

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Bombas Utilizadas como Turbinas Micro Generadoras de
Electricidad para Pequeñas Comunidades**

Victor Alfonso Gallo Mier

Ingeniería Civil

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

Quito, 18 de mayo 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 Micro Generadoras de Electricidad
para Pequeñas Comunidades**

Victor Alfonso Gallo Mier

Nombre del profesor, Título académico

Sixto Andrés Durán-Ballén Ochoa, PhD

Quito, 18 de mayo 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: Victor Alfonso Gallo Mier

Código: 00201176

Cédula de identidad: 1722104492

Lugar y fecha: Quito, 18 de mayo 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UNPUBLISHED DOCUMENT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>.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de todo corazón a mis padres, Alfonso y Germania, quienes me han ayudado a conseguir mis sueños académicos y han sido mi soporte durante toda mi etapa universitaria. A mi hermana, Samantha, y mis abuelitas, Julieta y María Luisa, quienes han sido mi apoyo incondicional. A Dayanna, quien siempre me ha ayudado a ser mejor persona y apoyado en cualquier momento.

También quiero agradecer a mi tutor de grado, Sixto, quien me ha guiado y ayudado académicamente en esta investigación. A los ingenieros, Ricardo Buitrón y Antonio Villagómez, quienes otorgaron la idea del tema de investigación y han sido partícipes en la misma. A los estudiantes de Ing. Mecánica, Anahí Barreto y Mateo Espín, por su apoyo en la investigación. Finalmente, agradezco al departamento de Ing. Civil de la Universidad San Francisco de Quito por proporcionar los fondos y los materiales necesarios para esta investigación.

RESUMEN

La obtención de energía a bajo costo resulta muy conveniente para pequeñas comunidades, que a pesar de tener el agua como un recurso tan cercano muchas veces no es aprovechado por falta de los sistemas adecuados. Por ello, se realizó la investigación teórica sobre el funcionamiento de bombas hidráulicas que pueden funcionar como turbinas micro generadoras de electricidad como un recurso útil, eficaz y que cuenta con un factor de costo beneficio favorable hacia los usuarios. Se realizaron ensayos de laboratorio para poner en práctica los conocimientos teóricos y comprobar diferentes hipótesis sobre el uso de bombas como turbinas. Finalmente, se realizó un análisis sobre las aplicaciones del uso de este sistema y a su vez sobre los aspectos económicos y energéticos que se pueden generar.

El resultado de este proyecto, utilizando el sistema como turbinas, consiste en utilizar los cauces cerca de comunidades pequeñas para la producción diaria de electricidad necesaria por los usuarios; mientras que, utilizando el sistema en un sentido contrario como bomba, se pueden utilizar dichos cauces para abastecer una adecuada cantidad de agua para diferentes aplicaciones de uso como riego, abrevadero de animales, limpieza de instalaciones dedicadas a la cría de ganado e incluso para ocio (dependiendo de la calidad del agua). Este proyecto además de lograr beneficios hídricos y eléctricos también facilita beneficios ambientales, ya que el agua recolectada del cauce que no se utiliza finalmente es devuelta al mismo, sin ningún cambio en su constitución.

Palabras clave: Bombas, Turbinas, Electricidad, Agua, Comunidades, Costo, Beneficio.

ABSTRACT

Obtaining energy at low cost is very convenient for small communities, which despite having water as a resource so close, is often not used due to lack of adequate systems. For this reason, theoretical research was carried out on the operation of hydraulic pumps that can function as micro turbines that generate electricity as a useful, effective resource that has a favorable cost-benefit factor for users. Laboratory tests were carried out to put theoretical knowledge into practice and test different hypotheses about the use of pumps as turbines. Finally, an analysis was carried out on the applications of the use of this system and in turn on the economic and energy aspects that can be generated.

The result of this project, using the system as turbines, is to use the causes near small communities for the daily production of electricity needed by users; while, using the system in the opposite direction as a pump, these causes can be used to supply an adequate amount of water for different applications such as irrigation, animal feeding, cleaning of facilities dedicated to cattle breeding and even for leisure (depending on the quality of the water). This project, in addition to achieving water and electricity benefits, also provides environmental benefits, since the water collected from the stream is finally returned to it, without any change in its constitution.

Key words: Pumps, Turbines, Electricity, Water, Communities, Cost, Benefits.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	17
Objetivos.....	19
Metodología.....	19
Resumen Sobre el Desarrollo del Tema	20
Desarrollo del Tema.....	21
1. Marco Teórico	21
1.1. Bombas Hidráulicas	21
1.1.1. Bombas Centrífugas.....	22
1.2. Turbinas.....	23
1.3. Bombas funcionando como turbinas (“PAT”).....	24
1.3.1. Elementos importantes de las PAT.	26
1.3.2. Diferencias entre usar una PAT o una turbina.....	28
1.3.3. Pérdidas hidráulicas en el sistema PAT.	30
1.3.4. Ventajas y desventajas entre usar un sistema PAT y una turbina común.....	32
1.4. Potencia y Energía.....	35
2. Ensayo de Laboratorio.....	37
2.1. Materiales.....	38
2.2. Configuración.	39
2.3. Pruebas y Resultados.....	43
2.4. Análisis inverso.	59

2.5. Curva de resistencia del sistema para la prueba N° 1.	62
2.6. Curva de resistencia del sistema para la prueba N° 9.	67
3. Análisis sistema PAT.	73
3.1. Aplicaciones de uso del sistema PAT	73
3.2. Análisis energético	74
3.3. Análisis económico.....	74
Conclusiones.....	80
Recomendaciones	82
Referencias bibliográficas.....	83
Anexo A: Bombas funcionando como turbinas (PAT)	88
Anexo B: Elementos importantes de las PAT	89
Anexo C: Diagrama de Moody	90
Anexo D: Relación de Longitud Equivalente y Rugosidad de Tubería Dependiendo del Material	91
Anexo E: Objetivos de desarrollo sostenible de la “ONU” que aporta el sistema PAT..	92
Anexo F: Potencia y energía generada según Anzola y Colón.....	93
Anexo G: Potencia y energía generada según Gilmer Apaza	94
Anexo H: Gráfica para la Selección del Capacitor	95
Anexo I: Materiales a Utilizar en el Ensayo de Laboratorio	96
Anexo J: Ficha Técnica de Bomba Utilizada en el Ensayo de Laboratorio	103
Anexo K: Esquema de Configuración del Sistema Hidráulico.....	104

Anexo L: Esquema de Configuración del Sistema Eléctrico (Cambio de Giro Motor) 109

Anexo M: Planilla del Servicio Eléctrico en Ecuador 110

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Datos necesarios para calcular parámetros útiles. Elaboración propia..</i>	46
<i>Tabla 2: Resultados Prueba N° 1: 1HP → 1HP. Elaboración Propia.</i>	47
<i>Tabla 3: Resultados Prueba N° 2: 1HP → 1/2HP. Elaboración Propia.</i>	48
<i>Tabla 4: Resultados Prueba N° 3: 1HP + 1/2HP (serie) → 1HP. Elaboración Propia. ...</i>	48
<i>Tabla 5: Resultados Prueba N° 4: 1HP + 1/2HP (paralelo) → 1HP. Elaboración Propia.</i>	49
<i>Tabla 6: Resultados Pruebas N° 5, 6, 7 y 8: Configuración de Condensador. Elaboración Propia.....</i>	52
<i>Tabla 7: Comprobación de Lectura del Caudal del Rotámetro. Elaboración Propia.</i>	56
<i>Tabla 8: Comprobación del Caudal Entregado por Bomba de 1 HP sin Impulsor en la PAT. Elaboración Propia.....</i>	58
<i>Tabla 9: Resultados Prueba N° 9: 2HP → 1HP. Elaboración Propia.</i>	60
<i>Tabla 10: Pérdidas de Energía Prueba N° 1. Elaboración Propia.....</i>	61
<i>Tabla 11: Pérdidas de Energía Prueba N° 9. Elaboración Propia.....</i>	61
<i>Tabla 12: Datos Resistencia del Sistema con Bomba de 1 HP. Elaboración Propia.</i>	64
<i>Tabla 13: Pérdidas Totales del Sistema Hidráulico (Bomba de 1 HP a PAT 1 HP). Elaboración Propia.....</i>	65
<i>Tabla 14: Datos Resistencia del Sistema Considerando Total de Pérdidas en la PAT con Bomba de 1 HP. Elaboración Propia.</i>	66
<i>Tabla 15: Datos Resistencia del Sistema con Bomba de 2 HP. Elaboración Propia.</i>	68
<i>Tabla 16: Pérdidas Totales del Sistema Hidráulico (Bomba de 2 HP a PAT 1 HP). Elaboración Propia.....</i>	69

<i>Tabla 17: Datos Resistencia del Sistema Considerando Total de Pérdidas en la PAT con Bomba de 2 HP. Elaboración Propia.</i>	70
<i>Tabla 18: Estimación de Costos para la Instalación, Operación y Mantenimiento de Sistema PAT. Elaboración Propia.</i>	78
<i>Tabla 19: Resultado de potencia (kW) y energía generada (kWh/día) por medio del sistema PAT (Anzola, A. y Colón, K., 2018).</i>	93
<i>Tabla 20: Potencias útiles generadas por el sistema PAT, según caudal y altura piezométrica (Apaza, 2018).</i>	94
<i>Tabla 21: Energía producida en promedio anual por el sistema PAT, según potencia obtenida y el número de horas trabajadas (Apaza, 2018).</i>	94

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Bomba con desplazamiento positivo. Fuente: Dreamstime.....</i>	21
<i>Figura 2: Bomba de intercambio de movimiento. Fuente: Basher Uruguay.....</i>	22
<i>Figura 3: Bombas neumáticas. Fuente: Novatecfs.....</i>	22
<i>Figura 4: Bomba Centrífuga. Fuente: Indupal.</i>	23
<i>Figura 5: Turbina Hidráulica. Fuente: Pico Hydro.....</i>	24
<i>Figura 6: Energía que ingresa a una bomba y sale de una turbina (POWER TURBINES, 2021).....</i>	25
<i>Figura 7: Funcionamiento de una bomba (a) y de una turbina (b) en el sistema PAT (Apaza, 2018).....</i>	25
<i>Figura 8: Elementos estructurales que son similares en una bomba y una turbina en vistas transversales (Universidad Politécnica de Valencia, 2021).....</i>	27
<i>Figura 9: Ensamblaje de Capacitor. Fuente: Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.</i>	40
<i>Figura 10: Esquema Sistema Hidráulico. Elaboración Propia.</i>	42
<i>Figura 11: Sistema Hidráulico. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.....</i>	42
<i>Figura 12: Curva Característica Bomba Centrífuga "Pedrollo" 1 HP. Elaboración Propia.....</i>	44
<i>Figura 13: Curva Característica Bomba Periférica "Paolo" 1/2 HP. Elaboración Propia.</i>	44
<i>Figura 14: Curva Característica Bomba Sumergible "Gould Pumps ITT" 2 HP. Elaboración Propia.....</i>	45
<i>Figura 15: Cambio de Giro Motor de Bomba. Fuente: Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.....</i>	52
<i>Figura 16: Acople de Eje de 14.50 mm. Elaboración Propia.</i>	54
<i>Figura 17: Comprobación de Velocidad Angular Mecánicamente. Elaboración Propia.....</i>	54

<i>Figura 18: Generación de 80.50 V con Capacitor Electrolítico de 80 μf. Elaboración Propia.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 19: Generación de 88.50 V con Capacitor Electrolítico de 80 μf y 60 μf en Paralelo. Elaboración Propia.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 20: Impulsor de la Bomba "Pedrollo" de 1HP. Fuente: Laboratorio de Hidráulica USFQ.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 21: Curva de Resistencia del Sistema 1 HP. Elaboración Propia.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 22: Curva de Resistencia del Sistema 1 HP Considerando Pérdidas en la Entrada de la PAT. Elaboración Propia.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 23: Curva de Resistencia del Sistema 2 HP. Elaboración Propia.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 24: Curva de Resistencia del Sistema 2 HP Considerando Pérdidas en la Entrada de la PAT. Elaboración Propia.</i>	<i>71</i>
<i>Figura 25: Brida de Impulsión Interna de la Bomba. Laboratorio Ing. Hidráulica USFQ... 72</i>	
<i>Figura 26: Energía que ingresa a una bomba y sale de una turbina (POWERTURBINES, 2021).....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 27: Funcionamiento de una bomba (a) y de una turbina (b) en el sistema PAT (Apaza, 2018).....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 28: Elementos estructurales que son similares en una bomba y una turbina en vistas transversales (Universidad Politécnica de Valencia, 2021).</i>	<i>89</i>
<i>Figura 29: Diagrama de Moody, para obtener el factor de fricción (f) según la rugosidad y diámetro de la tubería, y el número de Reynolds (Francisco, 2015).....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 30: Factor de relación y longitud equivalente para válvulas y acoplamientos (Mott, 2006).....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 31: Rugosidad de tubería dependiendo del material (Mott, 2006).</i>	<i>91</i>

<i>Figura 32: Objetivos de desarrollo sostenible de la “ONU” a los que favorece el uso de un sistema PAT (ONU, 2015).</i>	92
<i>Figura 33: Gráfica para Selección del Capacitor. (Trillos, 2011).</i>	95
<i>Figura 34: Bomba Centrífuga de 1 HP Marca "Pedrollo". Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.</i>	96
<i>Figura 35: Tubería PVC de 1 in de diámetro. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.</i>	96
<i>Figura 36: Uniones Roscables Universales de 1in de diámetro. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.</i>	97
<i>Figura 37: Codos Tubería PVC de 1in de diámetro. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.</i>	97
<i>Figura 38: Acople Tubería PVC "Tee" de 1in de diámetro. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.</i>	97
<i>Figura 39: Neplos Corridos de 1in de diámetro. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.</i>	98
<i>Figura 40: Válvulas de Bola de 1in de diámetro. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.</i>	98
<i>Figura 41: Manómetro, Reducción Bushing PVC Roscable y de Acero Galvanizado de 1/2 in de diámetro. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.</i>	99
<i>Figura 42: Tanque de Almacenamiento de 85 Litros. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.</i>	99
<i>Figura 43: Rotámetro en Unidades de m³h con Neplo Corrido y Unión Roscable Universal. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.</i>	100
<i>Figura 44: Tacómetro Digital. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.</i>	100
<i>Figura 45: Condensador de Papel de 60 μf (izquierda) y Condensador Electrolítico de 80 μf (derecha). Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.</i>	101
<i>Figura 46: Herramientas varias. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.</i>	101
<i>Figura 47: Manguera de 1 pulg. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.</i>	101

<i>Figura 48: Bomba Marca "Paolo" de 1/2 HP. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.</i>	<i>102</i>
<i>Figura 49: Bomba Marca "Goulds Pumps" Sumergible de 2 HP. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 50: Ficha Técnica Bomba Pedrollo. (Pedrollo, 2021).....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 51: Conexión Sistema Hidráulico Prueba N° 1. Elaboración Propia.</i>	<i>104</i>
<i>Figura 52: Sistema Hidráulico Prueba N° 1. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 53: Conexión Sistema Hidráulico Prueba N° 2. Elaboración Propia.</i>	<i>105</i>
<i>Figura 54: Conexión Sistema Hidráulico Prueba N° 3. Elaboración Propia.</i>	<i>106</i>
<i>Figura 55: Conexión Sistema Hidráulico Prueba N° 4. Elaboración Propia.</i>	<i>107</i>
<i>Figura 56: Conexión Sistema Hidráulico Prueba N° 9. Elaboración Propia.</i>	<i>108</i>
<i>Figura 57: Configuración Sistema Eléctrico (Cambio de Giro Motor). Ing. Villagómez, A.</i>	<i>109</i>
<i>Figura 58: Planilla del Servicio Eléctrico en Ecuador. Elaboración Propia.....</i>	<i>110</i>

INTRODUCCIÓN

La producción de energía mediante combustibles fósiles ha sido aquel método más conocido y utilizado por un largo tiempo en todo el Ecuador y el mundo. Pero al ser sumamente contaminante debido a los gases de efecto invernadero que este produce se ha visto la necesidad de generar un método de obtención de energía limpia a bajo costo que se ha fortalecido con el paso de los años. Se han instaurado varias soluciones energéticas a nivel global como la energía nuclear (en Francia y Alemania), muy útil a corto plazo, pero con grandes desventajas ya que puede generar bastantes problemas ambientales y de salud. Las energías renovables son claramente una solución viable, como el aprovechamiento del sol con el uso de paneles solares o del viento para la generación de energía eólica; se debe tomar en cuenta que su máximo beneficio se obtiene a gran escala (Escuín, 2011).

La energía hidráulica es sumamente viable ya que se pueden esperar grandes resultados a mediano plazo y generalmente a gran escala para abastecer a grandes ciudades del país. En el Ecuador, según “CELEC EP” la energía hidráulica ha aportado el 91% total de energía disponible en el Sistema Nacional Interconectado para el consumo nacional y las exportaciones en el año 2020, y el 77% de la producción energética total del país (CELEC EP, 2021).

La energía hidráulica a gran escala es totalmente un éxito en nuestro país, pero a pesar de esto aun existentes pequeñas comunidades con grandes complicaciones en este aspecto. Por ende, se ha propuesto la producción de energía a menor escala utilizando bombas que funcionan como turbinas micro generadoras de electricidad utilizando pequeños causes para su uso y sus beneficios son amplios, tanto en el campo económico como en el ambiental. Este proyecto es sumamente económico debido a la facilidad de obtener una bomba de bajo costo al igual que su mantenimiento en talleres con técnicos especializados. Además, se justifica

económicamente comparado al extenso costo de una instalación de tendido eléctrico y al costo y mantenimiento del uso de una turbina. En términos ambientales y de pérdidas energéticas hidráulicas su impacto es simplemente escaso debido a que el agua no utilizada finalmente regresa a su cauce original sin ningún cambio en su constitución; esto es, siempre y cuando se realicen adecuadamente las obras de canalización del agua.

En el Ecuador, existen varias zonas rurales que no cuentan con el servicio eléctrico público y esto se ha convertido en una problemática importante para el país. En estas zonas los adultos, niños y personas de la tercera edad tienen dificultades principalmente para estudiar, cocinar, divertirse, e incluso son vulnerables en el aspecto de salubridad; lamentablemente muchas veces se ven obligados a caminar extensas distancias entre carreteras y montañas para poder satisfacer estas necesidades. Además, utilizan velas para la iluminación, estufas de carbón y hornos de leña para cocinar afectando gravemente a la salud de las personas. Para solventar todas estas dificultades se propone un proyecto donde se pueden aprovechar pequeños causes para generar electricidad a través del funcionamiento inverso de una bomba; es decir, como turbina generando grandes beneficios en las zonas rurales donde habitan pequeñas comunidades.

Este proyecto está enfocado en proporcionar un beneficio social para que varias comunidades lejanas tengan la capacidad de mejorar su estilo de vida gracias al servicio eléctrico. A través de este proyecto también se pueden beneficiar varios sectores sociales y empresariales; como por ejemplo el uso de este proyecto de manera individual o personal que podría resultar en beneficios económicos. De igual manera, beneficios de gran escala con proyectos municipales, e incluso empresas privadas de índole turístico ambiental se podrían enfocar en estos proyectos ya que les ayuda a cumplir su objetivo de ser autosustentables.

En adelante, para el término “Bomba como turbina” se utilizará la abreviación de sus siglas en inglés como “PAT” que provienen de “Pump As Turbine”.

OBJETIVOS

1. Metodología para convertir una bomba en turbina micro generadora de electricidad.
2. Estimación de energía eléctrica que se puede aprovechar.
3. Plantear aplicaciones sobre el uso del cauce cerca de comunidades alejadas para mejorar su calidad de vida.
4. Analizar el factor de costo beneficio en base a las aplicaciones de uso.

METODOLOGÍA

1. Realizar una investigación exhaustiva para conocer sobre el funcionamiento de una bomba turbina.
2. Realizar una investigación y análisis numérico para determinar el aprovechamiento eléctrico.
3. Realizar ensayos de laboratorio para determinar las aplicaciones viables hacia dichas comunidades.
4. Determinar qué tipo de bombas se pueden utilizar para cumplir con las aplicaciones viables hacia dichas comunidades.
5. Realizar una investigación y análisis económico sobre las aplicaciones de uso.

RESUMEN SOBRE EL DESARROLLO DEL TEMA

Breve resumen del desarrollo del tema se muestra a continuación:

- En el capítulo 1 se habla sobre el marco teórico de la investigación sobre el funcionamiento de bombas hidráulicas utilizadas como turbinas.
- En el capítulo 2 se habla sobre los ensayos de laboratorio realizados para comprobar los fundamentos teóricos y resolver las hipótesis generadas en la investigación.
- En el capítulo 3 se habla de las aplicaciones sobre el funcionamiento del sistema bombas usadas como turbinas y sobre los aspectos energéticos y económicos.

DESARROLLO DEL TEMA

1. Marco Teórico

1.1. Bombas Hidráulicas

Es un dispositivo mecánico de energía que trabaja con un fluido para lograr transformar energía mecánica en energía hidráulica. Su función principal es incrementar y transferir energía a un líquido aumentando su presión y velocidad para permitir su transporte en una instalación deseada (F. Zarza, L., s.f.). Existen varios tipos de bombas y se los clasificará según su funcionamiento.

- Bombas con desplazamientos positivos o volumétricos: Su contorno móvil de volumen variable ocasiona que el flujo avance a través de la máquina, cediendo energía de presión al fluido mediante volúmenes confinados. Entre los principales ejemplares están las bombas de émbolo, membranas, engranajes, paletas y pistones.



Figura 1: Bomba con desplazamiento positivo. Fuente: Dreamstime.

- Bombas de intercambio de movimiento o turbobombas: Cede energía al fluido mediante la variación del momento cinético producido en el rodete de la bomba. Entre los principales ejemplares se encuentran las bombas centrífugas, axiales y helio centrífugas.



Figura 2: Bomba de intercambio de movimiento. Fuente: Basher Uruguay.

- Bombas según el tipo de accionamiento: Estas pueden ser electrobombas, bombas neumáticas, manuales y de accionamiento hidráulico.



Figura 3: Bombas neumáticas. Fuente: Novatecfs.

1.1.1. Bombas Centrífugas.

Las bombas de intercambio de movimientos, como las bombas centrífugas, son las más sencillas de modificar para las especificaciones y características necesarias del usuario. Como su propio nombre lo menciona, las bombas centrífugas, actúan bajo el principio de centrifugación; en el cual el motor o cualquier otro método que las acciones provoca el movimiento de los álabes y la succión del fluido. El principio fundamental de este equipo es elevar con rapidez la presión del fluido, consecuentemente para aligerar dicha presión el fluido escapa por la salida de la bomba. Cabe destacar que este sistema no funciona hasta que la carcasa de la bomba esté totalmente llena. En su clasificación existen dos tipos de bombas

centrífugas, las horizontales que son más económicas y por ende más usadas debido a su sencilla instalación y accesibilidad para su inspección y mantenimiento. Las bombas centrífugas verticales son menos espaciales y más utilizadas en depósitos de agua, lagos o pozos donde la succión no supera los 6 metros de profundidad (Universidad Nacional de Ingeniería, 2019).



Figura 4: Bomba Centrífuga. Fuente: Indupal.

1.2. Turbinas

Es un dispositivo mecánico compuesto por rodets y álabes por los cuales el flujo circula, capaz de transformar energía hidráulica en energía mecánica, que posteriormente puede ser transformada en energía eléctrica mediante un transformador. La mayoría de las turbinas hidráulicas funcionan con flujo axial o radial, incluso existen turbinas de flujo transversal por la cual el agua pasa dos veces en dirección transversal; es decir, en dirección del eje y en dirección contraria cuando se aleja de él (Planas, 2020). Las turbinas se pueden clasificar por la forma de obrar el agua.

- Turbinas de acción: Estas turbinas trabajan a altas presiones y su velocidad de rotación es controlada por una válvula de flujo. Estas turbinas se diferencian gracias a que el movimiento se produce en el mismo sentido del agua.

- Turbinas de reacción: Estas turbinas trabajan en sentido contrario del movimiento del flujo, perdiendo presión mientras este circula por los álabes, resultando en una presión nula o negativa al momento que esta sale del sistema.



Figura 5: Turbina Hidráulica. Fuente: Pico Hydro.

1.3. Bombas funcionando como turbinas (“PAT”)

Una PAT es un equipo de bombeo hidráulico que consiste en que la estructura de una bomba sea acoplada como una turbina proporcionando potencia de accionamiento necesario según la necesidad de los usuarios (Arenas, E., Cantizado, A. y Arenas, A.). El principio fundamental, en sectores donde habitan pequeñas comunidades donde la generación y principalmente la obtención de energía es muy poco asequible. Además, la alternativa de invertir en su propia central hidroeléctrica o utilizar un sistema hidráulico como turbina es sumamente costoso. Se recomienda captar energía hidráulica de causes o suministro de agua constante mediante el movimiento rotacional inverso de una bomba para convertirla en energía mecánica generando y recuperando energía adicional de manera económica; el modelo gráfico se puede observar a continuación.

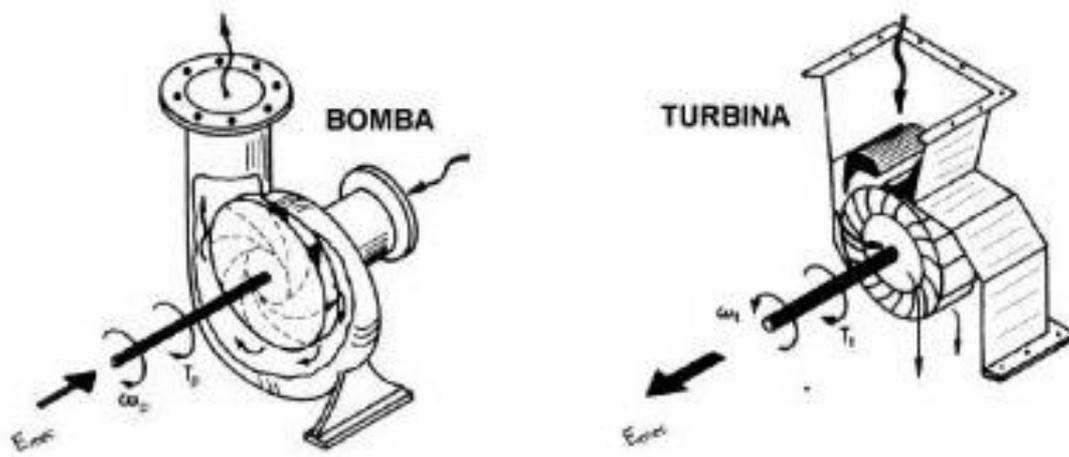


Figura 6: Energía que ingresa a una bomba y sale de una turbina (POWER TURBINES, 2021).

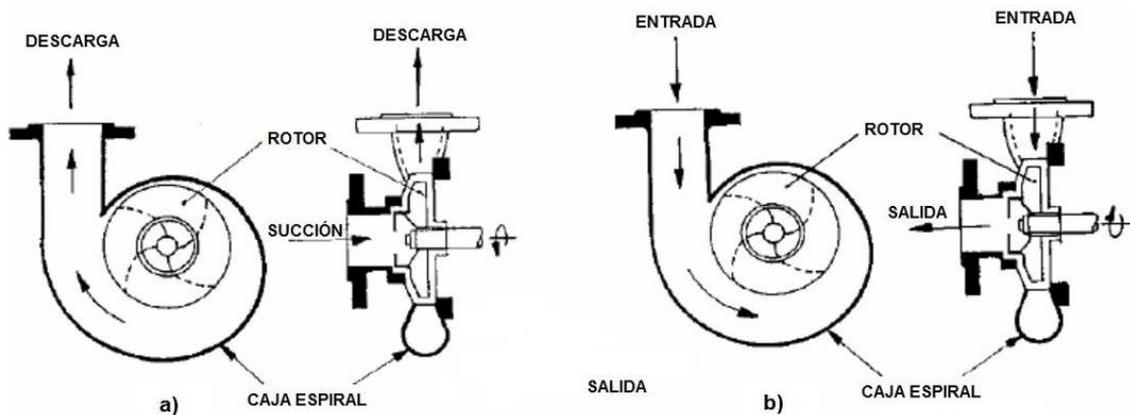


Figura 7: Funcionamiento de una bomba (a) y de una turbina (b) en el sistema PAT (Apaza, 2018).

Debido a que la estructura de una bomba no contiene un mecanismo de control hidráulico es importante que el sistema siempre posea un suministro constante o presentará inconvenientes debido al tamaño uniforme de los álabes guía. Con el fin de solucionar este inconveniente se han proporcionado varias soluciones como instalar álabes guías de diferentes tamaños capaces de distribuir uniformemente la cantidad de flujo. Una solución más sencilla y viable es colocar

una válvula de control en la tubería de entrada del sistema para que este pueda funcionar o detenerse sin problema en condiciones constantes.

En el caso de las PAT se puede utilizar la mayoría de los ejemplares de bombas debido a que no existe ninguna restricción en el ingreso del agua por la salida del sistema y obviamente de manera contraria. En el caso de tener grandes caudales con una gran cantidad de flujo se pueden utilizar bombas de doble flujo, e incluso desde el punto de vista optimista ambiental y arquitectónico se pueden utilizar bombas sumergibles integradas en el curso del agua.

El principio de una PAT funcionando como bomba consiste en que el fluido entra en la succión de la bomba a baja presión, mientras el rotor transforma la energía de velocidad en presión, por lo que el fluido se descarga con mayor presión. Mientras que el procedimiento de la PAT funcionando como turbina consiste en que el fluido entra con energía de presión, acciona el rotor inversamente generando y reservando energía a bajo costo, mientras el fluido se descarga con menor presión (Leiva, 2018). La propuesta de funcionamiento sobre este tipo de proyecto se resume en que, el funcionamiento diurno de la PAT sea capaz de generar energía eléctrica para abastecer las aplicaciones de uso doméstico, industrial o comercial; mientras que, el funcionamiento nocturno del sistema PAT tenga la capacidad de almacenar una gran cantidad de agua con un mínimo de recursos eléctricos capaz de abastecer las mismas aplicaciones mencionadas anteriormente.

1.3.1. Elementos importantes de las PAT.

Una PAT tiene ciertos elementos que se deben destacar gracias a la similitud estructural que tienen las bombas y las turbinas, algunos se describen a continuación:

- **Brida de impulsión:** Elemento por el cual sale el agua a presión funcionando como bomba y por el contrario cuando se la utiliza como PAT.

- Voluta: Sección de la estructura que distribuye uniformemente el caudal a lo largo de la corona directriz.
- Corona directriz: Sección fija de la estructura que transforma la energía de presión en energía cinemática.
- Rodete: Elemento móvil que rota debido a los álabes.
- Álabes: Elementos similares a cuchillas rotatorias que están siempre en contacto con el agua.
- Eje: Elemento móvil rotativo que conecta el sistema hidráulico con el sistema eléctrico de la máquina.
- Motor eléctrico: Dependiendo del tipo de bomba el motor actúa como generador de energía mecánica para posteriormente transformarla en energía hidroeléctrica.
- Brida de aspiración: Elemento por el cual entra el agua por succión funcionando como bomba y por el contrario cuando se la utiliza como PAT.

Algunos de los elementos mencionados anteriormente se muestran a continuación (López Jiménez & Pérez Sánchez , 2021):

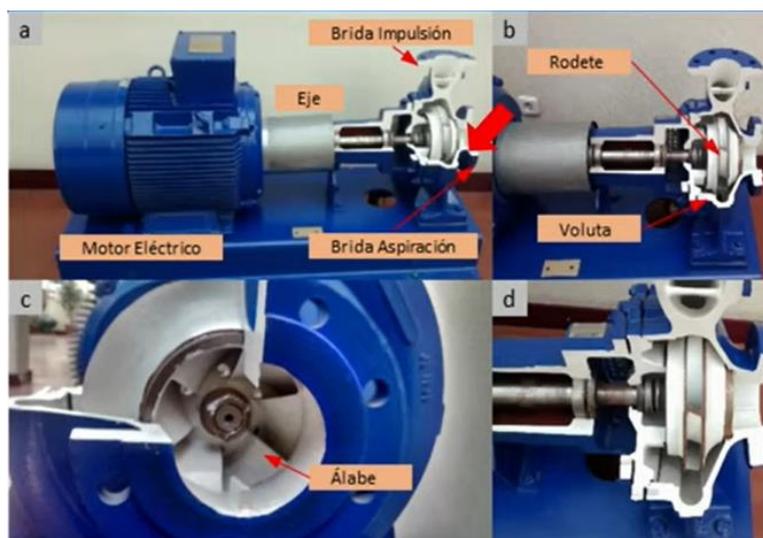


Figura 8: Elementos estructurales que son similares en una bomba y una turbina en vistas transversales (Universidad Politécnica de Valencia, 2021).

Las PAT con el pasar del tiempo se han convertido en uno de los métodos de energía renovable más prometedores del mundo debido a su bajo costo y fácil desarrollo. Para la sección de una PAT se deben tomar en cuenta ciertos aspectos esenciales como la adaptación constante del caudal y de la altura piezométrica, la potencia de salida del sistema, la velocidad nominal de la tubería debe ser menor a la máxima permisible por la bomba, aspectos de sitio como desnivel topográfico, características de conducción como diámetros, expansiones, contracciones y rugosidades. Además, es importante considerar el efecto de cavitación, el cual consiste en la formación de burbujas de vapor a altas temperaturas generadas por los cambio bruscos de presión o velocidad que afectan a los sistemas hidráulicos creando turbulencias y fricciones en el fluido, ocasionando una pérdida de rendimiento importante en el sistema, impidiendo el desplazamiento adecuado de este y en ocasiones provoca la corrosión del metal en el material de contacto. En un bomba existen dos zonas muy importantes donde se puede producir este fenómeno y son en el ojo del rodete cuando existe demasiado vacío que excede la presión del fluido, y en la voluta cuando la altura de descarga es demasiado alta variando el punto de trabajo fuera de su funcionamiento normal (Pricast, 2009) y (Monje, s.f.).

1.3.2. Diferencias entre usar una PAT o una turbina.

La producción de energía limpia o energía renovable ha impulsado la creación o adaptación de diferentes métodos de obtención de energía. Las consecuencias de utilizar una turbina como medio principal para generar electricidad a pequeña y a gran escala han resultado en costos demasiado elevados, además de tener un complicado sistema de instalación y mantenimiento. El usar una PAT es muy útil como se ha mencionado anteriormente, pero hay que destacar ciertas diferencias que resultan importantes de determinar para el funcionamiento de esta.

La principal diferencia que se puede determinar es que la bomba no posee un mecanismo de control de flujo, lo que explica su bajo costo y la necesidad de colocar una válvula de control,

elevando así insignificadamente su valor. Esta es la razón principal por que el sistema PAT siempre debe tener condiciones constantes de caudal y altura piezométrica, además es útil en reducir diferencias de presión.

En el caso de tener un amplio rango de caudales y alturas en locaciones donde se desee utilizar este sistema es primordial el uso de bombas, ya que la variedad de especificaciones disponibles de este sistema hidráulico concuerda con lo mencionado anteriormente. Mientras que, el diseño funcional de una turbina siempre se diseña para un emplazamiento o características específicas.

El funcionamiento de una PAT se puede diferenciar según el modo de uso tomando en cuenta las siguientes características principales como: el caudal, altura piezométrica, potencia y eficiencia energética.

Utilizando el sistema PAT como bomba el caudal del sistema tiende a disminuir mientras aumenta la altura piezométrica, hasta llegar a la denominada altura de corte donde el caudal se reduce a cero. En cambio, en el funcionamiento como una turbina el caudal del sistema aumentará proporcionalmente con la altura piezométrica.

En el caso del factor de potencia, como bomba, depende del tipo de máquina que se utilice para el proceso, en el caso de utilizar un flujo real la potencia disminuirá conforme aumente la altura piezométrica; mientras que, al utilizar un flujo axial la potencia y la altura piezométrica aumentarán de manera conjunta. En caso de utilizar una turbina, la potencia aumentará progresivamente, incluso sobrepasando la altura nominal para la cual fue establecida. Cabe mencionar que la potencia óptima de una turbina es mayor que la de una bomba, representando un mayor torque en el sistema.

La eficiencia del sistema es la característica principal por tomar en cuenta, en el caso de utilizar el sistema como bomba, este factor va aumentando según el aumento del caudal empezando desde un caudal nulo, mientras llega al punto nominal del funcionamiento y finalmente el

rendimiento decrece mientras sigue aumentando el flujo. En el caso del funcionamiento de una turbina, su eficiencia es de carácter similar al de una bomba, tomando en cuenta que el caudal inicial es su valor mínimo de uso o valor de vacío.

1.3.3. Pérdidas hidráulicas en el sistema PAT.

El sistema PAT funciona, básicamente, como cualquier otro sistema hidráulico, por lo cual siempre existirán pérdidas energéticas debido a la fricción que a su vez ocasiona la pérdida de presión sobre el fluido. Las principales pérdidas que se presentan en este sistema son debido a la fricción y a la resistencia generada por los acoples del sistema.

En el caso de las pérdidas hidráulicas por fricción se pueden clasificar en pérdidas primarias y secundarias. Las pérdidas primarias ocurren cuando el fluido está en contacto con la superficie del sistema de tuberías. En ciertos casos esta conducción ocasiona que se rocen unas capas de flujo con otras cuando el fluido es denominado como flujo laminar. En el caso de tener flujo turbulento las pérdidas se producen cuando las partículas del flujo rozan entre sí (FESMEX, 2022). Las pérdidas primarias por fricción se pueden analizar mediante la siguiente ecuación matemática en unidades del sistema internacional, ecuación de Darcy:

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

Donde:

- h_L es la pérdida de energía primaria por fricción por unidad de peso del fluido resultando en unidades de metros (m) o Joule sobre Newton ($\frac{J}{N}$).
- L es la longitud de la tubería.
- D es el diámetro de la tubería.

- v es la velocidad a la que circula el fluido.
- g es el valor de gravedad expresado en $\frac{m}{s^2}$.
- f es el factor de fricción según el diagrama de Moody, tomando en cuenta el número de Reynolds y la rugosidad del material de la tubería utilizada (Anexo C y D).

Ecuación del número de Reynolds:

$$NR = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\eta}$$

Donde:

- NR es el número de Reynolds.
- ρ es la densidad del fluido, en caso de agua es $1000 \frac{kg}{m^3}$.
- η es la viscosidad dinámica o absoluta del fluido, en caso de agua es $0.001 Pa \cdot s$.

Las pérdidas secundarias por fricción se producen por diferentes tipos de acoples, por ejemplo, cuando el fluido pasa por una expansión o contracción de tubería e incluso por accesorios colocados a lo largo del sistema de tubería, como válvulas. Se pueden analizar estas pérdidas mediante la siguiente ecuación matemática expresada en unidades del sistema internacional.

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

Donde:

- h_v es la pérdida de energía secundaria por fricción por unidad de peso del fluido resultando en unidades de metros (m) o Joule sobre Newton $\left(\frac{J}{N}\right)$.
- k es un coeficiente de resistencia que se obtiene mediante la siguiente notación matemática:

$$k = f_T \cdot \left(\frac{Le}{D}\right)$$

Donde:

- f_T es el factor de fricción en turbulencia completa dependiendo del tipo de acoplamiento de la tubería.
- $\frac{Le}{D}$ es la relación de longitud equivalente de tubería del mismo diámetro reportada en tablas, según diferentes literaturas (Anexo D).

Las pérdidas hidráulicas producidas por choque ocurren principalmente en el rodete debido a que el caudal en movimiento por el sistema PAT es diferente al predeterminado de diseño, constatando choques a la entrada del rodete y alrededor del sistema difusor (Leiva, 2018). En esta sección del sistema PAT también existen pérdidas hidráulicas por conducción cuando existe un gran número de álabes, teniendo un mayor perímetro mojado, lo que resulta en un menor radio hidráulico, es decir menor eficiencia de flujo.

Las pérdidas hidráulicas volumétricas se producen en ciertos puntos específicos de las PAT, en el caso de la entrada y salida del sistema no se puede despreciar esta consideración debido al gradiente hidráulico que se genera entre ambos puntos.

1.3.4. Ventajas y desventajas entre usar un sistema PAT y una turbina común.

1.3.4.1. Ventajas.

- Como se ha mencionado anteriormente el costo de utilizar una PAT es sumamente viable ante el costo de una turbina común, principalmente el uso de una bomba para este funcionamiento se debe gracias a la geometría idéntica que existe entre ambos elementos. Al existir una mayor disponibilidad y variedad de tipos de bombas este factor favorece principalmente al costo de adquisición, gracias a la “sencilla”

fabricación de este elemento ante la de una turbina. Además, la instalación, el funcionamiento y principalmente el mantenimiento de este elemento es sumamente favorable ya que no se necesita conocimientos técnicos altamente calificados.

- El resultado del funcionamiento de una PAT es proporcionar energía limpia y renovable de manera constante y o predecible, con la simplicidad de transformaciones energéticas produciendo una excelente mejora en el rendimiento y en el impacto ambiental. Por ejemplo, si se compara el sistema PAT con el sistema de bombeo de motores eléctricos este afecta al entorno ambiental y su rendimiento no es óptimo. Funcionalmente se puede comparar el uso de otras energías renovables como energía eólica o solar que proporcionan energía de manera intermitente e impredecible. La reducción de costos energéticos se reduce significativamente debido a que el sistema PAT, por ejemplo, es capaz de reemplazar al funcionamiento del elemento de estrangulamiento que implica un costo sumamente elevado en la obtención de energía eléctrica de manera común (POWERTURBINES, 2021).
- Organizaciones internacionales como la Organización de las Naciones Unidas (“ONU”) y el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (“CIEMAT”) buscan establecer implementaciones coherentes en los ámbitos de energía, desarrollo sostenible y medio ambiente. Por lo tanto, al hacer uso del sistema PAT se está contribuyendo con estas organizaciones para el mejoramiento del ecosistema mundial, principalmente favoreciendo algunos objetivos de desarrollo sostenible de la “ONU” como agua limpia y saneamiento, energía asequible y no contaminante, acción por el clima, además de la conservación de ecosistemas terrestres y entre otros (Anexo E).
- El objetivo principal de este proyecto es abastecer energéticamente a pequeñas comunidades que no cuentan con este servicio. Al usar un sistema PAT, en estos casos,

se reducirían significativamente los costos de generación y transporte de agua y electricidad, ya que la instalación del sistema se puede realizar en lugares cercanos a los centros de consumo.

- El uso de una PAT en vez de una turbina de uso común puede favorecer económicamente a varios sectores empresariales o sociales debido a innovaciones sobre proyectos individuales o personales, municipales e incluso pueden favorecer a la empresa privada. Especialmente al sector turístico que está enfocado hacia un entorno ambiental cuyo objetivo es ser autosustentable.

1.3.4.2. Desventajas.

- La utilización del sistema PAT también presenta ciertas pequeñas desventajas que, aunque no son muy problemáticas, son sumamente muy importante de considerar antes de poner en práctica un proyecto de tal envergadura. Principalmente, la falta de información sobre el funcionamiento de una PAT en los catálogos de fabricantes de bombas dificultan varios aspectos, como la instalación y el propio funcionamiento del sistema. Además, al no tener un dispositivo de control hidráulico, como se mencionó anteriormente, esto implica un costo adicional al momento de adquirir este sistema y siempre se deberán tener condiciones constantes de caudal y altura piezométrica.
- El uso del sistema PAT resultará en una producción de energía menor que una turbina, al igual que se obtiene una eficiencia menor, debido a que se está modificando el funcionamiento del equipo para el cual fue diseñado.
- Existe el riesgo de cavitación en la bomba debido al cambio de presión y velocidad en el sistema, ya que esta no fue diseñada para realizar las funciones de una turbina.

1.4. Potencia y Energía

Es sumamente importante conocer la eficiencia y la cantidad de producción energética que un sistema hidroeléctrico puede generar, a su vez que factores se podrían modificar para obtener una mejor eficiencia en el sistema y consecuentemente abaratar costos de producción y mantenimiento. En un sistema PAT la cantidad de energía generada depende esencialmente del caudal turbinado y de la caída del agua disponible útil del sistema; es decir, de la variación de altura que existe entre los puntos de ingreso de flujo al sistema (aguas arriba) y de salida del flujo del sistema (aguas abajo).

Según Anzola y Colón, quienes realizaron un ensayo sobre el aprovechamiento de energía en redes de distribución de agua potable a través de un sistema PAT en la ciudad de Barranquilla - Colombia, obtuvieron los siguientes resultados energéticos utilizando una bomba centrífuga “IHM 8x31 PE” de 35 HP con capacidad máxima de 680 GPM y una altura media aprovechable de 46 metros. En el caso de estudio se realizó el ensayo con condiciones constantes de caudal de 444 GPM \approx 28 L/s y una altura piezométrica de 30 metros obteniendo una potencia mínima de 9.17 KW y una potencia máxima de 13.46 KW, frecuentando valores entre los 10 y 12 KW; generando una energía neta promedio de hasta 240 KWh/día (Anzola, A. y Colón, K., 2018) (Anexo F).

Entre otras investigaciones sobre el funcionamiento y operación del sistema PAT se encuentra una tesis a cargo del Ingeniero Gilmer Apaza de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa – Perú. En este ensayo se consideró la producción hipotética continua de energía durante 15 horas al día con varios caudales a ensayar, tomando en cuenta las condiciones constantes de una altura piezométrica de 85 metros; para el caso de un caudal de 38 L/s se obtuvo una potencia útil de 27 KW y haciendo funcionar el sistema por 8 horas se obtuvo una energía total de 212 KWh, tomando en cuenta las pérdidas energéticas. De esta investigación

se obtuvieron dos ensayos más con potencias útiles generadas de 40 y 65 KW con caudales de 55 y 85 L/s, respectivamente. La cantidad total de energía generada mediante el sistema PAT durante las 15 horas al día y utilizando los tres caudales más eficientes se obtuvo una energía total de 594 KWh/día (Apaza, 2018) (Anexo G).

Según lo descrito anteriormente se puede comprobar que el desarrollo de un sistema PAT funciona adecuadamente para generar electricidad de manera eficiente, pero cabe destacar que estos valores energéticos y de potencia son obtenidos gracias a los sistemas PAT de gran capacidad, como por ejemplo la bomba utilizada por “Anzola y Colón” de 35 HP, que se podrían considerar como una central hidroeléctrica debido a su gran capacidad de producir electricidad; los resultados se pueden evidenciar en los Anexos F y G. Se expuso estas investigaciones previas para comparar con los ensayos que se realizaron en el laboratorio de ingeniería hidráulica de la Universidad San Francisco de Quito a menor escala, como un sistema PAT micro generador de energía con pequeños caudales esperando obtener una eficiencia suficiente para pequeñas comunidades que no disponen del servicio de electricidad.

2. Ensayo de Laboratorio

Para realizar los ensayos de laboratorio se debe tener en cuenta que cualquier motor; por ende, cualquier bomba, puede utilizarse como generador bajo las circunstancias adecuadas. Un aspecto sumamente importante que considerar es la relación entre la potencia de la PAT y el condensador que se debe utilizar ya que, según la gráfica del diagrama de selección de capacitores (Trillos, 2011) (se puede observar en el Anexo H) esto varía en función del tipo de corriente de la PAT ya sea monofásica o trifásica y de la velocidad angular de diseño o nominal. Un condensador eléctrico o capacitor es un dispositivo pasivo capaz de almacenar energía eléctrica en forma de diferencial de potencial para liberarla posteriormente, se puede medir en unidades de microfaradios (μf). El almacenamiento de energía eléctrica utiliza dos placas o superficies conductoras en formas de láminas separadas por un material aislante (dieléctrico) que puede ser papel, aceite, aluminio, entre otros; estas estas placas se cargarán con la misma cantidad de energía, pero con diferente polaridad. Una vez cargadas estas placas están preparadas para soltar esa carga cuando se conecte a un receptor de salida (Areatecnologia, s.f.).

En este caso, la PAT que se utilizará para la producción de energía será una bomba Pedrollo de 1 HP de potencia nominal, de corriente monofásica y su velocidad angular nominal es de 3400 min^{-1} ; por ende, según la gráfica del diagrama de selección de capacitores (Trillos, 2011) (Anexo H) se necesitará un capacitor mínimo de 80 MUF (μf). Es recomendable, como lo menciona el gráfico, seleccionar la capacidad del inmediato superior que está marcado en el gráfico de 100 MUF (μf).

Además, se debe tener en cuenta que al momento que el fluido ingrese por la brida de impulsión, la velocidad angular del eje de la PAT deberá ser igual o mayor a la velocidad nominal determinada por el fabricante. Por ello, es sumamente importante considerar la

cantidad de flujo (caudal) que estará circulando por el sistema hidráulico ya que esto influirá en la velocidad angular del impulsor y del eje de la PAT.

2.1. Materiales.

Los materiales que se utilizaron para los ensayos de laboratorio se describen a continuación y se pueden observar a manera de ilustraciones en el Anexo I.

- 2 Bombas centrífugas marca “Pedrollo” modelo “CP 620” de 1 *HP* (ficha técnica se puede observar en el Anexo J).
 - Bomba “A” funcionará como tal.
 - Bomba “B” funcionará como turbina (PAT).
- 1 Bomba sumergible marca “Goulds Pumps ITT” modelo “HS20” de 2 *HP*.
- 1 Bomba periférica marca “Paolo” modelo “PBP-50” de 1/2 *HP*.
- 1 Capacitor electrolítico de 80 $\mu f \pm 5\%$ de 450 *VAC*.
- 3 Tuberías PVC de 1 *pulg* de diámetro de 0.50 *m* de largo.
- 1 Tubería PVC de 1 *pulg* de diámetro de 0.85 *m* de largo.
- 1 Tubería PVC de 1 *pulg* de diámetro de 1.65 *m* de largo.
- 1 Tubería PVC de 1 *pulg* de diámetro de 0.70 *m* de largo.
- 4 Uniones Roscables Universales de 1 *pulg* de diámetro.
- 2 Codos para Tubería PVC de 1 *pulg* de diámetro.
- 2 Acople de Tubería PCV tipo “Tee” de 1 *pulg* de diámetro.
- 8 Neplo corrido de 1 *pulg* de diámetro.
- 2 Válvulas de corte de 1 *pulg* de diámetro.
- 1 Manómetro de Glicerina.
- 1 Reducción Bushing PVC roscable de 1 *pulg* a 1/2 *pulg* de diámetro.
- 1 Reducción Bushing de acero galvanizado de 1 *pulg* a 1/2 *pulg* de diámetro.

- 1 Tanque de almacenamiento de 85 *litros*.
- 1 Rotámetro en unidades de m^3/h .
- 1 Tacómetro digital.
- 2 Uniones de manguera (pitón) de 2 *pulg* de diámetro.
- 1 Manguera de 2 *pulg* de diámetro (0.20 *m*).
- 1 Unión PVC roscable de 2 *pulg* de diámetro.
- 1 Reducción Bushing PVC roscable de 2 *pulg* a 1 *pulg* de diámetro.
- Cable eléctrico de 3 terminales 1.00 *m*.
- Manguera de agua.
- Herramientas varias.

2.2. Configuración.

Una vez obtenido todos los materiales descritos anteriormente se debe realizar la configuración del todo el sistema eléctrico e hidráulico.

2.2.1. Sistema Eléctrico:

Para la configuración del sistema eléctrico se deben realizar las siguientes conexiones y modificaciones en la PAT:

1. Se debe cambiar el capacitor que está ensamblado por defecto en la PAT.
 - 1.1. Retirar los 2 pernos que se encuentran ajustando la tapa superior de la bomba donde se realizan las conexiones eléctricas y desmontarla.
 - 1.2. Retirar el capacitor con cuidado, en este caso reemplazaremos un capacitor de 60 μf y 300 *VAC* por un capacitor electrolítico de 80 μf y 450 *VAC*.
 - 1.3. Al momento de retirar el capacitor se observarán 2 conectores que salen del interior de la bomba (conectados en el motor) los cuales son terminales de trabajo y de arranque. Además, el capacitor estará conectado por medio de un

cable o una placa metálica la cual transmite la corriente al capacitor cuando este funciona como bomba.

- 1.4. Se debe conectar el sistema de la misma manera, los 2 conectores que salen del motor se deben conectar el capacitor electrolítico y con ayuda de un cable eléctrico se debe conectar la placa metálica al capacitor.

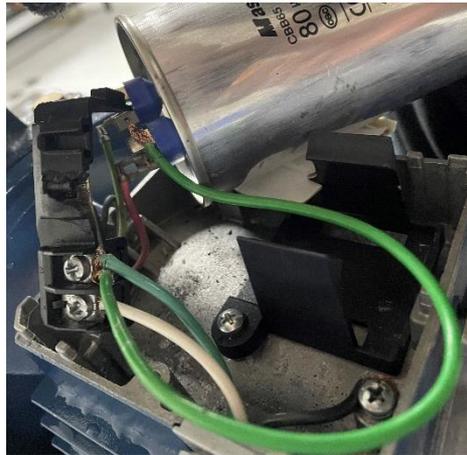


Figura 9: Ensamblaje de Capacitor. Fuente: Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.

2.2.2 Sistema Hidráulico:

Para la configuración del sistema hidráulico se referirá como sección “A” y “B” a la sección izquierda y derecha del tanque de almacenamiento respectivamente:

Sistema Hidráulico para Bomba de 1 HP.

1. Realizar 2 orificios de 1.00 pulg de diámetro a cada extremo del tanque de almacenamiento y conectar las tuberías de 0.50 m de largo a cada lado.
2. Sección “A” (izquierda) del sistema:
 - 2.1. Con ayuda del niple corrido y de la unión universal conectar la tubería de 0.50 m de largo en la brida de aspiración de la bomba.
 - 2.2. Colocar el niple corrido y la unión universal, seguido de la llave de paso, en la brida de impulsión de la bomba. Posteriormente colocar el manómetro con ayuda del acople de tubería tipo “Tee” y de las reducciones bushing.

2.3. Colocar la tubería de 0.50 m de largo, el rotámetro, la válvula reductora de presión y el codo de tubería.

3. Sección “B” (derecha) del sistema:

3.1. Con ayuda del neplo corrido y de la unión universal, seguida de la llave de paso, conectar la tubería de 0.50 m de largo en la brida de aspiración de la bomba que funcionara como turbina.

3.2. Conectar la tubería de 0.85 m de largo juntamente con el neplo corrido y la unión universal en la brida de impulsión de la bomba que funcionara como turbina.

3.3. Colocar el codo de tubería en el otro extremo de la tubería.

4. Sección superior central del sistema (conexión entre “A” y “B”):

4.1. Conectar la tubería de 1.65 m de largo al codo mencionado en el paso 2.3 y al codo mencionado en el paso 3.3.

Sistema Hidráulico para Bomba Sumergible de 2 HP.

- 1.** Se deberá introducir la bomba sumergible de 2 HP en el tanque de almacenamiento de agua.
- 2.** Se utilizará la configuración realizada anteriormente para una bomba de 1 HP, simplemente se modificará la longitud de la tubería de la sección superior central del sistema (conexión entre “A” y “B”) de 1.65 m a 0.70 m.

El esquema de las configuraciones hidráulicas se puede observar a continuación y con mayor detalle en el Anexo K.

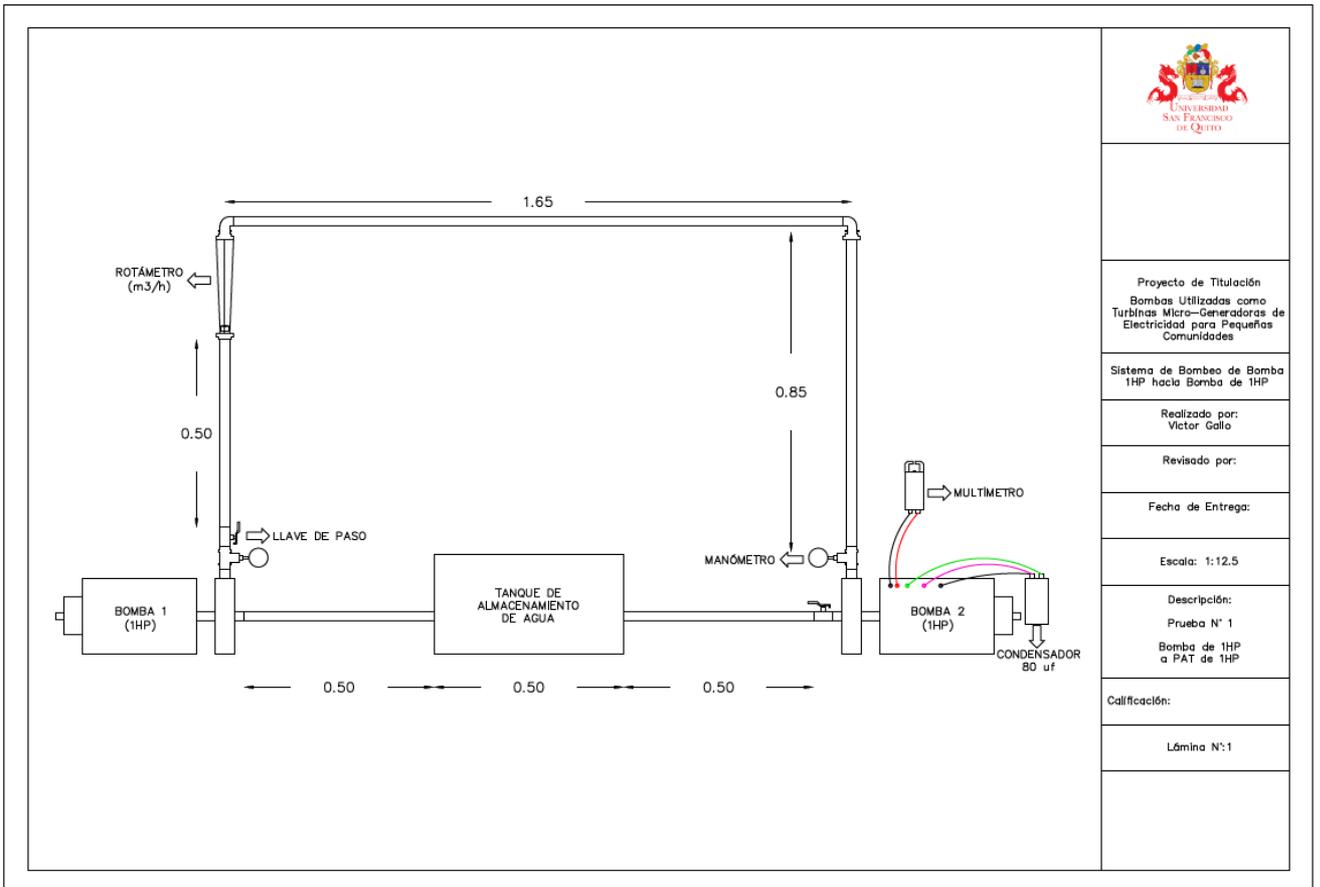


Figura 10: Esquema Sistema Hidráulico. Elaboración Propia.



Figura 11: Sistema Hidráulico. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.

2.3. Pruebas y Resultados.

Una vez realizadas las configuraciones necesarias para el sistema hidráulico y eléctrico se procedió a realizar las pruebas de laboratorio, utilizando el empuje del agua por medio de una bomba simulando el cauce de un río, tomando en cuenta ciertas condiciones de caudal, presión y altura piezométrica:

Comprobación curva característica de la bomba.

- 1.** Realizar una conexión eléctrica en la Bomba “A” de 1 HP para poder conectarla a la red eléctrica.
- 2.** Llenar de agua el tanque de almacenamiento mediante una manguera desde una toma de agua cercana.
- 3.** En la sección “A” del sistema se debe verificar que la válvula de corte esté totalmente cerrada y que la bomba esté llena de agua para proceder a encenderla.
- 4.** Tomando en cuenta que la válvula de corte esté totalmente cerrada, se procede a medir los siguientes parámetros hidráulicos y eléctricos mediante el medidor de energía:
 - a.** Presión a través del manómetro.
 - b.** Caudal a través del rotámetro.
 - c.** Sentido de Giro y Velocidad Angular a través del tacómetro digital (medir a través de la cinta reflectiva pegada en el ventilador de la bomba).
- 5.** Posteriormente, se procede a abrir progresivamente la válvula de corte y juntamente se deben medir nuevamente todos los valores mencionados en el paso anterior hasta que la válvula esté totalmente abierta.

Los resultados de la curva característica de la bomba de 1 HP se muestra a continuación:

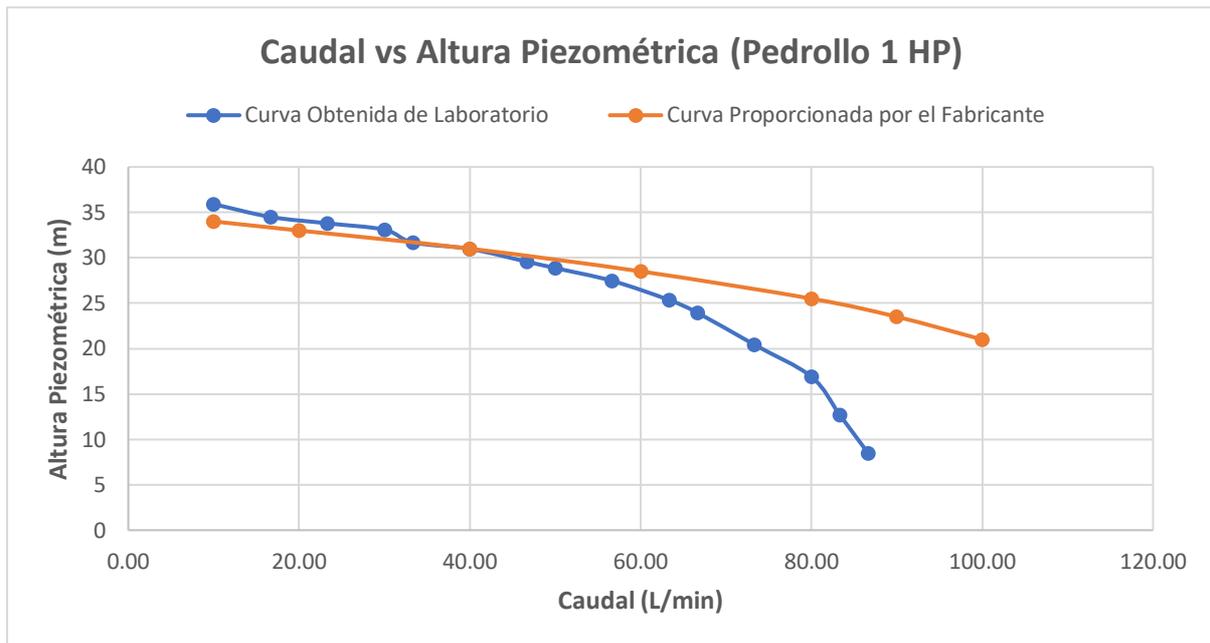


Figura 12: Curva Característica Bomba Centrífuga "Pedrollo" 1 HP. Elaboración Propia.

6. Se repitió el mismo procedimiento para la bomba de 1/2 HP.

Los resultados de la curva característica de la bomba periférica de 1/2 HP se muestra a continuación:

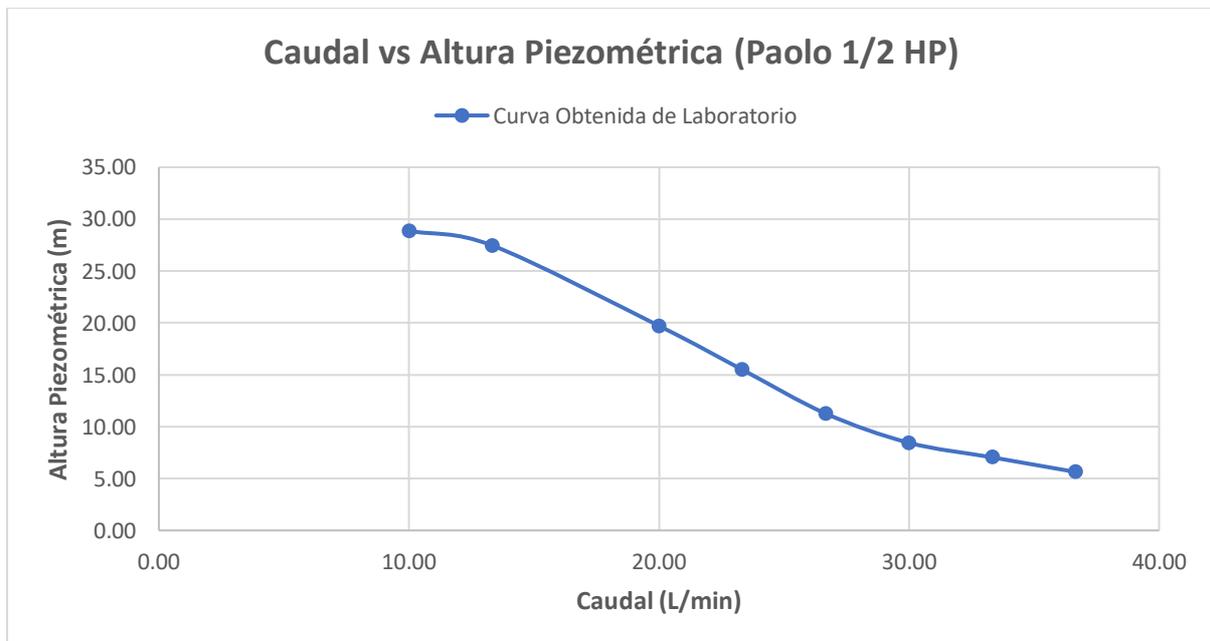


Figura 13: Curva Característica Bomba Periférica "Paolo" 1/2 HP. Elaboración Propia.

7. Se repitió el mismo procedimiento para la bomba sumergible de 2 HP.

Los resultados de la curva característica de la bomba sumergible de 2 HP se muestra a continuación:

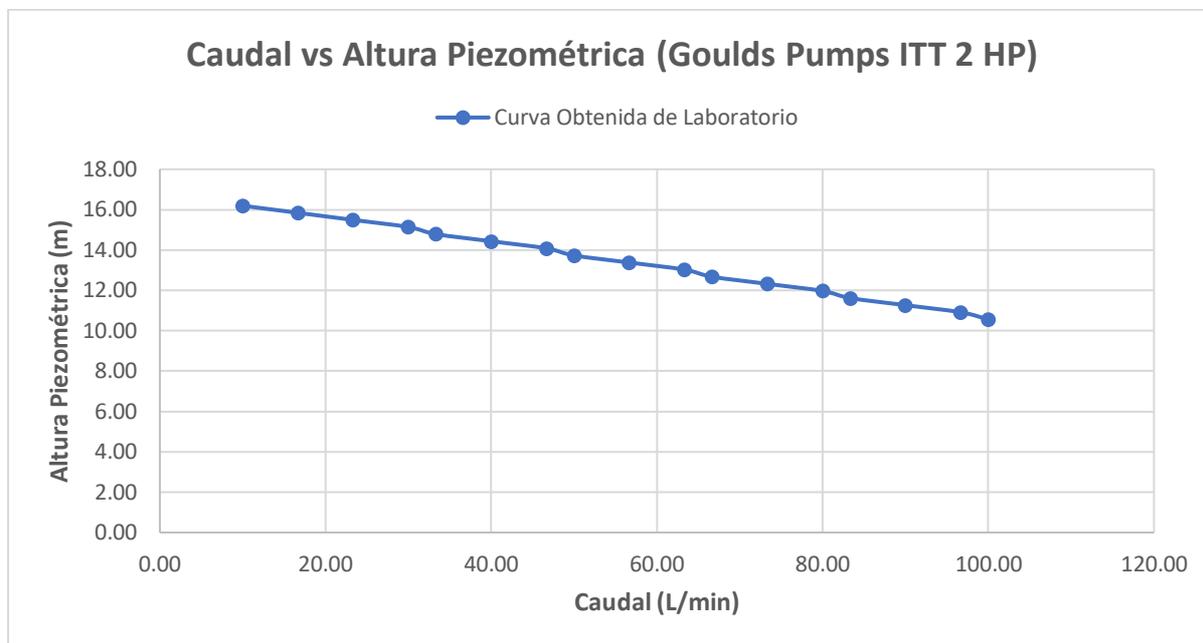


Figura 14: Curva Característica Bomba Sumergible "Gould Pumps ITT" 2 HP. Elaboración Propia.

Cabe destacar que la curva obtenida en laboratorio para la bomba sumergible de 2 HP solo llega hasta $100 \frac{L}{min}$ debido a que este es el valor máximo de lectura del rotámetro utilizado en los ensayos. El caudal que entrega esta bomba supera los $100 \frac{L}{min}$.

Para las siguientes pruebas se debe conectar en la PAT un cable donde se realiza la conexión eléctrica para poder medir con el multímetro el voltaje que se está produciendo.

Prueba N° 1.

La prueba N° 1 se realizó bombeando agua por el sistema hidráulico desde la bomba de 1 HP hacia la PAT de 1 HP, obteniendo los siguientes parámetros de caudal, presión, velocidad angular en la PAT y voltaje producido.

Además, se calcularon los siguientes parámetros:

- Área de tubería utilizada (1 pulg \approx 0.0254 m).

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot D^2$$

Donde:

- A es el área de la tubería (m^2).
- D es el diámetro de la tubería (m).
- Diámetro del impulsor de la PAT de 1 HP (D_I).

$$D_I = 0.14 \text{ m}$$

- Diámetro del eje de la PAT de 1 HP (D_E).

$$D_E = 0.014 \text{ m}$$

Tabla 1: Datos necesarios para calcular parámetros útiles. Elaboración propia..

Datos Necesarios		
Área Tubería Utilizada (1 in)	0.00051	m ²
Diámetro del Impulsor PAT (1HP)	0.140	m
Diámetro del Eje PAT (1HP)	0.014	m

- Velocidad lineal en el impulsor de la PAT.

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

Donde:

- v es la velocidad lineal ($\frac{m}{s}$).
- Q es el caudal medido en $\frac{m^3}{s}$.
- Velocidad angular en el impulsor de la PAT.

$$\omega_I = \frac{v \cdot 60}{\pi \cdot D_I}$$

Donde:

- ω_I es la velocidad angular en el impulsor de la PAT (min^{-1}).
- D_I es el diámetro del impulsor de la PAT (m).
- Velocidad angular en el eje de la PAT.

$$\omega_E = \frac{\omega_I \cdot D_I}{D_E}$$

Donde:

- ω_E es la velocidad angular en el eje de la PAT (min^{-1}).
- D_E es el diámetro del eje de la PAT (m).

Tabla 2: Resultados Prueba N° 1: 1HP → 1HP. Elaboración Propia.

Resultados Medidos Bomba				Resultados Medidos PAT				Cálculos de Velocidad		
RPM	Caudal			Presión	H. Piezométrica	RPM	Voltaje	Lineal Impulsor	Angular Impulsor	Angular Eje
min^{-1}	m ³ /h	L/min	m ³ /s	PSI	m	min^{-1}	V	m/s	min^{-1}	min^{-1}
3430	3.80	63.33	0.00106	34.00	23.94	2345	0.98	2.083	284.182	2841.824

Es importante destacar que todos los caudales en las pruebas o ensayos están medidos cuando la llave de paso o válvula tipo bola está totalmente abierta.

Como se puede observar en la tabla de resultados, la PAT alcanzó 2354 *RPM* de velocidad angular nominal del eje; por ende, la producción de voltaje fue de 0.98 *V*.

Cabe destacar que se observará una variación considerable entre la velocidad angular medida y calculada en el eje de la PAT, en esta y en las siguientes pruebas, ya que no se considerará el factor de ingreso del agua hacia el impulsor por la brida de impulsión de la PAT debido a que es un factor experimental dependiendo de cada PAT.

Prueba N° 2.

La prueba N° 2 se realizó bombeando agua por el sistema hidráulico desde la bomba de 1 *HP* hacia la PAT de 1/2 *HP*. Posteriormente se midieron y calcularon los mismos parámetros que en la Prueba N° 1.

Tabla 3: Resultados Prueba N° 2: 1HP → 1/2HP. Elaboración Propia.

Resultados Medidos Bomba				Resultados Medidos PAT				Cálculos de Velocidad		
RPM	Caudal			Presión	H. Piezométrica	RPM	Voltaje	Lineal Impulsor	Angular Impulsor	Angular Eje
min ⁻¹	m ³ /h	L/min	m ³ /s	PSI	m	min ⁻¹	V	m/s	min ⁻¹	min ⁻¹
3430	3.80	63.33	0.00106	34.00	23.94	2220	0.87	2.083	-	-

Como se puede observar en la tabla de resultados, se cambió la potencia de la PAT a 1/2 HP, pero esto no tuvo influencia ya que la velocidad angular medida en el eje de la PAT disminuyó a 2220 RPM. Esto también se produjo debido al tipo de bomba, al ser periférica tiene un impulsor diferente y por ello el cálculo de la velocidad angular no es considerado. Además, la producción de voltaje también fue insignificante de tan solo 0.87 V.

Prueba N° 3.

La prueba N° 3 se realizó bombeando agua, con ayuda de mangueras, desde la bomba de 1 HP más la bomba de 1/2 HP mediante una conexión en serie hacia la PAT de 1 HP. Posteriormente se midieron y calcularon los mismos parámetros que en la Prueba N° 1.

Tabla 4: Resultados Prueba N° 3: 1HP + 1/2HP (serie) → 1HP. Elaboración Propia.

Bombas	Resultados Medidos Bomba				Resultados Medidos PAT				Cálculos de Velocidad		
	RPM	Caudal			Presión	H. Piezométrica	RPM	Voltaje	Lineal Impulsor	Angular Impulsor	Angular Eje
	min ⁻¹	m ³ /h	L/min	m ³ /s	PSI	m	min ⁻¹	V	m/s	min ⁻¹	min ⁻¹
½ HP	3430	3.10	51.67	0.00086	36.00	25.34	1140	0.28	1.70	231.83	2318.33
1 HP	3470										

Como se puede observar en la tabla de resultados, la velocidad nominal de la bomba de 1 HP aumentó a 3470 RPM debido a la impulsión del fluido que proporcionaba la bomba periférica. Además, la conexión en serie proporcionó una mayor presión a la PAT, pero la velocidad angular nominal del eje de la PAT, nuevamente, disminuyó significativamente y; por ende, la producción de voltaje también fue insignificante de tan solo 0.28 V.

Por lo tanto, se puede concluir que con una conexión en serie de bombas disminuye la eficiencia en la PAT.

Prueba N° 4.

La prueba N° 4 se realizó bombeando agua, con ayuda de mangueras y un acople tipo “Tee”, desde la bomba de 1 HP más la bomba de 1/2 HP mediante una conexión en paralelo hacia la PAT de 1 HP. Posteriormente se midieron y calcularon los mismos parámetros que en la Prueba N° 1.

Tabla 5: Resultados Prueba N° 4: 1HP + 1/2HP (paralelo) → 1HP. Elaboración Propia.

Bombas	Resultados Medidos Bomba				Resultados Medidos PAT				Cálculos de Velocidad		
	RPM	Caudal			Presión	H. Piezométrica	RPM	Voltaje	Lineal Impulsor	Angular Impulsor	Angular Eje
	min ⁻¹	m ³ /h	L/min	m ³ /s	PSI	m	min ⁻¹	V	m/s	min ⁻¹	min ⁻¹
½ HP	3430	4.10	68.33	0.00114	32	22.53	2620	1.18	2.25	306.62	3066.18
1 HP	3430										

Como se puede observar en la tabla de resultados, la conexión en paralelo proporcionó un aumento de caudal de ingreso a la PAT; por ende, la velocidad angular nominal del eje de la PAT aumentó significativamente a 2620 RPM siendo el mayor alcanzado en relación con los resultados de las pruebas realizadas anteriormente y la producción de voltaje aumentó a 1.18 V siendo el valor máximo obtenido.

Por lo tanto, se puede concluir que una conexión en paralelo aumenta la eficiencia de la PAT y que se necesita un mayor caudal para que la velocidad angular del eje de la PAT llegue a su velocidad nominal de 3400 RPM, y por ende obtener una mayor cantidad de voltaje.

Prueba N° 5.

Para la prueba N° 5 se realizó la misma configuración que la prueba N° 1, bombeando agua desde la bomba de 1 HP hacia la PAT de 1 HP, pero con la diferencia que se conectó un capacitor de 60 μf en paralelo adicionalmente al capacitor de 80 μf para verificar si aumentando la capacitancia al sistema podría generar una mayor cantidad de voltaje. Posteriormente se midieron los datos en la PAT de la velocidad angular del eje, el caudal y el voltaje generado. Resultados se muestran en la tabla 6.

Prueba N° 6.

Para la prueba N° 6 se realizó el mismo procedimiento que la prueba N° 5, con la diferencia que a la PAT se la hizo funcionar como bomba por alrededor de 5 minutos para que así pueda generarse un campo magnético remanente y verificar si se puede obtener mejores resultados. Posteriormente se midieron los datos en la PAT de la velocidad angular del eje, el caudal y el voltaje generado. Resultados se muestran en la tabla 6.

Prueba N° 7.

Para la prueba N° 7 se verificó la hipótesis sobre si es necesario que el sentido de giro del eje, cuando funciona como bomba (sentido horario), sea el mismo que cuando el fluido ingresa a la PAT, ocasionando el giro inverso del eje (sentido antihorario). Por lo tanto, se cambió el sentido de giro motor de la PAT para que coincida con el sentido de giro cuando el fluido ingrese a la PAT por la brida de impulsión. De igual manera se conectó un capacitor de $60 \mu f$ en paralelo adicionalmente al capacitor de $80 \mu f$. Posteriormente se midieron los datos en la PAT de la velocidad angular del eje, el caudal y el voltaje generado. Resultados se muestran en la tabla 6.

Este cambio de giro se realizó extendiendo los terminales internos desde la bobina de arranque de la bomba hacia el exterior para una mayor comodidad. En el caso de la bomba “Pedrollo” de 1 HP se deben seguir los siguientes pasos:

1. Se debe desarmar la bomba que se utilizará como turbina con mucho cuidado:
 - 1.1. Retirar los 2 pernos que se encuentran ajustando la tapa superior de la bomba donde se realizan las conexiones eléctricas y desmontarla.
 - 1.2. Desconectar los terminales que están conectados al capacitor, al terminal de corriente y retirar el capacitor.
 - 1.3. Retirar los 4 pernos que se encuentran ajustando la carcasa que almacena el agua (voluta) y desmontarla.

- 1.4.** Desmontar la carcasa plástica de la bomba y posteriormente el ventilador.
 - 1.5.** Retirar los 3 pernos que se encuentran ajustando la carcasa posterior.
 - 1.6.** Inmovilizar el eje para posteriormente quitar la tuerca que se encuentran en el eje del impulsor.
 - 1.7.** Desmontar el impulsor donde se encuentran los álabes mediante un extractor de 3 ejes o mediante el proceso de palanca con cuidado sin deformar los elementos.
 - 1.8.** Finalmente, se separan 2 elementos, el rotor totalmente sólidos juntamente con el eje y el estator donde se encuentran conectados 3 terminales; arranque de color rosado, trabajo de color verde; ambos conectados hacia el capacitor, y el terminal de tierra de color negro.
- 2.** Realizar 3 extensiones de los terminales hacia la parte exterior de la bomba.
 - 3.** Armar nuevamente la bomba, siguiendo los pasos de manera regresiva descritos anteriormente.
 - 4.** Para realizar la conexión del cambio de sentido de giro del motor se deberán conectar los terminales de la siguiente manera:
 - 4.1.** Verificar la continuidad entre el terminal de trabajo (color verde) con una de las extensiones de arranque o tierra, mediante el multímetro.
 - 4.2.** Conectar la extensión que tenga continuidad, juntamente con la extensión de trabajo, al terminal de arranque. Además, dicha conexión deberá estar conectada directamente a la placa metálica donde ingresa la corriente eléctrica.
 - 4.3.** Conectar el terminal de trabajo al capacitor.
 - 4.4.** Conectar la extensión sobrante con el terminal de tierra y posteriormente al capacitor.
 - 5.** Verificar todas las conexiones y el sentido de giro cuando se conecte a la corriente.

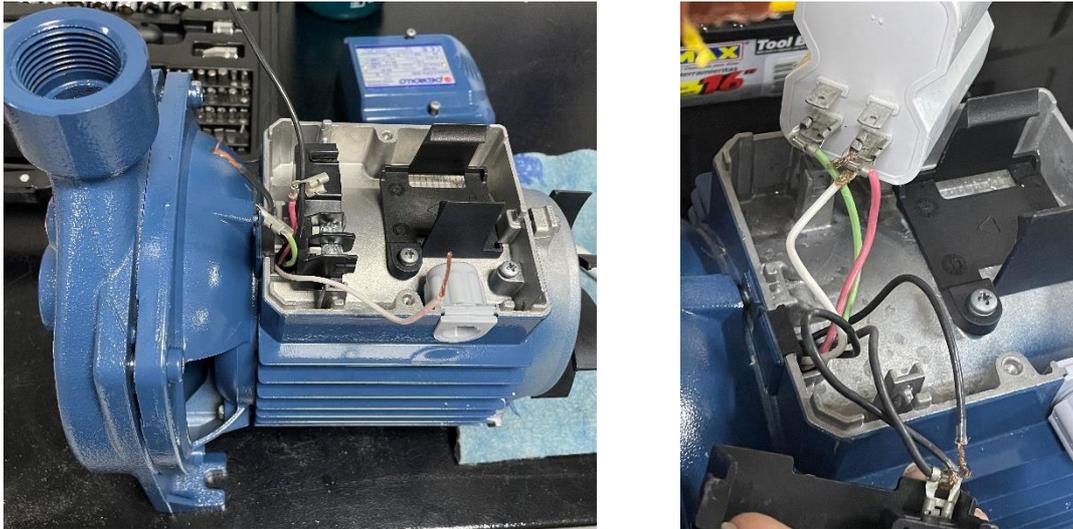


Figura 15: Cambio de Giro Motor de Bomba. Fuente: Laboratorio de Ing. Hidráulica

USFQ.

Dichas conexiones eléctricas se muestran gráficamente en el Anexo L.

Prueba N° 8.

La prueba N° 8 se realizó de igual manera que la prueba N° 7 con la diferencia que a la PAT se la hizo funcionar como bomba por alrededor de 5 minutos para que así pueda generarse un campo magnético remanente y verificar si se puede obtener mejores resultados. Posteriormente se midieron los datos en la PAT de la velocidad angular del eje, el caudal y el voltaje generado. Resultados se muestran en la tabla 6.

Tabla 6: Resultados Pruebas N° 5, 6, 7 y 8: Configuración de Condensador. Elaboración Propia.

Unidades	RPM PAT	Caudal			Condensador	Voltaje
	min ⁻¹	m ³ /h	L/min	m ³ /s	microfaradios	V
Giro Motor: Horario	2370	3.80	63.33	0.0011	80 uf	0.880
	2354				80 uf + 60 uf	0.880
	2370				80 uf + 60 uf (Campo Remanente)	1.007
Giro Motor: Antihorario	2311	3.80	63.33	0.0011	80 uf	0.660
	2332				80 uf + 60 uf	0.660
	2335				80 uf + 60 uf (Campo Remanente)	0.924

Como se puede observar en la tabla descrita anteriormente, cambiar el sentido de giro del motor de sentido horario a sentido antihorario no implica un cambio importante al momento de inducir electricidad; incluso llega a disminuir la capacidad de “generar” electricidad.

Además, se puede observar que conectar un capacitor en paralelo no influye en lo absoluto, pero en este caso puede ser debido a la combinación de los 2 tipos de condensadores, ya que el capacitor de $80 \mu f$ es electrolítico y el de $60 \mu f$ es de papel, por lo que puede que no exista compatibilidad entre ambos capacitores.

Lo que se puede destacar de la Tabla N° 6 es que al generar previamente un campo magnético remanente y posteriormente hacer funcionar el sistema PAT, la magnetización logra incrementar el voltaje “generado”.

Debido a que, con las pruebas realizadas anteriormente, no se logró aumentar significativamente la velocidad angular del eje de la PAT para lograr generar electricidad; se desarrollaron ciertas hipótesis que se esclarecerán a continuación como pruebas de comprobación.

Prueba de Comprobación N° 1.

Debido a los resultados presentados anteriormente, el sistema PAT no genera energía eléctrica, se desarrolló una primera hipótesis para comprobar si electromecánicamente funciona este sistema. Para realizar esta prueba de comprobación se logró unir los ejes de ambas bombas de 1 HP para que la bomba “A” funcione como tal y por ende la PAT (bomba “B”) logre girar a la velocidad nominal requerida de 3400 RPM. Para este proceso se instaló un acople de ejes de 14.50 mm de diámetro que se fabricó en un torno y está diseñado para ajustar los ejes mediante 2 pernos prisioneros. El acople de eje, la velocidad nominal y la cantidad de voltaje generado se muestran a continuación:



Figura 16: Acople de Eje de 14.50 mm. Elaboración Propia.



Figura 17: Comprobación de Velocidad Angular Mecánicamente. Elaboración Propia.



Figura 18: Generación de 80.50 V con Capacitor Electrolítico de 80 μ f. Elaboración Propia.



Figura 19: Generación de 88.50 V con Capacitor Electrolítico de 80 μf y 60 μf en Paralelo. Elaboración Propia.

A través de este proceso se comprobó que efectivamente la PAT, mecánicamente, si es capaz de generar electricidad cuando alcanza la velocidad nominal de los 3430 RPM. Además, si se aumenta la capacitancia llega a aumentar el voltaje generado, como se puede observar en la figura 6, con un capacitor de 80 μf genera 80.50 V. Mientras que con una conexión de capacitancia en paralelo de 80 μf y 60 μf genera 88.50 V.

Prueba de Comprobación N° 2.

Debido a los resultados presentados anteriormente, se desarrolló una segunda hipótesis sobre si el rotámetro lograba describir el caudal que estaba entregando la bomba de manera precisa, por ello se realizó la comprobación de la lectura del caudal en el rotámetro midiendo el caudal mediante el método volumétrico en la salida de la PAT.

Para ello se siguieron los siguientes pasos:

- Se midió el caudal que entregaba la bomba periférica de 1/2 HP mediante la lectura del rotámetro.
- Se pesó el recipiente de medición en la balanza y seguidamente se encendió la balanza.
- Se procedió a colocar el agua que salía por la brida de aspiración de la PAT debido al sistema hidráulico, mientras se tomaba el tiempo en dicho proceso.

- Se pesó el recipiente lleno de agua.
- Se realizaron los siguientes cálculos teniendo en cuenta el peso del agua y el tiempo en segundos.
 - Transformar el peso del agua a volumen por medio de la siguiente fórmula.

$$V = \frac{m}{\rho}$$

Donde:

- V es el volumen en m^3 .
- m es la masa del agua en Kg .
- ρ es la densidad del agua en $\frac{Kg}{m^3}$.
 - Posteriormente, se calcula el caudal con la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{V}{t}$$

Donde:

- Q es el caudal en $\frac{m^3}{s}$.
- t es el tiempo medido en segundos.

Los resultados de la comprobación de lectura del caudal de la bomba periférica de 1/2 HP en el rotámetro se muestran a continuación:

Tabla 7: Comprobación de Lectura del Caudal del Rotámetro. Elaboración Propia.

Bomba de 1/2HP - Rotámetro = 2.00 m3/h					
Peso Agua	Tiempo	Volumen	Caudal		
Kg	s	m3	m3/s	m3/h	L/min
2.33	4.12	0.00233	0.00057	2.04	33.93
2.62	4.47	0.00262	0.00059	2.11	35.17
2.63	4.65	0.00263	0.00057	2.04	33.94
		Q PROM	0.00057	2.06	34.35

El porcentaje de error se muestra a continuación, mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Error} = \left| \frac{\text{Valor Medido} - \text{Valor Calculado}}{\text{Valor Medido}} \right| \cdot 100\%$$

$$\% \text{ Error} = \left| \frac{2.00 \text{ m}^3/\text{h} - 2.06 \text{ m}^3/\text{h}}{2.00 \text{ m}^3/\text{h}} \right| \cdot 100\%$$

$$\% \text{ Error} = 3.00\%$$

Como se puede observar en la tabla anterior, se puede comprobar que el caudal marcado por el rotámetro es de $2.00 \text{ m}^3/\text{h}$; y el caudal promedio medido es de $2.06 \text{ m}^3/\text{h}$. Por lo que, se puede confirmar que la lectura de caudal que arroja el rotámetro es adecuada debido a que el porcentaje de error es de 3.00%.

Prueba de Comprobación N° 3.

Debido a los resultados presentados anteriormente, se desarrolló una tercera hipótesis, sobre si el impulsor de la PAT generaba algún tipo de fricción al momento de ingresar el fluido por la brida de aspiración. Por ello, se retiró el impulsor de la PAT y se procedió a medir el caudal entregado por la bomba de 1 HP.

Para ello se realizaron los siguientes pasos:

- Retirar los 4 pernos que se encuentran ajustando la carcasa que almacena el agua (voluta) y desmontarla.
- Desmontar la carcasa plástica de la bomba y posteriormente el ventilador.
- Inmovilizar el eje para posteriormente quitar la tuerca que se encuentra en el eje del impulsor.
- Retirar el impulsor.
- Volver a colocar la carcasa que almacena el agua y ajustar los 4 pernos retirados anteriormente.

- La medición del caudal que sale por la brida de aspiración de la PAT se realizó de igual manera que en la prueba de comprobación N° 1.



Figura 20: Impulsor de la Bomba "Pedrollo" de 1HP. Fuente: Laboratorio de Hidráulica USFQ.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 8: Comprobación del Caudal Entregado por Bomba de 1 HP sin Impulsor en la PAT.

Elaboración Propia.

Bomba de 1HP - 3.80 m³/h					
Peso Agua	Tiempo	Volumen	Caudal		
Kg	s	m ³	m ³ /s	m ³ /h	L/min
2.52	2.65	0.00252	0.00095	3.42	57.06
2.57	2.50	0.00257	0.00103	3.70	61.68
2.37	2.22	0.00237	0.00107	3.84	64.05
2.68	2.91	0.00268	0.00092	3.32	55.26
2.63	2.60	0.00263	0.00101	3.64	60.69
3.07	3.19	0.00307	0.00096	3.46	57.74
		Q PROM	0.00099	3.56	59.41

El porcentaje de error se muestra a continuación, mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Error} = \left| \frac{\text{Valor Medido} - \text{Valor Calculado}}{\text{Valor Medido}} \right| \cdot 100\%$$

$$\% \text{ Error} = \left| \frac{3.80 \text{ m}^3/\text{h} - 3.56 \text{ m}^3/\text{h}}{3.80 \text{ m}^3/\text{h}} \right| \cdot 100\%$$

$$\% \text{ Error} = 6.32\%$$

Como se puede observar en la tabla anterior, el caudal entregado por la bomba de 1 HP es de $3.80 \frac{m^3}{h}$ mientras que el caudal promedio medido sin el impulsor en la PAT por el método volumétrico es de $3.56 \frac{m^3}{h}$. Con estos datos se puede comprobar un porcentaje de error de 6.32% ya que el impulsor no genera fricción al ingresar el fluido en la PAT, caso contrario, al momento que el fluido ingresa por la brida de impulsión este interactúa con el impulsor y genera velocidad de flujo en la brida de aspiración otorgando una mayor cantidad de caudal de salida debido a que la velocidad y el caudal son directamente proporcionales.

2.4. Análisis inverso.

Prueba N° 9.

Para la prueba N° 9 se realizó el proceso de cálculo teórico inverso de la siguiente manera:

1. Al conocer la velocidad angular nominal requerida del eje de la PAT, para que esta produzca una cantidad de voltaje considerable, se calcula la velocidad nominal del impulsor de la PAT.

$$\omega_E = 3400 \text{ min}^{-1}$$

$$\omega_I = \frac{\omega_E \cdot D_E}{D_I}$$

$$\omega_I = \frac{3400 \cdot 0.014}{0.14}$$

$$\omega_I = 340 \text{ min}^{-1}$$

2. Posteriormente se transforma la velocidad angular del impulsor de la PAT a velocidad lineal en el impulsor.

$$v = \frac{\pi \cdot D_I \cdot \omega_I}{60}$$

$$v = \frac{\pi \cdot 0.14 \cdot 340}{60}$$

$$v = 2.492 \frac{m}{s}$$

3. Una vez obtenida la velocidad lineal en el impulsor se puede calcular el caudal tomando en cuenta el área de la tubería de 1 in.

$$Q = v \cdot A$$

$$Q = 2.492 \cdot 0.00051$$

$$Q = 0.00126 \frac{m^3}{s} \approx 75.773 \frac{L}{min} \approx 4.546 \frac{m^3}{h}$$

Esto quiere decir que se necesita una bomba que logre proporcionar un caudal constante de mínimo $75.773 \frac{L}{min}$. Para ello en el rotámetro utilizado en el laboratorio debe marcar un flujo de mínimo de $4.546 \frac{m^3}{h}$. Debido a los resultados presentados anteriormente se utilizará una bomba sumergible de 2 HP capaz de bombear el caudal mínimo teórico obtenido.

La prueba N° 9 se realizó bombeando agua en el sistema hidráulico desde una bomba sumergible de 2 HP hacia la PAT de 1 HP. Posteriormente se midieron y calcularon los mismos parámetros que en la Prueba N° 1.

Tabla 9: Resultados Prueba N° 9: 2HP → 1HP. Elaboración Propia.

Resultados Medidos Bomba				Resultados Medidos PAT				Cálculos de Velocidad		
RPM	Caudal			Presión	H. Piezométrica	RPM	Voltaje	Lineal Impulsor	Angular Impulsor	Angular Eje
min ⁻¹	m ³ /h	L/min	m ³ /s	PSI	m	min ⁻¹	V	m/s	min ⁻¹	min ⁻¹
3450	2.90	48.33	0.00081	20.00	14.08	1620	0.40	1.590	216.876	2168.76

Como se puede observar en la tabla anterior, el caudal entregado por la bomba sumergible de 2 HP es menor que el entregado por la bomba de 1 HP en el sistema, esto quiere decir que existe una carga de pérdidas considerables en todo el sistema hidráulico. Por ello, se calcularon las pérdidas del sistema mediante la ecuación de Darcy explicada en el apartado de “Pérdidas hidráulicas en el sistema PAT”. Las pérdidas hidráulicas del sistema de la prueba N° 1 y 9 se muestran en las tablas a continuación:

Tabla 10: Pérdidas de Energía Prueba N° 1. Elaboración Propia.

Pérdidas del Sistema Hidráulico (Bomba 1HP a PAT 1HP)								
Área Tubería 1in	0.00051	m2	Caudal Entregado (Q)	3.80	m3/h	Velocidad	2.083	m/s
				0.00106	m3/s			
Fricción	L (m)	D (m)	ε	D/ε	NR	f	k	hL (m)
		4.00	0.0254	3.00E-07	8.47E+04	5.29E+04	0.021	3.24
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
Pérdida Total en Sistema Hidráulico de Bomba de 1HP hacia PAT de 1HP							hLT (m)	1.213

Como se puede observar en la tabla anterior, la pérdida producida por la configuración de la prueba N° 1, es de 1.213 m ó $\frac{J}{N}$. Esta carga de pérdida es sumamente considerable, aunque no justifica la disminución de la cantidad de caudal entregado por la bomba de 1 HP comparado con el caudal máximo alcanzado en la curva característica de dicha bomba de $5.20 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ o $86.67 \frac{\text{L}}{\text{min}}$.

Tabla 11: Pérdidas de Energía Prueba N° 9. Elaboración Propia.

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)	ε	D/ε	NR	f	k	hL (m)
		2.50	0.0254	3.00E-07	8.47E+04	4.04E+04	0.022	2.15
Pérdidas menores	Le/D	D (m)				ft	k	hL (m)
2 Codos	30	0.0254				0.009	0.54	0.070
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	2.00				0.37	0.048
Pérdida Total en Sistema Hidráulico de Bomba de 2HP hacia PAT de 1HP							hLT (m)	0.614

Como se puede observar en la tabla anterior, la pérdida producida por la configuración de la prueba N° 9, es de 0.614 m ó $\frac{J}{N}$. La carga de pérdidas disminuyó a pesar de haber aumentado las pérdidas por contracción súbita de tubería de 2 in a 1 in; y esto se debió a los siguientes factores:

- Menor caudal de fluido entregado; por lo tanto, también disminuirá la velocidad del fluido.
- Menor longitud de tubería, debido a la configuración del sistema hidráulico para el uso de la bomba sumergible de 2 HP.

Esta carga de pérdida es sumamente considerable, aunque, nuevamente no justifica la disminución de la cantidad de caudal entregado por la bomba de 2 HP comparado con el caudal máximo de lectura por el rotámetro alcanzado en la curva característica de dicha bomba de $6.00 \frac{m^3}{h}$ o $100 \frac{L}{min}$.

2.5. Curva de resistencia del sistema para la prueba N° 1.

Debidos a los acontecimientos y resultados presentados anteriormente se creó la curva de resistencia del sistema, que se define como el caudal que entregará la bomba cuando se instale en un sistema dado considerando elementos sobre el diseño en la líneas de succión y descarga, como también codos, válvulas, y entre otros. Para conocer la cantidad de pérdida que se está obteniendo gracias a la entrada de la PAT “Pedrollo” de 1 HP se utiliza la ecuación general de energía:

$$h_A - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2 \cdot g}$$

Donde:

- h_A es la carga total de la bomba.
- h_L es la carga de pérdidas del sistema.
- P_2 es la presión a la entrada de la PAT.
- z_2 es la altura de la PAT según el nivel de referencia arbitrario.
- v_2 es la velocidad del fluido al ingreso de la PAT.
- g es la gravedad en unidades de $\frac{m}{s^2}$.

Despejando la ecuación para obtenerla en términos de la altura piezométrica de la bomba se tiene que:

$$h_A - h_o = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + k \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g}$$

$$H = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \cdot (1 + k)$$

Donde

- h_o es la carga estática total $\left(\frac{P_2}{\gamma} + z_2\right)$.
- H es la altura piezométrica de la bomba $(h_A - h_o)$.
- k es la sumatoria de los coeficientes de resistencia en el sistema.

Despejando la velocidad de la ecuación anterior, para obtener el caudal en función del área de la tubería y la velocidad de flujo se tiene que:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot H}{(1 + k)}}$$

$$Q = A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot H}{(1 + k)}}$$

Gracias a la simplificación de la ecuación obtenida anteriormente se puede obtener la curva de resistencia del sistema.

Para el sistema de la prueba N° 1, la altura piezométrica se obtiene de la curva característica entregada por el fabricante. Además, la sumatoria del coeficiente de resistencia se obtiene de la tabla N° 10 la cual es $k = 5.49$; por ende, la curva de resistencia del sistema es:

Tabla 12: Datos Resistencia del Sistema con Bomba de 1 HP. Elaboración Propia.

Datos Resistencia del Sistema con Bomba de 1HP	
Altura Piezométrica (H) (m)	Caudal Sistema (Q) (L/min)
20	236.47
21	242.31
22	248.02
23	253.59
24	259.04
25	264.39
26	269.62
27	274.76
28	279.80
29	284.75
30	289.62
31	294.41
32	299.12
33	303.76
34	308.32
35	312.83
36	317.26

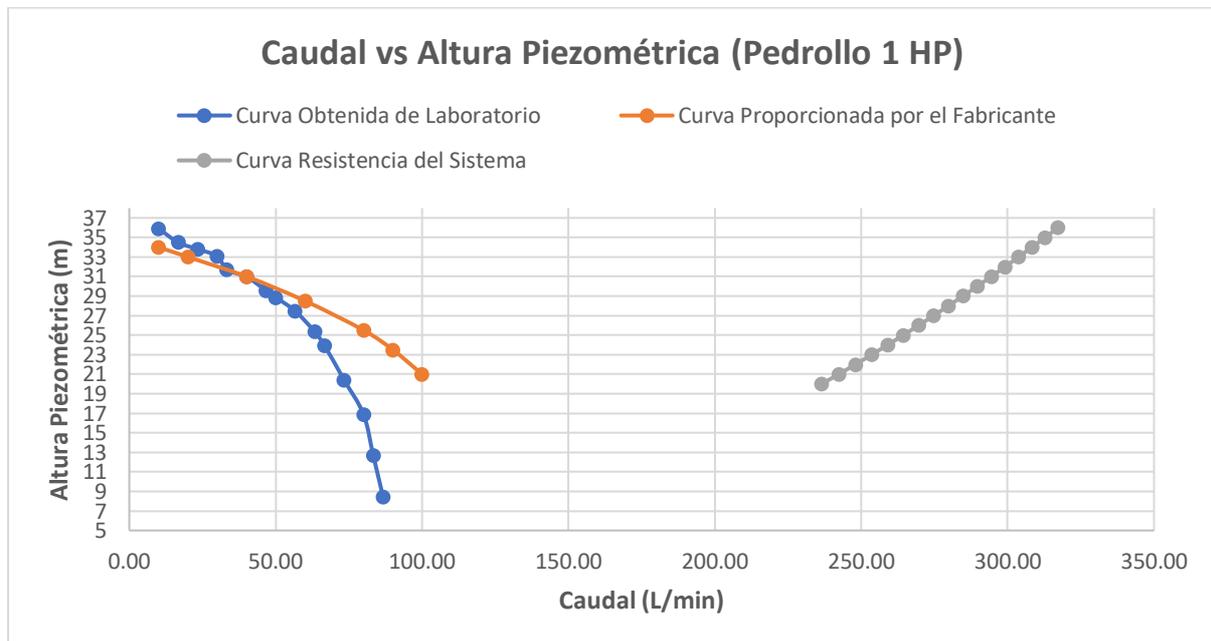


Figura 21: Curva de Resistencia del Sistema 1 HP. Elaboración Propia.

Como se puede observar en el gráfico y en la tabla anterior, no se obtiene una intersección entre la curva de resistencia del sistema con la curva de descarga del fabricante o en su defecto con la curva característica obtenida en el laboratorio. Debido a esto, se realizó un proceso

iterativo para calcular la cantidad total de carga de pérdidas en todo el sistema hidráulico, agregando la carga de pérdida de la entrada del sistema PAT.

Se logró coincidir el caudal operacional del sistema de $3.80 \frac{m^3}{h}$ o $63.33 \frac{L}{min}$ obtenido en los ensayos de laboratorio con la altura piezométrica correspondiente a 28 m según la curva del fabricante. Obteniendo un coeficiente de resistencia de la PAT de $k = 120.12$; y, por ende, una sumatoria total de $k = 125.61$, las pérdidas de todo el sistema llegan hacer de $hL_T = 27.782 m$.

Tabla 13: Pérdidas Totales del Sistema Hidráulico (Bomba de 1 HP a PAT 1 HP).

Elaboración Propia.

Pérdidas Totales del Sistema Hidráulico (Bomba 1HP a PAT 1HP)								
Área Tubería 1in	0.0005	m ²	Caudal Entregado (Q)	3.80	m ³ /h	Velocidad	2.083	m/s
	1			0.00106	m ³ /s			
Fricción	L (m)	D (m)	e	D/e	NR	f	k	hL (m)
		4.00	0.0254	3.00E-07	8.47E+04	5.29E+04	0.021	3.24
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

Si se mantiene el mismo factor de fricción de 0.021, obtenido del diagrama de Moody, mediante la fórmula del coeficiente de resistencia se puede obtener la relación de longitud equivalente de la siguiente manera:

$$k = f \cdot \left(\frac{Le}{D} \right)$$

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

$$\frac{Le}{D} = \frac{120.12}{0.021} = 5720$$

Este valor de la longitud equivalente puede asemejarse a tener en el sistema 6 válvulas de compuerta $\frac{1}{4}$ abierta. Como se puede comprobar, la pérdida de carga que se genera al ingreso de la PAT es sumamente considerable.

La curva de resistencia del sistema considerando la carga total de pérdidas se puede evidenciar a continuación, juntamente con su gráfico:

Tabla 14: Datos Resistencia del Sistema Considerando Total de Pérdidas en la PAT con Bomba de 1 HP. Elaboración Propia.

Curva Resistencia del Sistema con Bomba de 1HP	
Altura Piezométrica (H) (m)	Caudal Sistema Pérdidas PAT (Q) (L/min)
20	53.52
21	54.85
22	56.14
23	57.40
24	58.63
25	59.84
26	61.03
27	62.19
28	63.33
29	64.45
30	65.55
31	66.64
32	67.70
33	68.75
34	69.79
35	70.81
36	71.81

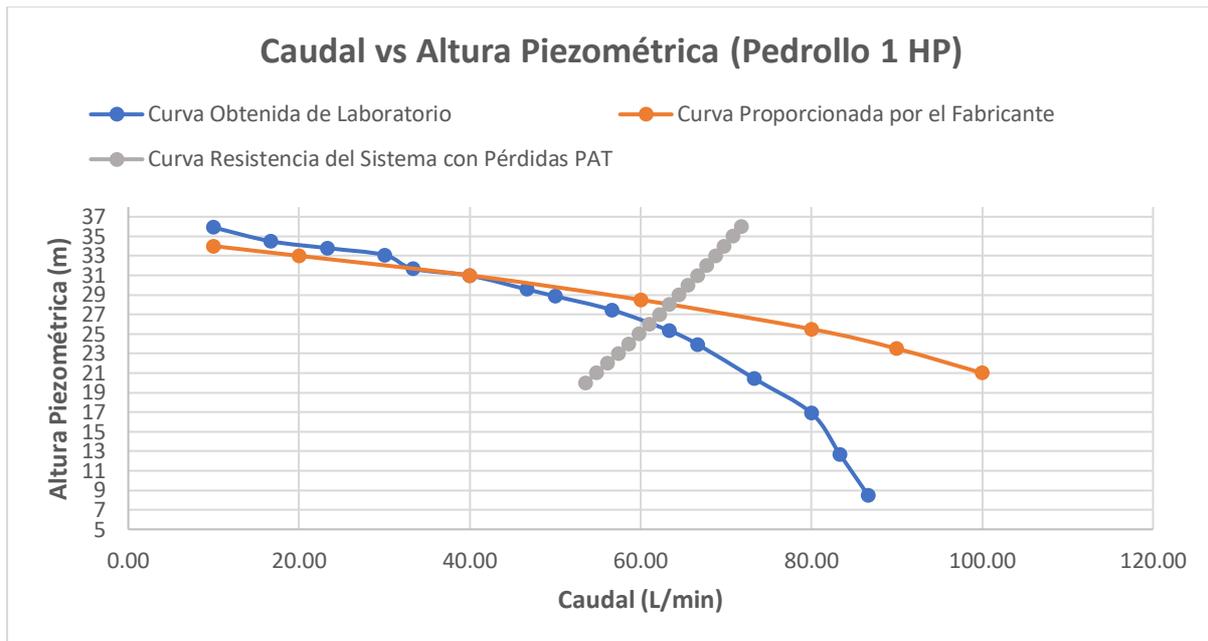


Figura 22: Curva de Resistencia del Sistema 1 HP Considerando Pérdidas en la Entrada de la PAT. Elaboración Propia.

2.6. Curva de resistencia del sistema para la prueba N° 9.

Para el sistema de la prueba N° 9, la altura piezométrica se obtiene de la curva característica de la bomba obtenida mediante los ensayos de laboratorio. Además, la sumatoria del coeficiente de resistencia se obtiene de la tabla N° 11 el cual es $k = 4.77$; por ende, las pérdidas y la curva de resistencia del sistema se tiene que:

Tabla 15: Datos Resistencia del Sistema con Bomba de 2 HP. Elaboración Propia.

Curva Resistencia del Sistema 2HP	
Caudal Sistema (Q) (L/min)	Altura Piezométrica (H) (m)
225.60	16.19
223.13	15.84
220.64	15.49
218.12	15.14
215.57	14.78
212.98	14.43
210.37	14.08
207.72	13.73
205.04	13.38
202.33	13.02
199.57	12.67
196.78	12.32
193.95	11.97
191.08	11.62
188.16	11.26
185.20	10.91
182.19	10.56

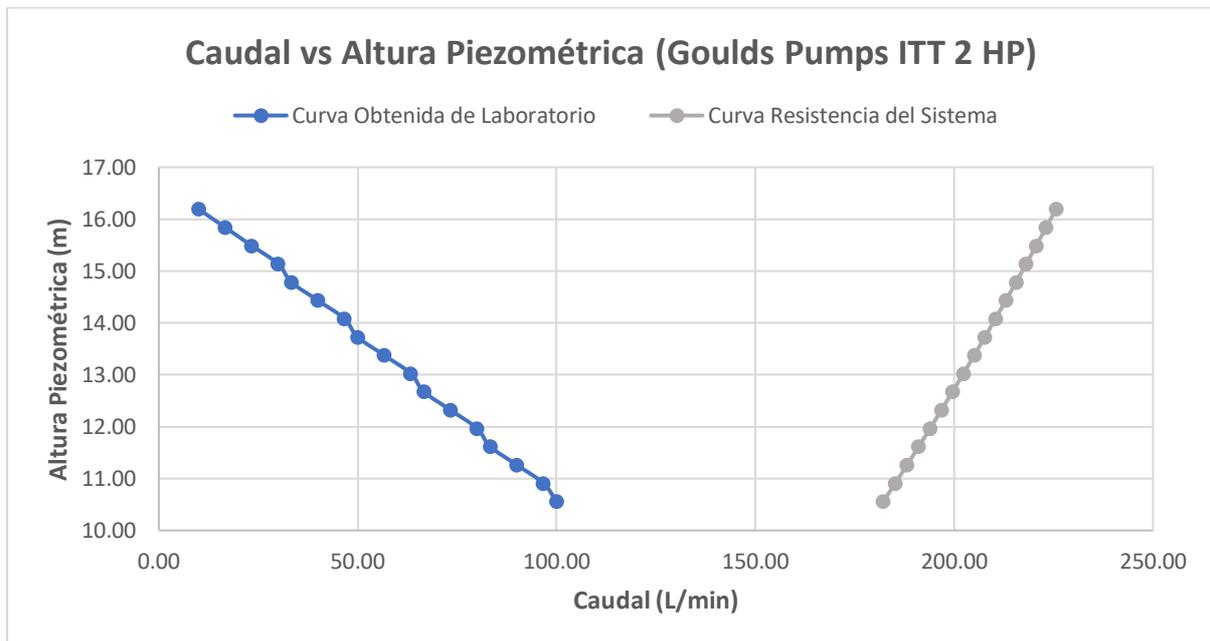


Figura 23: Curva de Resistencia del Sistema 2 HP. Elaboración Propia.

Como se puede observar en el gráfico y tabla anterior, al igual que para el sistema de la prueba N° 1, no se obtiene una intersección entre la curva de resistencia del sistema y la curva característica obtenida de los ensayos de laboratorio.

Nuevamente se realizó un análisis iterativo hasta lograr coincidir el caudal operacional del sistema de $2.80 \frac{m^3}{h}$ o $46.67 \frac{L}{min}$ obtenido en los ensayos de laboratorio con la altura piezométrica correspondiente de 16 m según la curva característica de la bomba sumergible de 2 HP. Obteniendo un coeficiente de resistencia de la PAT de $k = 81.68$; y, por ende, una sumatoria total de $k = 86.45$, las pérdidas de todo el sistema llegan a hacer de $hL_T = 11.137 m$.

Tabla 16: Pérdidas Totales del Sistema Hidráulico (Bomba de 2 HP a PAT 1 HP).

Elaboración Propia.

Pérdidas Totales del Sistema Hidráulico (Bomba 2HP a PAT 1HP)								
Área Tubería 1 in	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	0.070
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

Si se mantiene el mismo factor de fricción de 0.022, obtenido del diagrama de Moody, se puede obtener la relación de longitud equivalente calculada de la misma manera que se realizó previamente.

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

$$\frac{Le}{D} = \frac{81.68}{0.022} = 3712.82$$

Este valor de la longitud equivalente podría asemejarse a tener 4 válvulas de compuerta $\frac{1}{4}$ abierta. Como se puede comprobar, la pérdida de carga que se genera al ingreso de la PAT es sumamente considerable.

La curva de resistencia del sistema de la prueba N° 9, considerando la carga total de pérdidas se puede evidenciar a continuación, juntamente con su gráfico.

Tabla 17: Datos Resistencia del Sistema Considerando Total de Pérdidas en la PAT con Bomba de 2 HP. Elaboración Propia.

Curva Resistencia del Sistema 2HP	
Caudal Sistema Pérdidas PAT (Q) (L/min)	Altura Piezométrica (H) (m)
57.95	16.19
57.31	15.84
56.67	15.49
56.02	15.14
55.37	14.78
54.71	14.43
54.03	14.08
53.35	13.73
52.67	13.38
51.97	13.02
51.26	12.67
50.54	12.32
49.82	11.97
49.08	11.62
48.33	11.26
47.57	10.91
46.80	10.56

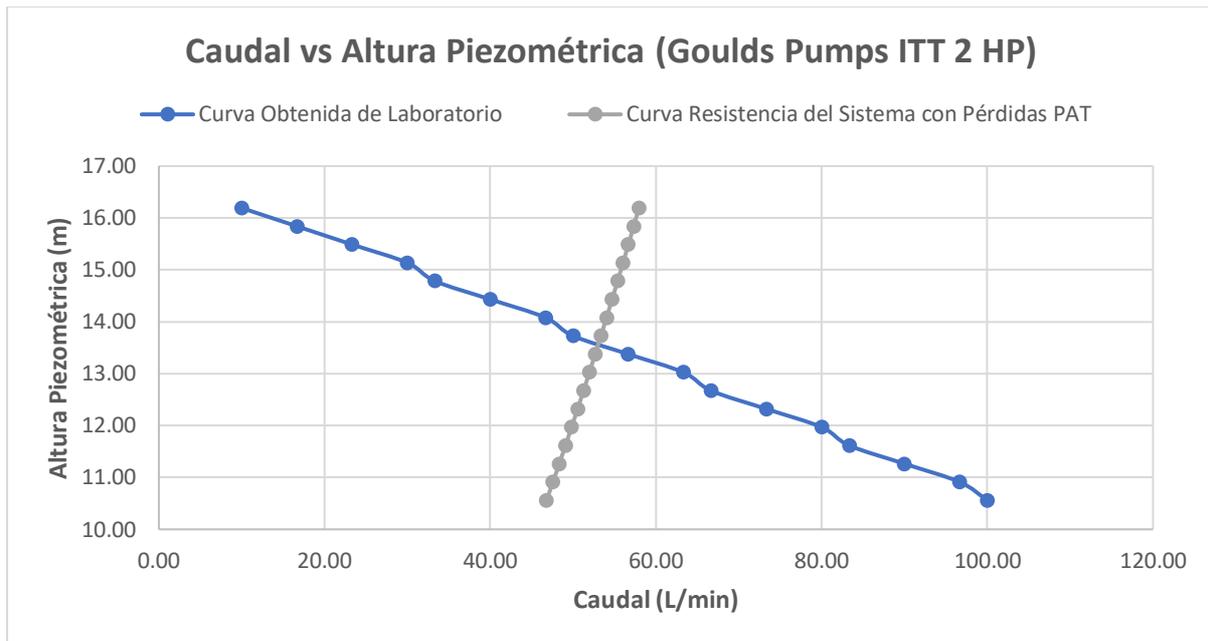


Figura 24: Curva de Resistencia del Sistema 2 HP Considerando Pérdidas en la Entrada de la PAT. Elaboración Propia.

Debido a los resultados presentados anteriormente se pudo comprobar que este modelo no es adecuado para la generación de electricidad. Para evitar las cargas de pérdidas a través de un sistema hidráulico debido a sus limitaciones cuando el fluido ingresa por la brida de impulsión de la bomba se debe realizar el cambio de la PAT. Cabe destacar los siguientes aspectos gracias a los gráficos y cálculos mostrados anteriormente:

- En ensayos de laboratorio, es importante considerar el punto de operación de la bomba que proporciona la cantidad de caudal y presión que ingresa en la PAT, ya que este debe coincidir con la curva de resistencia del sistema en el cual se consideran todas las cargas de pérdidas. De esta manera se puede verificar que la cantidad de caudal enviado por la bomba sea el mismo que recibe la PAT, así también verificando la eficiencia que tiene el sistema.

- Se demostró que el factor limitante en el sistema PAT es la resistencia que genera la brida de impulsión por donde ingresa el fluido, más no la cantidad de caudal que debía proporcionar la bomba como se tenía previsto anteriormente.



Figura 25: Brida de Impulsión Interna de la Bomba. Laboratorio Ing. Hidráulica USFQ.

3. Análisis sistema PAT.

A continuación, se describen algunos aspectos importantes respecto al sistema PAT como son las aplicaciones de uso, análisis energético y económico

3.1. Aplicaciones de uso del sistema PAT

Un sistema PAT es sumamente conveniente de utilizar principalmente para uso artesanal ya sea generando electricidad para pequeñas comunidades que se encuentran alejadas de la civilización que no cuentan con un sistema eléctrico público. Además de satisfacer el servicio eléctrico, se puede utilizar para sistemas de riego, abrevadero de animales, limpieza de instalaciones dedicadas a la cría de ganado e incluso para ocio (dependiendo de la calidad del agua).

Gracias a la amplia gama de bombas disponibles en el mercado se pueden emplear las siguientes aplicaciones (POWERTURBINES, 2021):

- En instalaciones industriales el sistema PAT podría ser sumamente útil debido a que suplantaría las válvulas reguladoras en varios sistemas de producción, ocasionando una reducción positiva en los costes de instalación y mantenimiento de sistemas de producción industriales.
- En sistemas de distribución de agua, principalmente en aguas a arriba de los puntos de alimentación de depósitos de agua. En el Ecuador, la empresa pública metropolitana de agua potable y saneamiento (EPMAPS) tiene en funcionamiento estos sistemas.
- Como inversión en pequeños sistemas hidroeléctricos.
- En esclusas de ríos con poca altura y pequeños caudales.
- En sistemas de procesos químicos para la depuración de gases.
- Salidas de fondos de envases.
- Sistemas de suministros de aceites.

- Osmosis inversa en desalinizadoras.

3.2. Análisis energético

El consumo energético en el Ecuador según el Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables ha aumentado en el periodo de enero a julio del 2021, en un 8.13% en relación con el mismo periodo del año 2020. En Ecuador se han consumido 15,086 gigavatios hora (*GWh*) principalmente en la región Costa con un 62.2% del consumo; seguida la región Sierra con un 34.70% del consumo y finalmente la región Amazonía con un consumo del 3.10%. Por otro lado, los excedentes de energía eléctrica disponible, obviamente tras cubrir la demanda nacional, se han exportado 410 *GWh* a Colombia y Perú obteniendo importantes ingresos por alrededor de *USD 7.25 millones*. (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2021).

Según lo mencionado anteriormente, se puede destacar como el consumo energético en nuestro país es fundamental para la vida diaria de todos los ecuatorianos, a su vez se intensifica la necesidad de proporcionar el servicio eléctrico a las comunidades más necesitadas; por ello, la producción de energía eléctrica gracias al sistema PAT tiene la capacidad de solventar la necesidad eléctrica en aquellas comunidades afectadas e incluso proporcionar energía a la red pública para lograr ciertos beneficios económicos que pueden ser de carácter individual o personal, municipales e incluso el sector turístico enfocado en el aspecto ambiental que se podría orientar en cumplir varios de sus objetivos autosustentables.

3.3. Análisis económico

Un factor sumamente importante de destacar es el costo de una bomba que puede funcionar como turbina para producir electricidad juntamente con el costo de una turbina que logra el mismo objetivo. En el Ecuador fácilmente se puede conseguir una bomba de agua de 1 *HP* de entre los *USD 75.00* y *USD 250.00*; mientras que, una turbina no se logra conseguir fácilmente

en el mercado y esta puede llegar a costar entre los *USD 400.00* y *USD 12,500.00* según la potencia requerida (INEC, 2021). Esta gran variación de costos entre bombas y turbinas se debe a los costos de fabricación y fácilmente se puede notar el beneficio económico que un sistema PAT lograría llevar a cabo; y eso sin tomar en cuenta los costos de mantenimiento del sistema.

En un proyecto de mediana capacidad al utilizar un sistema tipo PAT, el periodo de amortización puede llegar hasta un máximo de 3 años tomando en cuenta un funcionamiento sumamente sencillo e incluso puede llegar a tener un periodo de amortización menor gracias a los costos de inversión mínima que se requieren. Mientras que las plantas hidroeléctricas con un funcionamiento complejo de turbinas pueden llegar a tener hasta un periodo de amortización de más de 15 años (Anzola, A. y Colón, K., 2018).

El objetivo principal de este proyecto está enfocado al sector residencial; por ende, a través de una planilla del sistema eléctrico ecuatoriano, el cual se puede corroborar en el Anexo M, y simples cálculos podemos conocer el costo unitario por cada kilovatio hora (*KWh*) de este sector conociendo el consumo total de kilovatios hora y el monto a cancelar solo del consumo eléctrico. En una zona residencial del sector norte de la ciudad de Quito se han consumido *278.00 KWh* y se ha cancelado *USD 24.79* en el mes de marzo del 2022; por ende, se tiene que el costo unitario es de:

$$\text{Costo Unitario} = \frac{\text{Monto Cancelado (USD)}}{\text{Consumo Total (KWh)}}$$

$$\text{Costo Unitario} = \frac{\text{USD 24.79}}{278.00 \text{ KWh}}$$

$$\text{Costo Unitario} = 0.09 \frac{\text{USD}}{\text{KWh}}$$

Como se puede comprobar el costo unitario de un kilovatio hora en el Ecuador es de 9 centavos de dólar estadounidense.

Según los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio, no se llegó a generar energía considerable para realizar un análisis económico exhaustivo como se tenía previsto anteriormente en los objetivos. En su defecto, se realizó un cálculo estimado basado en el resultado de generación de energía mediante el sistema electromecánico, en el cual se logró generar 80.50 *voltios*. Se debe tomar en cuenta que la cantidad de amperaje y potencia que consume la bomba es de 12 *A* y 0.75 *kW*, respectivamente. También se puede estimar un factor de potencia de 60%; este último valor es un porcentaje de la relación entre la potencia absorbida de la red con la potencia útil del sistema.

Para calcular la cantidad de potencia obtenida se utiliza la siguiente ecuación:

$$P = V \cdot A \cdot F.P$$

Donde:

- P es la potencia en W .
- V es el voltaje.
- A es el amperaje.
- $F.P$ es el factor de potencia.

Resolviendo se tiene que:

$$P = 80.50 \cdot 12 \cdot 60\%$$

$$P = 579.60 \text{ W} = 0.5796 \text{ kW}$$

Como se puede observar anteriormente, se logró obtener 0.5796 kW mediante el sistema electromecánico; al conocer que la bomba utiliza 0.75 kW para su funcionamiento, se puede obtener el porcentaje de eficiencia en caso de que el sistema PAT funcione hidráulicamente.

$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{\text{Valor Obtenido}}{\text{Valor de Consumo}} \cdot 100\%$$

$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{0.5796 \text{ kW}}{0.75 \text{ kW}} \cdot 100\%$$

$$\% \text{ Eficiencia} = 77.28\%$$

Como se puede observar, se obtuvo una eficiencia del 77.28% de la fuente de energía mediante el sistema electromecánico.

Además, se realizó una estimación de costos sobre la instalación, operación y mantenimiento del sistema hidráulico PAT para lograr un aprovechamiento considerable; para ello se consideraron los siguientes parámetros:

- Bomba que funcionará como turbina (PAT)
- Obra de captación aguas arriba para almacenar el agua y evitar objetos sólidos que puedan generar daños en la PAT.
- Materiales de construcción y transporte.
- Equipos de medición útiles para determinar el caudal, la velocidad angular y parámetros energéticos cuando se logre generar electricidad.
- Mano de obra.
- Servicio técnico de mantenimiento periódico.

Los costos unitarios fueron obtenidos de los índices de precios de materiales, equipo y maquinaria de la construcción (IPCO) del boletín N° 259 del mes de octubre de 2021 (INEC, 2021).

Tabla 18: Estimación de Costos para la Instalación, Operación y Mantenimiento de Sistema PAT. Elaboración Propia.

Item	Descripción	Cantidad	Unidad	Valor Unitario	Valor Total
1	Sistema de Bombeo				
1.1	Bomba Funcionará como Turbina	1	u	\$ 220.20	\$ 220.20
2	Sistema de Captación				
2.1	Captación Aguas Arriba	1	u	\$ 3,000.00	\$ 3,000.00
3	Transporte				
3.1	Transporte de Materiales a Sitio de Obra	20	km	\$ 1.50	\$ 30.00
4	Tuberías y Accesorios				
4.1	Tubería PVC de 1" diámetro	12	m	\$ 1.20	\$ 14.40
4.2	Tee 1" diámetro	4	u	\$ 2.09	\$ 8.36
4.3	Codos 1" diámetro	4	u	\$ 1.68	\$ 6.72
4.4	Acoples 1" diámetro	12	u	\$ 0.63	\$ 7.56
4.5	Válvula de Corte 1" diámetro	2	u	\$ 11.74	\$ 23.48
4.6	Manómetro	1	u	\$ 10.75	\$ 10.75
5	Equipos				
5.1	Caudalímetro	1	u	\$ 25.00	\$ 25.00
5.2	Tacómetro Digital	1	u	\$ 27.00	\$ 27.00
5.3	Medidor de Factores de Energía	1	u	\$ 25.00	\$ 25.00
6	Mano de Obra				
6.1	Ingeniero Civil / Residente	1	obra	\$ 800.00	\$ 800.00
6.2	Maestro Mayor	1	obra	\$ 500.00	\$ 500.00
6.3	Peones	1	obra	\$ 425.00	\$ 425.00
7	Servicio Técnico				
7.1	Servicio de Mantenimiento	1	semestral	\$ 180.00	\$ 180.00
				Subtotal	\$ 5,303.47
				Iva 12%	\$ 636.42
				Total	\$ 5,939.89

Como se puede observar en la tabla anterior, el precio total estimado de la instalación, operación y mantenimiento del sistema PAT es considerablemente alto de \$5,939.89, pero este sistema puede beneficiar a varias comunidades que no disponen de energía eléctrica y se logrará mejorar su calidad de vida. Además, gracias a las diferentes aplicaciones que se le

puede otorgar a este sistema se podría llegar amortizar este valor en menos de 3 años y a partir de ello generar ganancias sumamente importantes; ya sea en el sector privado e incluso en el sector público.

CONCLUSIONES

El uso de las bombas utilizadas como turbinas (PAT) es uno de los métodos de energía renovable más eficiente comparado con otros métodos de obtención de energía como la producción de energía nuclear, la cual presenta un porcentaje de eficiencia del 68% según el Centro de Investigación Económica y Presupuestaria, A. C. (CIEP, 2020). Además, proporciona un gran beneficio social, económico y principalmente ambiental ya que no contamina en tal magnitud como la producción de energía nuclear. Este sistema, PAT, es capaz de generar cierta capacidad de energía eléctrica con pocas modificaciones en lugares remotos donde el recurso hídrico sea suficiente.

En el caso de esta investigación no se logró generar electricidad por medio del sistema hidráulico debido a que la bomba adquirida para que funcione como turbina, bomba “Pedrollo” de 1 HP, presenta un sistema muy específico dentro de la brida de impulsión de 10 mm de diámetro. Como bomba funciona de manera excelente ya que este sistema permite la impulsión del fluido, pero en el caso como turbina, al momento de ingresar el fluido por esta brida de impulsión dicho sistema no permite el paso adecuado del fluido y por ende genera una gran cantidad de pérdidas hidráulicas demostradas anteriormente. Por el contrario, la estimación potencial que se obtuvo anteriormente, mediante la generación de energía por el sistema electromecánico demuestra como la eficiencia de un sistema PAT puede llegar a obtener excelentes resultados que se podrán utilizar para el beneficio de pequeñas comunidades.

Mediante los resultados presentados anteriormente se puede determinar que para que funcione el sistema PAT debe existir siempre caudal y altura piezométrica constante, ya que esto influye en la velocidad angular de giro del eje, el cual tiene que alcanzar y mantenerse a la velocidad nominal del sistema. Además, se debe verificar la capacitancia mínima necesaria según la potencia de la PAT a utilizar al momento de energía eléctrica.

A pesar de todas las limitaciones, se logró obtener suficiente información sobre el funcionamiento de las PAT y por ende de los ensayos realizados previamente. Esto es sumamente importante para que futuras investigaciones logren tener las bases necesarias para mejorar los resultados y en un futuro se emplee esta práctica de energía de renovable para beneficiar a muchas comunidades que carecen de ciertos servicios como la energía eléctrica. También este tipo de energía renovable podría llegar a generar beneficios económicos tanto para el sector privado como para el sector público. Existen muchas aplicaciones que pueden ser utilizadas para este tipo de sistema PAT, como la venta de energía eléctrica a la red pública, proyectos ambientales autosustentables, e incluso para el sector industrial y manufacturero.

En temas económicos la instalación, la operación y el mantenimiento de un sistema PAT resulta sumamente ventajoso comparado con la colocación de la red de energía de alambrado público o con la utilización de una planta electro generadora a diésel; ya que el sistema PAT podría generar energía eléctrica las 24 horas del día y la energía producida de manera “excesiva” se la podría almacenar en baterías de cualquier tipo que incluso estén conectadas a otros sistemas proporcionando mayores beneficios como calefacción de aire y agua. Además, el costo de mantenimiento es sumamente económico comparado con las plantas hidroeléctricas que llegar a tener costos sumamente elevados.

RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones, se recomienda, utilizar una bomba centrífuga como turbina que tenga mayor diámetro en la brida de impulsión para que el fluido pueda circular sin ningún problema y principalmente no se generen pérdidas de energía tan altas. Es recomendable utilizar alguna de las bombas descritas a continuación:

- Bomba marca “Leo” modelo *XHm/6A* de 3 HP con diámetro de succión y aspiración de 3 in.
- Bomba marca “Barnes” modelo *EH – 210* de 1HP con diámetro de succión de $1\frac{1}{4}$ in y diámetro de impulsión de 1 in. A pesar de tener el mismo diámetro de impulsión que la bomba utilizada en esta investigación, dicha bomba no contiene el sistema de salida de agua específico como la bomba “Pedrollo”.
- Bomba marca “IHM Eurolinea” modelo 8x31 con diámetro de succión de 3 in y de impulsión de $2\frac{1}{2}$ in.
- Bomba marca “Hidromac Malmedi” modelo 80 – 200A con diámetro de succión de 3 in y diámetro de aspiración de 4 in.

Se recomienda investigar las condiciones hidráulicas, como el caudal y la presión, necesarias para que el sistema PAT logre generar energía eléctrica manteniendo una eficiencia superior en relación con otros métodos de producción de energía.

En la sección electromecánica del sistema se recomienda el estudio y el uso de un generador de imanes permanentes, como un alternador, o el uso de un variador de frecuencia para lograr producir energía eléctrica bajo diferentes condiciones de giro del sistema y por lo tanto con variaciones en la velocidad angular de funcionamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anzola, A. y Colón, K. (2018). *Aprovechamiento de energía en líneas de conducción o redes de distribución de agua potable empleando bombas usadas como turbinas (BUTUS)*. Barranquilla: Universidad de la Costa.
- Apaza, G. (2018). *Utilización de turbina-bomba en sistemas de distribución de agua*. Arequipa, Perú: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Areatecnologia. (s.f.). *Areatecnologia*. Obtenido de <https://www.areatecnologia.com/electricidad/condensador.html>
- Arenas, E., Cantizado, A. y Arenas, A. (s.f.). *Estudio de una bomba-turbina integral*. XXI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica: Asociación Española de Ingeniería Mecánica.
- Audisio, O. (s.f.). *Bombas Utilizadas Como Turbinas*. Buenos Aires, Argentina: Universidad Nacional del Comanhue.
- CELEC EP. (14 de enero de 2021). *CELEC EP*. Obtenido de Noticias: <https://www.celec.gob.ec/hidroagoyan/index.php/sala-de-prensa/noticias/722-celec-ep-genera-y-transmite-mas-del-90-por-ciento-de-la-energia-electrica-limpia-que-consume-el-pais-y-exporta-a-los-paises-vecinos#:~:text=En%20este%20sentido%2C%20de%20la,a%20tra>
- Cely, E. y Pérez, J. (2018). *Evaluación del Desempeño de una Bomba Centrífuga Operando como Turbina*. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana.
- CIEP. (7 de febrero de 2020). *Centro de Investigación Económica y Presupuestaria, A. C.* Obtenido de <https://ciep.mx/analisis-de-eficiencia-de-la-energia-nucleoelectrica-una-alternativa-eficiente-para-el-sector->

- López Jiménez, P. A., & Pérez Sánchez, M. (Dirección). (2021). [Película].
- López Jiménez, P. A., & Pérez Sánchez, M. (Dirección). (2021). *Aspectos de regulación en sistemas con bombas instaladas como turbinas* [Película].
- Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables. (22 de agosto de 2021). *La demanda eléctrica del Ecuador aumentó en un 8,13%*. Obtenido de Boletín de prensa: [https://www.recursoyenergia.gob.ec/la-demanda-electrica-del-ecuador-aumento-en-un-813/#:~:text=Quito%20D.M.%2C%2022%20de%20agosto%20de%202021&text=De%20acuerdo%20con%20la%20informaci%C3%B3n,gigavatios%20%E2%80%932%20hora%20\(GWh\).](https://www.recursoyenergia.gob.ec/la-demanda-electrica-del-ecuador-aumento-en-un-813/#:~:text=Quito%20D.M.%2C%2022%20de%20agosto%20de%202021&text=De%20acuerdo%20con%20la%20informaci%C3%B3n,gigavatios%20%E2%80%932%20hora%20(GWh).)
- Monje, M. (s.f.). *iagua*. Obtenido de ¿Qué es la cavitación? ¿Cómo evitarla?: <https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/que-es-cavitacion-como-evitarla>
- Mott, R. (2006). *Mecánica de Fluidos*. Dayton: Pearson Education.
- Moussaoui, M. (2017). *Estudio sobre bombas funcionando como turbinas (BFT). Selección, montaje y caracterización experimental de un prototipo para banco de ensayos docente*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.
- N Ramal, et al. (2013). *An experimental investigation of pump as turbine for micro hydro application*. Malaysia: IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 16 012064.
- Nautiyal, H., Kumar, A. y Yadav, S. (2011). *Experimental Investigation of Centrifugal Pump Working as Turbine for Small Hydropower Systems*. Hamirpur: CSCANADA.
- ONU. (25 de septiembre de 2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Pedrollo. (2021). *Ficha Técnica Electrobombas Centrífugas CP*. Pedrollo.

Pérez-Sánchez, M., et al. (s.f.). *Bombas Operando Como Turbinas (PAT)*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

Planas, O. (16 de noviembre de 2020). *Energía Solar*. Obtenido de Turbinas hidráulicas: <https://solar-energia.net/energias-renovables/energia-hidraulica/turbinas-hidraulicas>

POWERTURBINES. (28 de febrero de 2021). *Conoces realmente todo sobre nuestras PAT's? Bombas usadas como turbinas*. Obtenido de [https://powerturbines.eu/blog/conoces-realmente-todo-sobre-nuestras-pats-bombas-usadas-como-turbinas/#:~:text=Las%20bombas%20usadas%20como%20turbinas%20\(PaT\)%20son%20%20C3%BAtiles%20siempre%20que,generar%20y%20recuperar%20energ%C3%ADa%20adicional](https://powerturbines.eu/blog/conoces-realmente-todo-sobre-nuestras-pats-bombas-usadas-como-turbinas/#:~:text=Las%20bombas%20usadas%20como%20turbinas%20(PaT)%20son%20%20C3%BAtiles%20siempre%20que,generar%20y%20recuperar%20energ%C3%ADa%20adicional)

Pricast. (07 de octubre de 2009). *Interempresas*. Obtenido de Cavitación en el bombeo de fluidos: https://www.interempresas.net/Componentes_Mecanicos/Articulos/34521-Cavitacion-en-el-bombeo-de-fluidos.html

Puchi, C. (2010). *Factibilidad técnica de la utilización de una bomba como turbina hidráulica*. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile.

Quintero, J. y Villamizar, A. (2011). *Viabilidad técnica-económica de implementar una bomba como pico turbina para suministrar energía eléctrica a una escuela rural*. Medellín: Universidad EAFIT.

Tecnoturbines. (29 de junio de 2018). *Tecnoturbines Powering Water*. Obtenido de <https://tecnoturbines.com/blog/bombas-usadas-como-turbinas-bajo-condiciones-hidraulicas-variables>

Trillos, N. (2011). *Micro-Generación de Electricidad Utilizando Bombas como Turbinas*. Bogotá: Universidad de los Andes.

Universidad Nacional de Ingeniería. (2019). *Ensayo Bomba - Turbina*. Laboratorio de Ingeniería Mecánica III.

Universidad Politécnica de Valencia, A. L. (Dirección). (2021). *¿Qué es una bomba funcionando como turbina (PAT)?* [Película].

Williams, A. (1997). *Pumps As Turbines, A user guide*. Londres: Intermediate Technology Publications Ltd.

ANEXO A: BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINAS (PAT)

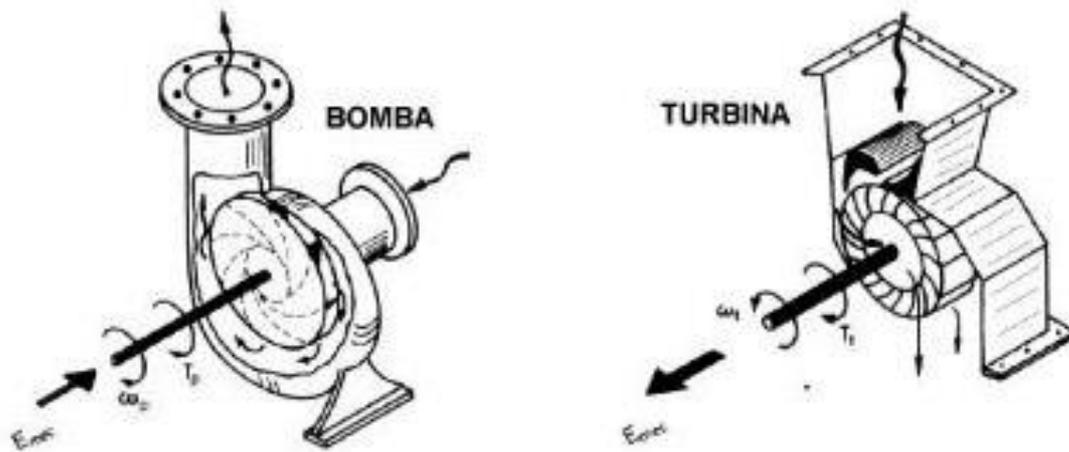


Figura 26: Energía que ingresa a una bomba y sale de una turbina (POWER TURBINES, 2021).

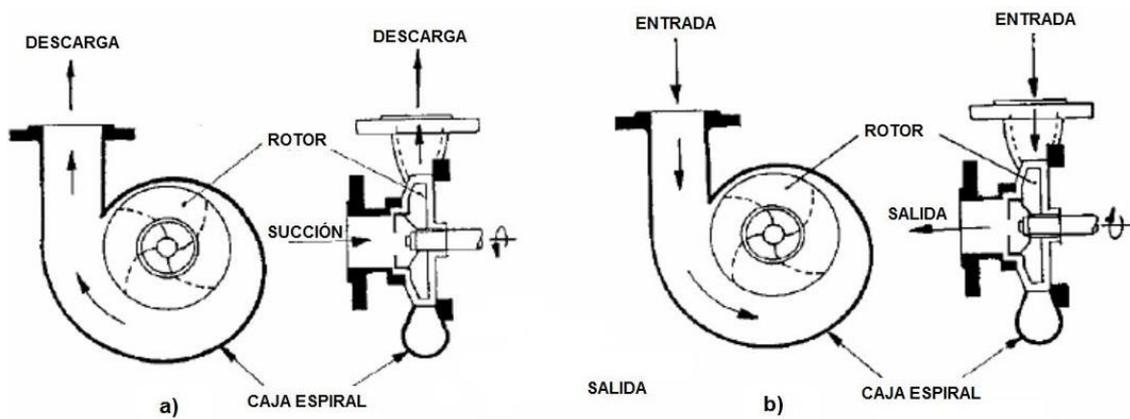


Figura 27: Funcionamiento de una bomba (a) y de una turbina (b) en el sistema PAT (Apaza, 2018).

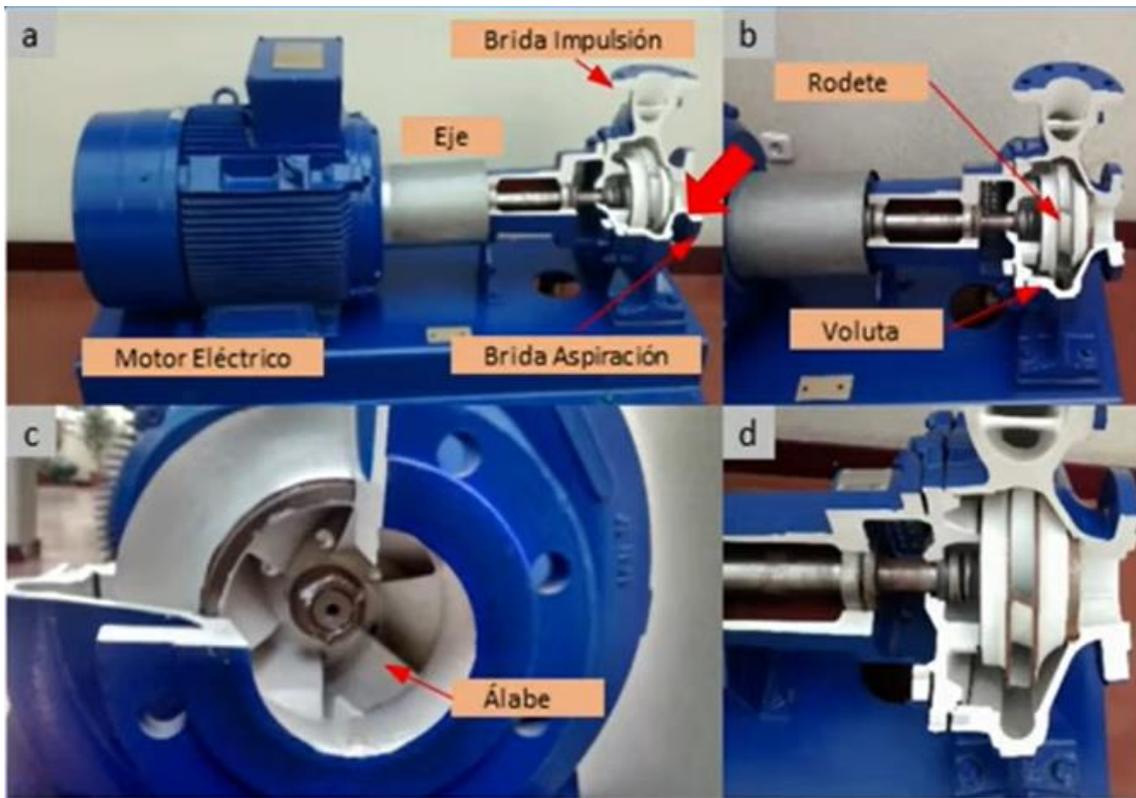
ANEXO B: ELEMENTOS IMPORTANTES DE LAS PAT

Figura 28: Elementos estructurales que son similares en una bomba y una turbina en vistas transversales (Universidad Politécnica de Valencia, 2021).

ANEXO C: DIAGRAMA DE MOODY

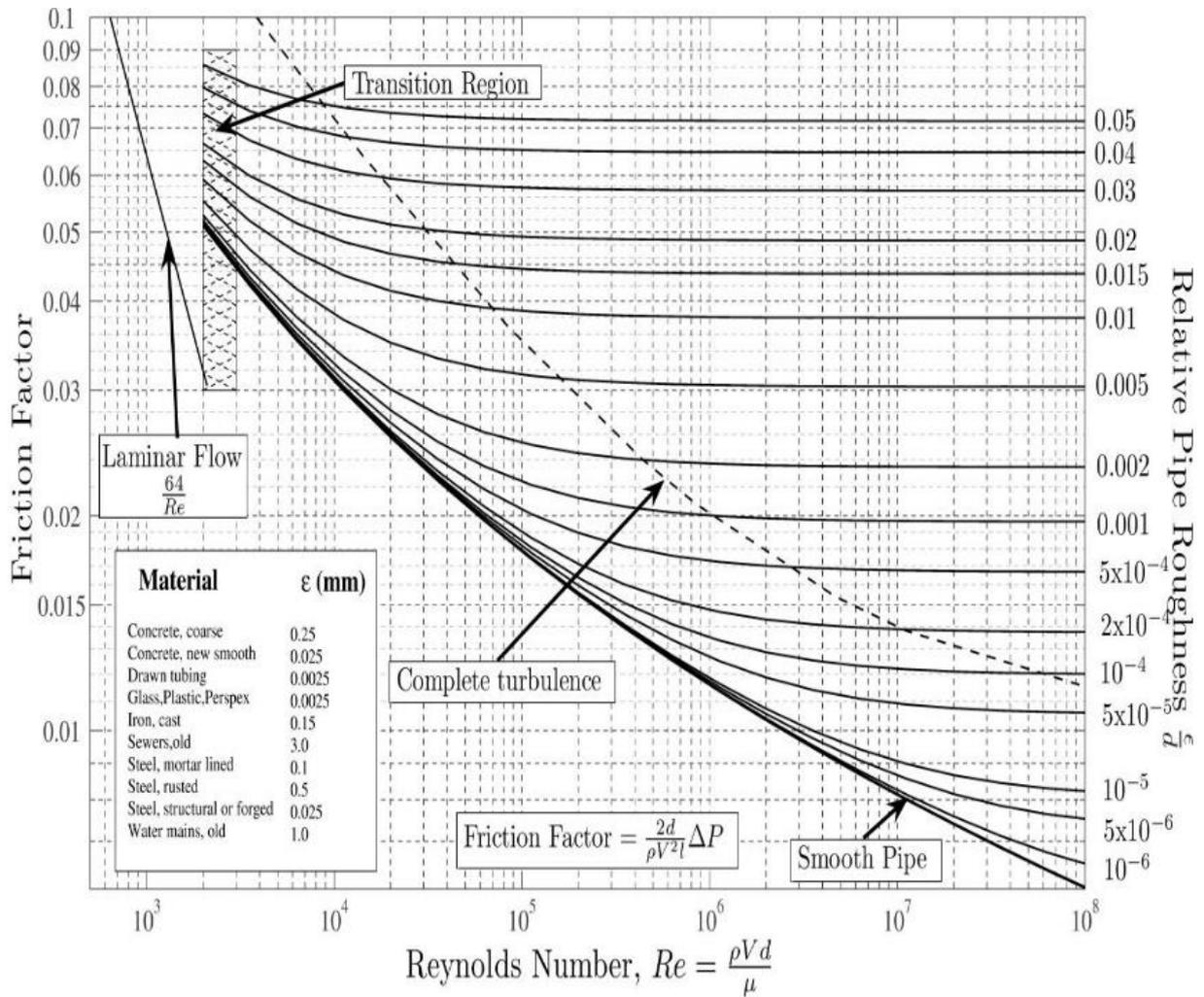


Figura 29: Diagrama de Moody, para obtener el factor de fricción (f) según la rugosidad y diámetro de la tubería, y el número de Reynolds (Francisco, 2015).

ANEXO D: RELACIÓN DE LONGITUD EQUIVALENTE Y RUGOSIDAD DE TUBERÍA DEPENDIENDO DEL MATERIAL

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°	30
Codo a 90° de radio largo	20
Codo roscado a 90°	50
Codo estándar a 45°	16
Codo roscado a 45°	26
Vuelta cerrada en retorno	50
Te estándar—con flujo directo	20
—con flujo en el ramal	60

Fuente: Crane Valves, Signal Hill, CA.

Figura 30: Factor de relación y longitud equivalente para válvulas y acoplamientos (Mott, 2006).

TABLA 8.2 Valores de diseño de la rugosidad de tubos.

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

Figura 31: Rugosidad de tubería dependiendo del material (Mott, 2006).

**ANEXO E: OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA “ONU” QUE
APORTA EL SISTEMA PAT**



Figura 32: Objetivos de desarrollo sostenible de la “ONU” a los que favorece el uso de un sistema PAT (ONU, 2015).

ANEXO F: POTENCIA Y ENERGÍA GENERADA SEGÚN ANZOLA Y COLÓN

Tabla 19: Resultado de potencia (kW) y energía generada (kWh/día) por medio del sistema PAT (Anzola, A. y Colón, K., 2018).

Fecha	Potencia (kW)	Energía Generada (kWh/día)
2018-04-09	10,79	165,05
2018-04-10	11,30	271,26
2018-04-11	10,76	247,4
2018-04-12	10,80	256,45
2018-04-13	11,08	232,43
2018-04-14	11,23	266,76

Nota: La tabla presenta los principales resultados de potencia (kW) y energía generada en la Línea de conducción El Radar-Usiacurí, empleando una bomba como turbina, esta representación fue elaborada de forma propia (Anzola & Colón, 2018)

ANEXO G: POTENCIA Y ENERGÍA GENERADA SEGÚN GILMER APAZA

Tabla 20: Potencias útiles generadas por el sistema PAT, según caudal y altura piezométrica (Apaza, 2018).

TABLA 6.8					
POTENCIAS ÚTILES GENERADAS					
Q [l/s]	% Q_{max}	H [m]	η	$\eta_g * \eta_t$	P [kW]
38	40%	85,56	0,832	0,86	27
55	58%	85,12	0,879	0,86	40
85	90%	83,85	0,932	0,86	65

Tabla 21: Energía producida en promedio anual por el sistema PAT, según potencia obtenida y el número de horas trabajadas (Apaza, 2018).

TABLA 6.9			
ENERGÍA PRODUCIDA EN AÑO PROMEDIO			
P [kW]	N° horas	Energía [kW.h/día]	Energía [MW.h/año]
27	8	212	78
40	3	121	44
65	4	261	95
Totales	15	594	217

ANEXO H: GRÁFICA PARA LA SELECCIÓN DEL CAPACITOR

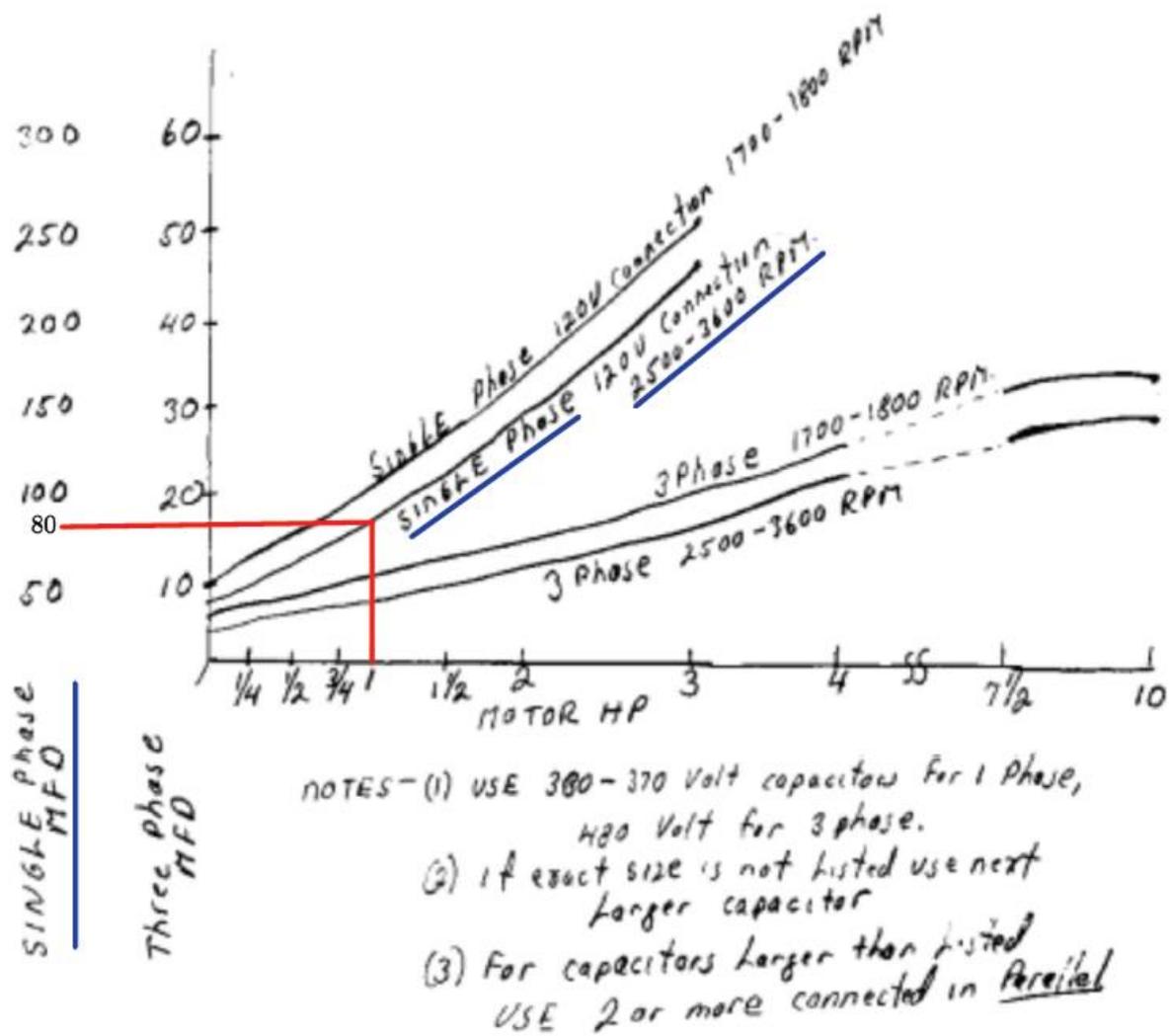


Figura 33: Gráfica para Selección del Capacitor. (Trillos, 2011).

ANEXO I: MATERIALES A UTILIZAR EN EL ENSAYO DE LABORATORIO

Figura 34: Bomba Centrífuga de 1 HP Marca "Pedrollo". Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.



Figura 35: Tubería PVC de 1 in de diámetro. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.



Figura 36: Uniones Roscables Universales de 1in de diámetro. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.



Figura 37: Codos Tubería PVC de 1in de diámetro. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.



Figura 38: Acople Tubería PVC "Tee" de 1in de diámetro. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.



Figura 39: Neplos Corridos de 1in de diámetro. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.



Figura 40: Válvulas de Bola de 1in de diámetro. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.



Figura 41: Manómetro, Reducción Bushing PVC Roscable y de Acero Galvanizado de 1/2 in de diámetro. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.



Figura 42: Tanque de Almacenamiento de 85 Litros. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.



Figura 43: Rotámetro en Unidades de m^3/h con Neplo Corrido y Unión Roscable

Universal. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.



Figura 44: Tacómetro Digital. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.



Figura 45: Condensador de Papel de 60 μ f (izquierda) y Condensador Electrolítico de 80 μ f (derecha). Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.



Figura 46: Herramientas varias. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.



Figura 47: Manguera de 1 pulg. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.



Figura 48: Bomba Marca "Paolo" de 1/2 HP. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.



Figura 49: Bomba Marca "Goulds Pumps" Sumergible de 2 HP. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.

ANEXO J: FICHA TÉCNICA DE BOMBA UTILIZADA EN EL ENSAYO DE LABORATORIO



CAMPO DE PRESTACIONES

- Caudal hasta 160 l/min (6 m³/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
- IEC 60335-1
- CEI 61-150
- EN 60034-1
- IEC 60034-1
- CEI 2-3

CERTIFICACIONES
 Empresa con sistema de gestión certificado DWV
 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 riego 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

- Marca registrada nº 0001516350 C/m158
- Sello mecánico especial
- Modelo comunitario registrado nº 002098434

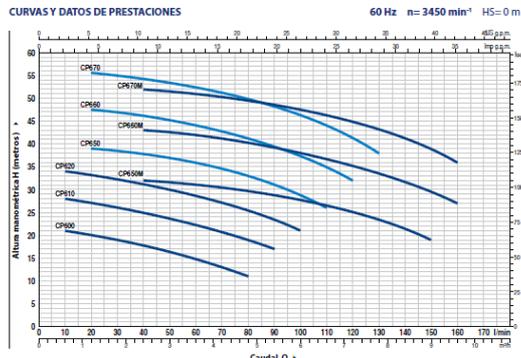
EJECUCIÓN BAJO PEDIDO

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

GARANTÍA

2 años según nuestras condiciones generales de venta

CURVAS Y DATOS DE PRESTACIONES



MODELO	POTENCIA (P ₂)	Q ₁	Q (l/min)															
			0	10	20	40	60	80	90	100	110	120	130	150	160			
CPm 600	0.37	0.50	22	21	20	18	15	11										
CPm 610	0.60	0.85	28.5	28	27	25	22	19	17									
CPm 620	0.75	1	35	34	33	31	28.5	25.5	23.5	21								
CPm 650	1.1	1.5	40	-	39	38	36	33.1	31.2	28.8	26							
CPm 660	1.5	2	48	-	47.5	46	44	41	38.5	37.5	35	32						
CPm 670	2.2	3	56	-	55.5	54.5	52.5	50	48.5	46.5	44	41.5	38					
CPm 650M	1.1	1.5	33	-	32	31	30	29	28	26.5	25	23	19					
CPm 660M	1.5	2	44	-	43	42	40	39	38	37	35.5	34	29.5	27				
CPm 670M	2.2	3	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

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

Tolerancia de las curvas de prestación según EN 50096 Grado B8.

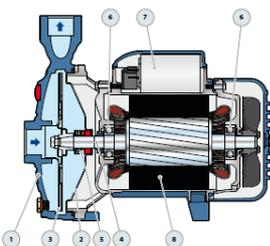
60 Hz | CP 0.25 kW - 2.2 kW

CP 0.25 kW - 2.2 kW | 60 Hz

POS. COMPONENTE CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS

1 CUERPO BOMBA	Hierro fundido con tratamiento de catáforésis con bocas roscadas ISO 228/1																												
2 TAPA	Acero inoxidable AISI 304 (en hierro para CP 650-660-670-650M-660M-670M)																												
3 RODETE	Acero inoxidable AISI 304																												
4 EJE MOTOR	Acero inoxidable AISI 431																												
5 SELLO MECANICO	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Electrobomba</th> <th>Sello</th> <th>Eje</th> <th colspan="2">Materiales</th> </tr> <tr> <th>Modelo</th> <th>Modelo</th> <th>Diámetro</th> <th>Anillo fijo</th> <th>Anillo móvil</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CP 600-610</td> <td>AR-12</td> <td>Ø 12 mm</td> <td>Cerámica</td> <td>Grafito</td> <td>NBR</td> </tr> <tr> <td>CP 620</td> <td>AR-14</td> <td>Ø 14 mm</td> <td>Cerámica</td> <td>Grafito</td> <td>NBR</td> </tr> <tr> <td>CP 650-660-670</td> <td>FN-18</td> <td>Ø 18 mm</td> <td>Grafito</td> <td>Cerámica</td> <td>NBR</td> </tr> </tbody> </table>	Electrobomba	Sello	Eje	Materiales		Modelo	Modelo	Diámetro	Anillo fijo	Anillo móvil	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	FN-18	Ø 18 mm	Grafito	Cerámica	NBR
	Electrobomba	Sello	Eje	Materiales																									
	Modelo	Modelo	Diámetro	Anillo fijo	Anillo móvil																								
	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	FN-18	Ø 18 mm	Grafito	Cerámica	NBR																								
6 RODAMIENTOS	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Electrobomba</th> <th>Modelo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CP 600-610</td> <td>6201 ZZ / 6201 ZZ</td> </tr> <tr> <td>CP 620</td> <td>6203 ZZ / 6203 ZZ</td> </tr> <tr> <td>CP 650-660-670</td> <td>6204 ZZ / 6204 ZZ</td> </tr> </tbody> </table>	Electrobomba	Modelo	CP 600-610	6201 ZZ / 6201 ZZ	CP 620	6203 ZZ / 6203 ZZ	CP 650-660-670	6204 ZZ / 6204 ZZ																				
	Electrobomba	Modelo																											
	CP 600-610	6201 ZZ / 6201 ZZ																											
	CP 620	6203 ZZ / 6203 ZZ																											
CP 650-660-670	6204 ZZ / 6204 ZZ																												
7 CONDENSADOR	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Electrobomba</th> <th>Capacidad</th> </tr> <tr> <th>Monofásica</th> <th>(230 V)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CPm 600</td> <td>10 µF - 450 VL</td> </tr> <tr> <td>CPm 610</td> <td>14 µF - 450 VL</td> </tr> <tr> <td>CPm 620</td> <td>20 µF - 450 VL</td> </tr> <tr> <td>CPm 650-650M</td> <td>25 µF - 450 VL</td> </tr> <tr> <td>CPm 660-660M</td> <td>31.5 µF - 450 VL</td> </tr> <tr> <td>CPm 670-670M</td> <td>50 µF - 450 VL</td> </tr> </tbody> </table>	Electrobomba	Capacidad	Monofásica	(230 V)	CPm 600	10 µF - 450 VL	CPm 610	14 µF - 450 VL	CPm 620	20 µF - 450 VL	CPm 650-650M	25 µF - 450 VL	CPm 660-660M	31.5 µF - 450 VL	CPm 670-670M	50 µF - 450 VL												
	Electrobomba	Capacidad																											
	Monofásica	(230 V)																											
	CPm 600	10 µF - 450 VL																											
	CPm 610	14 µF - 450 VL																											
	CPm 620	20 µF - 450 VL																											
CPm 650-650M	25 µF - 450 VL																												
CPm 660-660M	31.5 µF - 450 VL																												
CPm 670-670M	50 µF - 450 VL																												

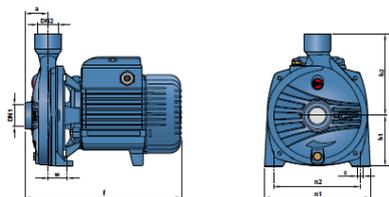
- 8 MOTOR ELECTRICO
 CPm: monofásica 220 V - 60 Hz con protección térmica incorporada en el bobinado.
 CP: trifásica 220/380 V - 60 Hz o 220/440 V - 60 Hz.
 * Las electrobombas trifásicas están equipadas con motores de alto rendimiento en clase IE2 hasta P₂=0.60 kW y en clase IE3 desde P₂=0.75 kW (IEC 60034-30-1)
 - Aislamiento: clase F
 - Protección IP X4



60 Hz | CP 0.25 kW - 2.2 kW

CP 0.25 kW - 2.2 kW | 60 Hz

DIMENSIONES Y PESOS



MODELO	BOCAS	DIMENSIONES mm											kg	
		DN1	DN2	a	f	h3	h1	h2	n1	n2	w	s	l1	l2
CPm 600	CP 600	1"	1"	42	257	205	82	123	165	135	38	11	7.0	7.7
CPm 610	CP 610												8.5	7.8
CPm 620	CP 620												11.0	10.9
CPm 650-650M	CP 650-650M	1 1/4"	1"	51	367	260	110	150	206	165	44.5	11	18.9	17.6
CPm 660-660M	CP 660-660M												18.9	17.9
CPm 670-670M	CP 670-670M												28.9	22.5

CONSUMO EN AMPERIOS

MODELO	TENSION			MODELO	TENSION			
	220 V	110 V	127 V		220 V	380 V	220 V	440 V
CPm 600	2.7 A	5.5 A	5.2 A	CP 600	1.8 A	1.0 A	2.0 A	1.2 A
CPm 610	4.0 A	8.0 A	8.0 A	CP 610	2.8 A	1.6 A	2.6 A	1.5 A
CPm 620	6.0 A	12.0 A	16.8 A	CP 620	4.2 A	2.4 A	4.2 A	2.4 A
CPm 650	8.8 A	17.6 A	16.0 A	CP 650	7.5 A	4.3 A	5.8 A	3.2 A
CPm 650M	8.8 A	17.6 A	16.7 A	CP 650M	7.5 A	4.3 A	5.8 A	3.2 A
CPm 660	9.7 A	20.0 A	16.8 A	CP 660	7.6 A	4.4 A	5.9 A	3.2 A
CPm 660M	9.7 A	19.0 A	18.4 A	CP 660M	7.6 A	4.4 A	6.4 A	4.1 A
CPm 670	13.2 A	25.0 A	22.9 A	CP 670	7.5 A	4.3 A	5.8 A	3.2 A
CPm 670M	12.0 A	24.0 A	19.0 A	CP 670M	8.6 A	5.0 A	7.8 A	4.5 A

PALETIZADO

MODELO	PARA GRUPEJE	PARA CONTAINER	
		nº bombas	nº bombas
CPm 600	CP 600	96	144
CPm 610	CP 610	96	144
CPm 620	CP 620	70	112
CPm 650-650M	CP 650-650M	50	70
CPm 660-660M	CP 660-660M	50	70
CPm 670-670 M	-	50	70
-	CP 670-670 M	35	49

Figura 50: Ficha Técnica Bomba Pedrollo. (Pedrollo, 2021)

ANEXO K: ESQUEMA DE CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA HIDRÁULICO

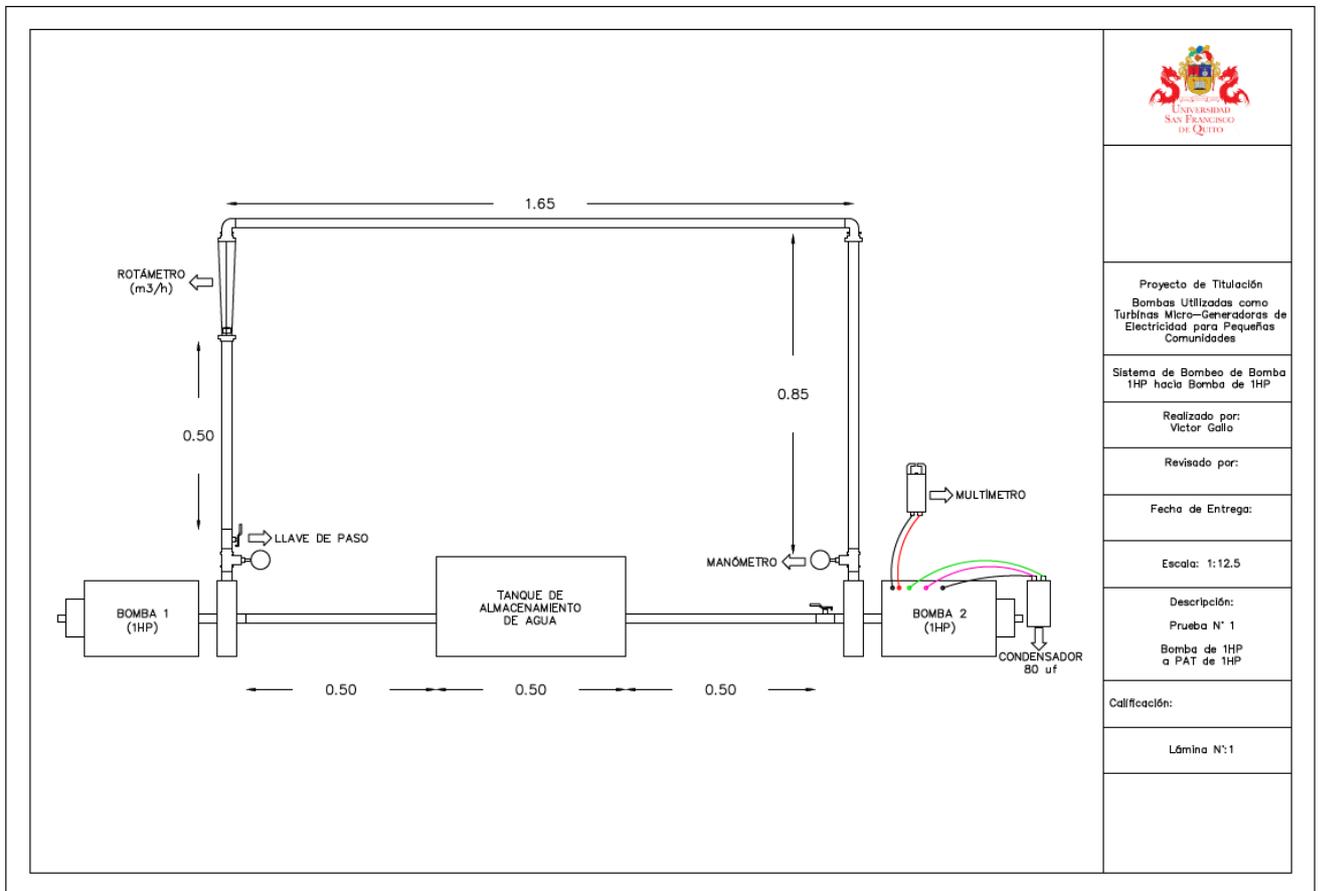
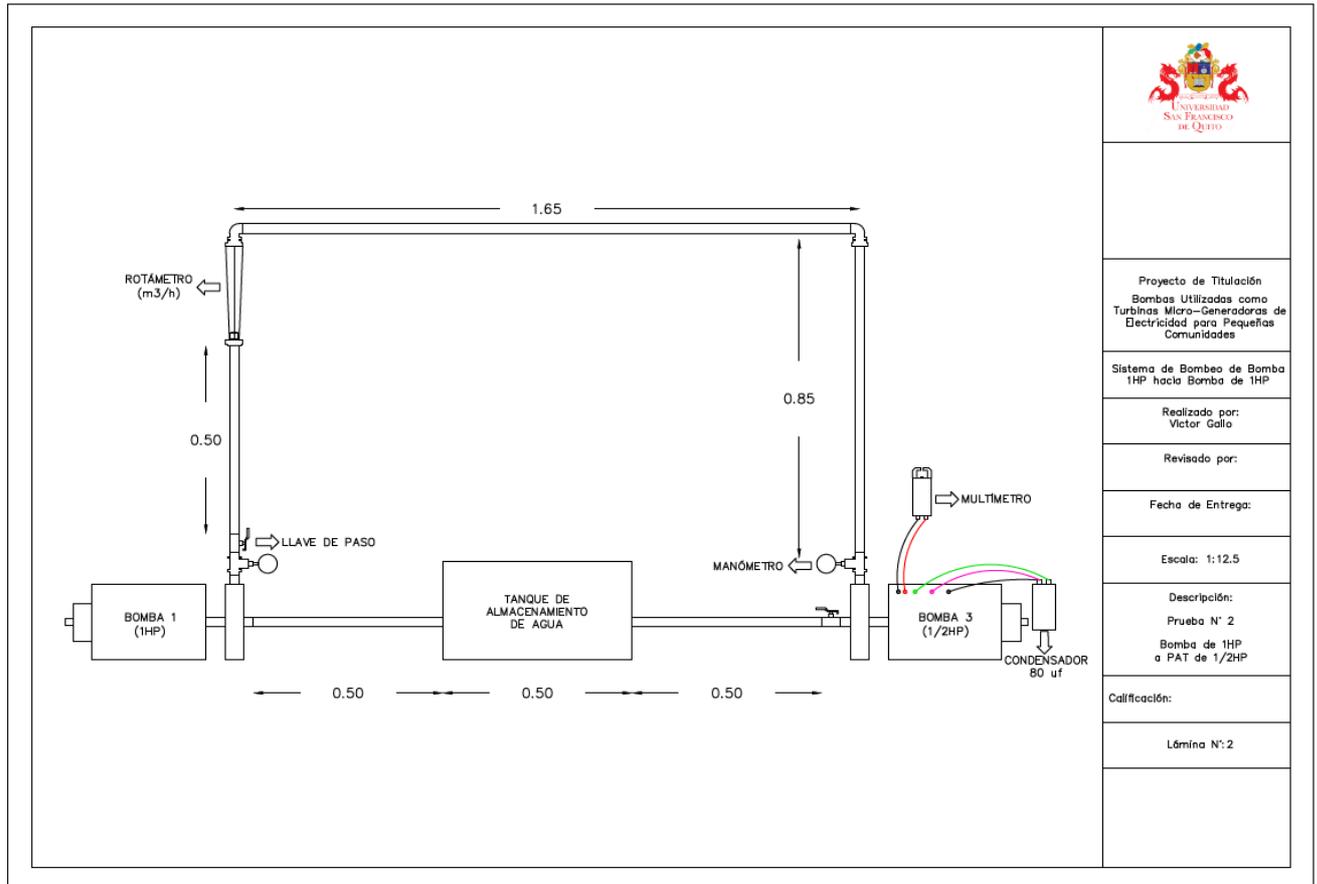


Figura 51: Conexión Sistema Hidráulico Prueba N° 1. Elaboración Propia.



Figura 52: Sistema Hidráulico Prueba N° 1. Laboratorio de Ing. Hidráulica USFQ.



<p>Proyecto de Titulación Bombas Utilizadas como Turbinas Micro-Generadoras de Electricidad para Pequeñas Comunidades</p>
<p>Sistema de Bombeo de Bomba 1HP hacia Bomba de 1HP</p>
<p>Realizado por: Victor Gallo</p>
<p>Revisado por:</p>
<p>Fecha de Entrega:</p>
<p>Escala: 1:12.5</p>
<p>Descripción: Prueba N° 2 Bomba de 1HP a PAT de 1/2HP</p>
<p>Calificación:</p>
<p>Lámina N°: 2</p>

Figura 53: Conexión Sistema Hidráulico Prueba N° 2. Elaboración Propia.

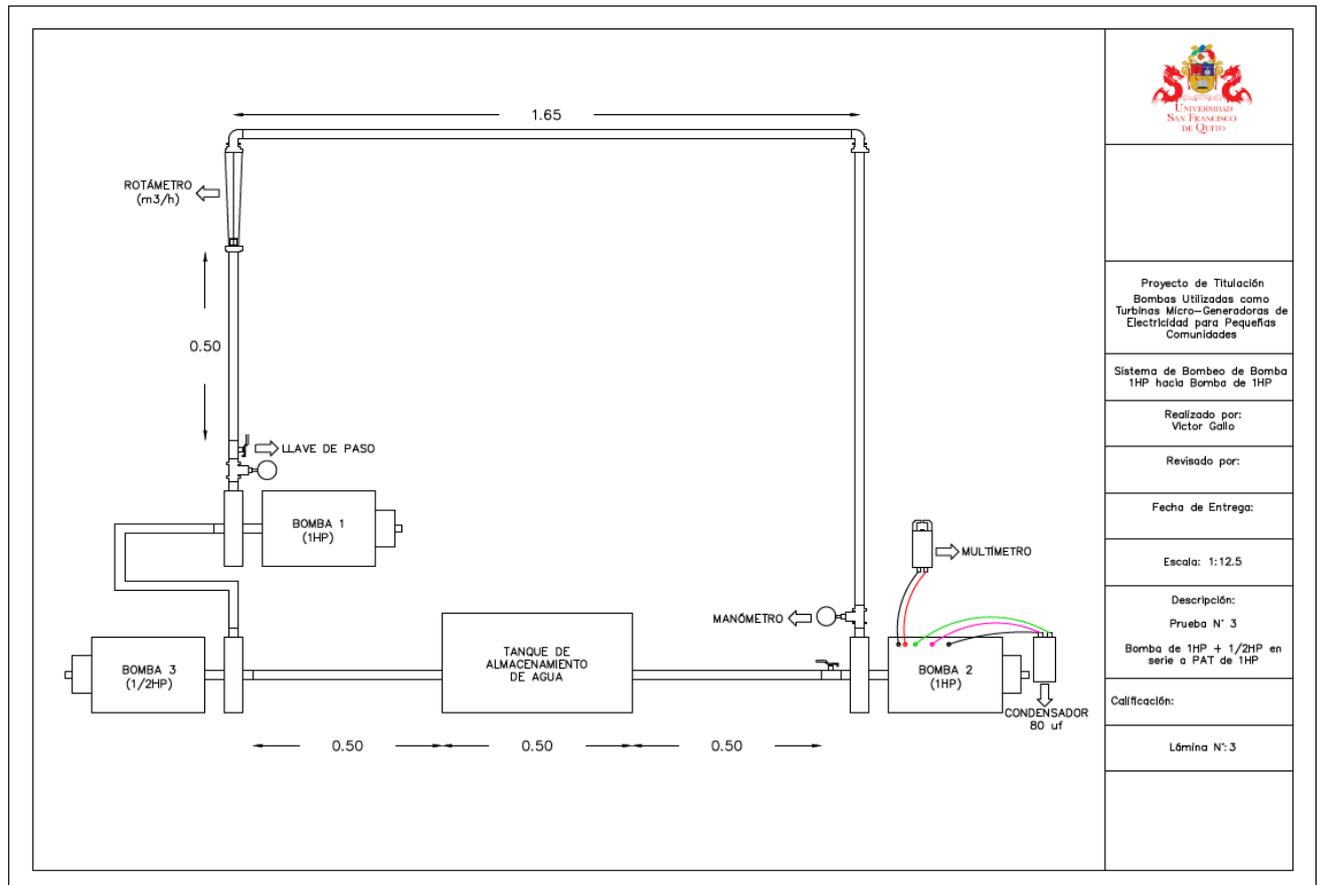


Figura 54: Conexión Sistema Hidráulico Prueba N° 3. Elaboración Propia.

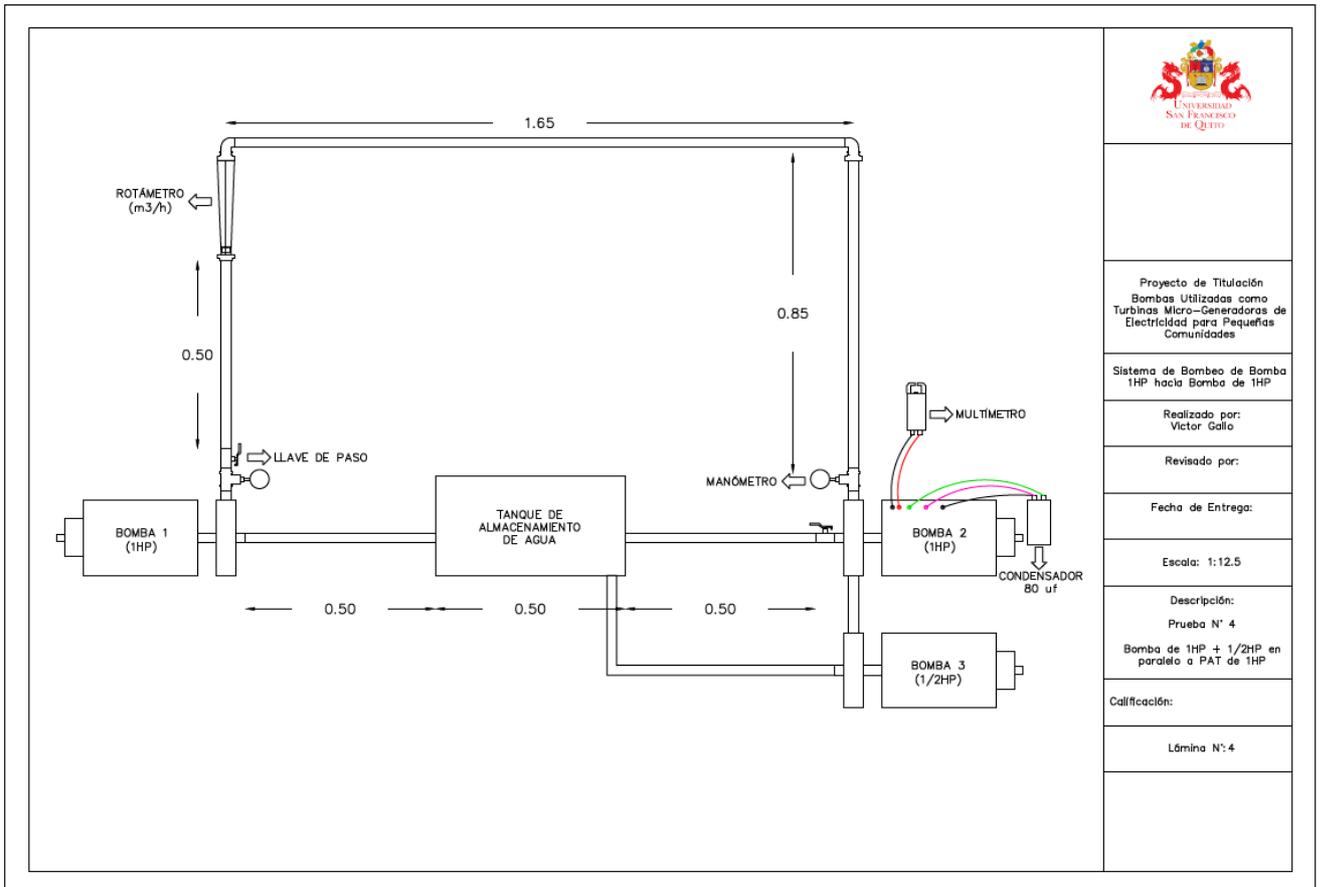
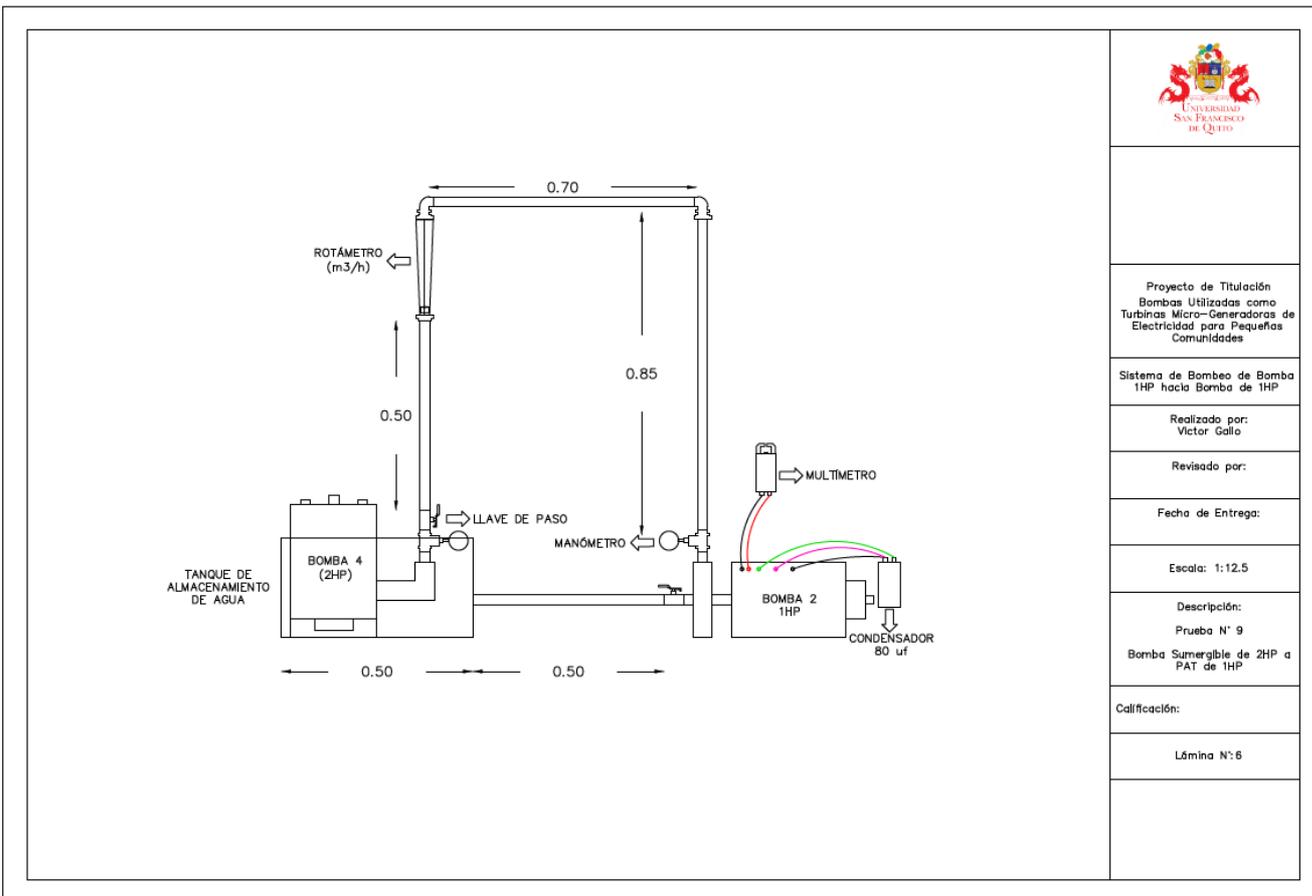


Figura 55: Conexión Sistema Hidráulico Prueba N° 4. Elaboración Propia.



Proyecto de Titulación
Bombas Utilizadas como
Turbinas Micro-Generadoras de
Electricidad para Pequeñas
Comunidades

Sistema de Bombeo de Bomba
1HP hacia Bomba de 1HP

Realizado por:
Victor Gallo

Revisado por:

Fecha de Entrega:

Escala: 1:12.5

Descripción:
Prueba N° 9
Bomba Sumergible de 2HP a
PAT de 1HP

Calificación:

Lámina N°: 6

Figura 56: Conexión Sistema Hidráulico Prueba N° 9. Elaboración Propia.

ANEXO L: ESQUEMA DE CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO
(CAMBIO DE GIRO MOTOR)

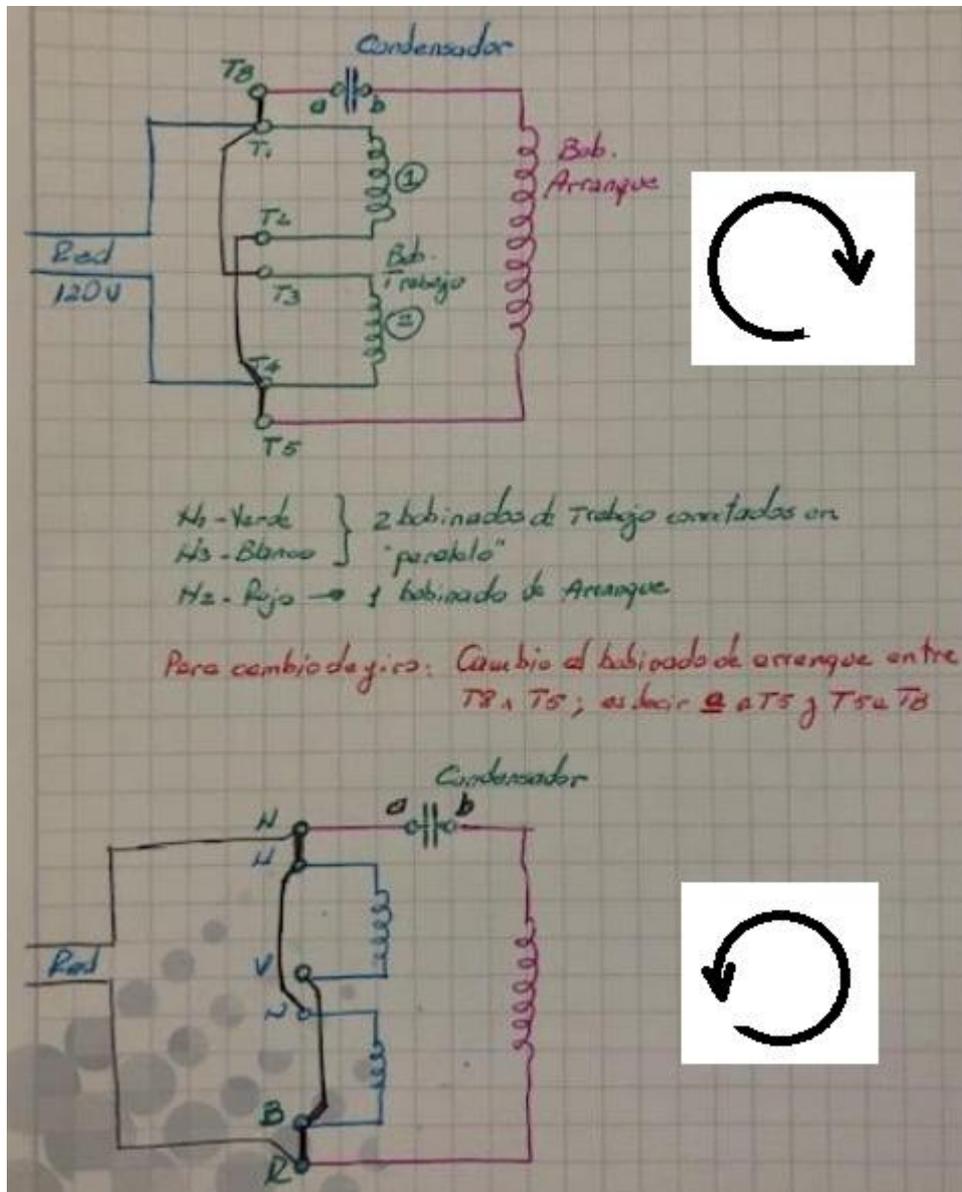


Figura 57: Configuración Sistema Eléctrico (Cambio de Giro Motor). Ing. Villagómez, A.

ANEXO M: PLANILLA DEL SERVICIO ELÉCTRICO EN ECUADOR



Empresa Eléctrica Quito S.A.E.E.Q.
Matriz: Bartolome de las Casas E1-24 y Av. 10 de Agosto

Ruc: 1790053881001
Contribuyente especial, resolución No. 5368
OBLIGADO A LLEVAR CONTABILIDAD



K200009377652

Nro. factura [REDACTED]
Nro. doc. interno 2821161287
Fecha de emisión 09-03-2022
Fecha de vencimiento 24-03-2022
Número de autorización
0903202201179005388100120019990648939420067759812

VALOR TOTAL: [REDACTED]

Información del Consumidor

CUENTA CONTRATO [REDACTED] Código Único Eléctrico [REDACTED]
Nombre cliente [REDACTED]
Cédula [REDACTED] Tipo de tarifa Arconel [REDACTED] Residencial
Celular Actualizar Celular [REDACTED] Geocódigo [REDACTED] Unidad de Lectura [REDACTED]
Correo Electrónico Actualizar Correo Electrónico [REDACTED]
Dirección del servicio [REDACTED]

1. Información Servicio Eléctrico y Alumbrado Público

Número de medidor [REDACTED]
Tipo de consumo leído
Fecha desde 09-02-2022
Días facturados 29
Fecha hasta 09-03-2022

Descripción	Fecha Hasta	Lectura Actual	Lectura Anterior	Diferencia Consumo	Consumo Subtotal	Consumo interno Transformador	Consumo Total	Unidad Medida	Monto (\$)
Energía activa total	09-03-2022	56661,00	56383,00	0,00	278,00	0,00	278,00	kWh	24,79

Figura 58: Planilla del Servicio Eléctrico en Ecuador. Elaboración Propia.