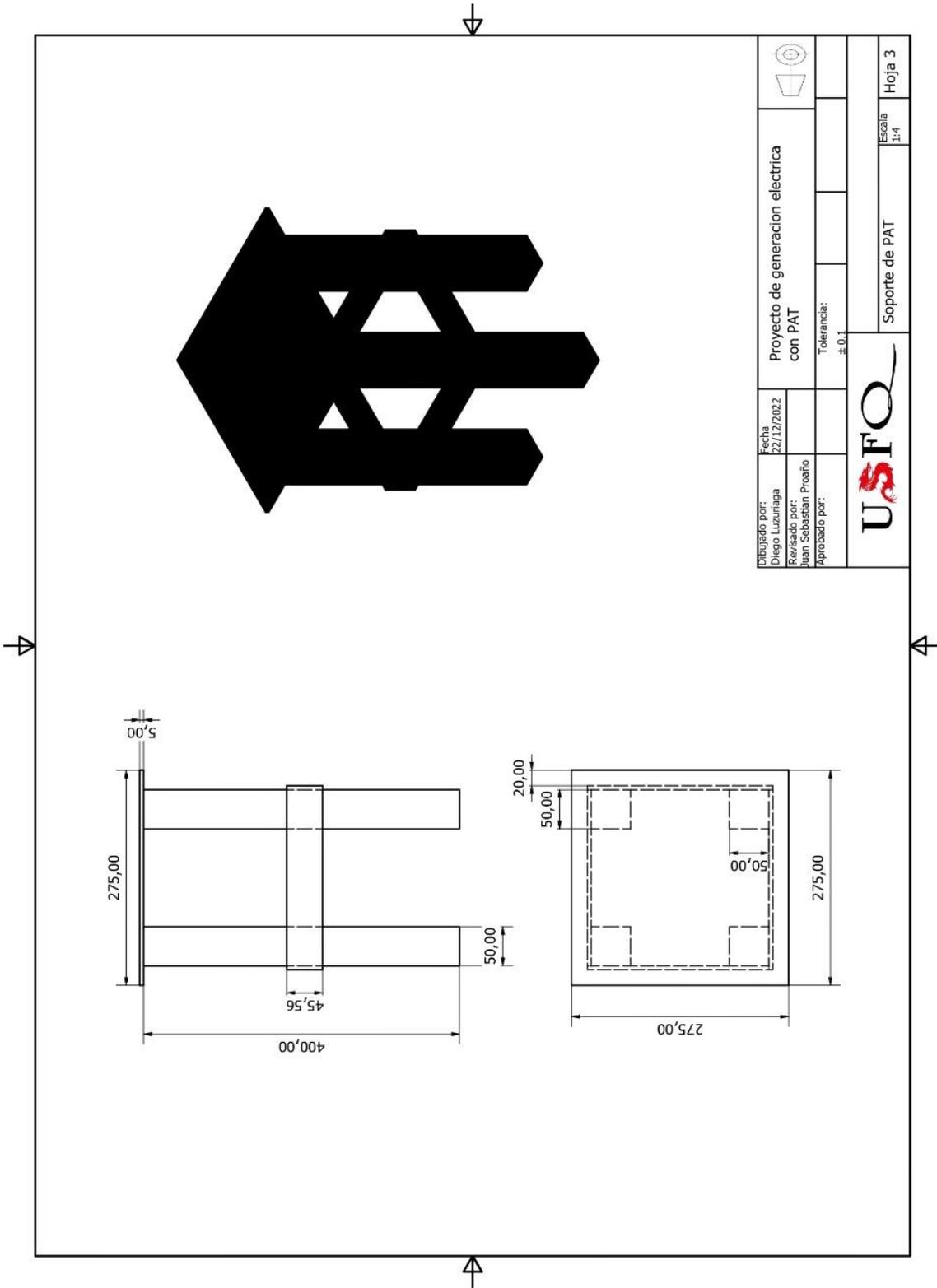
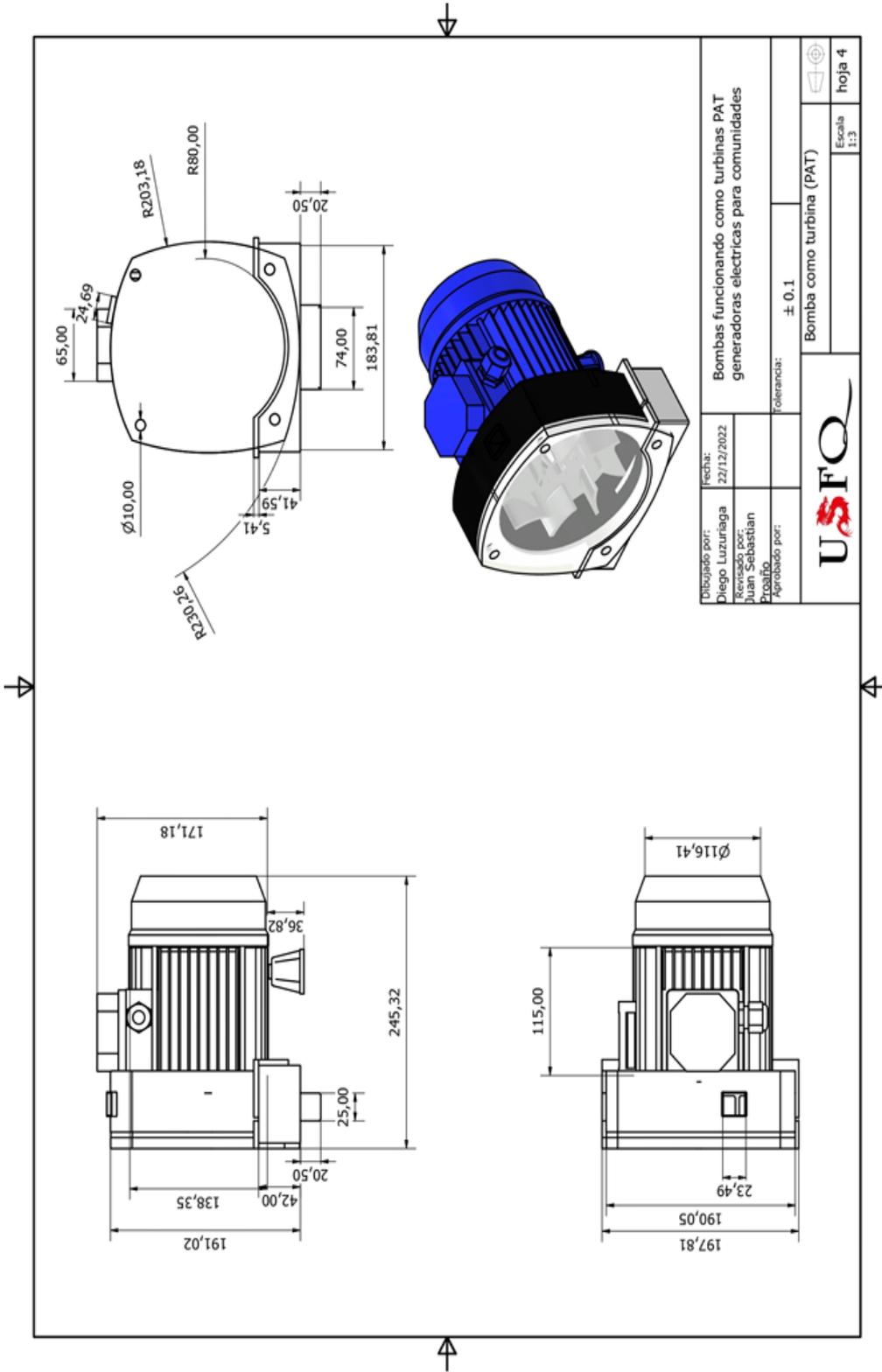


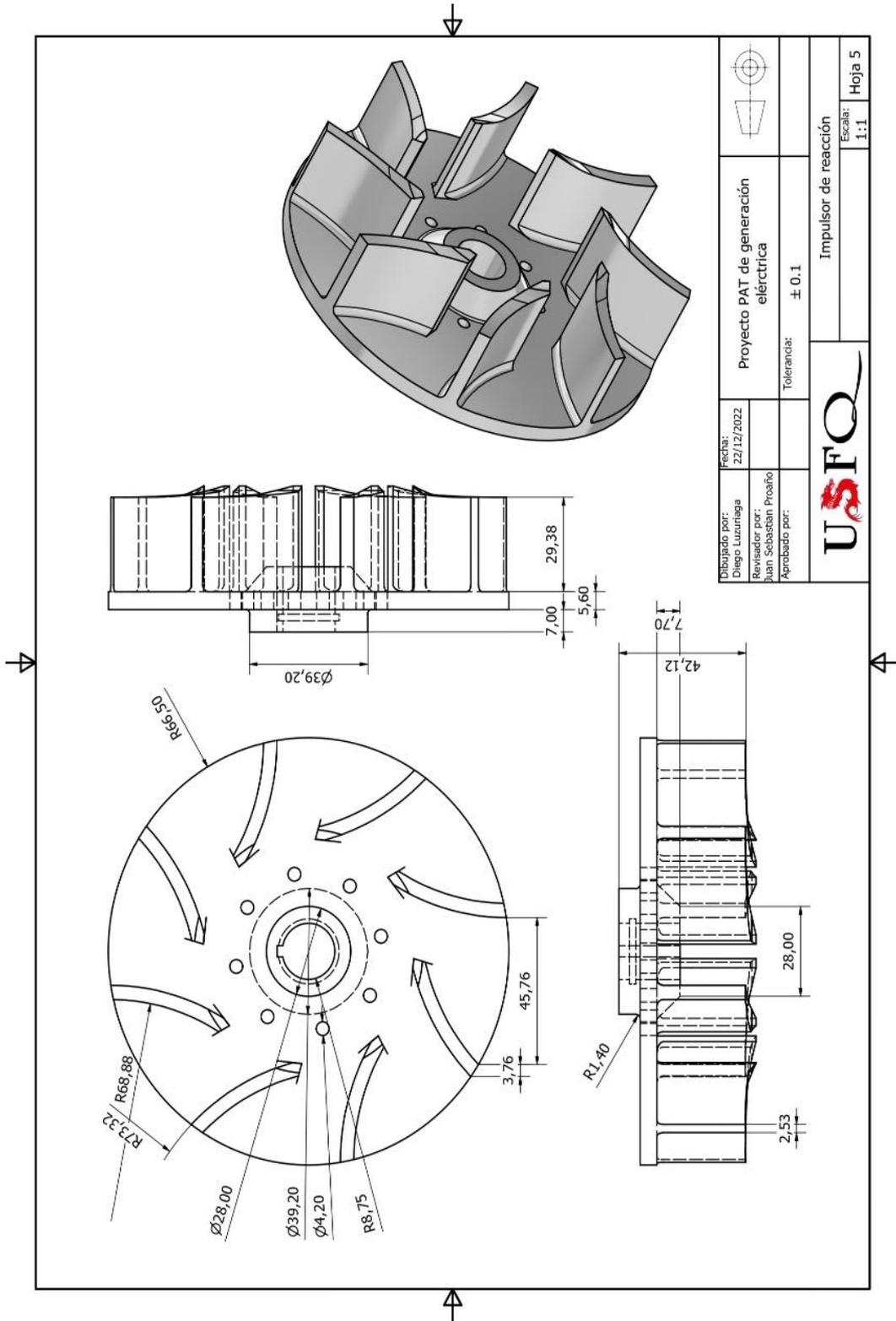
Ilustración 77: Plano de ensamble final



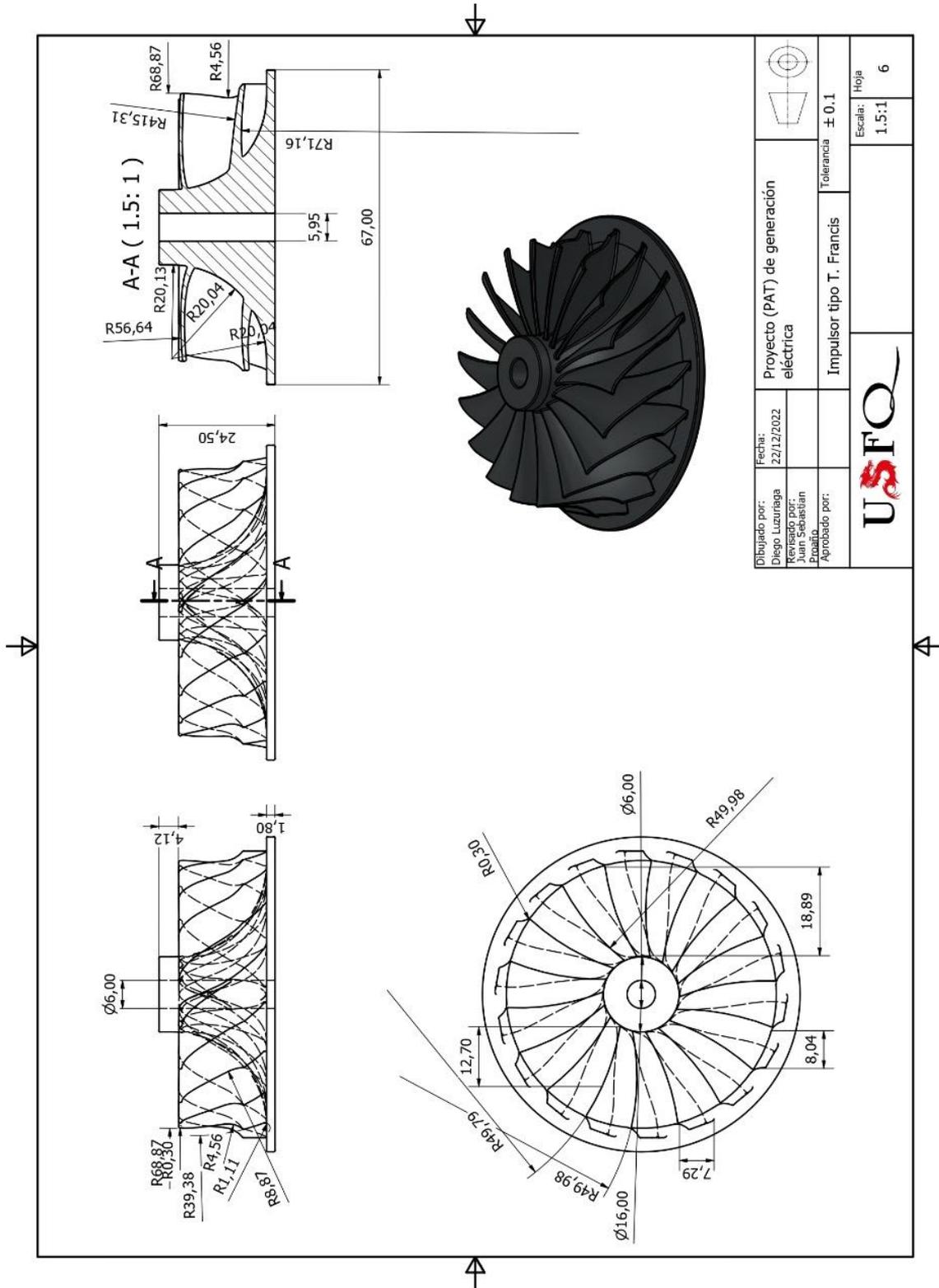
*Ilustración 78: Ensamble de soporte*



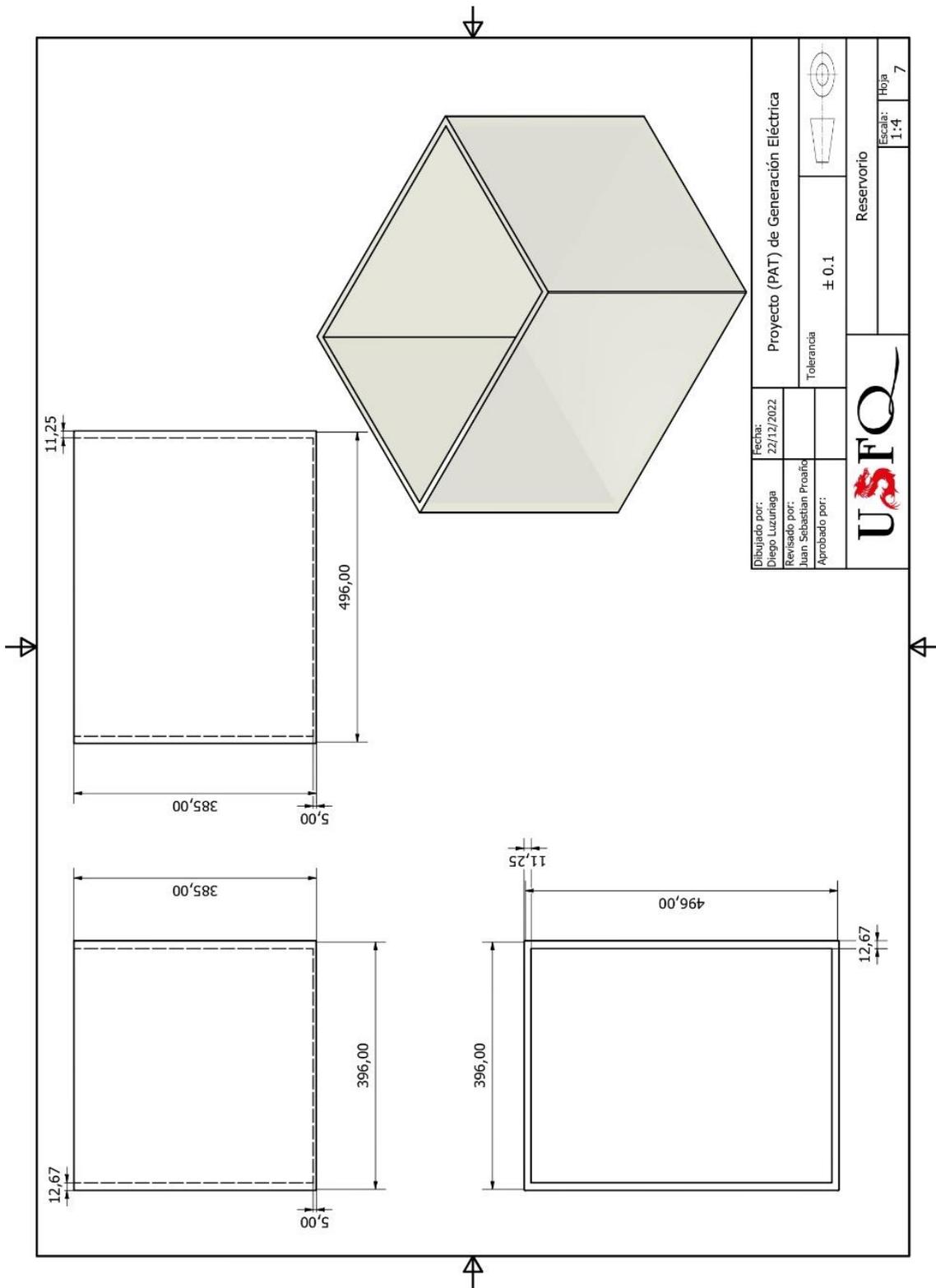
*Ilustración 79: Ensamble de PAT*



*Ilustración 80: Plano de rodete*



*Ilustración 81: Plano de rodete tipo francis.*



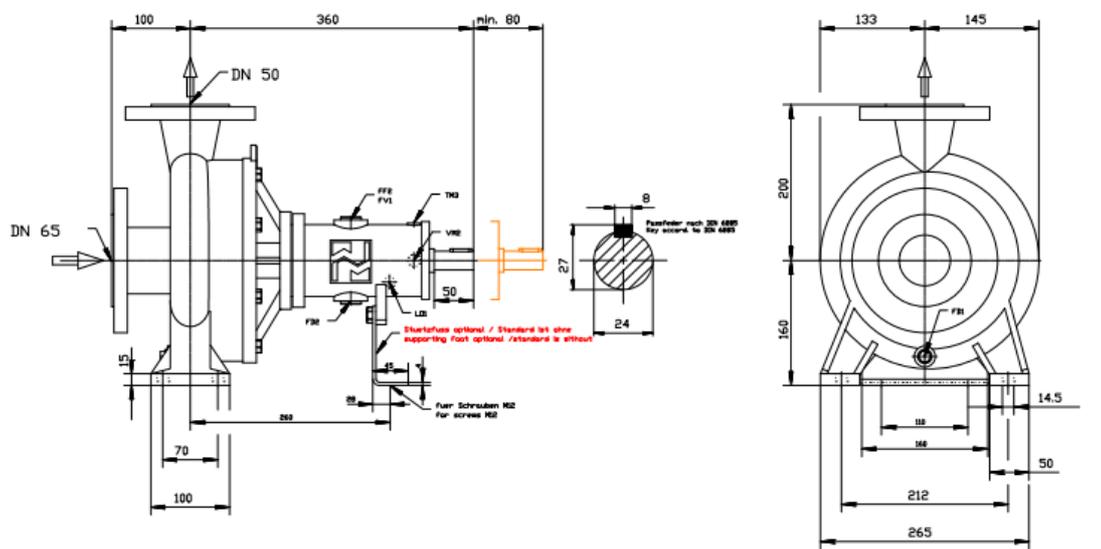
**Ilustración 82: Plano de reservorio**



## ANEXO C: BOMBA RECOMENDADA, PARA APLICACIONES FUTURAS

Nicht-generierte Motordaten sind unverbindliche Richtwerte (ca.-Werte). Sie müssen bezogen auf die jeweilige Einbausituation immer überprüft werden.  
 Not standardized motor dimensions are only rough information (approx. values). Specific installation has to be verified.

Zeichnung nicht maßstablich / Drawing not-to-scale



Flansche nach Norm (siehe Datenblatt)  
Flanges standard (refer to data sheet)

V	optional - siehe Auftragsunterlagen / refer to order data sheet	
VMB	Vibrationsmessung / Vibration measurement	NE
TR	Temperaturmessung / Temperature measurement	NE
PM 2	Druckmessung / Pressure measurement	SI/4
PM 4	Druckmessung / Pressure measurement	SI/4
LS	Leckage Auslass / Leakage outlet	SI/4
FF/FV	Fördergut Aufnahme - Entlüftung / liquid recharging - vent	SI/2
FB	Fördergut Entleerung / Liquid drain	SI/2
FS	Fördergut Entleerung / Liquid drain	SI/4
Zahn-/System	Antriebsbezeichnung / Connection designation	Strasse / Str.

Hilfsanschlüsse / Auxiliary connections

Bitte Unterlage ist eine streng vertrauliche Mitteilung und unersetzlich geschützt. Sie darf ohne unsere schriftliche Erlaubnis weder kopiert noch in irgendeiner Weise öffentlich verbreitet oder Dritten zur Kenntnis gegeben werden.

Copying of this document, and giving it to others and the use or communication of the contents thereof, are forbidden without express authority by ALLVEILER. Offenders are liable to the payment of damages. All rights are reserved in the event of the grant of a patent or the registration of a utility model or design.

Name in unvollständigen Änderungen vorbehalten	Beschreibung in unvollständigen Änderungen vorbehalten	Die Ausführung nach der detaillierten Beschreibung nicht entsprechen. Darstellung hat nur zu befolgen in accordance with the planing.
ALLVEILER GmbH Werk Rastatt Postfach 104 9-7688 Rastatt		Benennung/Description Einbauzeichnung / Dimension drawing NTT 50-200

Lochzahl und Flanschnetze, siehe Flanschnetze.  
Number of holes and flange dimensions refer to flange standard.

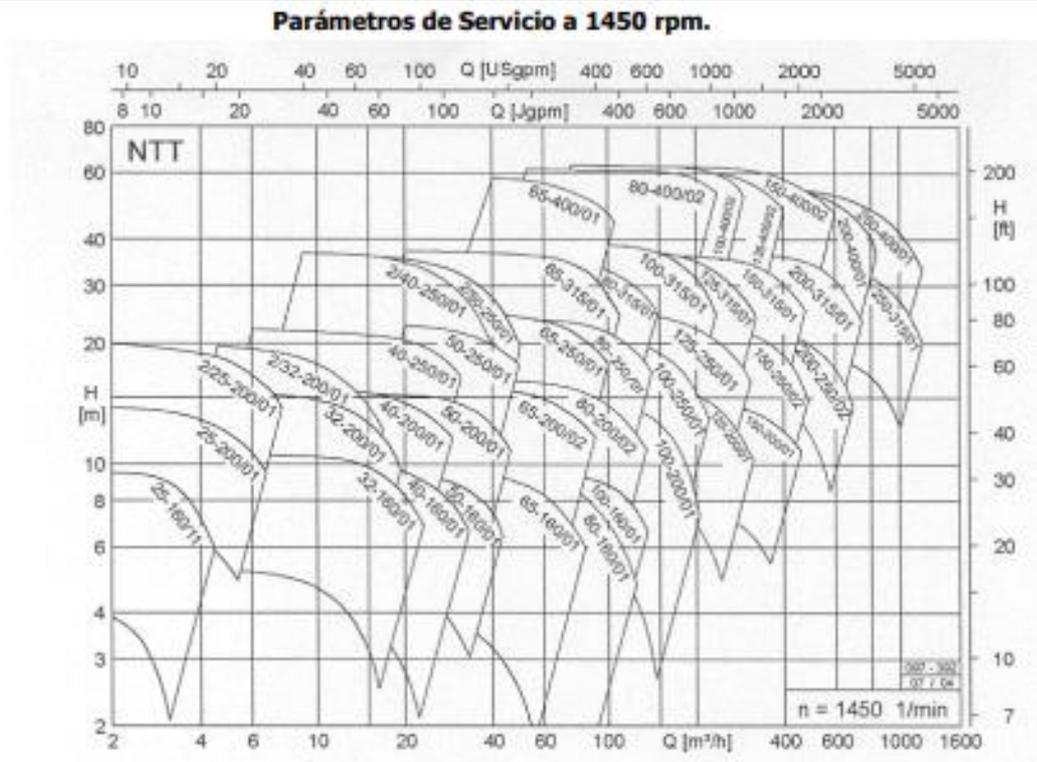
Kunde/Customer:

Projekt/Project:

Angebot/Antrag/Differ/Order:

30

*Ilustración 84: Bomba centrífuga de eje libre.*





**ANEXO D: PRUEBAS MECÁNICAS E HIDRÁULICAS**

Prueba con compresor	
Prueba con compresor	
Prueba con compresor	
Prueba hidráulica	

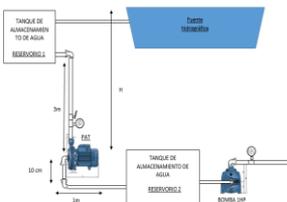
Prueba mecánica	 A photograph showing a person's hands using a blue and red power drill to work on a mechanical assembly. The assembly includes a black fan-like component and various wires. The person is wearing a black wristband. The background is a white surface with some tools and components scattered around.
-----------------	---

*Tabla 27: Pruebas de campo*

## ANEXO E: CÁLCULOS MANUALES

Proyecto de generación hidroeléctrica con PAT

Área de aplicación

Datos:		
Tipo	Valor	Unidad
densidad agua	997	kg/m3
viscosidad agua	0,001	Pa.s
diámetro tubería	0,0254	m
Caudal	0,00105	m3/s
Rugosidad plastico	3,00E-07	m
Factor de fricción (f)	0,02071	-
Longitud tuberías	9,2	m
gravedad	9,81	m/s2
k	8,284	Le/D
z1	3	m
Peso específico del agua	1000	kgf/m3
Diámetro impeler original	14	cm
Caudal en l/min	63	L/min

Perdidas

**Numero de Reynolds**

$$Re = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu}$$

52502,633 >2300

**Velocidad del fluido**

$$v = \frac{Q}{A}$$

2,07325255 m/s

**Area**

$$\frac{\pi(D)^2}{4}$$

0,00050645 m2

$\frac{e}{D}$

1,18E-05

**K**

8,901

**Bernoulli**

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + hl + hv$$

6,593429285 m

**Energía del fluido**

$$Energía Total = Altura total = z_2 + \frac{v^2}{2g}$$

32,56079135 mca  
319303,4931 Pa

**Cálculo de pérdidas**

**Ecuación de Darcy-Weisbach**

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

1,643386158 m

**Perdidas menores**

$$h_v = k \frac{v^2}{2g}$$

1,95004313

**Cota piezométrica**

$$Hl = h_v - h_f$$

0,30665697 m

**Presión en tubería**

$$Presión = \rho \cdot g \cdot \Delta h$$

29341,71 Pa

**Diámetro nuevo**

Diámetro nuevo = 30% Diámetro viejo + Diámetro viejo

18,2 cm

**Taza nueva de flujo**

Diámetro nuevo = tasa de flujo viejo - Tasa de flujo nuevo

0,1365 m3/s

Diámetro nuevo

**Ilustración 86: Cálculos en Excel**

*Descripción: Se utilizó Excel en lugar de recrear cálculos a mano por practicidad.*

Pruebas		Resultados Medidos PAT					Resultados Calculados		
		Caudal	Presión	H. Piezométrica	RPM	Voltaje	Vel. Lineal Impulsor	Vel. Angular Impulsor	Vel. Angular Eje
Tipo	Nº	L/min	PSI	m	min <sup>-1</sup>	V	m/s	min <sup>-1</sup>	min <sup>-1</sup>
Bomba 1HP - PAT 1HP	1	63,33	34	23,94	2345	0,98	2,083	284,18	2841,82
Bomba 1HP - PAT 1/2HP	2	63,33	34	23,94	2220	0,87	2,083	-	-
Bomba 1HP+1/2HP en Serie - PAT 1HP	3	51,67	36	25,34	1140	0,28	1,700	231,83	2318,33
Bomba 1HP+1/2HP en Paralelo - PAT 1HP	4	68,33	32	22,53	2620	1,18	2,250	306,62	3066,18
Bomba 2HP - PAT 1HP	5	48,33	20	14,08	1620	0,40	1,590	216,88	2168,76

**Tabla 28: Cálculos vs resultados**

Pérdidas del Sistema Hidráulico (Bomba 2HP a PAT 1HP)								
Área Tubería 1in	0,00051	m2	Caudal Entregado (Q)	2,90	m3/h	Velocidad	1,590	m/s
				0,00081	m3/s			
Fricción	L (m)	D (m)	e	D/e	NR	f	k	hL (m)
	2,50	0,0254	3,00E-07	8,47E+04	4,04E+04	0,022	2,15	0,277
Pérdidas menores	Le/D	D (m)				ft	k	hL (m)
	2 Codos	30	0,0254				0,009	0,54
2 Tee	20	0,0254				0,009	0,36	0,046
Válvula de Bola	150	0,0254				0,009	1,35	0,174
Contracción de 2 in a 1 in	D1 (m)	D2 (m)	D1/D2				k	hL (m)
	0,0508	0,0254	2				0,37	0,048
Pérdidas por la entrada del Sistema PAT							k	hL (m)
							81,68	10,522
Pérdida Total en Sistema Hidráulico de Bomba de 2HP hacia PAT de 1HP							hLT (m)	11,137

**Tabla 29: Iteración realizada por Víctor Gallo (ICV)**

Pérdidas del Sistema Hidráulico (Bomba 1HP a PAT 1HP)								
Área Tubería 1in	0,00051	m <sup>2</sup>	Caudal Entregado	3,80	m <sup>3</sup> /h	Velocidad	2,083	m/s
Fricción	L (m)	D (m)	e	0,00106	m <sup>3</sup> /s	f	k	hL (m)
	4,00	0,0254	3,00E-07	8,47E+04	NR	0,021	3,24	0,716
Pérdidas menores	Le/D	D (m)				ft	k	hL (m)
2 Codos	30	0,0254				0,009	0,54	0,119
2 Tee	20	0,0254				0,009	0,36	0,080
Válvula de Bola	150	0,0254				0,009	1,35	0,299
Pérdidas por la entrada del Sistema PAT							k	hL (m)
							120,12	26,568
Pérdida Total en Sistema Hidráulico de Bomba de 1HP hacia PAT de 1HP							hLT (m)	27,782

**Tabla 30: Pérdidas calculadas por Víctor Gallo (ICV).**

Pérdidas del Sistema Hidráulico (Bomba 1HP a PAT 1HP)								
Área Tubería 1in	0,00051	m <sup>2</sup>	Caudal Entregado	1,09	m <sup>3</sup> /h	Velocidad	0,596	m/s
Fricción	L (m)	D (m)	e	0,00030	m <sup>3</sup> /s	f	k	hL (m)
	3,00	0,0254	3,00E-07	8,47E+04	1,51E+04	0,028	3,28	0,059
Pérdidas menores	Le/D	D (m)				ft	k	hL (m)
2 Codos	30	0,0254				0,009	0,54	0,010
2 Tee	20	0,0254				0,009	0,36	0,007
Válvula de Bola	150	0,0254				0,009	1,35	0,024
Pérdidas por la entrada del Sistema PAT							k	hL (m)
							120,12	2,174
Pérdida Total en Sistema Hidráulico de Bomba de 1HP hacia PAT de 1HP							hLT (m)	2,274

**Tabla 31: Perdidas mayores y menores de nuestra iteración**

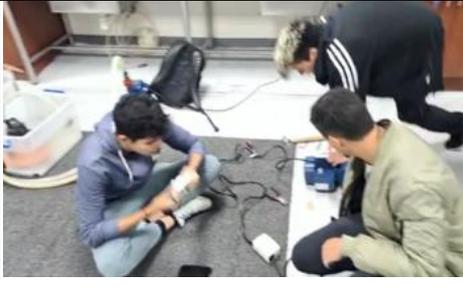
Bombear agua de 1HP hacia PAT de 1 HP						
Unidades	RMP PAT	Caudal			Condensador	Voltaje
	m <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> /h	L/min	m <sup>3</sup> /s	microfaradios	V
Giro Motor: Horario	2370	3,91	65,17	0,0011	80 uf	0,880
	2354				80 uf + 60 uf	0,880
	2370				80 uf + 60 uf (Campo Remanente)	1,007
Giro Motor: Anti - Horario	2311	3,91	65,17	0,0011	80 uf	0,660
	2332				80 uf + 60 uf	0,660
	2335				80 uf + 60 uf (Campo Remanente)	0,924

**Tabla 32: Datos de iteración fallida usando teoría de condensadores asíncronos**

## ANEXO F: REUNIONES Y MINUTAS DE GRUPO

Fecha: 13/10/2022		Lugar: Laboratorio de hidraulica USFQ		Supervision: Sixto Duran Ballen	
Actividad	Inspeccion de tesis anterior	Objetivo:	Conocer lo realizado por los estudiantes anteriores		
Integrantes	Francisco, Diego, Juan Jose y Luca				
Registro Fotografico					
					

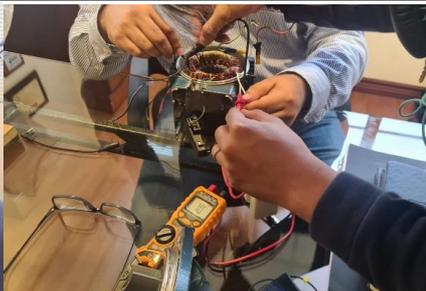
**Tabla 33: Minuta 1**

Fecha: 24/10/2022		Lugar: Laboratorio de hidraulica y taller		Supervision: N/A	
Actividad	Apertura de bomba y recreacion de experimento	Objetivo:	Comprobar el estado del sistema		
Integrantes	Francisco, Diego, Juan Jose y Luca				
Registro Fotografico					
					

**Tabla 34: Minuta 2**

Fecha: 28/10/2022		Lugar: Laboratorio de hidraulica USFQ		Supervision: Ing Ricardo Buitron	
Actividad	Asesoría acerca de bombas funcionando como turbinas y consejos	Objetivo:	Comprender por donde partir y guiar el desarrollo del proyecto		
Integrantes	Francisco, Diego, Juan Jose y Luca				
Registro Fotografico					
					

**Tabla 35: Minuta 3**

Fecha: 07/11/2022		Lugar: Oficina hayeck 3r piso		Supervision: Ing Alberto Suarez	
Actividad	Asesoría acerca de conexiones de bombas	Objetivo:	Reconectar la bomba para uso como generador		
Integrantes	Francisco, Diego, Juan Jose y Luca				
Registro Fotografico					
					

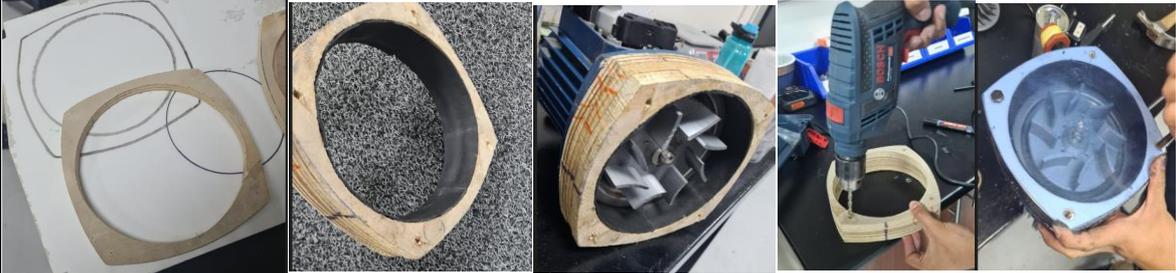
**Tabla 36: Minuta 4**

Fecha: 15/11/2022		Lugar: Taller mecanico		Supervision: N/A	
Actividad	Maquinar rotor para colocar imanes de neodimio	Objetivo:	Crear un nucleo magnetico en el rotor		
Integrantes	Francisco, Diego, Juan Jose y Luca				
Registro Fotografico					
					
					

**Tabla 37: Minuta 5**

Fecha: 23/11/2022		Lugar: Taller mecanico		Supervision: N/A	
Actividad	Pruebas mecanicas con compresor y taladro	Objetivo:	Berificar generacion electrica con la bomba		
Integrantes	Francisco, Diego, Juan Jose y Luca				
Registo Fotografico					
					

**Tabla 38: Minuta 6**

Fecha: 26/11/2022		Lugar: Taller mecanico		Supervision: N/A	
Actividad	Construccion de voluta de reaccion	Objetivo:	Crear voluta para pruebas hidraulicas		
Integrantes	Francisco, Diego, Juan Jose y Luca				
Registo Fotografico					
					

**Tabla 39: Minuta 7**

Fecha: 28/11/2022		Lugar: Taller mecanico		Supervision: N/A	
Actividad	Pruebas con circuito completo	Objetivo:	Verificar que funciona con caudal		
Integrantes	Francisco, Diego, Juan Jose y Luca				
Registo Fotografico					
					

**Tabla 40: Minuta 8**

## ANEXO G: DIAGRAMA DE PROCESOS



*Ilustración 87: Diagrama de procesos*

## ANEXO H: DIAGRAMA DE GANTT

Proyecto de Bomba utilizada como turbina para generacion electrica.													
No	ACTIVIDADES	20-26 ago	29ago -2sep	3 - 10 sep	12-20 sep	26-29 sep	1-10 oct	16 Oct - 7 Nov	7-9 Nov	9-14 Nov	20-24 Nov	25-29 Nov	12-16 Dic
1	Conformacion del grupo												
2	Propuesta de tema												
3	Analisis de papers y datos tecnicos												
4	Importancia del proyecto												
5	Revision de fuentes literarias												
6	Concepto de diseño												
7	Realizacion de calculos												
8	Calculos 2												
9	Calculos 3												
10	Investigacion sobre manufactura												
11	Verificacion de calculos												
12	Analisis de riesgos												
13	Reporte de progreso												
14	Construccion y simulaciones												
15	Planos												
16	Planos de construccion												
17	Plan de manufactura												
18	Prototipo final												
19	mantenimiento y operaci3n												
20	Feria de ingenieria												
21	Examen de etica												
22	Presentacion final												
23	Defensa del proyecto												

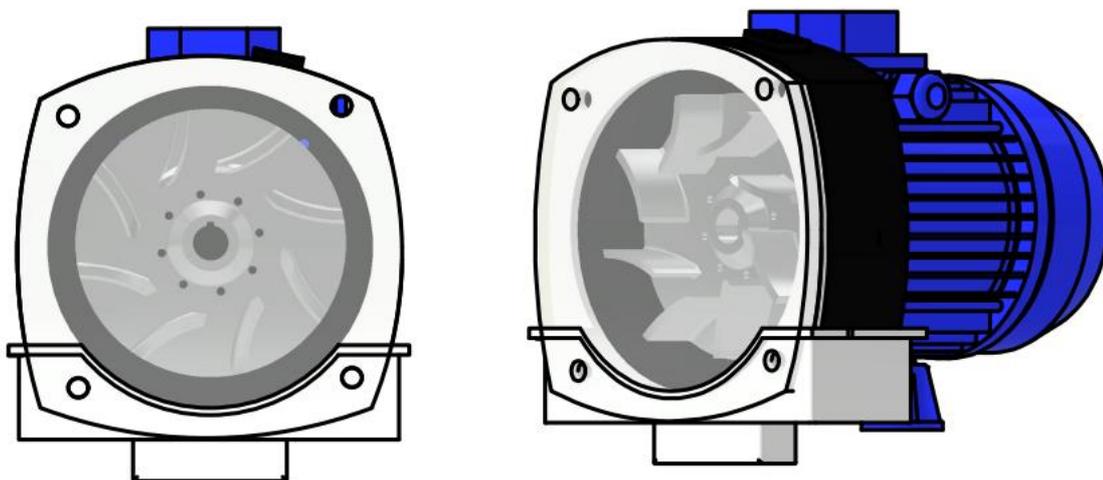
**Tabla 41: Diagrama de Gantt General**

Mes de Noviembre.										
No	ACTIVIDADES	7	10	12	15	21	25	26	28	30
1	Construccion y simulaciones									
2	Planos									
3	Planos de construccion									
4	Plan de manufactura									
5	Prototipo final									

**Tabla 42: Horario de actividades noviembre**

## ANEXO I: MANUAL DE OPERACIONES

### Manual de Operaciones PAT



Guía rápida de uso

Edición 1

Diciembre de 2022

## TABLA DE CONTENIDO

<b>Tabla de ilustraciones .....</b>	<b>100</b>
<b>Preparación .....</b>	<b>101</b>
<b>Conexiones eléctricas .....</b>	<b>102</b>
<b>Complementos .....</b>	<b>104</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>104</b>
<b>Mantenimiento .....</b>	<b>105</b>

## TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 83 .....	101
Ilustración 84 .....	101
Ilustración 85 .....	102
Ilustración 85 .....	102
Ilustración 86 .....	102
Ilustración 87 .....	102
Ilustración 88 .....	103
Ilustración 89 .....	103
Ilustración 90 .....	104

## PREPARACIÓN

Se usa tubería de ingreso de 1in para el adaptador de la voluta (Ilustración 83).



*Ilustración 88*

Se debe tener un reservorio inferior para recibir el agua de salida (Ilustración 89).



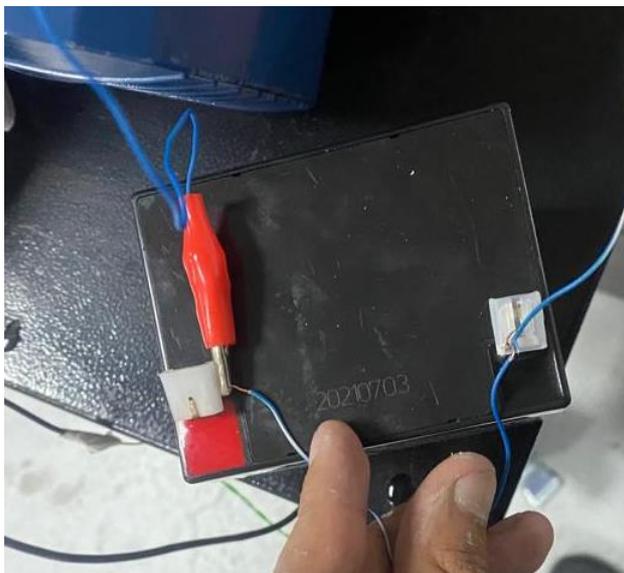
*Ilustración 89*

## CONEXIONES ELÉCTRICAS

Se debe tener una batería de 12V, conectores de tipo lagarto, y el PAT (Ilustración 90 y 92).



*Ilustración 90*



*Ilustración 92*

se conecta el cocodrilo rojo de salida de la bomba hacia el terminal rojo de la batería, y el cocodrilo negro hacia el terminal negro de la batería.

A continuación, se conecta el cocodrilo rojo (IN) del regulador de voltaje hacia el terminal rojo de la batería, y a su vez el cocodrilo negro (IN) del regulador de voltaje hacia el terminal negro de la batería. (Ilustración 93).

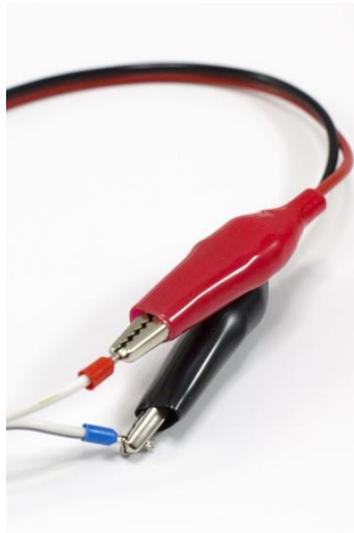


Mientras se gira en sentido horario, el voltaje aumenta, y cuando se gira en sentido anti horario el voltaje disminuye. (Ilustración 94).



***Ilustración 94***

Para conectar correctamente los dispositivos que se requiere suministrar con energía eléctrica



***Ilustración 95***

en DC, se debe usar el cocodrilo rojo (out) del regulador de voltaje en la terminal positiva del dispositivo, mientras que el cocodrilo negro (out) debe ir al terminal negativo (Ilustración 95).

Una vez realizadas estas conexiones, se puede dejar pasar el flujo de agua y usar la energía eléctrica requerida.

## COMPLEMENTOS

En caso de requerir un voltaje mayor, se puede usar un transformador de AC justo en el paso entre las terminales de la bomba y la batería de 12V (Ilustración 96).



*Ilustración 96*

Las conexiones pueden ser en cualquier sentido de los contactos, pues al ser AC, no tiene una polaridad constante.

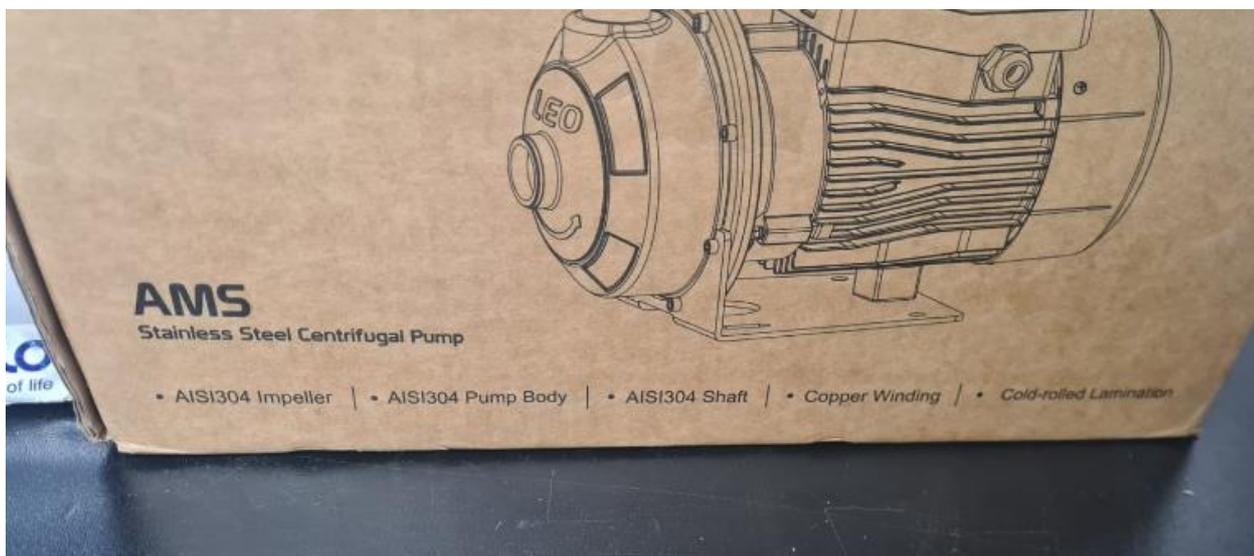
### Recomendaciones

Se recomienda tener todos los elementos eléctricos los más lejanos a la PAT para evitar cortos por salpicadura de agua y proteger todo el sistema de generación

Se recomienda usar hipoclorito de sodio en el agua de ingreso para evitar la formación de algas.

## MANTENIMIENTO

- Se recomienda engrasar o cambiar los rodamientos cada año con grasa de rodamientos de grado 1 pues las revoluciones de uso no son muy altas.
- Los imanes de neodimio deben ser remplazados cada 8-10 años en caso de presentar fisuras, este tipo de imanes pierde fuerza magnética en aproximadamente 30 años de uso continuo.
- En caso de presentarse una caída en la generación eléctrica, debe revisarse el rotor, puesto a que las fisuras en los imanes pueden llevar a una pérdida de fuerza para la creación del campo magnético necesario, lo que haría necesario reemplazar los imanes de los polos magnéticos.
- Para evitar problemas relacionados con roturas en alabes de los impulsores es importante considerar el uso de filtros en el ingreso de agua de la voluta, para evitar roturas o perdidas de paletas de los rodetes.
- Se recomienda inspección visual del rodete tras una semana de uso continuo para verificar que no exista daños en los mismos.
- Para evitar la formación de algas en el rotámetro y manómetros, es recomendable agregar 10 ml de hipoclorito de sodio por semana de uso en un reservorio de caída.
- El represamiento resulta ser crítico para el sistema, ya que, si se almacena más de 2 metros cúbicos de agua, puede existir un daño en los impulsores por la caída agresiva del agua por lo que debe verificarse siempre que se mantenga menos de esta carga de agua en el reservorio emisor principalmente si es elevado.
- Debe realizarse una inspección visual del reservorio para verificar que no exista problemas con cuerpos no deseados ingresando al sistema que puede desencadenar en daños en componentes críticos.
- Para evitar el golpe de ariete, debe evitar cerrarse las válvulas de manera abrupta, sino que debe hacerse de manera continua pero no a gran velocidad.

**ANEXO J: NORMAS DE BOMBA LEO**

*Ilustración 97: Normas de Bomba Leo*

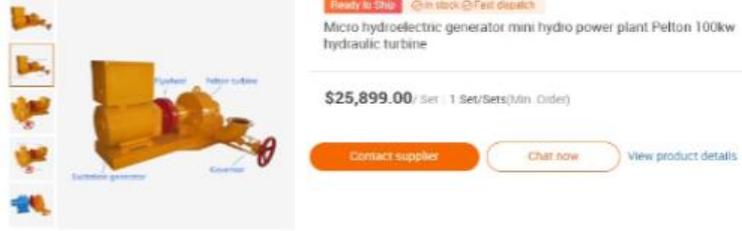
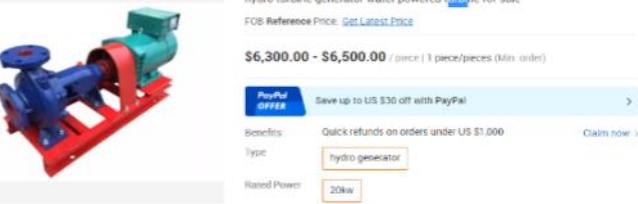
ANEXO K: COSTOS

<p>Factura de Conectores</p>	
<p>Factura de batería</p>	
<p>Factura de imanes</p>	
<p>Factura de silicón de acuario</p>	



Costos			
Artículo	Cantidad	Prototipo (USD)	Final (USD)
Bomba pedrollo Cent 1 HP	1	N/A	235
Bomba Leo agrigola 1HP	1	182	182
Mano de obra	1	N/A	14,06
Rotor 6 muescas	1	N/A	11,5
Imanes neodimio	24	45	30
Impulsor rapido	1	N/A	15
Manómetros	2	N/A	50
Tubo PVC 3 m (1 Pulg)	2	N/A	7,6
Inversor	1	20	20
Luces LED	1	10	10
Puente de diodos	1	4	4
Batería 12 V- 5 A	1	10	10
Pernos M12 (10mm x 160mm)	4	8	8
Unión universal	6	N/A	7,44
Codos 90 (1 pulg)	2	N/A	3,68
Reservorio	1	N/A	10,99
Retazo de acrílico	1	5	5
Madera	3	3	3
Tira de caucho (1 m)	1	3	3
Reductor de voltaje	1	3,9	3,9
Ventilados 12 V	1	2,9	2,9
Silicon	1	5	5
Total [USD]		301,8	642,07

**Tabla 44: Costo de ejecución del proyecto**

Costo de micro hidro generadora comercial.	 <p>Micro hydroelectric generator mini hydro power plant Pelton 100kw hydraulic turbine</p> <p>\$25,899.00 / Set ( 1 Set/Sets (Min. Order)</p> <p>Contact supplier   Chat now   View product details</p>
Costo de PAT comercial.	 <p>20KW brushless induction radial flow micro water turbine generator mini hydro turbine generator water powered turbine for sale</p> <p>FOB Reference Price: <a href="#">Get Latest Price</a></p> <p>\$6,300.00 - \$6,500.00 / piece ( 1 piece/pieces (Min. order)</p> <p>Save up to US \$30 off with PayPal</p> <p>Benefits: Quick refunds on orders under US \$1,000   Claim now &gt;</p> <p>Type: hydro generator</p> <p>Rated Power: 20kw</p>
Costo de turbina Peltón	 <p>Estado: Nuevo</p> <p>Precio: US \$1 500.00</p> <p>Aproximadamente: MXN \$29 588,72</p> <p>Envío: Puede que no se envíe a México. Para conocer las opciones de envío, lee la descripción del artículo, consulta al vendedor o al comprador.</p> <p>Entrega: Variable</p> <p>Devolución: El vendedor no acepta la devolución de este artículo.</p> <p>Pago: PayPal   G Pay   VISA   Mastercard   American Express</p>

**Tabla 45: Precios de dispositivos similares en el mercado**

## ANEXO L: BOMBA PEDROLLO DATA SHEET



## Electrobombas centrífugas

-  Agua limpia
-  Uso doméstico
-  Uso civil



## CAMPO DE PRESTACIONES

- Caudal hasta **160 l/min** (0,6 m<sup>3</sup>/h)
- Altura manométrica hasta **56 m**

## LÍMITES DE USO

- Altura de aspiración manométrica hasta **7 m**
- Temperatura del líquido de **-10 °C** hasta **+90 °C**
- Temperatura ambiente hasta **+40 °C**
- Presión máxima en el cuerpo de la bomba:
  - **6 bar** para CP 600-610-620
  - **10 bar** para CP 650-660-670
- Funcionamiento continuo **S1**

## EJECUCIÓN Y NORMAS DE SEGURIDAD

EN 60335-1      EN 60334-1  
IEC 60335-1    IEC 60334-1  
CEI 61-150      CEI 2-3



## CERTIFICACIONES

Empresa con sistema de gestión certificado DNV  
ISO 9001: CALIDAD

## USOS E INSTALACIONES

Son recomendadas para bombear agua limpia, sin partículas abrasivas y líquidos químicamente no agresivos con los materiales que constituyen la bomba.

Por su confiabilidad y simplicidad encuentran un amplio uso en el sector doméstico y civil, particularmente para la distribución del agua acopladas a pequeños o medianos tanques autoclaves, para el vaciado o para la irrigación de huertos o jardines.

La instalación se debe realizar en lugares cerrados, bien aireados y protegidos de la intemperie.

## PATENTES · MARCAS · MODELOS

- Modelo comunitario registrado nº 002098434

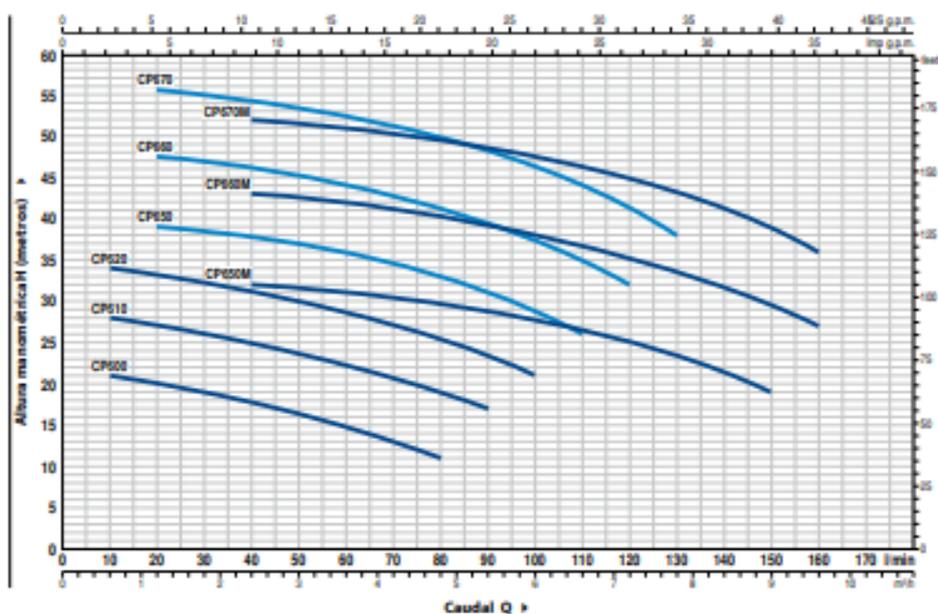
## EJECUCIÓN BAJO PEDIDO

- Sello mecánico especial
- Otros voltajes
- Protección IP X5 para CP 650-660-670

## GARANTIA

2 años según nuestras condiciones generales de venta

## CURVAS Y DATOS DE PRESTACIONES

60 Hz n= 3450 min<sup>-1</sup> HS= 0 m

MODELO		POTENCIA (P <sub>2</sub> )		Q	H															
Monofásica	Trifásica	kW	HP		▲	metros														
CPm 600	CP 600	0.37	0.50	IE2	0	0.6	1.2	2.4	3.6	4.8	5.4	6.0	6.6	7.2	7.8	9.0	9.6			
CPm 610	CP 610	0.60	0.85		8	10	20	40	60	80	90	100	110	120	130	150	160			
CPm 620	CP 620	0.75	1	IE3	22	21	20	18	15	11										
CPm 650	CP 650	1.1	1.5		28.5	28	27	25	22	19	17									
CPm 660	CP 660	1.5	2	35	34	33	31	28.5	25.5	23.5	21									
CPm 670	CP 670	2.2	3	40	-	39	38	36	33.1	31.2	28.8	26								
CPm 650M	CP 650M	1.1	1.5	48	-	47.5	46	44	41	39.5	37.5	35	32							
CPm 660M	CP 660M	1.5	2	56	-	55.5	54.5	52.5	50	48.5	46.5	44	41.5	38						
CPm 670M	CP 670M	2.2	3	33	-	-	32	31	30	29	28	26.5	25	23	19					
				44	-	-	43	42	40	39	38	37	35.5	34	29.5	27				
				53	-	-	52	51	49.5	48.5	47.5	46.5	45	43.5	39	36				

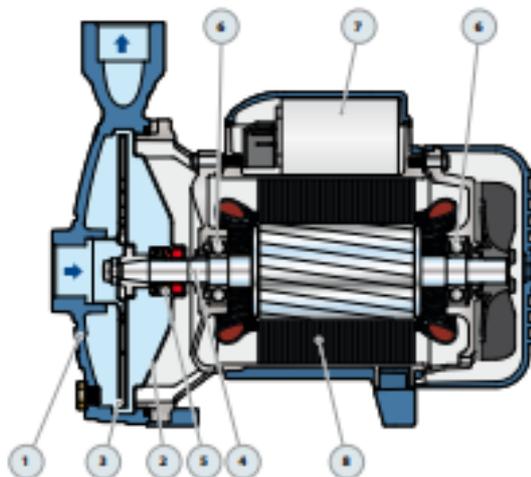
Q = Caudal H = Altura manométrica total HS = Altura de aspiración

Tolerancia de las curvas de prestación según DIN ISO 9906 Grado B8.

▲ Clase de rendimiento del motor trifásico (IEC 60034-30-1)

# CP

POS.	COMPONENTE	CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS					
1	<b>CUERPO BOMBA</b>	Hierro fundido con tratamiento de cataforesis con bocas roscadas ISO 228/1					
2	<b>TAPA</b>	Acero inoxidable AISI 304 (en hierro para CP 650-660-670-650M-660M-670M)					
3	<b>RODETE</b>	Acero inoxidable AISI 304					
4	<b>EJE MOTOR</b>	Acero inoxidable AISI 431					
5	<b>SELLO MECANICO</b>	<b>Electrobomba</b>	<b>Sello</b>	<b>Eje</b>	<b>Materiales</b>		
		<b>Modelo</b>	<b>Modelo</b>	<b>Diámetro</b>	<b>Anillo fijo</b>	<b>Anillo móvil</b>	<b>Distintos</b>
		CP 600-610	AR-12	Ø 12 mm	Cerámica	Grafito	NBR
		CP 620	AR-14	Ø 14 mm	Cerámica	Grafito	NBR
		CP 650-660-670 CP 650M-660M-670M	FN-18	Ø 18 mm	Grafito	Cerámica	NBR
6	<b>RODAMIENTOS</b>	<b>Electrobomba</b>	<b>Modelo</b>				
		CP 600-610	6201 ZZ / 6201 ZZ				
		CP 620	6203 ZZ / 6203 ZZ				
		CP 650-660-670 CP 650M-660M-670M	6204 ZZ / 6204 ZZ				
		<b>Electrobomba</b>	<b>Capacidad</b>				
<b>Monofásica</b>	<b>(220 V)</b>	<b>(110 V ó 127 V)</b>					
CPm 600	10 µF - 450 VL	25 µF - 250 VL					
CPm 610	14 µF - 450 VL	25 µF - 250 VL					
CPm 620	20 µF - 450 VL	60 µF - 300 VL					
CPm 650-650M	25 µF - 450 VL	60 µF - 250 VL					
CPm 660-660M	31.5 µF - 450 VL	60 µF - 250 VL					
CPm 670-670M	50 µF - 450 VL	80 µF - 250 VL					
8	<b>MOTOR ELÉCTRICO</b>	<p>CPm: monofásica 220 V - 60 Hz con protección térmica incorporada en el bobinado.            CP: trifásica 220/380 V - 60 Hz o 220/440 V - 60 Hz.</p> <p>→ Las electrobombas trifásicas están equipadas con motores de alto rendimiento en clase IE2 hasta P<sub>2</sub>=0.60 kW y en clase IE3 desde P<sub>2</sub>=0.75 kW (IEC 60034-30-1)</p> <p>- Aislamiento: clase F            - Protección: IP X4</p>					



60 Hz | CP 0.25 - 2.2 kW

*Ilustración 98: Bomba Pedrollo Cm650 Data Sheet*

## ANEXO M: CODIGO DE EFICIENCIAS EN MATLAB

```

1 clear all
2 clc
3 close all
4
5 %% Variables
6 g=9.81; %[m/s^2]
7 rho=997; %[kg/m^3]
8
9 %% Pump input parameters
10 n_R=1450; %Rated rotational speed
11 D1P=0.026; %Inlet diameter
12 D2P=0.026; %Outlet diameter
13 B1P=0.0304;
14 beta2P=29; %mean([29.5, 29.25, 28, 29.75, 29, 28.75]) %Blade angle %120
15 B2P=0.005; %Outlet height
16
17 eta_pump = 0.58;
18 eta_h_pump = 0;
19 H_pump = 35;
20 Q_pump = 0.0025;
21
22 %Parámetros bomba
23 cm1P=Q_pump/(pi*D1P*B1P);
24 omega_R=(2* pi *n_R)/60;
25 u2P=(omega_R*D2P)/2;
26 cm2P=2.03*cm1P;
27 cu2P=u2P-(cm2P/tan(beta2P*pi/180));
28 alpha2P=atan(cm2P/cu2P)*(180/pi);
29
30 %Parámetros PAT
31 D1=D2P;

```

```

31     D1=D2P;
32     D2=D1P;
33     B1=B2P;
34     beta1=beta2P ;
35     u1=omega_R*(D1/2);
36     cm1=cm2P;
37     cu1 = cu2P ;
38     alpha1=atan (cm1/cu1)*(180/pi);
39     u2=omega_R*(D2/2);
40     H_R=u1*cu1/g;
41     Q_R=cm1* pi *D1*B1;
42     phi=(u2^2)/(g*H_R) ;
43     sigma=(1-phi)/(1+phi);
44
45     n=[950:1:2150];
46     %PAT
47     for i=1:length(n)
48         if (1-(sigma *((n(i)/n_R)^2-1)))<0
49             q(i)=-sqrt(abs(1-(sigma*((n(i)/n_R)^2-1))));
50             Q(i)=q(i)*Q_R;
51             n_ed(i)=n(i)*(D2/sqrt(g*H_R));
52             Q_ed(i)=Q(i)/(D2^2*sqrt(g*H_R));
53             H(i)=(((n_R*D2)/n_ed(i))^2)/g;
54             O(i)=Q_ed(i)*D2^2*sqrt(g*H(i));
55     end
56 end
57
58 %CURVA H-Q
59 ind2 = H>0 & H<15;
60 title('H-Q diagram')
61 ylabel('H [m]')
62 xlabel('Q [m^3/h]')
63 legend ('Characteristic curve H-Q','BEP', 'Location', 'northwest')
64
65 %eficiencia
66 P1=xlsread('data.xlsx','B2:B18');
67 P2=P1;
68 Qtest=xlsread('data.xlsx','D2:D18');
69 %Qtest=xlsread('data.xlsx','D2:D18');
70 Htest=xlsread('data.xlsx','C2:C18');
71 %Htest=xlsread('data.xlsx','B2:B18');
72
73 %Encontrar BEP
74 %PowT = [0.6 0.51 0.42 0.36 0.27 0.22 0.19 0.15 0.11 0.065 0.025 0.005 -0.02 -0.06 -0.08 -0.1 -0.11];
75 %PowT = [];
76 %PowT = [0.005 0.010 0.020 .025 0.065 0.070 0.078 0.086 0.1 0.11 0.15 0.19 0.22 0.27 0.36 0.42 0.51];
77 PowT = [0.005 0.01 0.015 0.02 0.025 0.03 0.035 0.04 0.045 0.05 0.055 0.06 0.0607 0.061 0.062 0.064 0.2 0.57];
78 %PowT = 0.108;
79 for i = 1:length(Qtest)
80     etaT(i) = ((PowT(i)*1000)/(rho*g*(Qtest(i)/3600)*H_R));
81     %etaT(i) = (PowT(i)*1000)/(rho*g*(Qtest(i)/3600)*Htest(i));
82     %etaT(i) = (rho*g*(Qtest(i)/3600)*H_R)/(PowT(i)*1000);
83     %etaT(i) = (PowT*100000)/(rho*g*(Qtest(i))*Htest(i));

```

```
93     end
94     [M,I]=max(etaT);
95     O=0.4389;
96     JH=4;
97
98
99     %CURVA EFICIENCIA
100    figure;
101    ind3 = etaT>-0.15 & etaT<1.2;
102    hold on
103    plot (Qtest(ind3),etaT(ind3),'b','linewidth',1)
104    grid on
105    plot(JH,0,'r *','markers',10)
106    txt2=['\uparrow \eta = ' num2str(round(O,3))];
107    text(17.9,0.36,txt2,'FontSize',12)
108    title('\eta - Q diagram')
109    ylabel('\eta', 'FontSize',18)
110    xlabel('Q [m^3/h]')
111    legend ('PAT efficiency curve','BEP','Location','southeast')
```