



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

**ESCUELA PROFESIONAL INGENIERÍA EN ENERGÍAS
RENOVABLES**



**EVALUACION COMPARATIVA DEL RENDIMIENTO DE DOS
BOMBAS SOLARES SUMERGIBLES DE 2HP PARA LA
DETERMINACIÓN DE SU ALTURA ÓPTIMA DE OPERACIÓN A
MÁS DE 3800 MSNM**

Leydy Yhoana Pancca Humpiri

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO EN ENERGÍAS
RENOVABLES**

Asesor:

Dr. Henry Pizarro Viveros

Co-Asesor

Ing. Vianey Daysi Chura Palli

Juliaca, 2024



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

**ESCUELA PROFESIONAL INGENIERÍA EN ENERGÍAS
RENOVABLES**



**EVALUACION COMPARATIVA DEL RENDIMIENTO DE DOS
BOMBAS SOLARES SUMERGIBLES DE 2HP PARA LA
DETERMINACIÓN DE SU ALTURA ÓPTIMA DE OPERACIÓN A
MÁS DE 3800 MSNM**

Leydy Yhoana Pancca Humpiri

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO EN ENERGÍAS
RENOVABLES**

**Asesor:
Dr. Henry Pizarro Viveros**

**Co-Asesor
Ing. Vianey Daysi Chura Palli**

Juliaca, 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL INGENIERÍA EN ENERGÍAS
RENOVABLES



EVALUACION COMPARATIVA DEL RENDIMIENTO DE DOS
BOMBAS SOLARES SUMERGIBLES DE 2HP PARA LA
DETERMINACIÓN DE SU ALTURA ÓPTIMA DE OPERACIÓN A
MÁS DE 3800 MSNM

Leydy Yhoana Pancca Humpiri

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO EN ENERGÍAS
RENOVABLES

Asesor:

Dr. Henry Pizarro Viveros

Co-Asesor

Ing. Vianey Daysi Chura Palli

Juliaca, 2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Panca Humpiri, L. Y. (2024). Evaluación comparativa del rendimiento de dos bombas solares sumergibles de 2HP para la determinación de su altura óptima de operación a más de 3800 msnm Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Juliaca.

AUTOR: Leydy Yhoana Panca Humpiri

TÍTULO: Evaluación comparativa del rendimiento de dos bombas solares sumergibles de 2HP para la determinación de su altura óptima de operación a más de 3800 msnm

PUBLICACIÓN: Juliaca, 2024

DESCRIPCIÓN: Cantidad de páginas (148pp)

CÓDIGO: 02-000030-02/P23

NOTA: Incluye bibliografía

ASESOR: Dr. Henry Pizarro Viveros

CO-ASESOR: Ing. Vianey Daysi Chura Palli

PALABRAS CLAVE: Altura óptima de operación, Bombas sumergibles, Comparativa de bombas solares, Eficiencia energética, Energía solar fotovoltaica, Rendimiento de bombas solares, Sistemas de bombeo solar.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA

ESCUELA PROFESIONAL INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

“EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL RENDIMIENTO DE DOS BOMBAS SOLARES SUMERGIBLES DE 2HP PARA LA DETERMINACIÓN DE SU ALTURA ÓPTIMA DE OPERACIÓN A MÁS DE 3800 MSNM”

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES

Presentada por:

Leydy Yhoana Pancca Humpiri

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Dr. Washington Miguel Soncco Vilcapaza

PRESIDENTE DE JURADO

Dr. Ubaldo Yancachajlla Tito

JURADO (Secretario)

M. Sc. Josmell Tito Calderon

JURADO (Vocal)

2° MIEMBRO

3° MIEMBRO

Dr. Henry Pizarro Viveros
ASESOR DE TESIS

Ing. Vianey Daysi Chura Palli
CO-ASESOR DE TESIS

NOMBRE DEL TRABAJO

**EVALUACION COMPARATIVA DEL RENDI
MIENTO DE DOS BOMBAS SOLARES SU
MERGIBLES DE 2HP PARA LA DETERMI
NAC**

AUTOR

Leydy Yhoana Pancca Humpiri

RECUENTO DE PALABRAS

39048 Words

RECUENTO DE CARACTERES

195223 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

148 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

9.5MB

FECHA DE ENTREGA

Nov 11, 2024 2:47 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Nov 11, 2024 2:50 PM GMT-5

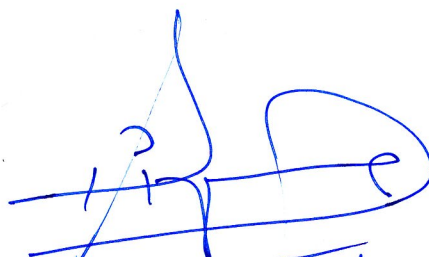
● **7% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 5% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 4% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)



Henry Pizarro Viveros
ASESOR

Resumen

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación se desarrolla con profunda gratitud y reconocimiento a mis queridos padres, Félix Pancca y Jacoba Humpiri. Su amor incondicional, apoyo constante y férrea dedicación han sido la mayor inspiración y fortaleza a lo largo de este proceso académico. Cada etapa de esta investigación lleva impreso el reflejo de su inquebrantable sacrificio y entrega. Agradezco infinitamente su inquebrantable confianza en mí y por haber sido mi sostén inquebragable en los momentos más desafiantes.

De igual manera, extendiendo este logro a mis hermanos, Marisol, Luis y Fernando, quienes han compartido conmigo cada alegría y cada obstáculo a lo largo de este trayecto. Su ánimo, aliento y compañía han sido pilares fundamentales que me han impulsado a alcanzar esta meta académica. Este triunfo también les pertenece a ustedes.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, deseo expresar mi más sincero y profundo agradecimiento a Dios, por haberme concedido la vida, la salud y por guiarme por el camino correcto. Su divina iluminación ha sido mi faro en los momentos de incertidumbre, otorgándome la fortaleza necesaria para superar cada obstáculo a lo largo de este trayecto académico.

De manera especial, quiero agradecer a mi distinguido asesor, el Dr. Henry Pizarro Viveros, por su invaluable sabiduría, orientación y dedicación inquebrantable a lo largo de este proyecto. Sus conocimientos han sido enriquecedores y su apoyo constante ha sido fundamental para mi crecimiento como investigador.

Asimismo, expreso mi sincero agradecimiento a mi estimada co-asesora, la Ing. Vianey Daysi Chura Palli, por su valiosa contribución y respaldo durante este proceso. Su experiencia y perspectiva han sido cruciales para dar forma a este trabajo de investigación.

Extiendo mi gratitud a la Universidad Nacional de Juliaca, por proporcionar un entorno académico propicio para el desarrollo de este proyecto. Su compromiso con la excelencia académica y la investigación ha sido un estímulo constante en mi formación profesional.

De igual manera, agradezco a la Escuela Profesional de Ingeniería en Energías Renovables por brindarme acceso a los recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación. El uso de los equipos del Laboratorio de Energía Solar Fotovoltaica fue fundamental para el desarrollo y la conclusión exitosa de este proyecto.

Por último, pero no menos importante, expreso mi gratitud a todos los docentes que compartieron su conocimiento y experiencia conmigo a lo largo de mi formación académica. Su dedicación a la enseñanza ha dejado una huella indeleble en mi desarrollo profesional y personal.

ÍNDICE

Dedicatoria.....	v
Agradecimientos.....	vi
Índice de tablas	x
Índice de figuras.....	xi
Índice de anexos.....	xv
Lista de abreviaturas y siglas.....	xvi
Lista de símbolos.....	xvii
Resumen.....	xviii
Abstract.....	xix
Introducción.....	xx
CAPITULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	23
1.1 Formulación del problema	24
1.1.1 Problema general.....	24
1.1.2 Problemas específicos	25
1.2 Objetivos de la investigación	25
1.2.1 Objetivo general	25
1.2.2 Objetivos específicos.....	25
1.3 Justificación de la investigación	26
1.3.1 Justificación técnica	26
1.3.2 Justificación social	27
1.3.3 Justificación ambiental.....	27
1.3.4 Justificación económica	28
CAPITULO II REVISIÓN DE LA LITERATURA	29
2.1 Antecedentes del problema	29
2.2 Marco teórico	32
2.2.1 Energía solar fotovoltaica.....	32
2.2.2 Análisis de la radiación solar y las horas solar pico en Juliaca.....	33
2.2.3 Tipos de radiación captada por los paneles solares.....	33
2.2.4 Radiación solar aplicada en la ciudad de Juliaca	34
2.2.5 Sistemas de bombeo	35

2.2.6	Principios de operación de los sistemas de bombeo fotovoltaico	35
2.2.7	Diseño y dimensionamiento de sistemas de bombeo fotovoltaico.....	36
2.2.8	Tipos de bombeo solar	37
2.2.9	Condiciones hidráulicas	38
2.2.10	Banco para simulación de alturas manométricas	40
2.2.11	Dimensionamiento de un Sistema de Bombeo Fotovoltaico	41
2.2.12	Tipos de mantenimiento	46
CAPITULO III MATERIALES Y MÉTODOS.....		48
3.1	Formulación de hipótesis	48
3.1.1	Hipótesis general	48
3.1.2	Hipótesis específicas	48
3.2	Materiales y equipos	48
3.2.1	Área de estudio.....	48
3.2.2	Módulo fotovoltaico.....	49
3.2.3	Modulo banco de pruebas de sistema solar de bombeo	50
3.2.4	Variador solar	53
3.2.5	Variador de red.....	55
3.2.6	Módulo de adquisición de datos.....	55
3.2.7	Celda calibrada.....	56
3.2.8	Bombas sumergibles	57
3.3	Software del sistema de adquisición de datos	58
3.4	Metodología	58
3.4.1	Fundamentación de las mediciones a 45m, 50m y 55m.....	58
3.4.2	Características técnicas de las bombas sumergibles	61
3.4.3	Procedimiento para la realización de pruebas en pleno sol.....	62
3.4.4	Procedimiento para la realización de pruebas con la fuente CC.....	63
3.4.5	Parámetros técnicos de la hidráulica de las bombas sumergibles	65
3.4.6	Mantenimiento para bombas sumergibles.....	65
CAPITULO IV RESULTADOS Y DISCUSIONES.....		67
4.1	Metodología para el diseño del módulo del sistema fotovoltaico.....	67
4.1.1	Cálculo de la energía diaria requerida.....	67
4.1.2	Cálculo del número de paneles solares necesarios.....	67
4.1.3	Cálculo del número de paneles en serie	68
4.1.4	Cálculo del número de ramas en paralelo	68

4.1.5	Cálculo de la corriente total	68
4.2	Resultado de las mediciones con el sistema fotovoltaico a pleno sol	69
4.2.1	Diagramas de la bomba sumergible Stairs	69
4.2.2	Diagramas de la bomba sumergible Pedrollo.....	93
4.2.3	Comparación de eficiencia de bombas en condiciones reales y catálogo a diferentes alturas	118
4.3	Resultados obtenidos con la fuente CC.....	119
4.3.1	Evaluación del comportamiento de la bomba Pedrollo de 2HP medido y teórico.....	120
4.3.2	Evaluación del comportamiento de la bomba stairs de 2HP medido y teórico.....	121
4.3.3	Comparación entre Stairs y Pedrollo.....	122
4.4	Discusión.....	122
4.5	Practicas recomendadas para el mantenimiento del módulo del sistema de bombeo fotovoltaico.....	123
4.5.1	Mantenimiento de la matriz fotovoltaica	123
4.5.2	Mantenimiento del módulo de pruebas de bombas.....	125
4.5.3	Mantenimiento de las bombas sumergibles	126
CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		129
5.1	Conclusiones	129
5.2	Recomendaciones.....	129
5.3	Sugerencia de trabajos de investigación futuros	130
CAPITULO VI REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		131
ANEXO 1. Ficha técnica de la motobomba sumergible de 2 HP de la marca stairs.....		137
ANEXO 2. Ficha técnica de la motobomba sumergible de 2 HP de la marca Pedrollo....		138
ANEXO 3. Ficha técnica de la curva de rendimiento de la bomba sumergible		139
ANEXO 4. Medición de la densidad del tipo de fluido utilizado en el módulo de pruebas		140
ANEXO 5. Motobomba sumergible Stairs.....		141
ANEXO 6. Motobomba sumergible Pedrollo		142
ANEXO 7. Motobomba sumergible Stairs en el módulo de prueba		143
ANEXO 8. Motobomba sumergible Pedrollo en el modulo de pruebas		145
ANEXO 9. Imágenes fotográficas de las evaluaciones de cada motobomba.....		147

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Especificaciones técnicas del módulo fotovoltaico monocristalino de 50W.....	50
Tabla 2 Parámetros del variador CFW500 solar drive	54
Tabla 3 Características de los equipos de adquisición de datos.	61
Tabla 4 Características técnicas de las bombas utilizadas en los experimentos.....	62
Tabla 5 Alturas manométricas para la realización de ensayos de caracterización de bombas en luz solar real para las diferentes alturas evaluadas.....	62
Tabla 6 Configuración de parámetros del CFW500 Solar Drive para pruebas con el SFV reales.	63
Tabla 7 Alturas manométricas para la realización de ensayos de caracterización de bombas en luz solar real para las diferentes alturas evaluadas.....	64
Tabla 8 Configuración de parámetros del CFW500 para pruebas con la fuente CC (Chroma).	65
Tabla 9 Características técnicas de la hidráulica de la bomba sumergible Stairs.....	65
Tabla 10 Características técnicas de la hidráulica de la bomba sumergible Pedrollo	65
Tabla 11 Promedio de datos del periodo de evaluación de dos bombas sumergibles	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Uso de energía solar como fuente alternativa para sistema de riego agrícola. ...	xxi
Figura 2. Instalación de sistemas de bombeo de agua potable con paneles solares	xxi
Figura 3. Partes de funcionamiento de una célula de silicio	32
Figura 4. Horas solar pico en sede Ayabacas - UNAJ	34
Figura 5. Componentes de un sistema de bombeo solar	36
Figura 6. Tipos de bombeo solar en función del caudal y la altura total de bombeo	37
Figura 7. Configuraciones estándar dependiendo del flujo y la altura total	38
Figura 8. Diagrama de altura y caudal de la bomba	39
Figura 9. Diagrama de los componentes del cabezal completo para la captura en superficie.	42
Figura 10. Instituto de energías renovables y eficiencia energética – UNAJ -Ayabacas...	49
Figura 11. Vista externa del sistema fotovoltaico.	49
Figura 12. Módulo de pruebas de bombas con generación solar fotovoltaica.	50
Figura 13. Diagrama esquemático del módulo de banco de pruebas del sistema de bombeo fotovoltaico	52
Figura 14. Posición de las bombas sumergidas dentro del depósito de agua.....	53
Figura 15. Variador de velocidad WEG CFW500 SOLAR DRIVE	53
Figura 16. Variador de velocidad WEG CFW500 DRIVE.	55
Figura 17. Datalogger Keysight Agilent 34970 ^a	56
Figura 18. Celda calibrada para medir irradiancia	57
Figura 19. Bombas centrífugas sumergibles de 2 HP utilizadas en el estudio.	58
Figura 20. Curvas de rendimiento y eficiencia de la bomba 4SR33G-F).	60
Figura 21. Comportamiento de la potencia c.c. y eficiencia de bomba vs tiempo a 45 m.c.a Stairs	70
Figura 22. Comportamiento de la potencia c.c. y eficiencia de bomba vs tiempo a 50 m.c.a. Stairs	71
Figura 23. Comportamiento de la potencia c.c. y eficiencia de bomba vs tiempo a 55 m.c.a. Stairs	72

Figura 24. Comportamiento de la tensión c.c. y temperatura del módulo vs tiempo a 45 m.c.a. Stairs	73
Figura 25. Comportamiento de la tensión c.c. y temperatura del módulo vs tiempo a 50 m.c.a. Stairs	74
Figura 26. Comportamiento de la tensión c.c. y temperatura del módulo vs tiempo a 55 m.c.a Stairs.....	75
Figura 27. Comportamiento de la potencia c.c vs irradiancia a 45 m.c.a Stairs.....	76
Figura 28. Comportamiento de la potencia c.c vs irradiancia a 50 m.c.a Stairs.....	77
Figura 29. Comportamiento de la potencia c.c vs irradiancia a 55 m.c.a Stairs	78
Figura 30. Comportamiento del caudal vs potencia c.c. a 45 m.c.a Stairs.	79
Figura 31. Comportamiento del caudal vs potencia c.c. a 50 m.c.a Stairs	80
Figura 32. Comportamiento del caudal vs potencia c.c. a 55 m.c.a Stairs	81
Figura 33. Comportamiento del caudal y frecuencia vs tiempo a 45 m.c.a Stairs	82
Figura 34. Comportamiento del caudal y frecuencia vs tiempo a 50 m.c.a Stairs	83
Figura 35. Comportamiento del caudal y frecuencia vs tiempo a 55 m.c.a Stairs.	84
Figura 36. Comportamiento de la irradiancia y de altura manométrica vs tiempo a 45 m.c.a Stairs	85
Figura 37. Comportamiento de la irradiancia y de altura manométrica vs tiempo a 50 m.c.a Stairs	86
Figura 38. Comportamiento de la irradiancia y de altura manométrica vs tiempo a 55 m.c.a Stairs	87
Figura 39. Comportamiento de la irradiancia y caudal vs tiempo a 45 m.c.a Stairs.....	88
Figura 40. Comportamiento de la irradiancia y caudal vs tiempo a 50 m.c.a Stairs	89
Figura 41. Comportamiento de la irradiancia y caudal vs tiempo a 55 m.c.a Stairs	90
Figura 42. Comportamiento de corriente y tensión vs tiempo a 45 m.c.a Stairs	91
Figura 43. Comportamiento de corriente y tensión vs tiempo a 50 m.c.a Stairs.....	92
Figura 44. Comportamiento de corriente y tensión vs tiempo a 55 m.c.a Stairs.....	93
Figura 45. Comportamiento de la potencia c.c. y eficiencia vs tiempo a 45 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2 HP	94
Figura 46. Comportamiento de la potencia c.c. y eficiencia vs tiempo a 50 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2 HP	95

Figura 47. Comportamiento de la potencia c.c. y eficiencia vs tiempo a 55 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2 HP	96
Figura 48. Comportamiento de la tensión c.c. y temperatura del módulo vs tiempo a 45 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2 HP	97
Figura 49. Comportamiento de la tensión c.c. y temperatura del módulo vs tiempo a 50 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2 HP	98
Figura 50. Comportamiento de la tensión c.c. y temperatura del módulo vs tiempo a 55 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2 HP	99
Figura 51. Comportamiento de la potencia c.c vs irradiancia a 45 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2 HP	100
Figura 52. Comportamiento de la potencia c.c vs irradiancia a 50 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2 HP	101
Figura 53. Comportamiento de la potencia c.c vs irradiancia a 55 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2 HP	102
Figura 54. Comportamiento del caudal vs potencia c.c. a 45 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2 HP	103
Figura 55. Comportamiento del caudal vs potencia c.c. a 50 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2 HP	104
Figura 56. Comportamiento del caudal vs potencia c.c. a 55 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2 HP	105
Figura 57. Comportamiento del caudal y frecuencia vs tiempo a 45 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2 HP	106
Figura 58. Comportamiento del caudal y frecuencia vs tiempo a 50 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2 HP	107
Figura 59. Comportamiento del caudal y frecuencia vs tiempo a 55 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2 HP	108
Figura 60. Comportamiento de la irradiancia y de la altura manométrica vs tiempo a 45 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2 HP	109
Figura 61. Comportamiento de la irradiancia y de la altura manométrica vs tiempo a 50 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2 HP	110
Figura 62. Comportamiento de la irradiancia y de la altura manométrica vs tiempo a 55 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2 HP	111
Figura 63. Comportamiento de la irradiancia y caudal vs tiempo a 45 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2 HP	112

Figura 64. Comportamiento de la irradiancia y caudal vs tiempo a 50 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2 HP	113
Figura 65. Comportamiento de la irradiancia y caudal vs tiempo a 55 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2 HP	114
Figura 66. Comportamiento de corriente y tensión vs tiempo a 45 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2 HP	115
Figura 67. Comportamiento de corriente y tensión vs tiempo a 50 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2 HP	116
Figura 68. Comportamiento de corriente y tensión vs tiempo a 55 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2 HP	117
Figura 69. Análisis comparativo de la eficiencia de bombas en condiciones operativas reales vs. especificaciones de catálogo en alturas manométricas variables	119
Figura 70. Comparación de la eficiencia energética de bombas sumergibles Pedrollo y Stairs valores catalogados vs medidos.	120
Figura 71. Comportamiento del Caudal (m^3/h) en función de la altura manométrica (m.c.a.) de la bomba sumergible Pedrollo de 2 HP	121
Figura 72. Comparación de caudal en función de la altura manométrica: datos reales vs. catálogo para la bomba sumergible Stairs.....	122
Figura 73. Limpieza de una celda fotovoltaica	125
Figura 74. Módulo de del banco de pruebas con fluido del grifo mas el aditivo (antioxidante)..	126
Figura 75. Mantenimiento de la bomba sumergible	127

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Ficha técnica de la motobomba sumergible de 2 HP de la marca stairs.	137
ANEXO 2. Ficha técnica de la motobomba sumergible de 2 HP de la marca Pedrollo...	138
ANEXO 3. Ficha técnica de la curva de rendimiento de la bomba sumergible de 2 HP stairs	139
ANEXO 4. Medición de la densidad del tipo de fluido utilizado en el módulo de pruebas	140
ANEXO 5. Motobomba sumergible Stairs	141
ANEXO 6. Motobomba sumergible Pedrollo.....	142
ANEXO 7. Motobomba sumergible Stairs en el módulo de prueba.....	143
ANEXO 8. Motobomba sumergible Pedrollo en el modulo de pruebas.....	145
ANEXO 9. Imágenes fotográficas de las evaluaciones de cada motobomba	147

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

UNAJ	Universidad nacional de Juliaca
EPIER	Escuela profesional de ingeniería en energías renovables
AM	Masa de Aire
SPF	Sistemas de Bombeo Fotovoltaico
PV	Módulos Fotovoltaicos
MPPT	Maximum Power Point Tracking
CDT	Carga Dinámica Total
CE	Carga Estática
SFB	Sistema de Flujo de Bombeo
HM	Altura manométrica
THD	Altura dinámica total

LISTA DE SÍMBOLOS

H_F	Pérdida de carga (m)
F	Factor de fricción de la tubería (sin unidad)
L	Longitud de la tubería (m)
D	Diámetro interno de la tubería (m)
V	velocidad del flujo de agua en la tubería (m/s)
Q	Caudal
CC	Corriente Continua
W	Potencia
η_{PV}	Eficiencia del sistema fotovoltaico
T	Temperatura del módulo
W/m^2	Irradiancia
P_H	Potencia hidráulica requerida por la bomba
P	densidad del agua
CH	constante hidráulica
G	aceleración debida a la gravedad ($m \cdot s^{-2}$)
V_D	Volumen demandado diario ($m^3 \cdot día^{-1}$).
HSP	Horas solar pico ($h \cdot día^{-1}$).
G_T	Irradiación global diaria en el plano del generador fotovoltaico ($kWh \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$).
G_{REF}	Irradiancia en condiciones de prueba estándar (STC): $1000 Wm^{-2}$.
P_{EL}	Potencia eléctrica en los devanados del motor (W).
η_{MB}	Eficiencia del grupo electrobomba (%).
η_{CP}	Eficiencia del dispositivo acondicionador de potencia (%)
E_{EL}	Energía eléctrica demandada diariamente por la bomba ($Wh \cdot día^{-1}$).
T	Tiempo de funcionamiento de la motobomba ($h \cdot día^{-1}$)
P_{GFV}	Potencia nominal del generador fotovoltaico
E_{diaria}	Energía diaria
$P_{sistema}$	Potencia requerida del sistema
$N_{paneles}$	Número de paneles solares
P_{pv}	Potencia nominal de un panel solar (W)
P_{max}	Potencia máxima
%	Tolerancia de potencia
V_{mp}	Voltaje de máxima potencia
I_{mp}	Corriente de máxima potencia
V_{oc}	Voltaje de circuito abierto
I_{sc}	Corriente de corto circuito
m.c.a	Metros columna agua

RESUMEN

El uso de sistemas de bombeo solar fotovoltaico se ha incrementado significativamente en diversas partes del mundo debido a la necesidad de soluciones sostenibles para el suministro de agua, especialmente en áreas rurales y remotas con acceso limitado a la electricidad. Sin embargo, existe una falta de estudios comparativos sobre el rendimiento de estos sistemas en condiciones extremas, como la ciudad de Juliaca, situada a más de 3800 metros sobre el nivel del mar. Esta investigación tiene como objetivo evaluar y comparar el rendimiento de dos bombas solares sumergibles de 2HP para determinar su altura óptima de operación en estas condiciones. El estudio se llevó a cabo en el Instituto de Energías Renovables y Eficiencia Energética de la Universidad Nacional de Juliaca, utilizando un enfoque experimental. Los resultados muestran que la bomba Stairs alcanza una eficiencia máxima del 39.23% a 1755 W y un caudal de 5.23 m³/h a 50 metros, mientras que la bomba Pedrollo logra una eficiencia máxima del 39.97% a 1700 W y un caudal de 5.4 m³/h a 45 metros. La eficiencia y el caudal de ambas bombas dependen significativamente de la potencia del sistema fotovoltaico y varían según la altura operativa. La bomba Stairs presenta un mejor rendimiento general, con una eficiencia del 38% a 1860 W y un caudal de 5.23 m³/h a 50 metros, mientras que la Pedrollo muestra una eficiencia de 39.27% a 1790 W y un caudal de 4.93 m³/h a la misma altura. Se concluye que las condiciones extremas, como la alta altitud y las bajas temperaturas, impactan el rendimiento, siendo la bomba Stairs ligeramente superior en estas condiciones. Estos hallazgos subrayan la importancia de seleccionar adecuadamente las bombas sumergibles y ajustar las condiciones operativas para maximizar el rendimiento en sistemas de bombeo solar, destacando la necesidad de mediciones empíricas y ajustes técnicos en condiciones extremas, así como la importancia del mantenimiento regular para garantizar la eficiencia y longevidad de los sistemas fotovoltaicos.

Palabras clave: Altura óptima de operación, Bombas sumergibles, Comparativa de bombas solares, Eficiencia energética, Energía solar fotovoltaica, Rendimiento de bombas solares, Sistemas de bombeo solar.

ABSTRACT

The use of photovoltaic solar pumping systems has significantly increased in various parts of the world due to the need for sustainable water supply solutions, particularly in rural and remote areas with limited access to electricity. However, there is a lack of comparative studies on the performance of these systems under extreme conditions, such as in the city of Juliaca, located over 3,800 meters above sea level. This research aims to evaluate and compare the performance of two 2HP submersible solar pumps to determine their optimal operating height under these conditions. The study was conducted at the Institute of Renewable Energy and Energy Efficiency of the National University of Juliaca, using an experimental approach. The results indicate that the Stairs pump achieves a maximum efficiency of 39.23% at 1755 W with a flow rate of 5.23 m³/h at 50 meters, while the Pedrollo pump attains a maximum efficiency of 39.97% at 1700 W with a flow rate of 5.4 m³/h at 45 meters. The efficiency and flow rate of both pumps are significantly influenced by the power of the photovoltaic system and vary according to the operating height. The Stairs pump demonstrates better overall performance, with an efficiency of 38% at 1860 W and a flow rate of 5.23 m³/h at 50 meters, compared to the Pedrollo pump, which shows an efficiency of 39.27% at 1790 W and a flow rate of 4.93 m³/h at the same height. It is concluded that extreme conditions, such as high altitude and low temperatures, impact performance, with the Stairs pump being slightly superior under these conditions. These findings underscore the importance of appropriately selecting submersible pumps and adjusting operating conditions to maximize performance in solar pumping systems, highlighting the necessity for empirical measurements and technical adjustments under extreme conditions, as well as the importance of regular maintenance to ensure the efficiency and longevity of photovoltaic systems.

Keywords: Comparative analysis of solar pumps, Energy efficiency, Optimal operating height, Performance of solar pumps, Photovoltaic solar energy, Solar pumping systems, Submersible pumps.

INTRODUCCIÓN

El siglo XXI ha marcado un notable avance hacia soluciones energéticas sostenibles, motivado por la urgencia de mitigar los efectos del cambio climático y fomentar el desarrollo sostenible a nivel global. En este contexto, la energía solar fotovoltaica se destaca como una tecnología fundamental para reducir las emisiones de carbono y mejorar el acceso a servicios esenciales en áreas remotas y de difícil acceso. Entre estas tecnologías, los sistemas de bombeo solar han surgido como una solución eficiente y económicamente viable para el suministro de agua potable y el riego agrícola en regiones donde la infraestructura eléctrica convencional es limitada o inexistente. El uso creciente de la energía solar fotovoltaica refleja un compromiso global con los objetivos del Acuerdo de París, que busca limitar el calentamiento global a menos de 2 grados Celsius y aspira a alcanzar 1.5 grados Celsius para mitigar los impactos más severos del cambio climático. Según el informe del (IPCC, 2021), se estima que las emisiones globales deben reducirse en un 45% para 2030 y alcanzar niveles netos cero para 2050, metas que impulsan la adopción de energías renovables como la solar fotovoltaica.

En 2023, la energía solar fotovoltaica representó aproximadamente el 3% de la producción global de electricidad, según la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2024). Este crecimiento es significativo también en el Perú, donde la capacidad instalada de energía solar alcanzó cerca de 380 MW, representando aproximadamente el 1.6% de la matriz energética nacional conforme se menciona en (Dirección General de Eficiencia Energética, 2024). Este avance es particularmente relevante en un país con abundantes recursos solares, como las regiones andinas y costeras, que ofrecen condiciones ideales para la generación solar.

El gobierno peruano, a través del Ministerio de Energía y Minas (MINEM), ha promovido activamente la implementación de sistemas de bombeo solar en todo el país. Hasta 2023, se habían instalado más de 10,000 sistemas de energía solar fotovoltaica, beneficiando a comunidades rurales y mejorando significativamente su acceso a servicios básicos como el agua potable. Estos proyectos son parte de una estrategia nacional para aumentar la capacidad instalada de energías renovables y reducir la dependencia de combustibles fósiles. En el departamento de Puno, los sistemas de bombeo solar han transformado significativamente la disponibilidad y accesibilidad al agua potable en comunidades rurales. En la provincia de Huancané, por ejemplo, más de 250 familias de la comunidad de Cuyuraya ahora disfrutan de agua potable gracias a la implementación de sistemas de

bombeo solar. Este proyecto, apoyado por iniciativas locales y organismos como Green Empowerment y Meal-a-Day (Figura 1), sustituyó una bomba eléctrica convencional que resultaba inviable debido a los altos costos de energía eléctrica y la limitada disponibilidad de suministro (Andina, 2023). Además, en el distrito de Arapa, provincia de Azángaro, se implementó otro sistema de bombeo de agua con energía solar que beneficia a 150 familias y 2 instituciones educativas (Figura 2). Estos proyectos no solo mejoran el acceso al agua potable, sino que también reducen la dependencia de combustibles fósiles y promueven la autosuficiencia energética en comunidades de alta montaña.



Figura 1. Uso de energía solar como fuente alternativa para sistema de riego agrícola (Andina, 2023).



Figura 2. Instalan sistemas de bombeo de agua potable con paneles solares (Andina, 2023).

La adopción de sistemas de bombeo solar ha tenido un impacto positivo y transformador en la calidad de vida de las comunidades de Puno. Previamente dependientes de fuentes de agua limitadas y frecuentemente insuficientes durante los periodos de estiaje, ahora tienen acceso

continuo a agua potable para consumo humano y actividades agrícolas. Este avance ha mejorado la salud, seguridad alimentaria y oportunidades económicas de los habitantes.

El acceso al agua es un desafío crítico en regiones de gran altitud, donde la infraestructura convencional a menudo es insuficiente o inexistente. En este escenario, los sistemas de bombeo solar emergen como una solución prometedora, ofreciendo una alternativa sostenible y autónoma para el suministro de agua. Sin embargo, operar estos sistemas en altitudes superiores a 3800 metros sobre el nivel del mar presenta retos únicos debido a las condiciones climáticas extremas características de estos entornos.

La presente investigación se enfoca en la evaluación comparativa del rendimiento de dos bombas solares sumergibles de 2HP en condiciones de gran altitud, específicamente en el contexto de la ciudad de Puno, ubicado a una altitud superior a 3,800 msnm en el altiplano andino. Este estudio busca determinar la altura óptima de operación de estas bombas, considerando los múltiples factores que afectan su desempeño en tales condiciones.

En estas elevaciones, la baja temperatura ambiente puede influir significativamente en la eficiencia de los paneles solares y alterar la viscosidad del agua. La eficiencia de los paneles solares, definida como su capacidad para convertir la luz solar en energía eléctrica, puede verse afectada por las bajas temperaturas, que a su vez pueden provocar problemas de condensación y formación de hielo. Paralelamente, el aumento de la viscosidad del agua a bajas temperaturas puede incrementar la resistencia al flujo en el sistema de bombeo, potencialmente reduciendo su eficiencia general. Esta investigación será realizada en el módulo de pruebas de bombas sumergibles que están en el Laboratorio de Energía Fotovoltaica de la Escuela Profesional de Ingeniería en Energías Renovables (EPIER). Este módulo es una réplica del módulo de pruebas de bombas sumergibles del *Laboratorio de Sistemas Fotovoltaicos* del Instituto de Energía e Ambiente (LSF/IEE) de la *Universidade de São Paulo* (USP) – Br

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la industria agrícola, la energía es un recurso esencial para todos los procesos y actividades productivas, y existen múltiples opciones para obtenerla. El sector agropecuario debe buscar fuentes energéticas eficientes y amigables con el medio ambiente porque el cambio climático es una realidad. Los combustibles fósiles se han utilizado con mayor frecuencia en la agricultura. No obstante, es preocupante que el sector agropecuario dependa de estos. Las variaciones en los precios de los combustibles y su escasez tienen un impacto significativo en la demanda de alimentos. La necesidad de implementar tecnologías inteligentes, económicas y respetuosas con el medio ambiente es un desafío que al mismo tiempo debe eliminar la dependencia de los combustibles en la agricultura.

En la actualidad, la energía solar para sistemas de bombeo se está convirtiendo en una opción cada vez más popular en el Perú, especialmente en zonas rurales donde no hay acceso a la red eléctrica convencional. Los sistemas de bombeo solar son una de las áreas de la energía solar que más ha crecido en el país en los últimos años (Andrés & Mancera, 2021). Debido a que son sistemas autónomos que no requieren la conexión con la red eléctrica nacional ni el uso de combustible fósil como las bombas sumergibles, varias empresas fabricantes de estos equipos han buscado como poder mejorar la eficiencia de cada equipo. Pero no siempre cada equipo se realiza con datos meteorológicos específicos o sus condiciones de funcionamiento ya que en cada fábrica solo se trabaja a un rango específico del lugar y con especificaciones técnicas del mismo sitio.

En nuestra región de Puno, típicamente agrícola y ganadera con amplias zonas rurales y de difícil acceso utilizadas para el sembrío muchas de las cuales no cuentan con el servicio eléctrico de la concesionaria se tiene la limitante del abastecimiento de energía a los sistemas de bombeo de agua. El planteamiento del problema de esta propuesta de tesis se enfoca en la evaluación y comparación de bombas, porque aún no se sabe cómo se podría corroborar el trabajo de cada una de estas bombas a más de 3800 metros sobre el nivel del mar, ya que solo contamos con las fichas técnicas que los fabricantes proveen. Este estudio pretende contribuir al comportamiento de trabajo de cada bomba en estas condiciones climáticas, en zonas rurales y remotas, en particular en altitudes superiores a los 3800 metros sobre el nivel del mar (msnm). En estas zonas, el acceso a energía y riego de agua para las agriculturas es limitado y a menudo se recurre a la utilización de sistemas de bombeo solar con bombas

sumergibles para garantizar un suministro constante. Dado que la eficiencia de estos sistemas puede variar dependiendo de las condiciones específicas de cada zona, incluyendo la altura en la que se encuentran. Por lo tanto, es necesario evaluar el rendimiento de las bombas sumergibles en altitudes elevadas y determinar la altura óptima de operación en un módulo de bombeo solar que pueda contribuir a un estudio de rendimiento de las bombas sumergibles, para garantizar un suministro de agua fiable y sostenible en estas zonas.

El investigador Brito (2006) menciona que existen diferencias entre los datos proporcionados por los fabricantes de los equipos que componen los sistemas de bombeo fotovoltaico y los resultados obtenidos en el sol real. En consecuencia, es esencial realizar pruebas de funcionamiento operativo del sistema en campo en aplicaciones que requieran una mayor fiabilidad para realizar una estimación precisa del volumen diario bombeado por una configuración específica. Sin embargo, estas pruebas operativas dependen de infraestructuras de laboratorio fácilmente accesibles para el dimensionamiento adecuado del sistema.

En el presente proyecto de investigación busca analizar el rendimiento de dos bombas sumergibles de 2HP de dos marcas distintas. Las pruebas de rendimiento serán realizadas en el Instituto de Energías Renovables y Eficiencia Energética de la Escuela Profesional de Ingeniería en Energías Renovables (EPIER) de la Universidad 51 Nacional de Juliaca (UNAJ) que está a una latitud de -15.4112, latitud de -70.0956 y una altitud 52 de 3832 msnm. Cada bomba se evaluará a distintas condiciones de alturas de un rango mínimo, intermedio y máximo según a la hidráulica de cada una siendo estos evaluados en el laboratorio de Energía Fotovoltaica, con el módulo de bombeo solar.

1.1 Formulación del problema

En este contexto es que podemos plantear las siguientes interrogantes de investigación.

1.1.1 Problema general

¿Es factible realizar una evaluación comparativa del rendimiento de dos bombas solares sumergibles de 2HP a más de 3800 msnm para determinar su altura óptima de operación?

1.1.2 Problemas específicos

¿Cuál es la metodología más adecuada para identificar y caracterizar las especificaciones técnicas y operativas de las dos bombas sumergibles solares a través de pruebas de laboratorio en un módulo de bombeo solar a una altitud superior a 3800 msnm?

¿Cómo afectarán las condiciones climáticas extremas, como la altitud, bajas temperaturas y alta irradiancia solar en el rendimiento de las dos bombas sumergibles solares y como ajustar las especificaciones técnicas y operativas en estas condiciones climáticas?

¿Cuáles son las prácticas recomendadas de mantenimiento para optimizar el rendimiento y la vida útil de las dos bombas sumergibles solares y cómo pueden ser implementadas en un módulo de bombeo solar en el laboratorio?

1.2 Objetivos de la investigación

1.2.1 Objetivo general

Evaluar y comparar el rendimiento de dos bombas solares sumergibles 2HP para la determinación de su altura óptima de operación a más de 3800 msnm.

1.2.2 Objetivos específicos

Desarrollar una metodología adecuada y eficiente para la identificación y caracterización de las especificaciones técnicas y operativas de las dos bombas sumergibles solares de 2HP en un módulo de bombeo solar a una altitud superior a 3800 msnm.

Determinar el impacto de las condiciones climáticas extremas, como la altitud, bajas temperaturas y alta irradiancia solar, en el rendimiento de las dos bombas sumergibles solares 2HP y proponer ajustes en las especificaciones técnicas y operativas para mejorar el rendimiento en estas condiciones climáticas.

Establecer las prácticas recomendadas de mantenimiento más efectivas para optimizar el rendimiento y prolongar la vida útil de las dos bombas sumergibles solares aplicado al módulo de bombeo solar en el laboratorio.

1.3 Justificación de la investigación

El acceso al agua potable es un problema importante en muchas zonas rurales del Perú, especialmente en las zonas montañosas a gran altitud, donde el acceso a la red eléctrica es limitado. El bombeo de agua mediante sistemas de energía renovable, como los sistemas de bombeo solar, puede ser una solución sostenible y económica para estas comunidades. Sin embargo, existe una falta de información sobre la eficiencia y el rendimiento de las bombas sumergibles en módulos de bombeo solar en estas zonas, lo que puede afectar negativamente la eficiencia de estos sistemas y su rentabilidad a largo plazo. Por lo tanto, la evaluación del rendimiento de dos bombas sumergibles en un módulo de bombeo solar a más de 3800 msnm permitirá determinar la altura óptima de operación de estas bombas y su eficiencia en este tipo de sistema. Los resultados de esta investigación pueden ayudar a los usuarios y a los instaladores de sistemas de bombeo solar a tomar decisiones más informadas y a maximizar la eficiencia y la rentabilidad de estos sistemas en zonas rurales a gran altitud en el Perú.

Cuando una bomba funciona a diferentes regímenes, es decir, en distintas condiciones de operación, los parámetros de la bomba pueden variar. Esto se debe a que las bombas están diseñadas para trabajar de manera óptima en un rango específico de caudal y altura. Cuando operan fuera de ese rango, su rendimiento puede verse afectado y, por lo tanto, los valores de caudal, altura y potencia pueden cambiar.

Por ejemplo, una bomba centrífuga tiene una curva que muestra cómo aumenta la altura de bombeo (cabeza) a medida que disminuye el caudal. Si la bomba opera en un caudal menor al diseño, la altura aumentará más de lo esperado, lo que podría sobrecargar el motor y generar ineficiencias en el sistema.

1.3.1 Justificación técnica

La complejidad hidrodinámica y las variaciones en el diseño de bombas a altitudes extremas como 3800 msnm, donde la presión atmosférica es aproximadamente 0.64 atm. Esta reducción aumenta el riesgo de cavitación, según Shashi, Pramila, & Menon (2010), que indicaron una disminución del 20% en la velocidad crítica para cavitación a 4000 msnm. Además, (Hall, 2018) mencionó que, aunque el NPSH requerido por una bomba no varía con la altitud, el NPSH disponible puede ser hasta 3.5m menor, afectando la eficiencia operativa y provocando fallas. La optimización de sistemas acoplados, como muestra Zhang et al, (2023), es crucial y más compleja

a estas altitudes, dado que la curva característica de la bomba y la curva de potencia del sistema PV varían con la irradiación y temperatura. La determinación experimental de estos parámetros a una altitud superior a 3800 msnm cubrirá un hueco en la literatura técnica y facilitará el desarrollo de diseños más precisos y eficientes.

1.3.2 Justificación social

De acuerdo con el informe de las Naciones Unidas (El derecho humano al agua y al saneamiento, 2010), contar con acceso a agua potable es esencial para poder disfrutar plenamente la vida y ejercer los derechos fundamentales, sobre todo en áreas rurales y comunidades que se encuentran en situación de marginación. Según Bonnesoeur et al, (2019), el acceso al agua en las regiones alto andinas, como Juliaca, se enfrenta a desafíos debido al cambio climático y la variabilidad hidrológica. Según Muhsen et al, (2018) el rendimiento de las bombas solares sumergibles puede verse afectado por la altura y la radiación solar, pero aun así son una solución viable y sostenible para proveer agua en áreas remotas. Comparar el rendimiento de dos bombas solares de 2HP a una altitud superior a los 3800 msnm ayudará a determinar cuál es la opción más eficiente para las comunidades en las regiones montañosas, cumpliendo con el Objetivo 6 de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, que busca garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua y saneamiento para todos.

1.3.3 Justificación ambiental

La vulnerabilidad hídrica de los ecosistemas de altitud se ve exacerbada por el cambio climático, como lo señala el informe del (IPCC, 2019), que proyecta la pérdida significativa de glaciares andinos para 2050. Estos ecosistemas, como los páramos andinos estudiados por (M. Huss, 2017), desempeñan un papel crucial en la regulación del caudal de los ríos durante la estación seca, pero la extracción no sostenible de agua subterránea amenaza su función como reguladores naturales. El uso de sistemas fotovoltaicos aplicados a instalaciones agrícolas fue estudiado, comprobando un uso rentable de la energía renovable aplicado al riego por goteo evitando así las emisiones de gases de efecto invernadero (Carroquino, Dufo-López, & Bernal-Agustín, 2015), sino que también aumenta la resiliencia climática, como se evidencia en el estudio de (Chandel, Naiik, & Chandel, 2015).

1.3.4 Justificación económica

Los costos iniciales y de operación siguen siendo una barrera para la adopción generalizada de sistemas fotovoltaicos para bombeo de agua, a pesar de la disminución significativa del costo nivelado de energía (LCOE), como señala el informe de (IRENA, 2021) Además, la sobredimensión de las bombas, como descubrió (Arvin Sohrabi, 2024), puede aumentar los costos de inversión hasta en un 40%. El impacto positivo en la productividad agrícola es evidente, especialmente en regiones como los Andes, donde el acceso al riego tecnificado puede aumentar los ingresos agrícolas, según él (Banco Mundial, 2017). La optimización de la altura de operación no solo reduce los costos energéticos, sino que también puede permitir regar áreas más extensas.

CAPITULO II

REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 Antecedentes del problema

En el ámbito de la investigación sobre sistemas fotovoltaicos de bombeo de agua, el análisis de su rendimiento bajo distintas condiciones climáticas ha cobrado gran relevancia. Un estudio destacado es el realizado por Tiwari & Kalamkar (2018), realizaron un análisis detallado en Nagpur, India, sobre el impacto de la altura total de bombeo y la radiación solar en el rendimiento de un sistema fotovoltaico de bombeo de agua (SPVWPS). Para este estudio se utilizó una bomba sumergible con rotor helicoidal. Cabe destacar que a pesar de que se han realizado varios estudios previos para investigar el rendimiento de los SPVWPS en diferentes condiciones climáticas y operativas, existe una escasez de investigaciones centradas en el rendimiento específico de estos sistemas basado en la radiación solar y la temperatura total, considerando las condiciones climáticas de la India. Para este trabajo, se llevaron a cabo experimentos utilizando distintas presiones de agua (4, 6, 8 y 10 bares) durante un día soleado. Se evaluaron varios aspectos como el flujo de agua, la potencia utilizada para operar las bombas, la cantidad de energía hidráulica generada y la eficiencia tanto. Según los resultados, se observó una reducción en el caudal a medida que aumentaba la cabeza total. Sin embargo, se encontró que la potencia máxima de la bomba se alcanzaba a una cabeza de 10 bar y con esta configuración también se lograba una mayor eficiencia total del sistema (7.68%). Estos hallazgos También se observaron que el caudal incrementa de manera proporcional al aumento de la radiación solar, por lo tanto, en Nagpur es necesario diseñar el sistema para un rango de radiación entre 400-800 W/m². Esto se debe a que más del 60% de la energía solar total se encuentra dentro de este intervalo.

En su estudio Yaichi, Fellah, Tayebi, & Boutadara (2019), presentaron un enfoque innovador para predecir el rendimiento de sistemas fotovoltaicos de bombeo de agua. Su modelo práctico se basa en la técnica de traducción no lineal aplicada a los puntos clave del sistema: la energía generada por los paneles solares (EPV) y no importan los valores de EPV y la altura de bombeo (H), el modelo solo necesita cuatro puntos de operación de referencia (EPV, Qd) medidos en campo y no requiere datos detallados del fabricante de la bomba. Crearon un método para convertir estos cuatro puntos de referencia a las condiciones deseadas de eficiencia del sistema motor-bomba, y

confirmaron la precisión del modelo mediante simulación usando información experimental. Descubrieron que el rendimiento máximo alcanzado por el conjunto motor-bomba fue de 48. Un sistema de 300 Wp y una altura de 13 es lo que se necesita para lograr un rendimiento del 3%. La energía potencial de 1319 Wh se alcanza a una distancia de 5 metros. Por último, realizaron la prueba del modelo en campo en Argelia, con una radiación de 1.65 a 11.16 kWh/m²/día y una altura de 1.6 a 14. Después de realizar una prueba con un total de 52 metros, obtuvimos valores predichos para la cantidad de agua bombeada que se ajustaron muy bien a los datos experimentales (con un coeficiente R² superior a 0.999 y un error promedio inferior al 1.4%). Esta conclusión nos permite afirmar que este método es práctico y podría ayudar a evaluar el rendimiento de bombas.

En investigaciones recientes, se ha explorado extensivamente el uso de energía solar fotovoltaica como alternativa eficiente para sistemas de bombeo de agua en regiones aisladas. Un estudio significativo es el de Sharma, Sharma, & Tiwari (2020), quienes abordaron el diseño y la optimización de un sistema de bombeo de agua utilizando energía solar fotovoltaica (PV) en Karansar, Jaipur (Rajasthan). Para ello, utilizaron el software PVsyst 5 para simular y encontrar las mejores opciones de diseño. Se realizó el estudio en Karansar, Jaipur (Rajasthan), utilizando datos climáticos de la región para evaluar su desempeño. Se desprende de los resultados que el sistema diseñado posee una eficiencia del 82,5% y que la mayor proporción de la energía generada por el conjunto panel fotovoltaico se destina al bombeo de agua. El sistema de bombeo de agua tiene un costo de 3,84 INR por metro cúbico, lo cual es considerablemente más bajo en comparación con el costo asociado a un sistema de bombeo diesel. Los resultados demuestran que el sistema diseñado ha obtenido un rendimiento aceptable y se presenta como una opción viable para la extracción de agua en zonas apartadas sin acceso a la red eléctrica. Se concluyó en el estudio que el sistema de bombeo de agua solar fotovoltaico (SPVWPT) diseñado presenta un rendimiento satisfactorio, lo cual indica que puede ser una alternativa factible para extraer agua en zonas alejadas sin conexión a la red eléctrica. El sistema diseñado tiene una eficiencia del 82,5% y el costo de bombeo de agua es significativamente más bajo que el de un sistema de bombeo de agua diesel.

El módulo de pruebas de bombas sumergibles en la USP-Brasil ha sido objeto de diversos estudios, destacando el de Meléndez (2009), quien evaluó el desempeño de

tres configuraciones de sistemas de bombeo fotovoltaico: dos con equipos diseñados específicamente para esta tecnología y una alternativa con equipos industriales convencionales. El objetivo del estudio fue analizar la eficiencia y la viabilidad económica de estas configuraciones, con potencias que varían entre 0,75 CV y 1,0 CV. La metodología empleada incluyó pruebas experimentales que midieron la eficiencia diaria de las bombas a diferentes alturas de columna de agua, complementadas con un análisis económico comparativo. Entre los materiales utilizados, destacó la configuración alternativa, compuesta por un convertidor de frecuencia WEG CFW08 y una bomba SOMAR de 1,0 CV y ocho etapas. Los resultados mostraron que, si bien la configuración alternativa presentó una eficiencia diaria menor, cercana al 30%, a una altura manométrica de 30 metros su rendimiento fue solo un 1% inferior al del sistema Grundfos, con un costo de operación un 22% menor. Además, en comparación con el sistema Solarjack, el costo del volumen bombeado fue un 51% más económico, lo que demuestra que, con una adecuada selección de componentes, los sistemas alternativos pueden ofrecer un rendimiento competitivo junto con importantes ventajas económicas.

La disertación de Resende (2023), se centra en el desarrollo de un modelo empírico para estimar el volumen diario de agua bombeada por sistemas fotovoltaicos de bombeo (SFB). Estos sistemas combinan módulos fotovoltaicos, bombas centrífugas, motores de inducción y convertidores de frecuencia. La investigación responde a la discrepancia entre los datos de los fabricantes y el rendimiento real de los SFB en campo. Resende llevó a cabo ensayos experimentales en la USP y la UNIFAP, utilizando ocho configuraciones de SFB con diferentes potencias de bombas. Los ensayos a sol real permitieron medir el volumen bombeado en diversas condiciones de irradiación solar y alturas manométricas. Los datos recopilados se usaron para construir un modelo empírico y generar curvas Q-Ig, que relacionan la caudal con la irradiación en el plano del generador fotovoltaico. El modelo empírico más adecuado fue el que consideró muestras con una proporción de irradiancia difusa (PD) $\leq 25\%$. Este modelo presentó un coeficiente de determinación (R²) de 0,95 y un Error Medio Percentual Absoluto (MAPE) menor al 5%. La investigación concluye que el modelo empírico es aplicable para dimensionar SFB en condiciones similares a las de los ensayos, lo que representa gran parte de los proyectos en Brasil.

2.2 Marco teórico

2.2.1 Energía solar fotovoltaica

La energía solar es una forma de energía renovable que se obtiene a partir de la irradiación solar. Esta irradiación es una fuente de energía inagotable que se puede aprovechar mediante distintas tecnologías para la producción de electricidad, calefacción y refrigeración, entre otros usos. según el aprovechamiento de la energía solar se realiza a través de dispositivos que capturan y transforman la radiación solar en energía útil, como los paneles solares fotovoltaicos y los colectores solares térmicos. Los paneles solares fotovoltaicos convierten directamente la luz solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico, mientras que los colectores solares térmicos capturan la radiación solar para calentar un fluido que se utiliza para la producción de calor y energía térmica. La energía solar tiene ventajas como su disponibilidad en cualquier lugar, la no generación de emisiones de gases contaminantes ni de ruidos y su contribución a la reducción del consumo de combustibles fósiles y la lucha contra el cambio climático. Sin embargo, el aprovechamiento de la energía solar también presenta desafíos técnicos y económicos, como la necesidad de una tecnología costosa y la dependencia de las condiciones climáticas, que pueden afectar la eficiencia de los sistemas de energía solar.

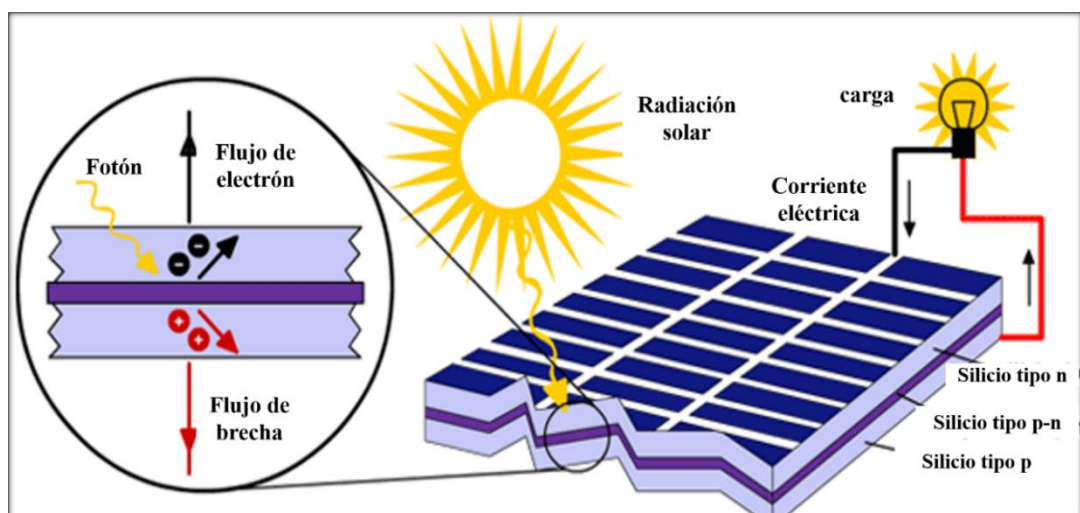


Figura 3. Partes de funcionamiento de una célula de silicio (MRWATT, 2024)

2.2.2 Análisis de la radiación solar y las horas solar pico en Juliaca

- **La irradiancia:** es una medida de la potencia de la radiación solar que incide sobre una superficie por unidad de área, generalmente expresada en vatios por metro cuadrado (W/m^2). Esta medida varía a lo largo del día y del año, influenciada por factores como la hora del día, la latitud, la altitud y las condiciones atmosféricas (como la nubosidad y la contaminación). Durante el mediodía en un día despejado, la irradiancia es mayor que al amanecer o al atardecer debido a la posición del sol en el cielo. La irradiancia es crucial para entender la disponibilidad instantánea de energía solar en un lugar determinado.
- **Las horas solar pico (HSP):** son una medida que facilita la comprensión y comparación de la energía solar disponible en diferentes lugares y épocas del año. Las HSP representan la cantidad de energía solar recibida en un día, expresada en términos de horas equivalentes de sol pleno, donde “sol pleno” se define como una irradiancia de $1000 \text{ W}/\text{m}^2$. Este concepto estandariza la variabilidad de la irradiancia a lo largo del día, promediando la energía total recibida. Por ejemplo, si un lugar recibe una energía total durante un día que sería equivalente a tener 5 horas de sol pleno ($1000 \text{ W}/\text{m}^2$), como comentan (Yancachajlla Tito, Quispe Huaman, & Vilca Huayta, 2020) que en ese lugar tiene 5 HSP. Esta medida es útil para la planificación y dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos, ya que permite estimar la producción de energía a lo largo del tiempo.

2.2.3 Tipos de radiación captada por los paneles solares

Los paneles solares fotovoltaicos captan principalmente tres tipos de radiación solar:

- **Radiación directa:** Es la radiación solar que llega directamente desde el Sol sin ser dispersada ni absorbida significativamente por la atmósfera. Es la forma más intensa de radiación solar y la más eficiente para los paneles solares.
- **Radiación difusa:** Es la radiación solar que ha sido dispersada por partículas y moléculas en la atmósfera. Aunque menos intensa que la radiación directa, la radiación difusa también contribuye a la generación de electricidad en los paneles solares.
- **Radiación reflejada:** Es la radiación solar que ha sido reflejada por el suelo y otras superficies. Aunque generalmente es una pequeña fracción de la radiación

total, puede contribuir a la producción de energía, especialmente en áreas con superficies reflectantes.

2.2.4 Radiación solar aplicada en la ciudad de Juliaca

Juliaca se encuentra en el altiplano peruano a una altitud de alrededor de 3824 metros sobre el nivel del mar y cuenta con condiciones geográficas y climáticas favorables para el uso de energía solar. La altitud elevada reduce la cantidad de atmósfera que debe atravesar la radiación solar, lo que reduce la pérdida de energía por dispersión y absorción. Además, estar cerca del ecuador garantiza una cantidad constante de radiación solar durante todo el año.

La imagen muestra las “Horas Solar Pico” para diferentes inclinaciones de paneles solares durante los meses de enero a diciembre. Las líneas azules muestran 0 grados, las líneas rojas 0.4402 grados, la línea de color verde 15.4402 grados, la línea morada 30.4402 grados y las líneas celestes 90 grados. El eje x del gráfico muestra los meses del año, mientras que el eje y muestra las horas solares pico, que van de 0 a 8 horas.

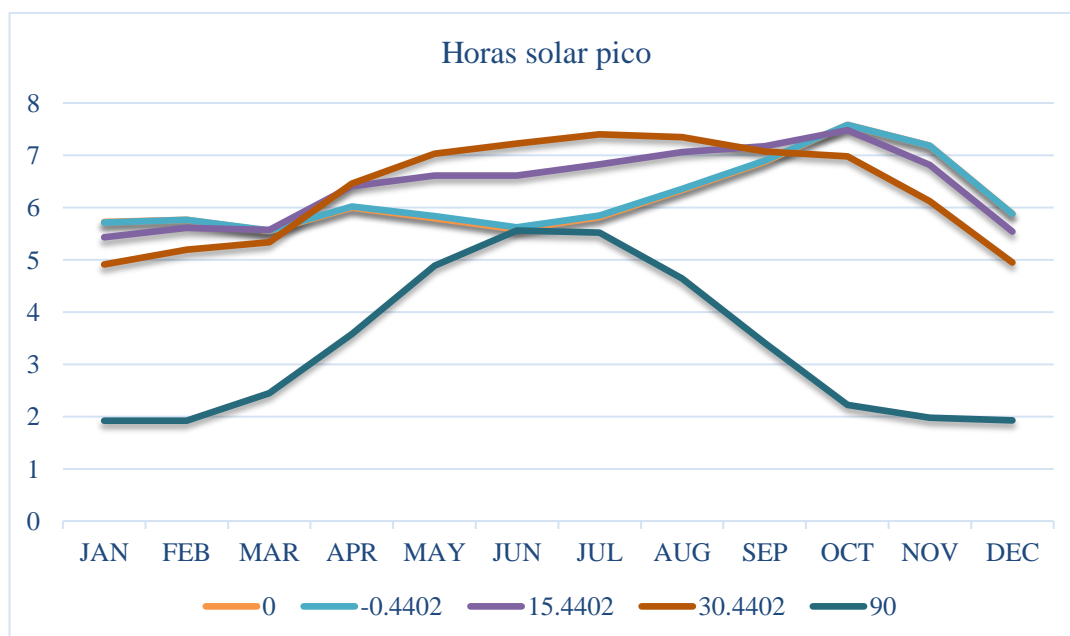


Figura 4. Horas solar pico en sede Ayabacas - UNAJ (NASA METEOROLOGY, 2024).

A una inclinación de 30.4402 grados (línea morada), la radiación solar es más eficiente durante todo el año. Durante la mayoría de los meses, esta inclinación muestra las horas solares pico más altas; alcanza su punto máximo en los meses de verano (junio, julio y agosto) y permanece alto durante la primavera y el otoño. Por otro lado, las inclinaciones de 0 y 90 grados muestran una menor eficiencia durante

todo el año. Por lo tanto, se recomienda una inclinación cercana a 30.4402 grados para maximizar la captación de energía solar durante todo el año.

2.2.5 Sistemas de bombeo

Un sistema de bombeo es un conjunto de dispositivos que utilizan una bomba impulsada por un motor para transportar fluidos a través de una tubería desde un punto de origen hasta un punto de destino. La bomba, alimentada por una fuente de energía, transforma la fuerza mecánica en una fuerza de salida que aumenta la presión y la velocidad del líquido, lo que permite que se mueva por la tubería. sistemas de bombeo fotovoltaico (SPF) son tecnologías que utilizan energía solar para accionar bombas de agua, lo que ofrece una solución de suministro de agua eficiente y sostenible para una variedad de aplicaciones. En zonas rurales y agrícolas, donde el acceso a la electricidad de la red puede ser limitado o inexistente, este sistema es particularmente útil.

2.2.6 Principios de operación de los sistemas de bombeo fotovoltaico

Los sistemas de bombeo fotovoltaico funcionan basándose en los siguientes principios:

- **Captación de energía solar:** El efecto fotovoltaico ocurre cuando los módulos fotovoltaicos (PV) capturan la radiación solar y la convierten en energía eléctrica. El tipo de células fotovoltaicas utilizadas determina la eficiencia de conversión. Puede ser de película delgada, policristalina o monocristalina.
- **Conversión y regulación de energía:** La electricidad producida puede ser utilizada directamente en corriente continua (CC) para accionar bombas CC, o puede ser convertida a corriente alterna (CA) mediante inversores, dependiendo del tipo de bomba utilizada. Los reguladores de tensión y los controladores de carga son cruciales para proteger el sistema y garantizar un suministro eléctrico estable.
- **Accionamiento de la bomba:** Una bomba hidráulica, que depende de la fuente de agua (pozos, ríos, lagos), se alimenta con energía eléctrica.
- **Almacenamiento y distribución del agua:** El agua bombeada puede distribuirse directamente a través de sistemas de tuberías y válvulas, o se puede almacenar en

tanques elevados o cisternas para su uso posterior. El uso de sensores de nivel y sistemas de control automático puede mejorar la operación del sistema.

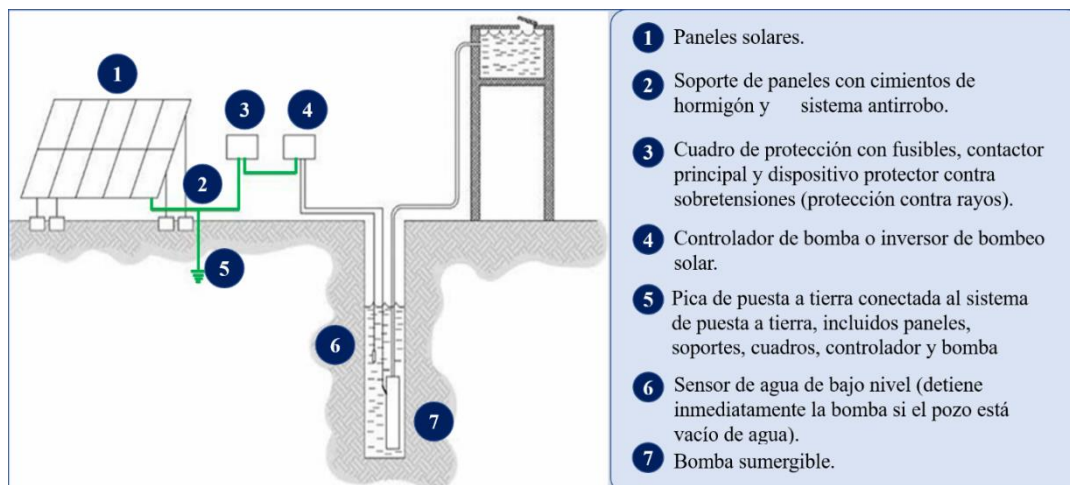


Figura 5.Componentes de un sistema de bombeo solar (Hydraulic Institute , 2024)

2.2.7 Diseño y dimensionamiento de sistemas de bombeo fotovoltaico

Para garantizar que un sistema de bombeo fotovoltaico sea eficiente y capaz de satisfacer las necesidades de agua, se requiere un análisis exhaustivo de una variedad de factores durante el diseño del sistema. El dimensionamiento implica una serie de pasos importantes:

- **Cálculo de la demanda de agua:** Determinar la cantidad de agua necesaria por día, que puede variar según la aplicación (riego, consumo humano o ganado).
- **Evaluación de la disponibilidad solar:** Analizar la radiación solar que se encuentra en el sitio de instalación. Esto incluye información sobre las variaciones estacionales y la insolación diaria promedio.
- **Selección de la bomba:** Elegir una bomba según la profundidad, la distancia de bombeo y el caudal deseado. Las bombas solares están diseñadas para aprovechar al máximo la energía variable generada por los paneles solares.
- **Dimensionamiento de los paneles solares:** Determinar la cantidad y la capacidad de los paneles solares necesarios para generar suficiente energía para accionar la bomba durante las horas de sol.
- **Consideraciones climáticas y geográficas:** La temperatura ambiente, la presencia de sombra y el ángulo de inclinación de los paneles solares son factores importantes para maximizar la eficiencia del sistema.

2.2.8 Tipos de bombeo solar

Existen principalmente 3 tipos de bombas solares cuyas curvas estándar se presentan a continuación:

- **Bombas manuales motorizadas:** este es el mismo mecanismo que el utilizado en el bombeo manual (tipo «India Mark» de pistón y articulación), en el que se agrega un motor para reemplazar la motricidad humana, Bombas “solares especial” alimentadas directamente a través de un controlador de bomba adecuado, que debe suministrar el fabricante de la bomba para garantizar la compatibilidad,).
- **Bombas convencionales:** generalmente alimentadas por un generador que serán alimentadas a través de un inversor de frecuencia variable, comúnmente llamado «inversor de bombeo solar».

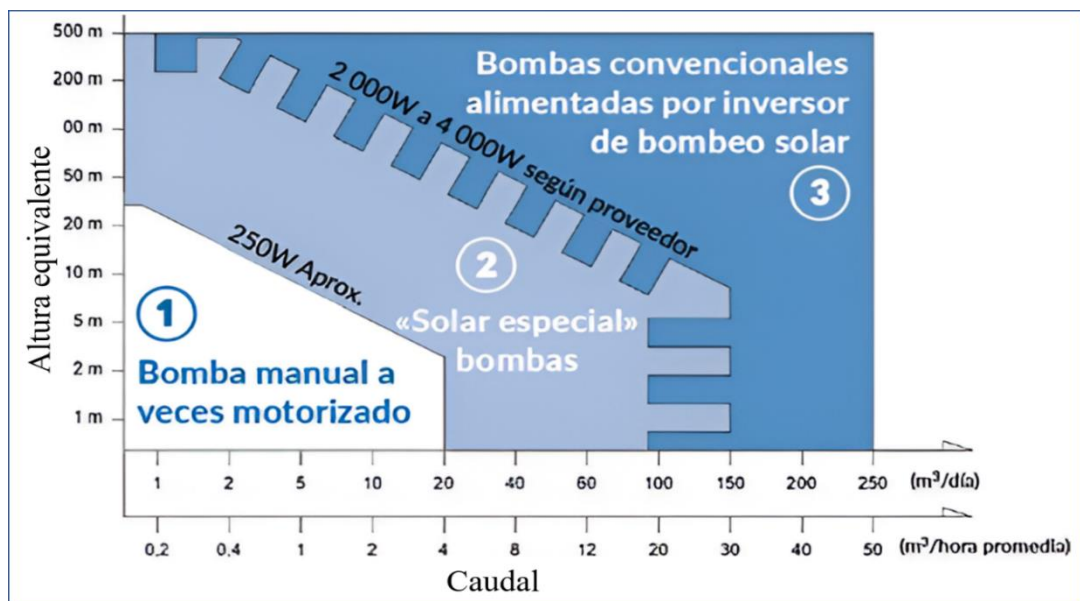


Figura 6.Tipos de bombeo solar en función del caudal y la altura total de bombeo (Hydraulic Institute , 2024)




Configuración	Bombas manuales motorizadas	Bombas solares	Bombas convencionales
Energía	< 250 W < 0,35 CV	250W a 4000W(max 2000W solo para algunos proveedores)0,35 HP a 5 HP	> 4000 W > 5 CV
Solución	Bombas manuales Para aplicaciones de riego (largos tiempos de bombeo), existen bombas manuales “motorizadas” que ofrecen la ventaja de mantener un modo manual en caso de problemas.	Bombas solares que se deben adquirir con su controlador. Es posible encontrar bombas de AC o DC.	Bomba estándar alimentada por inversor de bombeo solar. Las bombas funcionan con corriente alterna trifásica (AC) y frecuencia variable en la gran mayoría de los casos.
Tipos de equipos (ejemplos)			
Ejemplo de marcas y gamas de los proveedores principales	Volanta : - Una bomba en la familia, pero el precio y el rendimiento dependen de la profundidad del pozo.	Grundfos : - familia sqflex Lorentz : - familia PS2	Grundfos : - familia SP para la bomba Lorentz : - familia PSK2 (bomba e inversor)

Figura 7.Configuraciones estándar dependiendo del flujo y la altura total (Hydraulic Institute , 2024).

- **Bombas sumergibles:** Las bombas sumergibles son un tipo de bomba en el que la parte seleccionada de la bomba se sumerge en el líquido que se va a bombear, mientras que el motor se mantiene fuera del líquido. Por lo general, se instalan en la parte superior o en la pared de depósitos o contenedores. Estas bombas tienen diversas aplicaciones industriales, como en la industria de herramientas, máquinas con chispas, moledoras, centros de mecanizado y unidades de refrigeración, así como en sistemas de filtrado y limpieza industrial. Las bombas para herramientas se dividen en dos grupos: bombas para el lado limpio del filtro y bombas para el lado sucio del filtro. Para el lado limpio del filtro, se suelen utilizar bombas con impulsores cerrados debido a su alto rendimiento y capacidad de generar alta presión si es necesario. En cambio, para el lado sucio del filtro, se suelen emplear bombas con impulsores abiertos o semiabiertos, ya que son capaces de manejar partículas e impurezas ferromagnéticas. (Karassik, Messina, Cooper, & Heald, 2001)

2.2.9 Condiciones hidráulicas

Antes de determinar el tamaño del sistema de bombeo de agua, es necesario entender los conceptos básicos que describen las condiciones hidráulicas de una obra. El

tamaño del sistema está en relación directa con el producto de la Carga Dinámica Total (CDT) y el volumen diario necesario. Este producto se conoce como ciclo hidráulico. La carga dinámica total es la suma de la carga estática (CE) y la carga dinámica (CD), conceptos utilizados en el desarrollo de la presente investigación (Viejo Zubicaray & Álvarez Fernandez, 2004).

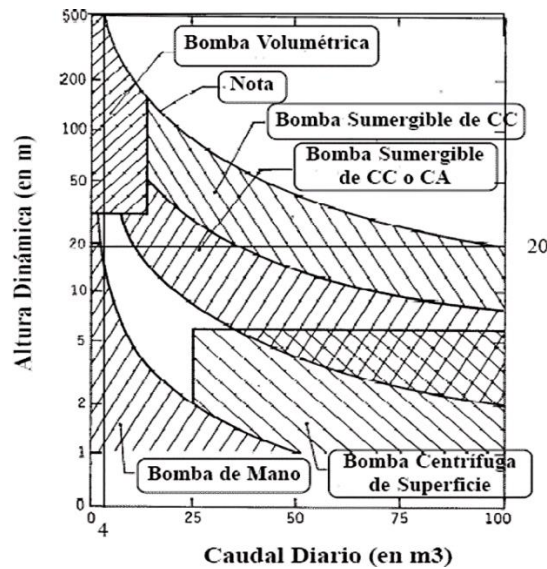


Figura 8. Diagrama de altura y caudal de la bomba (Valer Morales, 2016)

- **Carga estática:** La primera parte de la determinación de la carga estática implica realizar mediciones directas. Esto implica calcular la distancia vertical que el agua se desplaza desde el nivel de abatimiento del pozo hasta la altura en la que se descarga el agua. La carga estática se compone del abatimiento, el nivel estático y la altura de descarga. Todos los pozos experimentan el fenómeno de abatimiento cuando se extrae agua de ellos de forma constante. El abatimiento se refiere a la distancia en la que desciende el nivel del agua debido a la extracción continua.
- **Carga dinámica (fricción):** La carga dinámica se refiere al aumento de presión causado por la resistencia al flujo de agua debido a la rugosidad de las tuberías y componentes como codos y válvulas. La rugosidad de las tuberías depende del material utilizado en su fabricación. Los tubos de acero presentan una fricción diferente a los tubos de plástico PVC del mismo tamaño. Además, el diámetro de los tubos también afecta la fricción, ya que tubos más estrechos generarán una mayor resistencia. Para calcular la carga dinámica, es necesario determinar la distancia que recorre el agua desde el punto de entrada en la bomba hasta el punto de descarga, considerando tanto las distancias horizontales como el material y

diámetro de la tubería. Con esta información, se pueden estimar diversas formas de calcular la carga dinámica, (Boutelhig, Bakelli, Mahammed, & Arab, 2012)

- **Valor por omisión:** La carga dinámica es aproximadamente el 2% de la distancia de recorrido del agua. Por lo general el resultado es una estimación conservadora si se asume que los sistemas de bombeo solar típicos tienen flujos de menos de 1 L/s y las bombas recomendadas se conectan a tuberías de diámetro amplio.
- **Tablas de fricción:** Existen tablas publicadas por fabricantes que indican el porcentaje de fricción que debe añadirse en base al caudal, diámetro y material de las tuberías.
- **Formula de manning:** Este es un método matemático que se puede realizar fácilmente con una calculadora de bolsillo. La fórmula de Manning se expresa así:

Dónde:

Hf: es el incremento en la presión causada por la presión y expresada en la distancia lineal (m).

K: es una constante empírica con unidades de $(\text{m}^3/\text{s})^{-2}$

L: es la distancia total recorrida por el agua por las tuberías. Su unidad es metros (m).

Q es el flujo expresado en metros cúbicos por segundo (m^3/s).

La constante k se obtiene después de experimentar con varios materiales y tamaños de tuberías.

2.2.10 Banco para simulación de alturas manométricas

Con el fin de facilitar el monitoreo y la evaluación del Sistema de Flujo de Bombeo (SFB) (Brito, 2006) desarrolló un banco de trabajo para simular alturas manométricas utilizando un sistema de control de presión en la tubería de agua. Este banco de trabajo involucra la instalación de una segunda bomba que opera en paralelo con la bomba del SFB, imitando la altura manométrica (HM). Ambas bombas trabajan en conjunto dentro de un depósito de agua interconectado mediante un sistema de tuberías hidráulicas. Este proyecto fue posteriormente replicado en el laboratorio de la Universidad Federal de Pará, como se describe en el trabajo de Reis (2015), siguiendo el mismo esquema (Khatib, 2021).

2.2.11 Dimensionamiento de un Sistema de Bombeo Fotovoltaico

El dimensionamiento de un sistema de bombeo fotovoltaico SBFV implica determinar el tamaño adecuado de sus componentes principales: el generador fotovoltaico, bomba y los dispositivos acondicionadores de energía, para garantizar el abastecimiento de agua con los menores costos posibles. Este proceso requiere considerar parámetros críticos como la demanda diaria de agua de los usuarios, la altura dinámica total (TDH) y la irradiancia solar disponible. La demanda diaria determina el volumen de agua necesario, mientras que la TDH incluye la altura estática y las pérdidas por fricción en las tuberías. La irradiancia solar afecta la energía que los paneles pueden generar. (Flores Melendez, 2009).

a. Componentes del sistema

Paneles Solares: Capturan la energía solar y la convierten en electricidad.

Controladores: Optimizan la operación del sistema y protegen los componentes.

Inversores: Convierten la corriente continua (DC) generada por los paneles solares en corriente alterna (AC) (si se utiliza una bomba de AC).

Bomba: Puede ser de corriente continua (DC) o alterna (AC), sumergible o de superficie, dependiendo de la aplicación.

b. Ecuación de Darcy

La ecuación de Darcy es fundamental para calcular la pérdida de carga en el flujo a través de un medio poroso, como en los casos de bombeo subterráneo. Sin embargo, en el contexto del dimensionamiento del sistema de bombeo fotovoltaico, se utiliza más comúnmente para estimar la pérdida de presión en las tuberías:

$$H_f = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

Donde:

H_f	=	pérdida de carga (m)
f	=	factor de fricción de la tubería (sin unidad)
L	=	longitud de la tubería (m)
D	=	diámetro interno de la tubería (m)
v	=	velocidad del flujo de agua en la tubería (m/s)
g	=	aceleración debido a la gravedad (9.8 m/s ²)

La pérdida de fricción en las tuberías en un SFV afecta directamente la energía necesaria para el bombeo. La carga que la bomba debe superar se determina por la

altura dinámica total (TDH), que es la suma de las pérdidas por fricción, la altura estática y la altura dinámica. Si no se toman en cuenta las pérdidas por fricción, el sistema puede estar subdimensionado, lo que resulta en un rendimiento insuficiente, o sobredimensionado, lo que resulta en un aumento innecesario de los costos.

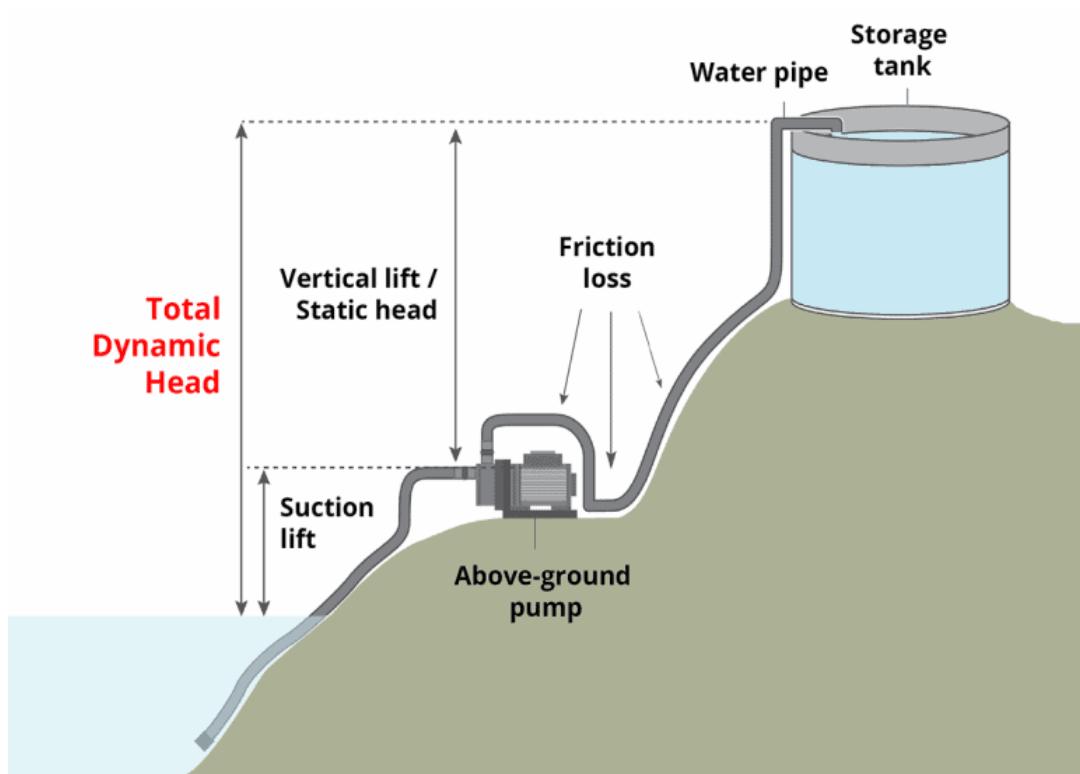


Figura 9. Diagrama de los componentes del cabezal completo para la captura en superficie. (World water reserve, 2023)

c. Determinación del caudal y la altura dinámica total

El caudal requerido (Q) y la altura dinámica total (TDH) son parámetros esenciales:

$$TDH = H_s + H_d + H_f \quad (2)$$

Donde:

H_s = altura estática, que corresponde a la altura entre la superficie del pozo y la entrada al reservorio o tanque (m.c.a.).

H_d = altura dinámica, que corresponde a la altura entre la superficie del pozo y el nivel del agua después de completar las pruebas de capacidad de bombeo del pozo (m.c.a.).

H_f = pérdidas por fricción, que corresponden a pérdidas de presión asociadas a la longitud, diámetro y rugosidad de la tubería, además de las derivadas del paso del agua en las conexiones (rodillas, válvulas, registros). Las pérdidas por fricción se pueden calcular utilizando coeficientes de fricción, que se pueden encontrar en las

tablas de fricción de tuberías. Generalmente estas tablas proporcionan información de pérdidas por cada 100 m de tubería (m.c.a.).

d. Cálculo del factor de fricción

El factor de fricción f depende del régimen de flujo (laminar o turbulento) y de las características de la tubería (rugosidad). En la mayoría de los sistemas de bombeo de agua, el flujo es turbulento, y f se puede determinar utilizando el diagrama de Moody o la ecuación de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (3)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \text{rugosidad absoluta de la tubería (m)} \\ D &= \text{diámetro interno de la tubería (m)} \\ Re &= \text{número de Reynolds, que se calcula como:} \\ Re &= \frac{\rho v D}{\mu} \end{aligned} \quad (4)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \rho &= \text{densidad del agua (1000 kg/m}^3\text{)} \\ v &= \text{velocidad del flujo de agua (m/s)} \\ D &= \text{diámetro interno de la tubería (m)} \\ \mu &= \text{viscosidad dinámica del agua (aproximadamente } 1 * 10^{-3} \text{ Pas a, } 20\text{C)} \end{aligned}$$

e. Determinación del caudal y energía requerida

El caudal de agua (Q) es la cantidad de agua que se necesita bombear en un periodo determinado. La energía requerida para bombear el agua se puede calcular como:

$$E = \frac{\rho g * Q * TDH}{\eta} \quad (5)$$

Donde:

$$\begin{aligned} E &= \text{energía requerida (W)} \\ \rho &= \text{densidad del agua (1000 kg/m}^3\text{)} \\ Q &= \text{caudal (m}^3\text{/s)} \\ TDH &= \text{altura dinámica total (m)} \\ \eta &= \text{eficiencia de la bomba (típicamente entre 0.5 y 0.7)} \end{aligned}$$

Para dimensionar proyectos de Sistemas de Bombeo Fotovoltaicos, se deben considerar algunas variables cruciales. Estos parámetros incluyen la potencia

hidráulica (P_H) que necesita la bomba para bombear un caudal de diseño específico hasta una altura total específica. Se puede calcular este parámetro utilizando la ecuación.

$$P_H = 2.7145 * Q * TDH \quad (6)$$

Donde:

$$\begin{aligned} P_H &= \text{Potencia hidráulica requerida por la motobomba (W).} \\ Q &= \text{caudal (m}^3\text{/s)} \\ TDH &= \text{altura dinámica total (m)} \end{aligned}$$

El valor de 2.7145 representa la constante hidráulica (CH), que se puede calcular a partir de la ecuación.

$$C_H = \frac{\rho * g}{3600} \quad (7)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \rho &= \text{densidad del agua (kg.m}^{-3}\text{)} = 1000 \text{ kg.m}^{-3}. \\ g &= \text{aceleración debida a la gravedad (m.s}^{-2}\text{)} = 9,7722 \text{ m.s}^{-2}. \\ 3600 &= \text{Corresponde al número de segundos por hora.} \end{aligned}$$

El caudal de diseño (Q), uno de los parámetros esenciales para la adecuada selección del conjunto bomba, se puede determinar a partir de la relación entre la demanda diaria de agua del usuario y el tiempo de operación del Sistema de Bombeo Fotovoltaico, cabe mencionar que la gravedad (m. s^{-2}) = 9,7722 m. s^{-2} , está calculada para la ciudad de Juliaca como lo indica (Dajes Castro, 2020) y para la densidad del fluido se midió en un laboratorio con un densímetro. De tal forma como se expresa en la Ecuación 8. En el presente estudio, este período de operación equivale a las Horas de Pleno Sol (HSP), variable que corresponde al número equivalente de horas por día con una irradiancia de 1000 W.m^{-2} . El cálculo de HSP se expresa en la ecuación.

$$Q = \frac{V_D}{HSP} \quad (8)$$

$$HSP = \frac{G_T}{G_{REF}} \quad (9)$$

Donde:

$$\begin{aligned} V_D &= \text{Volumen demandado diario (m}^3\text{. día}^{-1}\text{)}. \\ HSP &= \text{Horas solar pico (h. día}^{-1}\text{)}. \end{aligned}$$

G_T = Irradiación global diaria en el plano del generador fotovoltaico ($\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$).

G_{REF} = Irradiancia en condiciones de prueba estándar (STC): 1000 Wm^{-2} .

La potencia eléctrica (P_{EL}) en el eje del conjunto bomba necesaria para elevar un caudal de diseño dado a una altura se puede calcular a partir de la Ecuación 10:

$$P_{EL} = \frac{P_H}{\eta_{MB} \cdot \eta_{CP}} = \frac{2.7145 \cdot Q \cdot TDH}{\eta_{MB} \cdot \eta_{CP}} \quad (10)$$

Donde:

P_{EL} = Potencia eléctrica en los devanados del motor (W).

η_{MB} = Eficiencia del grupo electrobomba (%).

η_{CP} = Eficiencia del dispositivo acondicionador de potencia (%), valor que, para convertidores de frecuencia, se puede asumir como 0,95, según Abella, Lorenzo y Chenlo (2003).

En este sentido, la energía eléctrica requerida por la bomba (E_{EL}) para bombear agua viene dada por la Ecuación 2.8 o, alternativamente, por la Ecuación 11:

$$E_{EL} = P_{EL} \cdot T = P_{EL} \cdot HSP \quad (11)$$

$$E_{EL} = \frac{2.7145 \cdot V_D \cdot THD}{\eta_{MB} \cdot \eta_{CP}} \quad (12)$$

Donde:

E_{EL} = Energía eléctrica demandada diariamente por la motobomba ($\text{Wh}\cdot\text{día}^{-1}$).

T = Tiempo de funcionamiento de la motobomba (hdía^{-1}), que en el caso de bombeo fotovoltaico corresponde al parámetro HSP.

La potencia nominal del generador fotovoltaico (P_{GFV}), en Wp , requerida para el proceso de bombeo se puede calcular a partir de la Ecuación 13:

$$P_{GFV} = 1.25 \cdot \frac{E_{EL}}{HSP} \quad (13)$$

El valor de 1,25 corresponde a un factor de seguridad medio necesario para garantizar que el generador fotovoltaico proporcione la potencia suficiente para satisfacer las necesidades eléctricas de la bomba incluso en caso de pérdidas asociadas a los módulos fotovoltaicos (como la temperatura de funcionamiento del células fotovoltaicas, degradación inducida por la exposición a la luz, baja eficiencia a niveles de irradiancia más bajos), condiciones ambientales locales (como la presencia de polvo y sombras) y otros componentes del SFB (como caídas de tensión

en el cableado eléctrico y errores en el sistema Potencia máxima Seguimiento de Puntos) (Kiprono & Ibáñez Llario , 2020).

f. Dimensionamiento del sistema fotovoltaico

Para dimensionar los paneles solares, primero se calcula la energía diaria necesaria E_{diaria} en vatios-hora (Wh):

$$E_{diaria} = E * t \quad (14)$$

Donde:

t = tiempo de operación diario de la bomba (horas)
Luego, se calcula la potencia requerida del sistema fotovoltaico

$$P_{sistema} = \frac{E_{diaria}}{H_{sol} * \eta_{PV}} \quad (15)$$

Donde:

H_{sol} = horas solares pico disponibles (horas por día)
 η_{PV} = eficiencia del sistema fotovoltaico (típicamente entre 0.15 y 0.20)

Finalmente, el número de paneles solares necesarios se determina dividiendo la potencia requerida por la potencia nominal de un panel solar individual:

$$N_{paneles} = \frac{P_{sistema}}{P_{pv}} \quad (16)$$

Donde:

P_{pv} = potencia nominal de un panel solar (W)

2.2.12 Tipos de mantenimiento

a. Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo es crucial para las bombas sumergibles, ya que permite anticipar y prevenir fallas antes de que ocurran, minimizando el tiempo de inactividad y los costos de reparación. Este enfoque incluye el análisis de vibraciones, realizado de forma continua o mensual, que puede detectar hasta el 80% de los problemas mecánicos como desbalanceo y cavitación antes de que causen fallas catastróficas. El análisis de aceite, efectuado cada 2000 horas de operación o trimestralmente, se enfoca en detectar contaminación por agua y desgaste de metales, lo que puede extender la vida útil de los sellos mecánicos hasta en un 40%. La termografía, realizada trimestral o semestralmente, ayuda a identificar

sobrecalentamientos en el motor y problemas en las conexiones eléctricas, reduciendo las fallas eléctricas hasta en un 70%. Además, el monitoreo continuo de parámetros eléctricos como consumo de energía y resistencia de aislamiento puede predecir hasta el 90% de las fallas eléctricas con semanas de anticipación (Varejão F. , Sousa Mello, Ribeiro, Oliveira-Santos, & Loureiros Rodrigues, 2024).

b. Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo es esencial para asegurar la confiabilidad básica de las bombas sumergibles, realizando tareas programadas para prevenir fallas inesperadas. Esto incluye inspecciones visuales mensuales o trimestrales para revisar el estado de los cables, detectar signos de corrosión y verificar fugas visibles, que pueden identificar hasta el 50% de los problemas potenciales. La lubricación de rodamientos accesibles, realizada cada 6-12 meses, es crucial para reducir el desgaste y la fricción, extendiendo la vida útil de los rodamientos hasta en un 50%. La verificación y ajuste de alineación del eje de la bomba, hecha anualmente o semestralmente, puede reducir el consumo de energía hasta en un 10% al minimizar la fricción y el desgaste. Las pruebas eléctricas semestrales o anuales, que incluyen la verificación de resistencia de aislamiento y balance de fases, pueden prevenir hasta el 75% de las fallas eléctricas (Kannaujia, Bhore, & Goyal, 2024).

c. Mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo es inevitable en algunos casos y se lleva a cabo después de que ocurre una falla para restaurar el funcionamiento de la bomba sumergible. Esto incluye el reemplazo de sellos mecánicos, típicamente cada 2-5 años, que puede prevenir hasta el 90% de las fugas. El rebobinado del motor, necesario cada 5-10 años, puede restaurar la eficiencia del motor a niveles cercanos al 98% del original. El reemplazo de impulsores desgastados, realizado cada 3-7 años dependiendo del medio bombeado, puede mejorar la eficiencia de bombeo hasta en un 15%. (Epochautomation, 2024).

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Formulación de hipótesis

3.1.1 Hipótesis general

Es factible realizar una evaluación comparativa del rendimiento de dos bombas solares sumergibles de 2HP a más de 3800 msnm para determinar su altura óptima de operación, considerando las condiciones climáticas extremas y las características técnicas de cada equipo.

3.1.2 Hipótesis específicas

La metodología desarrollada para identificar y caracterizar las especificaciones técnicas y operativas de las dos bombas solares sumergibles de 2HP en un módulo de bombeo solar a más de 3800 msnm será efectiva para evaluar su rendimiento en dichas condiciones.

Las condiciones climáticas extremas, como la altitud, las bajas temperaturas y la alta irradiación solar, afectarán significativamente el rendimiento de las bombas solares sumergibles de 2HP, y los ajustes propuestos en sus especificaciones técnicas y operativas mejorarán su rendimiento bajo estas condiciones.

La implementación de prácticas de mantenimiento recomendadas para las bombas solares sumergibles de 2HP optimizará su rendimiento y prolongará su vida útil en un módulo de bombeo solar en laboratorio, especialmente en condiciones de operación a más de 3800 msnm.

3.2 Materiales y equipos

Los materiales y equipos utilizados en el presente proyecto de investigación son los siguientes:

3.2.1 Área de estudio

La presente investigación se realizó en la EPIER de la UNAJ el cual se encuentra ubicado en el centro poblado Santa María de Ayabacas a una latitud de -15.4094, longitud de -70.0906 y una altitud de 3832 msnm. En la Figura 10, se muestra la ubicación en donde se realizará el proyecto de investigación de la evaluación de las

dos bombas sumergibles en el módulo de pruebas de bombeo solar, para determinar el régimen de operación de cada una de ellas a más de 3800msnm.

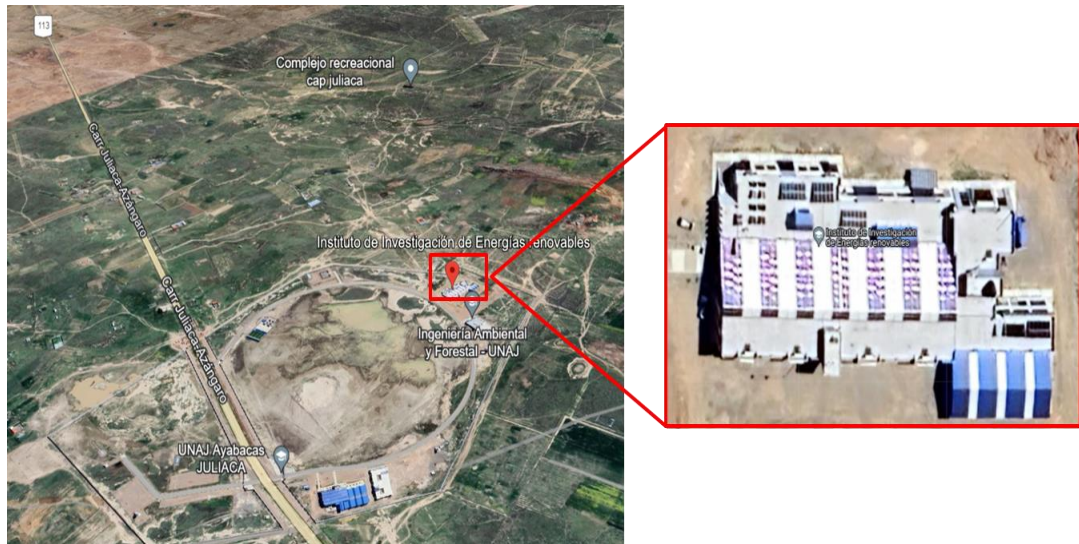


Figura 10. Instituto de energías renovables y eficiencia energética – UNAJ -Ayabacas (Fuente propia).

3.2.2 Módulo fotovoltaico

El sistema fotovoltaico instalado cuenta con una capacidad total de 2.7 kWp (kilovatios pico), compuesto por un total de 54 módulos solares que han sido estratégicamente divididos en tres configuraciones paralelas conocidas como strings. Cada uno de estos strings está integrado por 18 paneles solares, cada uno con una potencia individual de 50Wp, lo que en conjunto suma la capacidad total mencionada.



Figura 11. Vista externa del sistema fotovoltaico (Fuente propia).

Tabla 1

Especificaciones técnicas del módulo fotovoltaico monocristalino de 50W.

Módulo fotovoltaico A-SONNE 50W	
Datos eléctricos (STC)	
Potencia máxima	50 W
Tolerancia de potencia	+ - 3%
Voltaje de máxima potencia	18.25 V
Corriente de máxima potencia	2.74 A
Voltaje de circuito abierto	22.56 V
Corriente de corto circuito	2.79 A

3.2.3 Modulo banco de pruebas de sistema solar de bombeo

El módulo de banco de pruebas de la EPIER de la UNAJ está formado por perfiles metálicos de acero inoxidable que soportan dispositivos de acondicionamiento de bombas sumergibles y equipos de medición, como se muestra en la Figura 12.



Figura 12. Módulo de pruebas de bombas con generación solar fotovoltaica (Fuente propia).

Este módulo de pruebas se utiliza para simular sistemas de bombeo fotovoltaico y para medir la altura manométrica y caudal. Para simular la altura manométrica, se emplea una bomba de 3HP que es alimentada por la red eléctrica a través de un variador de frecuencia Weg CFW500 Vector Inverter. Este variador de frecuencia nos permite controlar y simular alturas de hasta 72 metros de columna de agua (m.c.a). Además, se evalúa una bomba de 2HP que es alimentada por un generador fotovoltaico mediante el variador CFW500 Solar Drive.

El módulo de banco de pruebas del sistema de bombeo fotovoltaico, diseñado para evaluar la eficiencia de bombas sumergibles utilizando energía solar. El sistema cuenta con un generador fotovoltaico que alimenta un variador de frecuencia DC (DCP), el cual regula el funcionamiento de la bomba sumergible sometida a evaluación, permitiendo un control sobre el caudal y la presión del sistema. Un medidor digital de caudal mide el flujo del fluido impulsado por la bomba, mientras que un presostato y un transductor de presión monitorean y controlan la presión en diferentes puntos del circuito. En paralelo, el sistema incluye una bomba auxiliar de 3HP, conectada a la red eléctrica trifásica del laboratorio y controlada por un segundo variador de frecuencia (CF). Esta bomba genera el contraflujo necesario para realizar pruebas exhaustivas del rendimiento de la bomba fotovoltaica, lo que permite un ciclo completo de evaluación. El módulo está equipado con un radiómetro, que mide el caudal de agua a lo largo del sistema para asegurar una medición precisa de los parámetros operativos. Adicionalmente, un manómetro proporciona lecturas directas de la presión y una válvula de retención evita el flujo inverso, protegiendo los componentes del sistema. El flujo del líquido es controlado mediante diversas válvulas, y el circuito se conecta a un depósito que almacena el fluido durante las pruebas. El diseño también incluye mangueras flexibles para facilitar la circulación del líquido, y el sistema de realimentación garantiza un ajuste continuo de los parámetros para optimizar las condiciones de prueba y asegurar mediciones fiables.

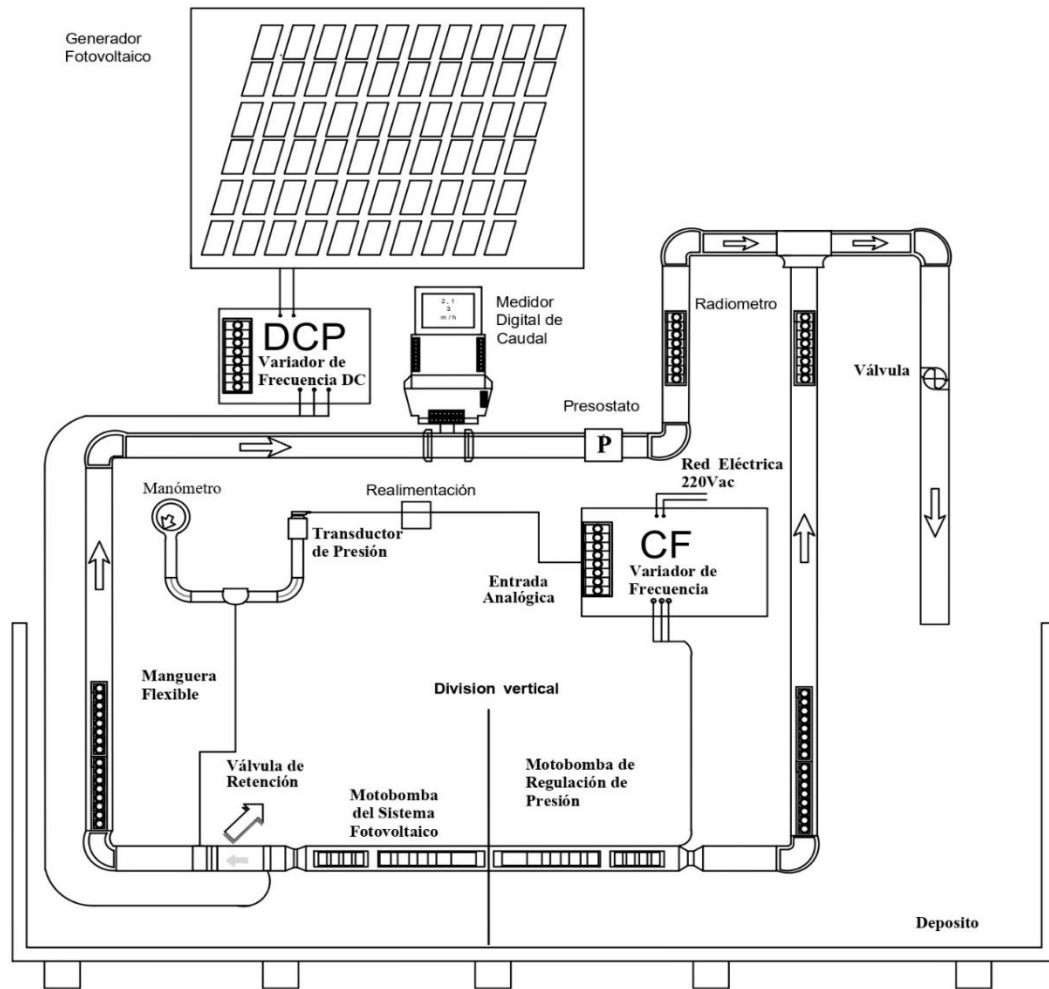


Figura 13. Diagrama esquemático del módulo de banco de pruebas del sistema de bombeo fotovoltaico (Fuente propia).

El módulo de banco de pruebas del sistema de bombeo fotovoltaico está diseñado para asegurar una altura manométrica constante durante las pruebas. Este objetivo se logra mediante el uso de una bomba que regula la presión del sistema. La presión es controlada por un variador de frecuencia (CFW500 DRIVE) conectado a la red eléctrica. La bomba recibe señales de un transductor de presión y ajusta el variador de frecuencia en consecuencia. De esta manera, cuando la bomba en prueba aumenta su capacidad de bombeo, la otra bomba disminuye su capacidad; y si la capacidad de bombeo de la bomba en prueba disminuye, la otra bomba incrementa la suya. Este ajuste continuo se mantiene durante todo el período de operación, garantizando así una altura manométrica constante. Este diseño permite evaluar el desempeño de la bomba en prueba de manera precisa y controlada, proporcionando información valiosa para el desarrollo y mejora de los sistemas de bombeo fotovoltaicos.

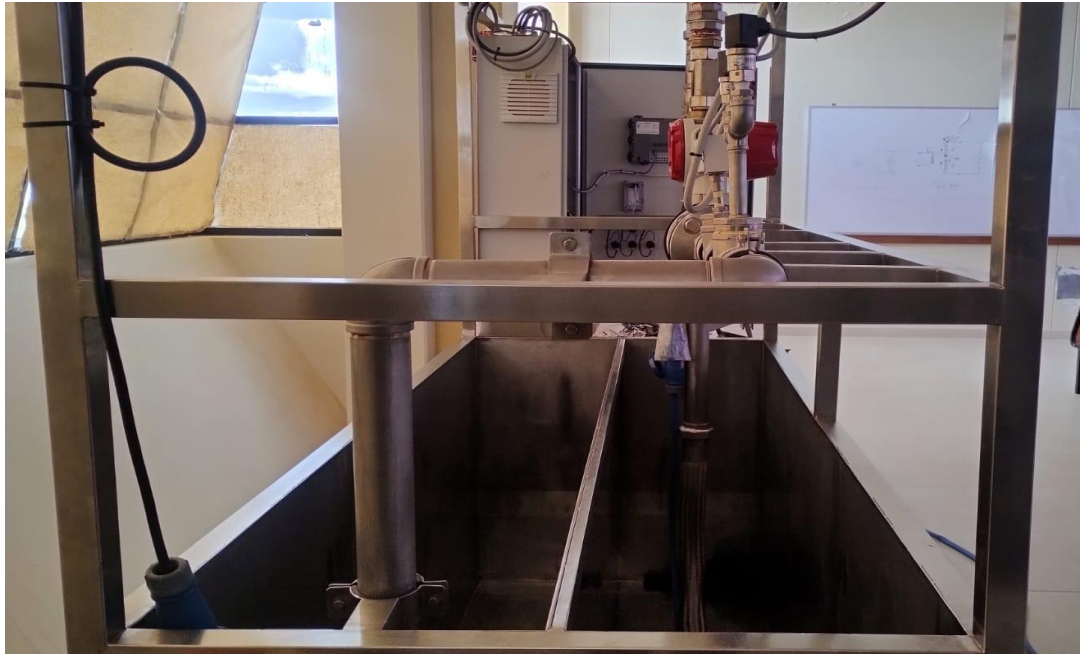


Figura 14. Posición de las bombas sumergidas dentro del depósito de agua (Fuente propia).

3.2.4 Variador solar

El variador de velocidad WEG CFW500 SOLAR DRIVE es un controlador de motores compacto y eficiente, diseñado específicamente para sistemas de bombeo solar. Utiliza tecnología MPPT para maximizar la eficiencia energética, adaptando la energía de las placas solar a la tensión de la bomba trifásica (220V o 380V).



Figura 15. Variador de velocidad WEG CFW500 SOLAR DRIVE (WEG, 2023)

Tabla 2*Parámetros del variador CFW500 solar drive*

Parámetros del variador CFW500 Solar Drive				
Parámetro	Descripción del Parámetro	Rango de Valores	Usuario – Fuente CC	Usuario – Generador FV
P0100	Tiempo de aceleración	0,1 a 999 s	300 s	0,5 s
P0101	Tiempo de desaceleración	0,1 a 999 s	300 s	0,5 s
P0121	Referencia vía HMI	0,0 a 500,0 Hz	60 Hz	60 Hz
P0133	Velocidad mínima	0 a 500 Hz	60 Hz	20 Hz
P0135	Corriente máxima de salida	0 a 200 A	10,5 A	10,5 A
P0220	Selección fuente Local/Remoto	0 a 11 0 = Siempre local 1 = Siempre remoto 2 = Tecla HMI (Local) 11 = SoftPLC	0 = Siempre local	1 = Siempre remoto
P0228	Selección JOG REM	0 a 6 0 = Inactivo 1 = Teclas HMI 3 = Serial/USB 6 = SoftPLC	0 = Inactivo	0 = Inactivo
P0401	Corriente nominal del motor (A): al menos, 1 x Inom Inom -> Corriente configurada del motor en el inversor (ver tabla 6.2 del Manual de Programación)	0 a 200 A	10:00 a. m.	10:00 a. m.
P0402	Rotación nominal del motor (rpm)	0 a 30000 rpm	3500 rpm	3500 rpm
P0403	Frecuencia nominal del motor (Hz)	0 a 500,0 Hz	60 Hz	60 Hz
P0404	Potencia nominal del motor	0 a 19 Por ejemplo: 6 = 1,5 HP 7 = 2,0 HP	7 = 2,0 HP	7 = 2,0 HP
P0406	Selección del modo de ventilación del motor	0 = Autoventilado 1 = Independiente	0 = Autoventilado	0 = Autoventilado
P0407	Factor de potencia nominal del motor	0,50 a 0,99	0,8	0,8

3.2.5 Variador de red

El variador de frecuencia CFW500 de WEG es un dispositivo compacto y robusto diseñado para controlar la velocidad de motores eléctricos de corriente alterna en aplicaciones industriales, ofreciendo modos de control vectorial y escalar, una interfaz de usuario intuitiva con pantalla LCD, y compatibilidad con múltiples protocolos de comunicación como Modbus-RTU y CANopen. Con un rango de potencia adaptable, funciones integradas de protección y ahorro de energía, y facilidad de instalación, el CFW500 optimiza el rendimiento y la eficiencia energética en aplicaciones como bombas, ventiladores, cintas transportadoras, compresores y mezcladoras, mejorando el control de procesos y prolongando la vida útil del equipo como se muestra en la Figura 17.



Figura 16. Variador de velocidad WEG CFW500 DRIVE. (WEG, 2023)

3.2.6 Módulo de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos incluye un datalogger, es un componente esencial del sistema de adquisición de datos que recopila y almacena datos de una variedad de sensores y transductores. Este equipo registra múltiples parámetros críticos como el tiempo, la corriente continua en amperios (A), el voltaje en corriente continua en voltios (V), la irradiancia solar global en vatios por metro cuadrado (W/m²), la altura manométrica total en metros de columna de agua (m.c.a), el caudal volumétrico en

metros cúbicos por hora (m^3/h), la frecuencia en hertz (Hz) y la temperatura en grados Celsius ($^{\circ}C$) como se muestra en la Figura 17.



Figura 17. Datalogger Keysight Agilent 34970^a (Fuente propia).

3.2.7 Celda calibrada

La celda calibrada es un dispositivo de medición que ha sido ajustado y verificado minuciosamente mediante comparación con estándares conocidos para garantizar su precisión y confiabilidad en la medición de una magnitud específica, como radiación. Este proceso de calibración se lleva a cabo en laboratorios especializados y garantiza que las lecturas de la celda estén dentro de los límites de tolerancia establecidos. Esto es especialmente importante en energía solar, donde la precisión de la medición es esencial para la validación de los resultados y la calidad del análisis realizado. En la Figura 18, se muestra la celda calibrada por el Laboratorio de Sistemas Fotovoltaicos de la Universidad de São Paulo que fue utilizada para medir radiación solar incidente en el sistema de generación fotovoltaica del módulo de banco de pruebas del sistema de bombeo fotovoltaico.



Figura 18. Celda calibrada para medir irradiancia (Fuente propia).

3.2.8 Bombas sumergibles

En el estudio se evaluaron dos bombas centrífugas sumergibles multietapa trifásicas de origen italiano, las cuales fueron seleccionadas considerando su amplia disponibilidad en el mercado peruano y su compatibilidad con los requisitos comunes en proyectos locales. La bomba Stairs de 10 etapas y la Pedrollo de 8 etapas, ambas con una potencia de 2HP, fueron escogidas por su capacidad para manejar las alturas manométricas y caudales requeridos en aplicaciones típicas de proyectos de agua potable, riego y manejo de aguas residuales en Perú. Esta selección se basó en la reputación y confiabilidad de ambas marcas en el mercado nacional, asegurando que cumplan con los estándares de rendimiento y durabilidad necesarios para condiciones variables de operación en el país. En la Figura 19 se ilustra las dos bombas sumergibles evaluadas.



Figura 19. Bombas centrífugas sumergibles de 2HP utilizadas en el estudio (Fuente propia).

3.3 Software del sistema de adquisición de datos

Para la adquisición de datos y su posterior análisis durante la ejecución del proyecto de investigación se utilizaron los siguientes softwares:

Keysight BenchVue

Excel

3.4 Metodología

Esta investigación se basa en un método experimental utilizado para evaluar el rendimiento de dos bombas sumergibles de 2HP en diferentes alturas operativas, específicamente 45, 50 y 55 m.c.a.

3.4.1 Fundamentación de las mediciones a 45m, 50m y 55m

Las bombas operan con mayor eficiencia dentro de un rango óptimo de alturas, por ejemplo, una bomba diseñada para una altura de 20 metros puede tener una eficiencia del 80%, mientras que a 45 metros esta eficiencia puede reducirse al 60% (Mohammed, Mohammed, & Azzedinne , 2019) Además, la capacidad de caudal

varía con la altura de elevación, y operar una bomba fuera de sus condiciones óptimas puede reducir su vida útil en un 30% y aumentar los costos de mantenimiento en un 25% como lo investigaron (Boutelhig, Bakelli, Mahammed, & Arab, 2012). La ficha técnica proporciona información detallada sobre las capacidades operativas, asegurando que las bombas configuradas según estas especificaciones operen con un 15-20% más de eficiencia (Hydraulic Institute , 2024).

Para llevar a cabo esta investigación, se realizaron mediciones a alturas de 45m, 50m y 55m utilizando la bomba modelo 4SR33G-F. Las razones para seleccionar estas alturas se basan en los parámetros y el comportamiento mostrado en el gráfico de rendimiento de la bomba, que relaciona el caudal Q y la altura H . Estas alturas fueron seleccionadas por las siguientes razones en las que se pueden observar en la Figura 21:

a. Eficiencia óptima y parámetros de operación

La curva de eficiencia en el gráfico muestra que la bomba alcanza su eficiencia máxima del 66.5% a una altura cercana a los 48.9 m.c.a. Esto significa que la bomba funciona de manera más eficiente en este rango de alturas, optimizando el consumo de energía y el rendimiento hidráulico. Medir a 45 m.c.a, permite observar el rendimiento de la bomba en un punto ligeramente inferior al de máxima eficiencia, proporcionando datos sobre cómo la bomba se comporta justo antes de alcanzar su pico de eficiencia.

b. Punto de máxima eficiencia

La medición a 50 m.c.a. es crítica ya que este punto se encuentra muy cercano al de máxima eficiencia (48.9m), permitiendo así una evaluación precisa del rendimiento de la bomba en condiciones casi óptimas. Evaluar el rendimiento a 50 metros también permite verificar la consistencia del rendimiento de la bomba en un punto muy cercano al óptimo, asegurando que la eficiencia esperada se alcanza en condiciones reales de operación.

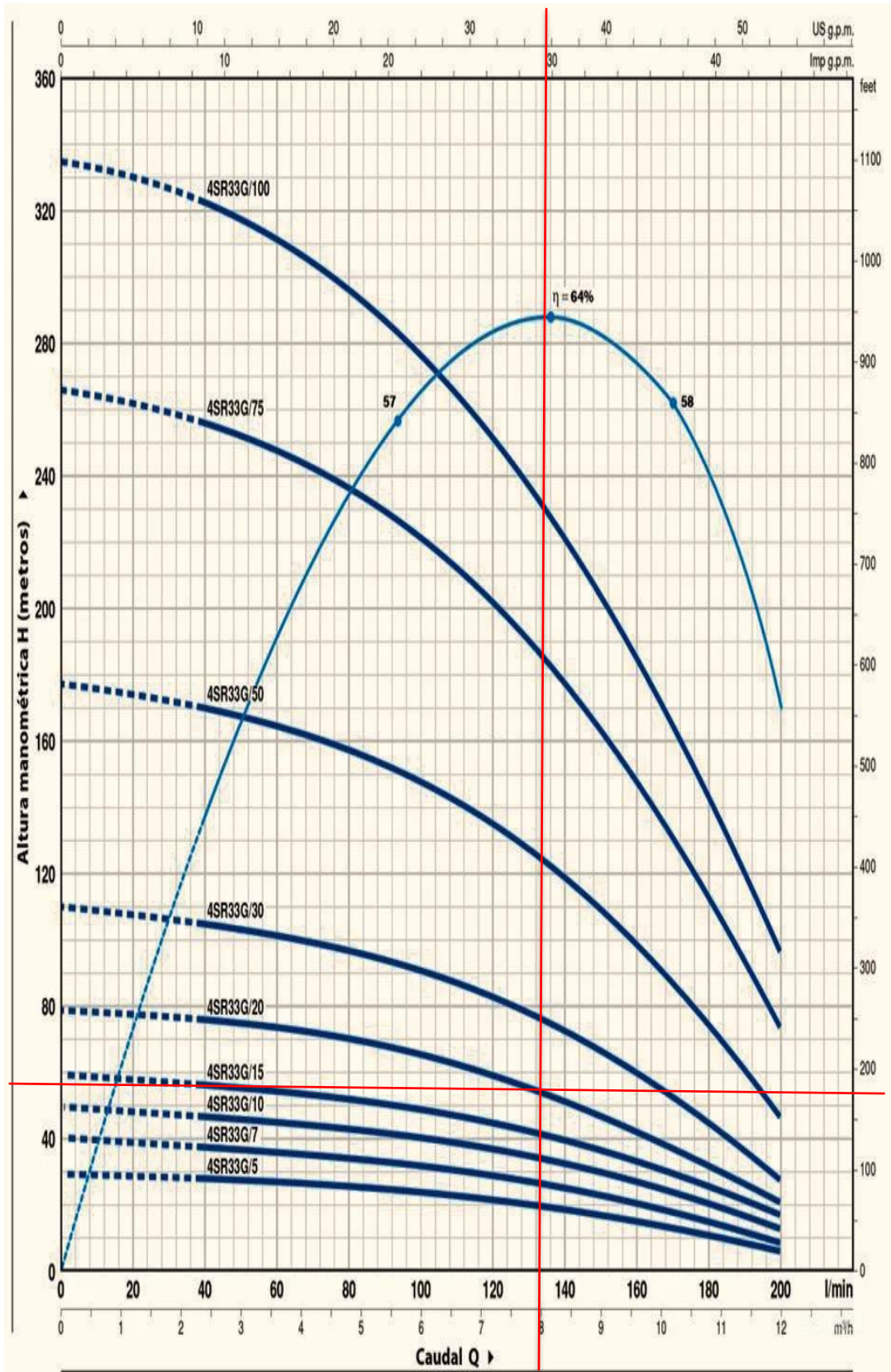


Figura 20. Curvas de rendimiento y eficiencia de la bomba 4SR33G-F (Pedrollo 4SR33G, 2023).

c. Comportamiento en condiciones variadas

Medir a 55 m.c.a. proporciona datos sobre cómo se desempeña la bomba cuando opera ligeramente fuera del punto de máxima eficiencia. Esto es esencial para comprender cómo la eficiencia y el rendimiento se ven afectados cuando la bomba trabaja en condiciones no óptimas. Evaluar el rendimiento a 55 m.c.a. permite analizar el comportamiento de la bomba cuando la altura incrementa, ofreciendo una visión de su desempeño en aplicaciones donde las condiciones pueden variar. Cada altura se mide durante tres días seguidos, de 8:30am hasta las 4:00pm, para evaluar las variaciones diarias y las condiciones ambientales pertinentes. Durante las pruebas, se registran factores importantes como el caudal de agua bombeado y la presión producida, y los datos se analizan para determinar la eficiencia operativa ideal de la bomba en cada configuración de altura. Este diseño experimental controlado permite llegar a conclusiones precisas sobre cuál altura maximiza el rendimiento de la bomba. Esto proporciona información importante para su uso en condiciones reales. Los datos se recogieron mediante un dispositivo de adquisición de datos del tipo Keysight Agilent 34970^a. Los detalles de funcionamiento y configuración de este equipo pueden consultarse en (Data Acquisition, 2024). Estos datos corresponden a la corriente y tensión del generador fotovoltaico, irradiancia, altura manométrica total y caudal, los cuales fueron almacenados a intervalos de 10 segundos. Las características y escalas de medida de los dispositivos utilizados para la adquisición de datos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3

Características de los equipos de adquisición de datos.

Variable	Transductor	Escala de medición
Irradiancia	Célula fotovoltaica calibrada	0 – 130,2 mV ↔ 0 – 1.000 W/m ²
Tensión de entrada	Transductor de tensión	0 – 500 mV _{cc} ↔ 0 – 10 V _{cc}
Corriente de entrada	Shunt	0 - 100 mV ↔ 0 – 10 A
Presión en los tubos	Transductor de presión	0 - 10 kgf/cm ² ↔ 0 - 10 V _{cc}
Caudal	Transductor de caudal	0 - 32 m ³ /h ↔ 0 - 20 mA

3.4.2 Características técnicas de las bombas sumergibles

Las características técnicas de las bombas sumergibles se refieren a los atributos específicos de diseño y rendimiento que determinan su capacidad para operar

eficientemente en diferentes condiciones, como la velocidad de rotación (RPM), el número de etapas, la tensión de operación del motor y la corriente nominal. Estos detalles son fundamentales para seleccionar la bomba adecuada según las necesidades de aplicación, asegurando un funcionamiento óptimo y confiable en proyectos de bombeo de fluidos.

Tabla 4

Características técnicas de las bombas utilizadas en los experimentos.

Configuración	Bomba	RPM	Numero de estigios	Tensión de operación del motor (V)	Corriente nominal del motor (A)
1	Stairs ST-3510-40M-T200	3445	10	220	6.8
2	Pedrollo SR 33G/20 -F	3445	8	220	8.2

3.4.3 Procedimiento para la realización de pruebas en pleno sol

Los ensayos de sol real se realizaron con el objetivo de determinar la capacidad de producción diaria de agua de los sistemas de bombeo fotovoltaicos en función de variables clave como la altura, la potencia del generador fotovoltaico y la irradiación global en el plano del generador fotovoltaico. Estas pruebas se llevaron a cabo en las condiciones climáticas específicas del lugar y a la altura de mayor eficiencia de cada una de las dos bombas evaluadas, ya que en estas condiciones los equipos operan de manera que permiten evaluar las condiciones de nubosidad o condiciones adversas al clima. Los cabezales de presión utilizados durante las pruebas al sol para cada bomba se detallan en la Tabla 5.

Tabla 5

Alturas manométricas para la realización de ensayos de caracterización de bombas en luz solar real para las diferentes alturas evaluadas.

Configuración	Bomba evaluada	Altura manométrica de ensayo (m.c.a)
1	ST-3510-40M-T200	45m
		50m
		55m
2	SR 33G/20 -F	45m
		50m
		55m

Para llevar a cabo pruebas de rendimiento de bombas bajo luz solar real, inicialmente, los bancos se ajustaron para simular las alturas de presión descritas en la Tabla 5. Finalmente se configuraron algunos parámetros del convertidor de frecuencia que controla la bomba bajo prueba (CFW500 Solar Drive), los cuales se describen en la Tabla 6. El modo de selección de fuente REMOTA le permite encender el banco de forma remota mediante un temporizador programable. Este dispositivo fue configurado, el laboratorio de fotovoltaica EPIER, para iniciar en el banco de pruebas a las 8:30 am y apagarlo a las 4:00 pm.

Tabla 6

Configuración de parámetros del CFW500 Solar Drive para pruebas con el SFV reales.

Parámetro de CFW500-Solar drive	Descripción	Configuración establecida
P0100	Tiempo de aceleración	0.5sg
P0101	Tiempo de desaceleración	0.5sg
P0133	Frecuencia mínima	20Hz
P0220	Selección de Fuente	1= Remoto

Nota: (WEG, 2023)

3.4.4 Procedimiento para la realización de pruebas con la fuente CC

Las pruebas con la fuente de corriente continua de la marca Chroma, se realizaron con el objetivo de determinar el rendimiento de los sistemas de bombeo bajo condiciones controladas. Estas pruebas se enfocaron en variables clave como la tensión y la corriente de la fuente CC, así como el caudal y la eficiencia de las bombas. Las pruebas se llevaron a cabo utilizando una configuración específica que permite evaluar cada una de las dos bombas bajo condiciones óptimas de operación. Este procedimiento asegura que los equipos funcionen de manera eficiente, minimizando vibraciones, desgaste y pérdidas hidráulicas. Esta metodología ayuda a reducir los costos de operación y mantenimiento. Los parámetros de operación utilizados durante las pruebas con la fuente CC para cada bomba se detallan en la Tabla 7.

Tabla 7

Alturas manométricas para la realización de ensayos de caracterización de bombas en luz solar real para las diferentes alturas evaluadas.

Configuración	Bomba evaluada	Altura manométrica de ensayo (m.c.a)
1	ST-3510-40M-T200	18m
		29m
		38m
		41m
		45m
		48m
		51m
		53m
		62m
2	SR 33G/20 -F	13m
		29.5m
		42.5m
		52m
		59m
		64.5m
		68.5m
		72m
		74m
76m		

Para llevar a cabo pruebas de rendimiento de bombas utilizando la fuente de corriente continua (Chroma), se siguió un procedimiento detallado que incluye la simulación de condiciones específicas y la configuración precisa de los equipos. Inicialmente, se ajustaron los bancos de pruebas para simular las alturas de presión descritas en la Tabla 7. Posteriormente, se configuraron los parámetros del convertidor de frecuencia que controla la bomba en prueba (CFW500 Solar Drive), los cuales se detallan en la Tabla 8. El modo de selección de fuente LOCAL permitió el encendido manual del banco de pruebas directamente desde el equipo. Para cada altura de presión simulada, las pruebas se realizaron en lapsos de 10 minutos, asegurando que se recogieran datos representativos y consistentes del rendimiento de las bombas. Este enfoque breve pero repetitivo permitió una evaluación precisa de su eficiencia operativa, minimizando variaciones externas y garantizando que las condiciones de prueba permanecieran constantes durante cada medición.

Tabla 8*Configuración de parámetros del CFW500 para pruebas con la fuente CC (Chroma).*

Parámetro de CFW500-Solar drive	Descripción	Configuración establecida
P0100	Tiempo de aceleración	300sg
P0101	Tiempo de desaceleración	300sg
P0133	Frecuencia mínima	60Hz
P0220	Selección de Fuente	0= Local

Nota: (WEG, 2023)

3.4.5 Parámetros técnicos de la hidráulica de las bombas sumergibles

Para interpretar y comparar los datos proporcionados de las bombas sumergibles Stairs-ST-3510 y Pedrollo-4SR 33G/20 -F, se analizan los parámetros técnicos de altura manométrica, caudal, potencia hidráulica y eficiencia de cada una. Que es presentada en las fichas técnicas de cada bomba.

Tabla 9*Características técnicas de la hidráulica de la bomba sumergible Stairs*

	STAIRS-ST-3510									
Altura manométrica (m.c.a)	62	53	51	48	45	41	38	29	18	
Caudal (m ³ .h ⁻¹)	0	3	3.6	4.2	4.8	5.4	6	7.2	8.4	
Potencia hidráulica (W)	1100									
Eficiencia de la bomba (%)	62									

Nota: (ST-3510, STAIRS 4", 2023)**Tabla 10***Características técnicas de la hidráulica de la bomba sumergible Pedrollo*

	PEDROLLO-4SR 33G/20 -F										
Altura manométrica (m.c.a)	76	74	72	68.5	64.5	59	52	42.5	29.5	13	
Caudal (m ³ .h ⁻¹)	0	2.4	3.6	4.8	6	7.2	8.4	9.6	10.8	12	
Potencia hidráulica (W)	1100										
Eficiencia de la bomba (%)	66.5										

Nota: (Pedrollo 4SR33G, 2023)

3.4.6 Mantenimiento para bombas sumergibles

a. Predictivo

El mantenimiento predictivo es una estrategia avanzada que utiliza diversas técnicas de monitoreo y análisis de datos para predecir cuándo es probable que ocurra una falla en un equipo, permitiendo intervenciones oportunas antes de que se produzcan averías. Para las bombas sumergibles, que operan en entornos desafiantes y a menudo son críticas para los procesos, este enfoque es especialmente valioso.

- Instalación de sensores: Se utilizan acelerómetros piezoeléctricos o sensores de proximidad. Para bombas sumergibles, se prefieren acelerómetros sellados herméticamente con clasificación IP68.
- Adquisición de datos: Los datos de vibración se recopilan periódicamente o de forma continua. La frecuencia de muestreo típica es de al menos 2.56 veces la frecuencia máxima de interés.
- Procesamiento de señales: Las señales de tiempo se convierten al dominio de la frecuencia mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT).
- Análisis espectral: Se examinan los espectros de frecuencia para identificar picos característicos que indiquen problemas específicos.
- Tendencias: Se monitorean los cambios en los niveles de vibración a lo largo del tiempo para detectar degradaciones graduales.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se realizará el análisis de datos del presente trabajo de investigación, enfocado en la evaluación comparativa del rendimiento de dos bombas solares sumergibles de 2HP. El objetivo es determinar su altura óptima de operación a más de 3,800 metros sobre el nivel del mar. A lo largo del análisis, se explorarán las diferentes variables y condiciones que afectan el desempeño de estas bombas en altitudes elevadas.

4.1 Metodología para el diseño del módulo del sistema fotovoltaico

Para el diseño de un sistema fotovoltaico para alimentar una bomba sumergible trifásica de 2 HP, que opera a 220 V con una corriente nominal de 8.3 A, se realizó el cálculo de la energía diaria requerida y el número de paneles solares necesarios. A continuación, se presentan los resultados obtenidos y su análisis.

4.1.1 Cálculo de la energía diaria requerida

Primero, se calculó la potencia de la bomba en vatios (W). Dado que la potencia nominal es de 2HP, y 1HP equivale a 746 W, la potencia eléctrica de la bomba es:

$$P = 2HP * \frac{746W}{HP} = 1492W \quad (17)$$

Suponiendo que la bomba funciona durante 6 horas al día, la energía diaria necesaria se calcula como:

$$E = P * t = 1492W * 6h = 8952Wh \quad (18)$$

Por lo tanto, la bomba requiere 8952 Wh de energía cada día para operar durante el tiempo especificado.

4.1.2 Cálculo del número de paneles solares necesarios

Para determinar el número de paneles solares necesarios, se utilizó la siguiente fórmula:

$$N_P = \frac{E}{Eff * HSP * W_P} \quad (19)$$

Donde:

- E = 8952Wh es la energía diaria requerida.
- Eff = 0.75 es la eficiencia del sistema fotovoltaico
- HSP = 4.6 HSP representa las horas de sol pico diarias disponibles según Figura:4.
- W_P = 50W es la potencia nominal de cada panel solar.

Sustituyendo los valores en la fórmula:

$$N_p = \frac{8952Wh}{0.75*4.6*50} \quad (20)$$

Realizando los cálculos:

$$N_p = \frac{8952}{172.5} = 51.9 \quad (21)$$

Dado que ya sabemos que el sistema fotovoltaico requiere un total de 52 paneles de 50 W cada uno, debemos asegurarnos de que estos paneles se configuren de manera que el voltaje total sea adecuado para la bomba (220 V) y que la corriente total sea suficiente para cubrir la corriente nominal de 8.3 A.

4.1.3 Cálculo del número de paneles en serie

Primero, calculamos cuántos paneles en serie necesitamos para alcanzar el voltaje de 220 V.

Cada panel tiene un voltaje de máxima potencia (V_{mp}) de 18.25 V.

El número de paneles en serie se calcula como:

$$N_s = \frac{V_{operacion}}{V_{panel}} = \frac{200V}{18.25V_{max}} = 12.05 \quad (22)$$

Redondeamos al siguiente número entero:

Número de paneles en serie (N_s): 13 paneles.

4.1.4 Cálculo del número de ramas en paralelo

Con los 13 paneles en serie, ahora determinamos cuántas ramas en paralelo son necesarias para cumplir con la corriente nominal requerida por la bomba.

El total de paneles es 52, por lo que podemos distribuir los paneles en 4 ramas en paralelo:

$$N_p = \frac{52_{paneles\ totales}}{13_{paneles\ en\ serie\ por\ rama}} = 4_{ramas\ en\ paralelo} \quad (23)$$

4.1.5 Cálculo de la corriente total

Cada rama en paralelo tendrá una corriente de:

$$I_{rama} = I_{panel} = 2.74A \quad (24)$$

Para 4 ramas en paralelo, la corriente total será:

$$I_{total} = I_{rama} * N_P = 2.74A * 4 = 10.96A \quad (25)$$

4.2 Resultado de las mediciones con el sistema fotovoltaico a pleno sol

El análisis de las mediciones realizadas con el sistema fotovoltaico a pleno sol proporciona una comprensión profunda del rendimiento y la eficiencia de las bombas sumergibles en condiciones óptimas de irradiación solar. Los resultados muestran que la eficiencia y el caudal de las bombas están directamente influenciados por la potencia disponible del sistema fotovoltaico, la cual varía según la altura a la que se opera la bomba.

Para el análisis, se utilizarán datos de entrada basados en el comportamiento real del sol, incluyendo parámetros como:

- Tiempo
- Corriente de cortocircuito (I_{cc} en A)
- Voltaje de circuito abierto (V_{oc} en V)
- Irradiancia (G_t en W/m^2)
- Altura Total dinámica (HT en m.c.a)
- Caudal (Q en m^3/h)
- Frecuencia (F en Hz)
- Temperatura (T en $^{\circ}C$)

Además, se calcularon los siguientes valores:

- Potencia (P en W)
- Energía eléctrica (EEL en Wh)
- Energía hidráulica (EH en Wh)
- Eficiencia del sistema (η_s en %)

4.2.1 Diagramas de la bomba sumergible Stairs

Los diagramas de rendimiento de la bomba sumergible Stairs de 2HP permiten evaluar su eficiencia en diversas condiciones.

a. Curva de potencia C.C. y eficiencia de bomba vs tiempo 45 m.c.a

El gráfico muestra la relación entre la potencia en corriente continua (C.C.), medida en vatios (W), y la eficiencia de una bomba, medida en porcentaje (%), a lo largo del

tiempo, con un intervalo desde las 08:00 hasta las 15:50. La curva azul representa la potencia C.C., que inicialmente aumenta rápidamente hasta estabilizarse en torno a los 1600 W desde las 09:30 hasta las 14:00, antes de disminuir bruscamente hacia el final del periodo. La curva naranja representa la eficiencia de la bomba, que también aumenta rápidamente al principio, alcanzando un máximo de alrededor del 35% en el mismo periodo de estabilización de la potencia, y luego disminuye significativamente después de las 14:00. Este comportamiento indica que la bomba opera con una eficiencia óptima durante el periodo en que la potencia es estable, y la eficiencia cae a medida que la potencia disminuye.

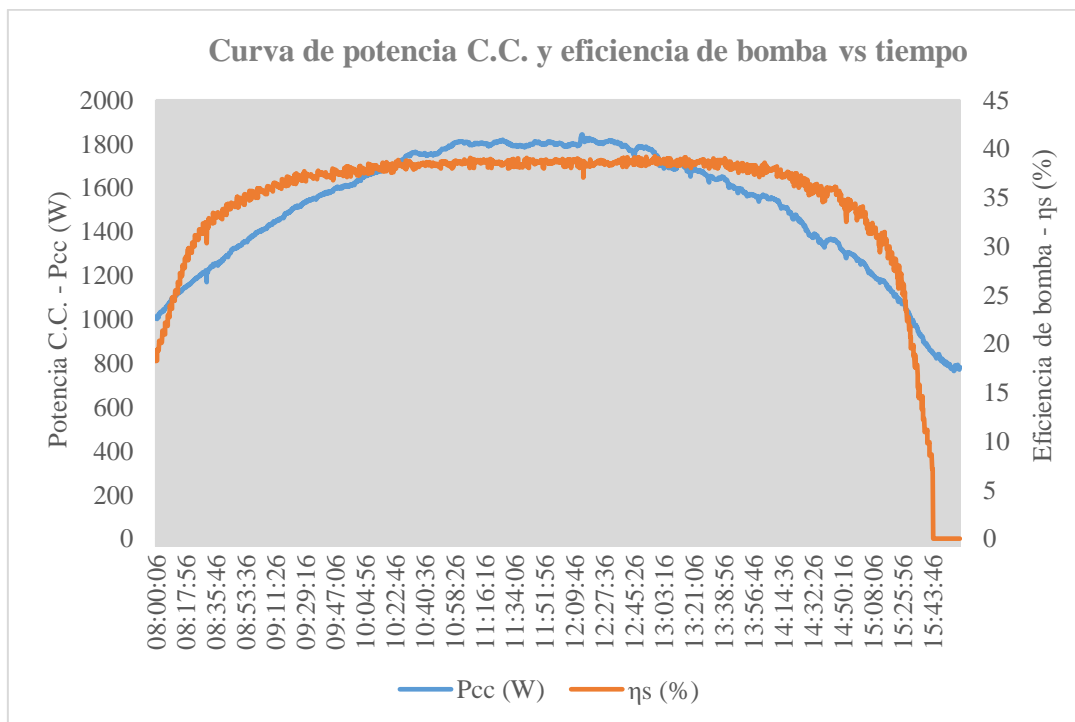


Figura 21. Comportamiento de la potencia c.c. y eficiencia de bomba vs tiempo a 45 m.c.a Stairs (Fuente propia).

b. Curva de potencia C.C. y eficiencia de bomba vs tiempo 50 m.c.a

Al inicio, la Potencia C.C. comienza en alrededor de 400 W y aumenta progresivamente hasta alcanzar un máximo de aproximadamente 1800 W alrededor de las 11:30. Posteriormente, la potencia se mantiene relativamente estable en 1800 W hasta cerca de las 14:30, momento en el cual se observa una caída brusca y oscilaciones significativas, descendiendo finalmente a cero alrededores de las 16:00. La eficiencia, por otro lado, comienza en torno al 5% a las 08:00:07. Aumenta rápidamente hasta alcanzar un pico de casi 30% alrededor de las 08:30. Luego, se estabiliza en un rango entre 25% y 30% hasta aproximadamente las 14:30. Similar a

la Potencia C.C., la eficiencia experimenta una serie de fluctuaciones marcadas a partir de ese momento, con picos y valles abruptos, antes de caer a valores cercanos al 0% hacia el final del período observado, alrededor de las 16:00. Estos datos sugieren que la bomba opera de manera eficiente durante la mayor parte de la mañana y primeras horas de la tarde, pero su desempeño se deteriora considerablemente después de las 14:30, tanto en términos de potencia como de eficiencia.

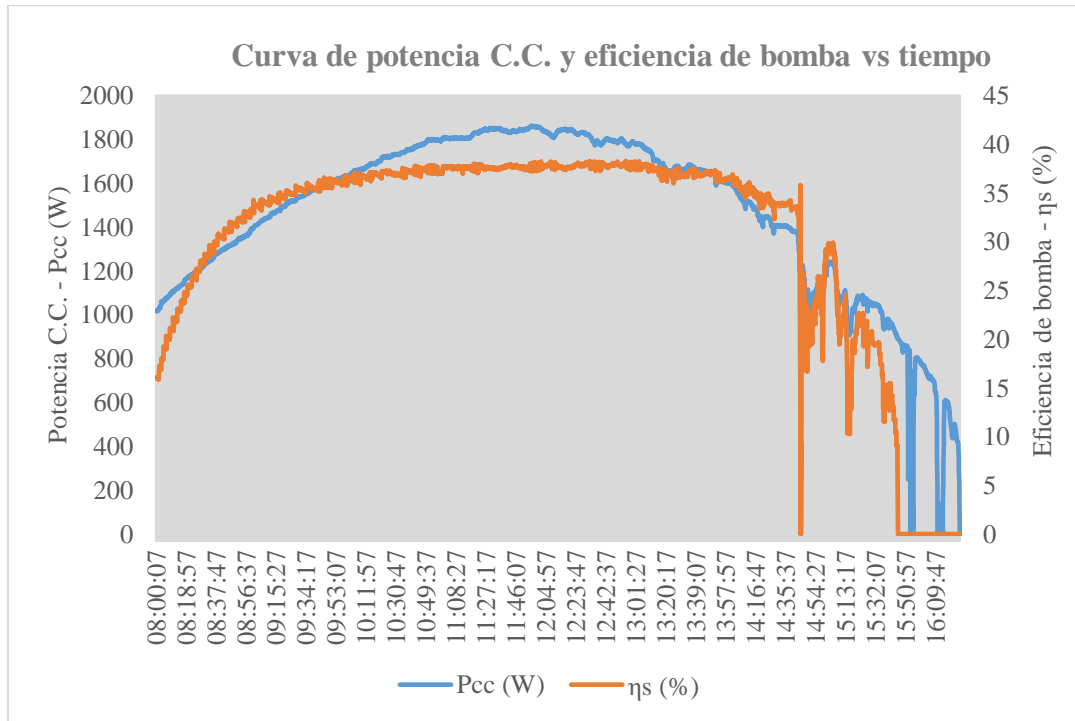


Figura 22. Comportamiento de la potencia c.c. y eficiencia de bomba vs tiempo a 50 m.c.a. Stairs (Fuente propia).

c. Curva de potencia C.C. y eficiencia de bomba vs tiempo 55 m.c.a

El gráfico muestra la curva de potencia en corriente continua (Pcc) y la eficiencia de una bomba en función del tiempo, con datos registrados desde las 08:00:03 hasta las 16:18:43. La potencia, medida en vatios (W) y representada con una línea azul, comienza en aproximadamente 400 W, aumenta gradualmente hasta estabilizarse alrededor de los 1600 W entre las 09:30:00 y las 14:00:00, y luego disminuye abruptamente hacia el final del período de registro. La eficiencia de la bomba, medida en porcentaje (%) y representada por una línea naranja, sigue un patrón similar, comenzando en cero, subiendo rápidamente hasta alcanzar un máximo de aproximadamente 35% alrededor de las 09:00:00, y manteniéndose relativamente constante antes de caer drásticamente a cero hacia el final del gráfico. El eje

izquierdo del gráfico corresponde a la potencia en vatios, mientras que el eje derecho corresponde a la eficiencia en porcentaje.

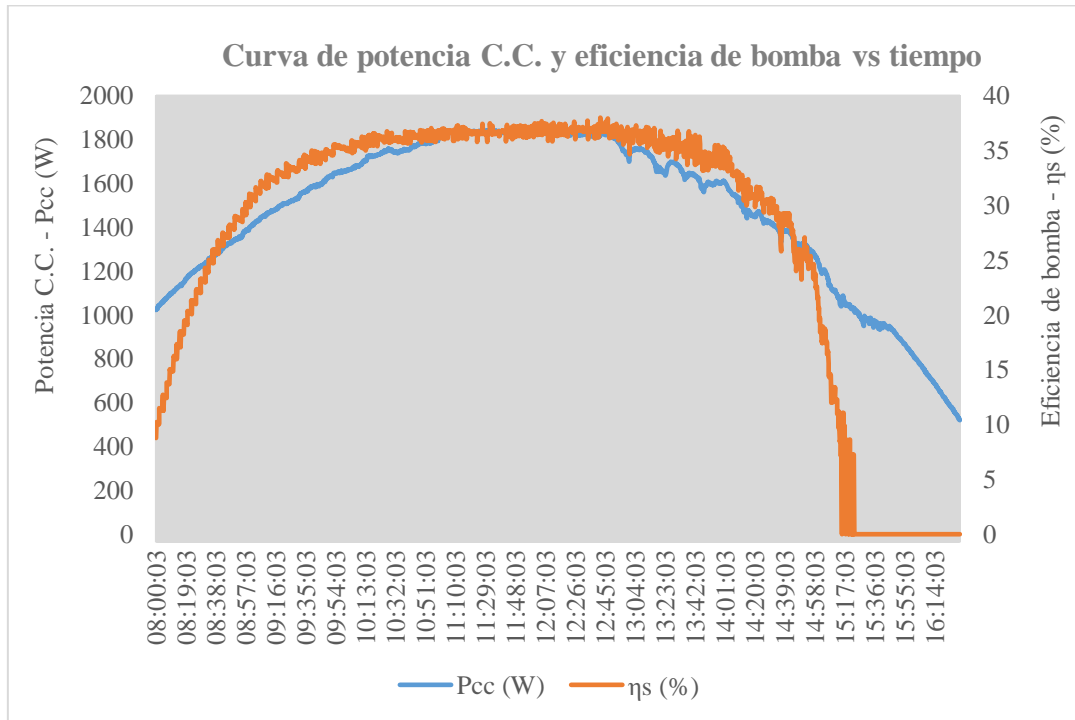


Figura 23. Comportamiento de la potencia c.c. y eficiencia de bomba vs tiempo a 55 m.c.a. Stairs (Fuente propia).

a. Curva de tensión C.C. y temperatura del módulo fotovoltaico vs tiempo para 45 m.c.a

El gráfico presenta la curva de tensión en corriente continua (V_{cc}) y la temperatura del módulo en función del tiempo, con datos registrados desde las 08:00:06 hasta las 15:51:36. La temperatura del módulo, medida en grados Celsius ($^{\circ}C$) y representada con una línea naranja, comienza en aproximadamente $30^{\circ}C$, sube de manera constante hasta alcanzar un máximo de alrededor de $55^{\circ}C$ a las 09:43:06, y se mantiene aproximadamente estable antes de descender gradualmente en la última parte del período, terminando en unos $45^{\circ}C$. La tensión en corriente continua, medida en voltios (V) y representada con una línea azul, comienza en unos 320 V, disminuye gradualmente hasta estabilizarse alrededor de los 290 V entre las 09:00:00 y las 13:00:00, y posteriormente muestra una ligera tendencia ascendente, alcanzando nuevamente los 320 V hacia el final del periodo de registro. El eje izquierdo del gráfico corresponde a la temperatura en grados Celsius, mientras que el eje derecho muestra la tensión en voltios.

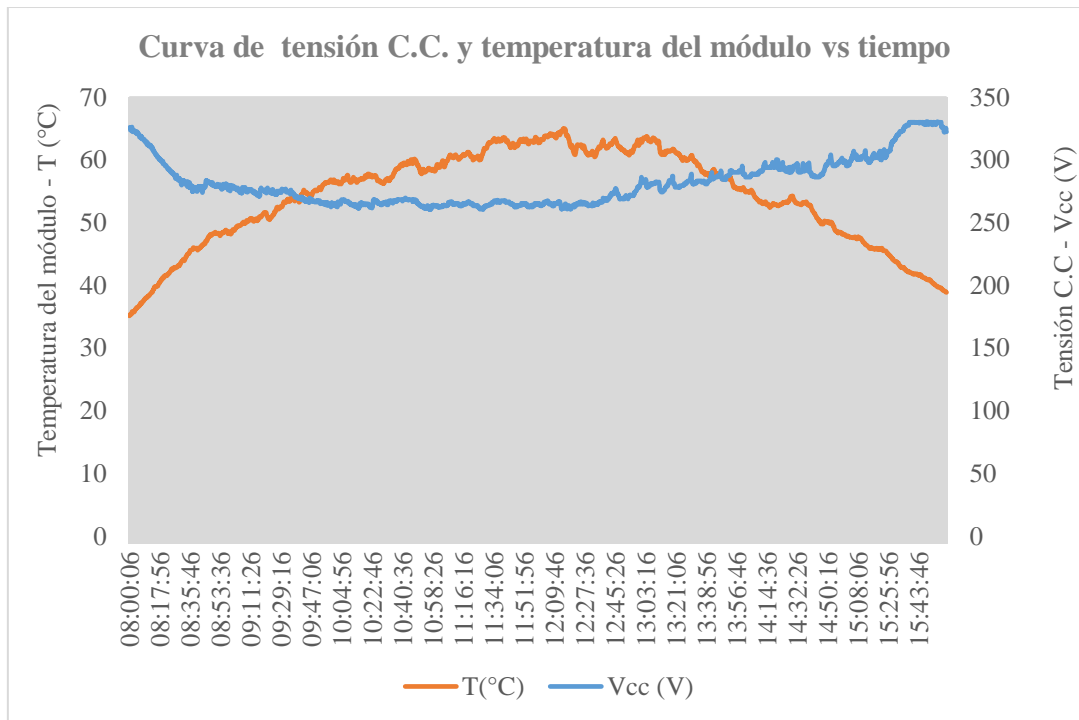


Figura 24. Comportamiento de la tensión c.c. y temperatura del módulo vs tiempo a 45 m.c.a. Stairs (Fuente propia).

b. Curva de tensión C.C. y temperatura del módulo vs tiempo 50 m.c.a

El gráfico muestra la relación entre la temperatura del módulo (en °C) y la tensión de corriente continua (en V) a lo largo del tiempo. El eje horizontal representa el tiempo, comenzando a las 08:00:07 y finalizando a las 16:18:57, con marcas de tiempo aproximadamente cada 15 minutos. El eje vertical izquierdo muestra la temperatura del módulo en un rango de 0 a 70 °C, y el eje vertical derecho muestra la tensión de corriente continua en un rango de 0 a 400 V. La línea naranja indica la temperatura del módulo, que empieza cerca de los 30 °C, sube hasta alrededor de 55 °C, y luego desciende gradualmente hacia el final del período. La línea azul representa la tensión de corriente continua, que inicia cerca de 300 V, se mantiene relativamente estable con pequeñas fluctuaciones hasta alrededor de las 14:15, y luego desciende significativamente hacia el final del período. El fondo del gráfico es gris, lo que resalta las líneas de datos. La leyenda al pie del gráfico identifica las líneas correspondientes a la temperatura (T) y la tensión (Vcc), respectivamente.

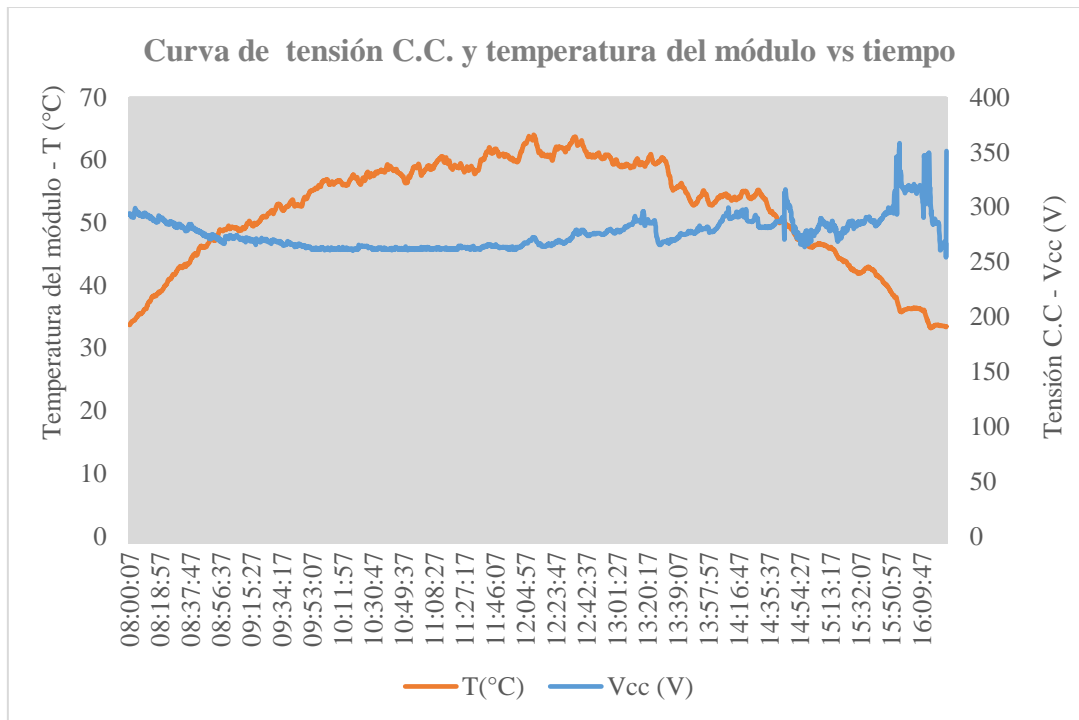


Figura 25. Comportamiento de la tensión c.c. y temperatura del módulo vs tiempo a 50 m.c.a. Stairs (Fuente propia).

c. Curva de tensión C.C. y temperatura del módulo vs tiempo 55 m.c.a

El gráfico presenta la relación entre la temperatura del módulo (T en °C) y la tensión de corriente continua (Vcc en V) a lo largo del tiempo, con datos recogidos desde las 08:00:03 hasta las 16:18:53. En el eje horizontal se muestra el tiempo con intervalos de aproximadamente 15 minutos. El eje vertical izquierdo indica la temperatura del módulo en un rango de 10 a 70 °C, mientras que el eje vertical derecho representa la tensión de corriente continua en un rango de 0 a 350 V. La curva naranja representa la temperatura del módulo, que comienza alrededor de los 30 °C, sube gradualmente hasta alcanzar un pico de cerca de 60 °C entre las 11:00 y las 13:00, y luego desciende progresivamente hacia los 200 V al final del período. La curva azul muestra la tensión de corriente continua, que inicia cerca de los 300 V, se mantiene relativamente estable con ligeras fluctuaciones hasta alrededor de las 14:00, momento en el cual muestra un leve aumento y luego desciende ligeramente, estabilizándose cerca de los 300 V hacia el final. El gráfico tiene un fondo gris que resalta las líneas de datos, y la leyenda al pie identifica claramente las líneas de temperatura (T) y tensión (Vcc).

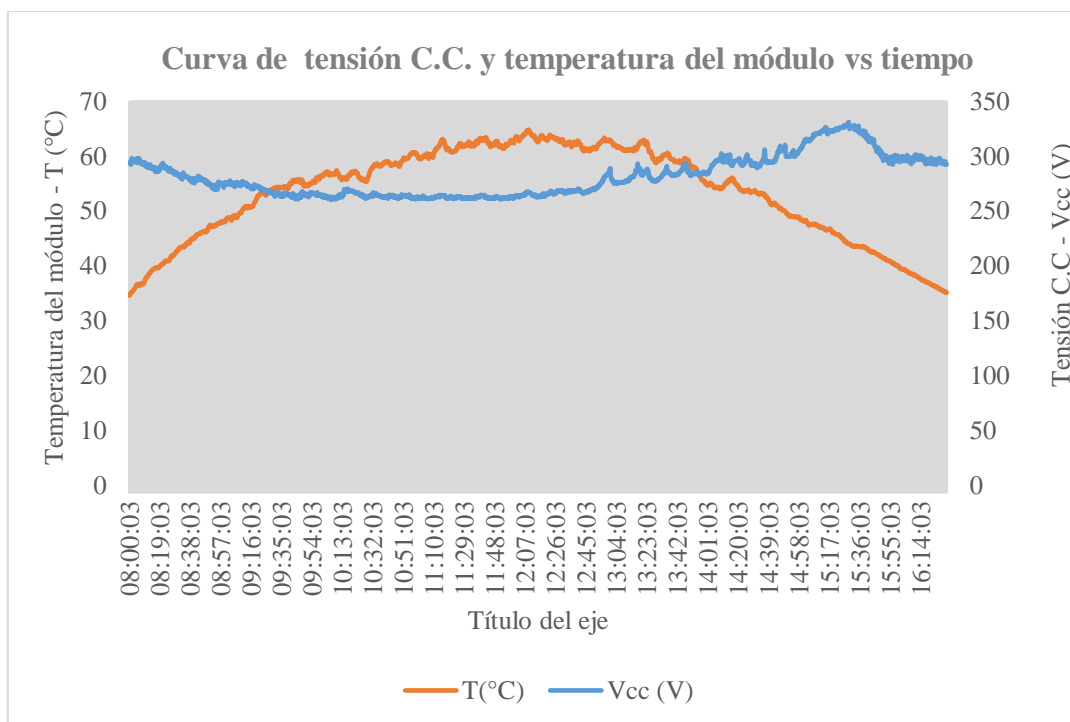


Figura 26. Comportamiento de la tensión c.c. y temperatura del módulo vs tiempo a 55 m.c.a Stairs (Fuente propia).

a. Curva de potencia C.C vs irradiancia 45 m.c.a

La figura 27 muestra una relación entre la potencia continua (C.C.) y la irradiancia solar. En el eje horizontal, se encuentra la irradiancia en vatios por metro cuadrado (W/m^2), que varía desde 0 hasta 1200. En el eje vertical, se representa la potencia continua en vatios (W), con valores que oscilan entre 0 y 1800. Los puntos de datos trazan una curva ascendente, lo que indica una correlación positiva entre la irradiancia y la potencia C.C. A medida que aumenta la irradiancia, la potencia C.C. también aumenta de manera no lineal, con una tasa de incremento más pronunciada a medida que la irradiancia alcanza valores más altos. Este gráfico es relevante en campos como la energía solar, donde comprender esta relación es fundamental para optimizar el rendimiento de los paneles solares.

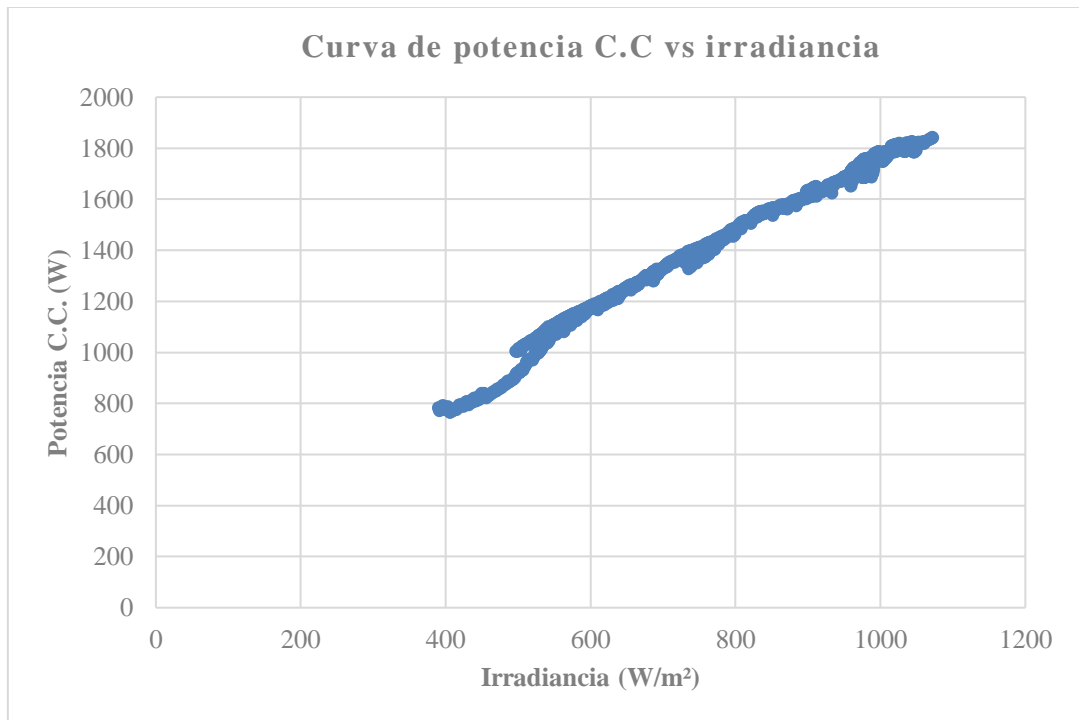


Figura 27. Comportamiento de la potencia c.c vs irradiancia a 45 m.c.a Stairs (Fuente propia).

b. Curva de potencia C.C vs irradiancia 50 m.c.a

La gráfica muestra la relación entre la Potencia C.C. (Corriente Continua) y la Irradiancia. En el eje horizontal, la Irradiancia se mide en W/m^2 y varía desde 0 hasta 1200. En el eje vertical, la Potencia C.C. se mide en W y abarca valores desde 0 hasta aproximadamente 1800. Los puntos azules en la gráfica forman una línea ascendente, indicando una correlación positiva entre la Irradiancia y la Potencia C.C. A medida que aumenta la Irradiancia, también lo hace la Potencia C.C., con el punto más alto en la gráfica alrededor de $1100 W/m^2$ para la Irradiancia y justo por debajo de 1800 W para la Potencia C.C.

Aproximadamente a $200 W/m^2$ de Irradiancia, la Potencia C.C. es de 0 W.

- A $400 W/m^2$ de Irradiancia, la Potencia C.C. aumenta a 200 W.
- A $600 W/m^2$ de Irradiancia, la Potencia C.C. se sitúa en 400 W.
- A $800 W/m^2$ de Irradiancia, la Potencia C.C. alcanza los 600 W.
- A $1000 W/m^2$ de Irradiancia, la Potencia C.C. llega a 800 W.

Aproximadamente a $1100 W/m^2$ de Irradiancia, la Potencia C.C. se encuentra cerca de 1800 W.

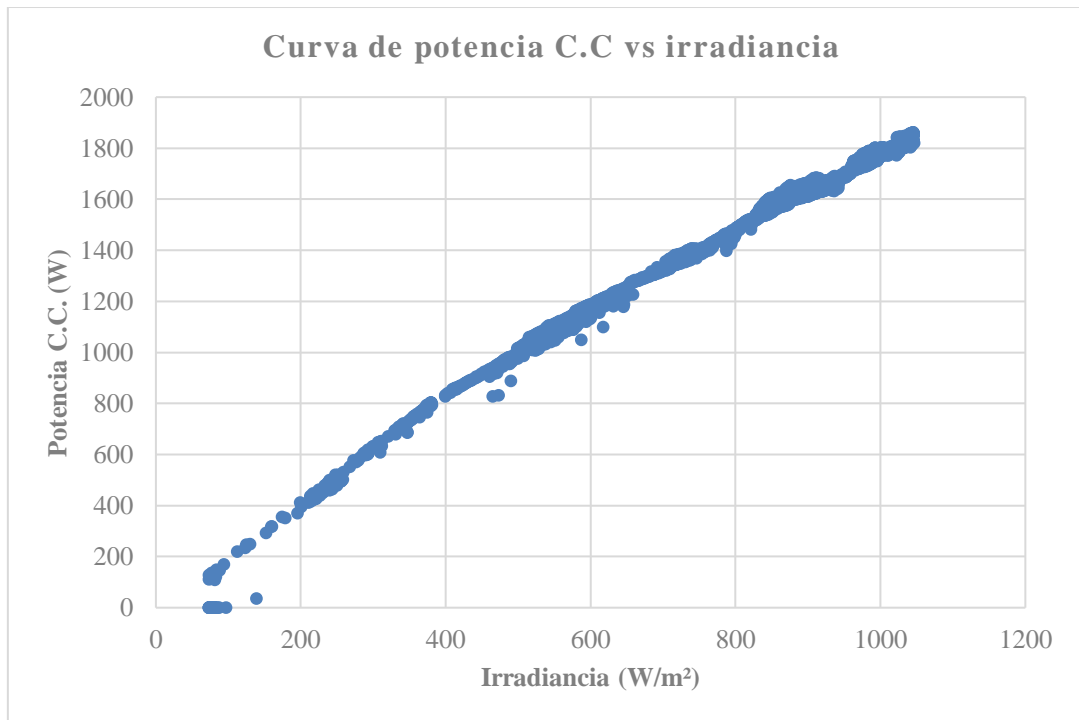


Figura 28. Comportamiento de la potencia c.c vs irradiancia a 50 m.c.a Stairs (Fuente propia).

c. Curva de potencia C.C vs irradiancia 55 m.c.a

La Curva de Potencia C.C vs Irradiancia muestra una relación positiva entre la Potencia C.C. (Corriente Continua) y la Irradiancia. A medida que aumenta la Irradiancia, la Potencia C.C. también aumenta. Algunos valores específicos son los siguientes:

- Aproximadamente a 200 W/m² de Irradiancia, la Potencia C.C. es de 0 W.
- A 400 W/m² de Irradiancia, la Potencia C.C. aumenta a 200 W.
- A 600 W/m² de Irradiancia, la Potencia C.C. se sitúa en 400 W.
- A 800 W/m² de Irradiancia, la Potencia C.C. alcanza los 600 W.
- A 1000 W/m² de Irradiancia, la Potencia C.C. llega a 800 W.
- Aproximadamente a 1100 W/m² de Irradiancia, la Potencia C.C. se encuentra cerca de 1800 W.

Esta relación es relevante para comprender cómo varía la salida de energía de los paneles solares (Potencia C.C.) en función de la cantidad de energía solar recibida (Irradiancia).

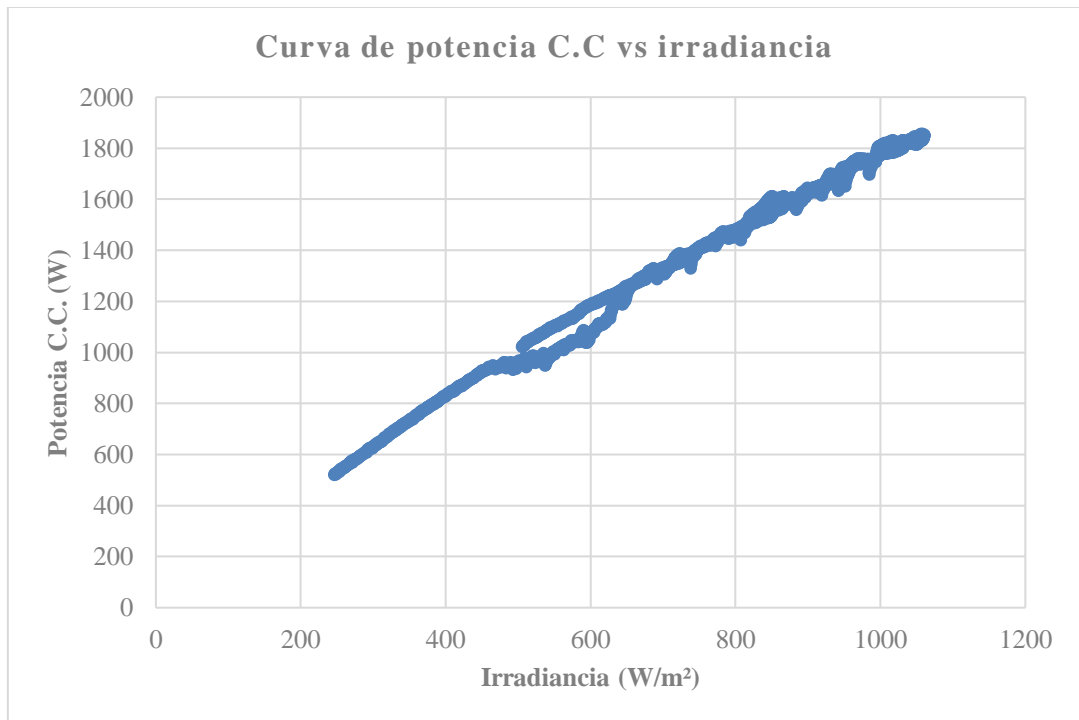


Figura 29. Comportamiento de la potencia c.c vs irradiancia a 55 m.c.a Stairs (Fuente propia).

a. Curva de caudal vs potencia C.C a 45 m.c.a

La figura 30 La grafica representa la relación entre el caudal (expresado en metros cúbicos por hora) y la potencia en corriente continua (medida en watts). A medida que aumenta la potencia, el caudal también se incrementa, mostrando una correlación positiva. Los puntos de datos a lo largo de la curva representan diferentes valores de potencia. Entre aproximadamente 1400 W y 1800 W, la curva se vuelve más pronunciada antes de estabilizarse cerca de los valores máximos mostrados.

Para comprender mejor este gráfico, consideremos algunos aspectos adicionales:

- Aplicaciones Típicas: Esta curva es relevante en sistemas de bombeo, donde la potencia eléctrica aplicada a una bomba afecta directamente el caudal de fluido que puede manejar. También es útil en sistemas hidráulicos, como válvulas o actuadores, donde la potencia influye en el flujo de fluido.
- Eficiencia y Punto Óptimo: Observamos que la curva no es lineal; inicialmente, pequeños aumentos en la potencia generan incrementos significativos en el caudal. Sin embargo, a medida que la potencia aumenta, la ganancia en caudal disminuye. Existe un punto óptimo donde se maximiza la eficiencia. En la

práctica, seleccionar la potencia adecuada implica equilibrar la necesidad de caudal con la eficiencia energética.

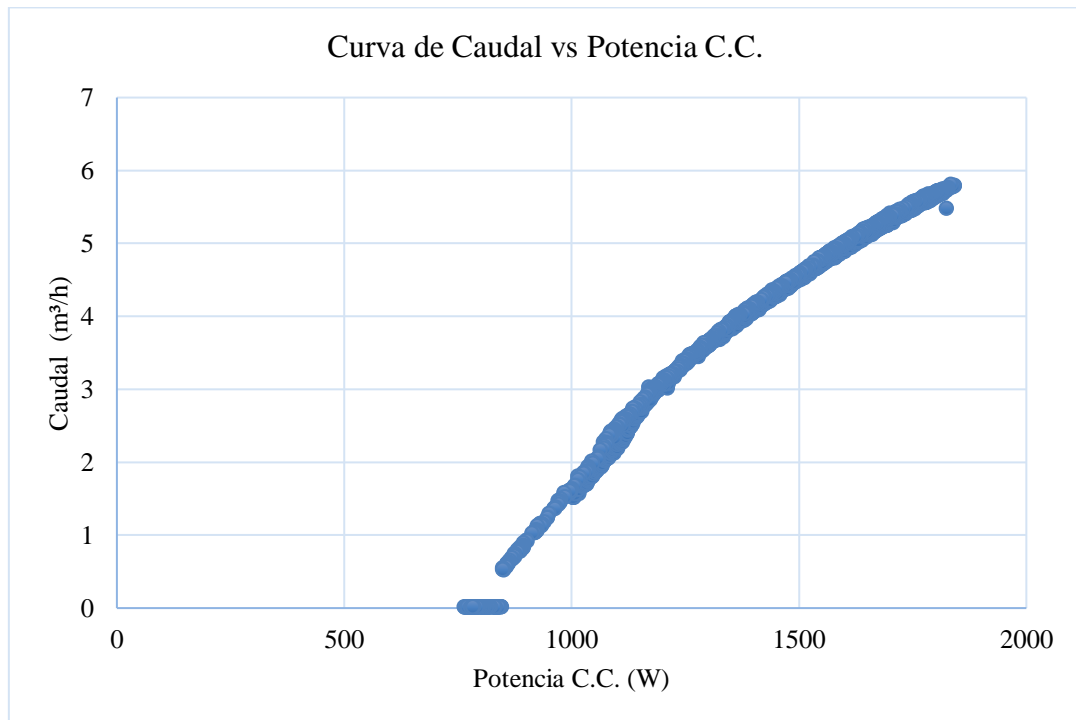


Figura 30. Comportamiento del caudal vs potencia c.c. a 45 m.c.a Stairs (Fuente propia).

b. Curva de caudal vs potencia C.C a 50 m.c.a

La figura 31 describe cómo varía el caudal en función de la potencia suministrada en corriente continua (C.C.), medido en vatios (W). En el eje X, la potencia varía desde 0 hasta 1800 W, mientras que en el eje Y se observa el caudal, que fluctúa entre 0 y 5.75 m³/h. La curva muestra un comportamiento no lineal, con datos relevantes que destacan la ineficiencia del sistema a bajas potencias. En potencias inferiores a 500 W, el caudal es prácticamente nulo, lo que indica que el sistema no está operando eficientemente en esta zona. A partir de los 1000 W, se registra un aumento significativo en el caudal, que pasa de valores cercanos a 0 m³/h a aproximadamente 3 m³/h, mostrando un incremento progresivo. Conforme la potencia aumenta entre 1000 y 1500 W, el caudal sigue creciendo de manera continua, alcanzando valores cercanos a 5 m³/h. Finalmente, cuando la potencia se aproxima a los 1800 W, el caudal se estabiliza cerca de 6 m³/h, mostrando un comportamiento asintótico, donde el incremento en el caudal disminuye a medida que el sistema se aproxima a su capacidad máxima de rendimiento. Este análisis detallado de los datos de la curva permite evaluar cómo el sistema responde a diferentes niveles de potencia y

determina el rango de operación óptimo para maximizar el caudal sin exceder la capacidad energética del equipo.

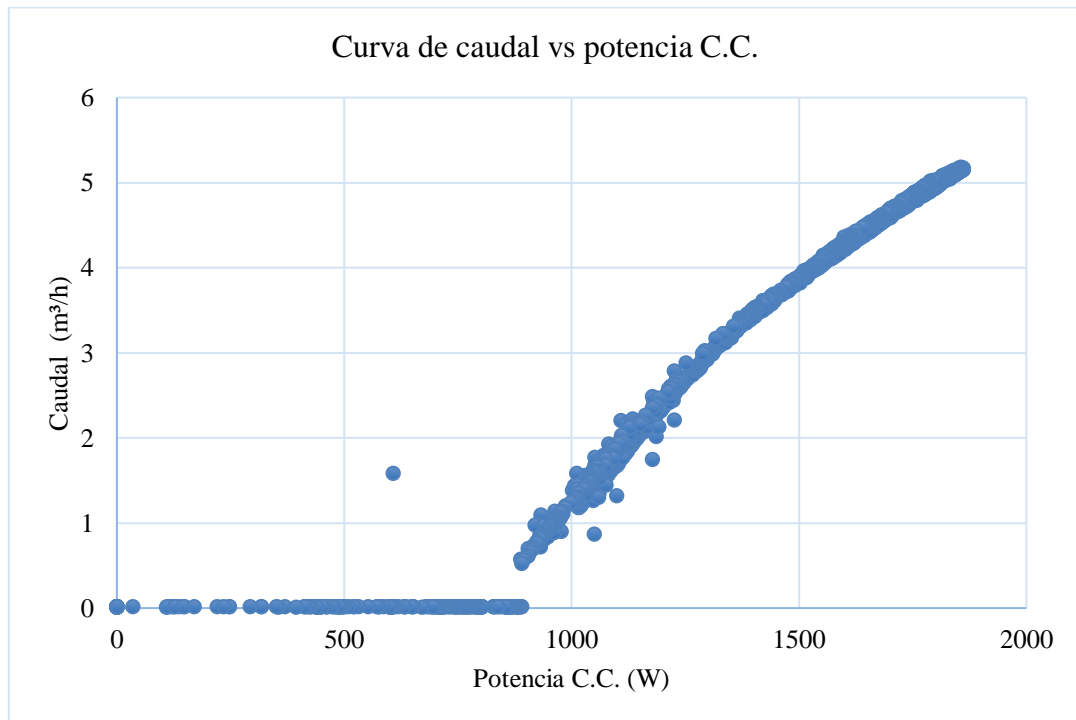


Figura 31. Comportamiento del caudal vs potencia c.c. a 50 m.c.a Stairs (Fuente propia).

c. Curva de caudal vs potencia C.C a 55 m.c.a

La figura 32 muestra la relación entre el caudal, medido en metros cúbicos por hora (m^3/h), y la potencia eléctrica en corriente continua (C.C.), expresada en vatios (W). En el eje horizontal, la potencia oscila entre 0 y 2000 W, mientras que el eje vertical refleja el caudal, con un rango de 0 a 5 m^3/h . Inicialmente, cuando la potencia se encuentra por debajo de los 1000 W, el caudal permanece prácticamente en cero, lo que indica que el sistema no genera flujo significativo en este intervalo de potencia. A partir de los 1000 W, la curva comienza a mostrar un aumento gradual del caudal, alcanzando un crecimiento más acelerado conforme la potencia aumenta. Este incremento se intensifica entre los 1200 W y 1900 W, donde el caudal sube de manera notable hasta alcanzar aproximadamente 4.5 m^3/h a los 1900 W. El comportamiento de la curva sugiere un umbral mínimo de potencia necesario para generar caudal apreciable, seguido de un patrón exponencial en el que el caudal aumenta rápidamente conforme la potencia supera este límite. Esta relación no lineal refleja características típicas de un sistema de bombeo en el que el flujo depende de la potencia suministrada al motor, posiblemente debido a la eficiencia del equipo a

diferentes niveles de operación. La gráfica destaca cómo el incremento en la potencia se traduce en un aumento significativo en el caudal a partir de ciertos valores de energía entregada.

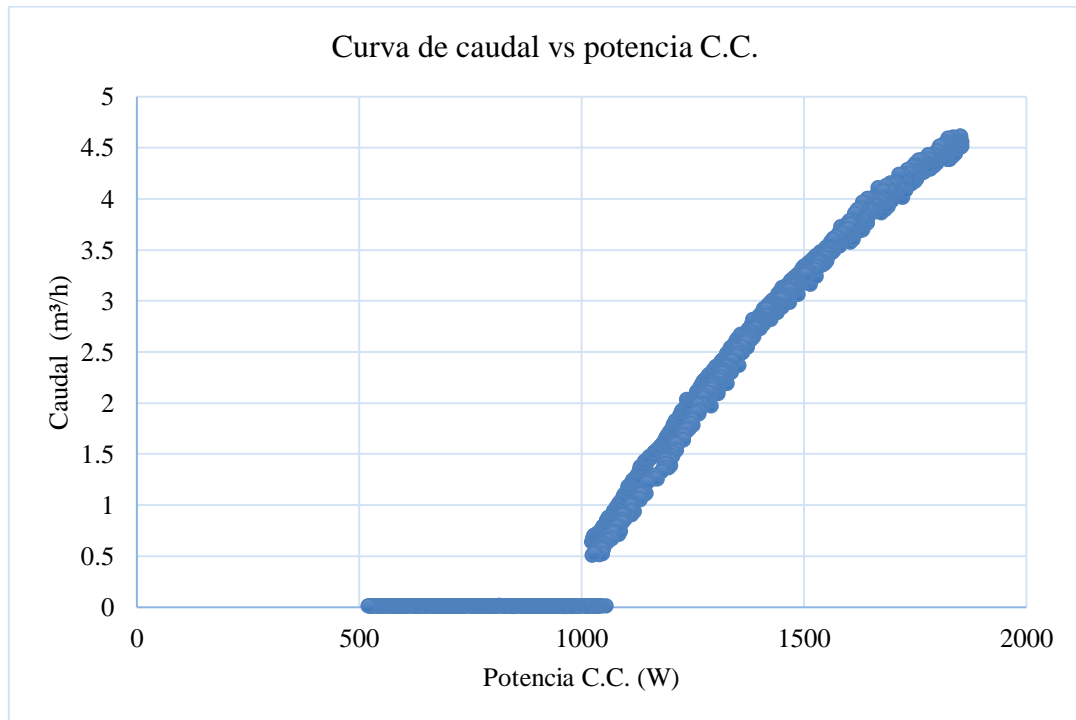


Figura 32. Comportamiento del caudal vs potencia c.c. a 55 m.c.a Stairs (Fuente propia).

a. Curva de caudal y frecuencia vs tiempo 45 m.c.a

El gráfico presenta dos conjuntos de datos: el caudal (Q) en metros cúbicos por hora (m^3/h) y la frecuencia (F) en hertzios (Hz) a lo largo del tiempo. El eje horizontal representa el tiempo, con intervalos específicos de horas y minutos desde las 08:00:06 hasta las 15:53:06. El caudal se representa en el eje vertical izquierdo (0 a 7 m^3/h), mientras que la frecuencia se representa en el eje vertical derecho (0 a 70 Hz). La curva azul representa el caudal, que comienza en un valor de aproximadamente 2 m^3/h y aumenta de manera constante hasta alcanzar un valor máximo de cerca de 6 m^3/h alrededor de las 11:00:00. Después de este punto, el caudal se estabiliza y luego comienza a disminuir gradualmente a partir de las 13:00:00, cayendo bruscamente después de las 15:00:00. La curva naranja representa la frecuencia, que inicia en aproximadamente 55 Hz y disminuye gradualmente hasta aproximadamente 45 Hz a las 11:00:00. Luego, la frecuencia se mantiene relativamente estable hasta las 13:00:00, después de lo cual comienza a aumentar nuevamente, alcanzando valores cercanos a 60 Hz hacia el final del período de

tiempo mostrado. El gráfico ilustra la relación inversa y dinámica entre el caudal y la frecuencia a lo largo del tiempo, destacando cómo variaciones en la frecuencia afectan el caudal de manera significativa.

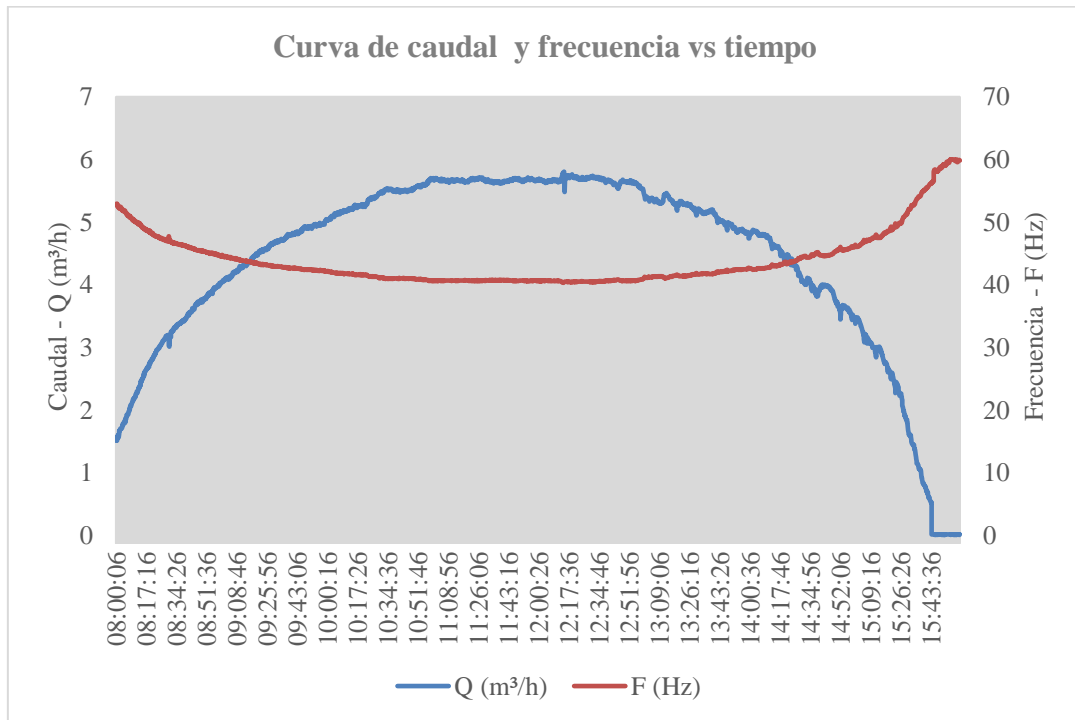


Figura 33. Comportamiento del caudal y frecuencia vs tiempo a 45 m.c.a Stairs (Fuente propia).

b. Curva de caudal y frecuencia vs tiempo 50 m.c.a

El presente gráfico muestra la relación entre el caudal (Q) y la frecuencia (F) a lo largo del tiempo, desde las 08:00:07 hasta las 16:14:37. El caudal, representado por la línea azul, comienza en aproximadamente 1 m³/h y aumenta de manera constante hasta alcanzar un máximo de alrededor de 5 m³/h hacia las 11:30:07. Posteriormente, el caudal se mantiene relativamente constante con pequeñas fluctuaciones hasta las 13:20:07. A partir de ese momento, el caudal experimenta una serie de caídas drásticas con oscilaciones significativas, descendiendo de forma abrupta hasta casi 0 m³/h al final del período observado. Este comportamiento de caídas hacia el final del día sugiere posibles interrupciones o ajustes en el sistema que afectan significativamente el caudal. Por otro lado, la frecuencia, indicada por la línea naranja, comienza cerca de 53 Hz y disminuye gradualmente hasta aproximadamente 45 Hz a las 13:00:07. Después de este punto, la frecuencia muestra un ligero aumento y se estabiliza cerca de los 50 Hz con pequeñas variaciones hacia el final del período de observación.

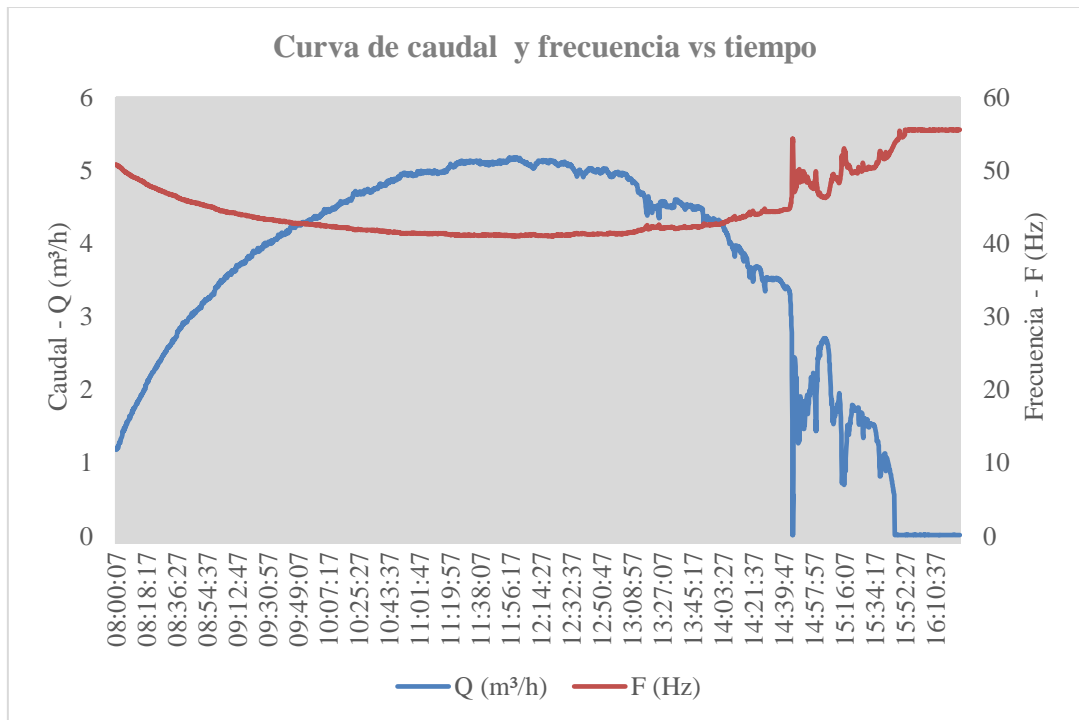


Figura 34. Comportamiento del caudal y frecuencia vs tiempo a 50 m.c.a Stairs (Fuente propia).

c. Curva de caudal y frecuencia vs tiempo 55 m.c.a

El presente gráfico muestra la relación entre el caudal (Q) y la frecuencia (F) a lo largo del tiempo, desde las 08:00:03 hasta las 16:24:03. El caudal, representado por la línea azul, inicia alrededor de 0.5 m³/h y muestra un incremento constante hasta alcanzar un pico cercano a los 4.5 m³/h hacia las 11:00:03. Después de alcanzar este máximo, el caudal se mantiene relativamente estable con pequeñas variaciones hasta las 13:00:03. Posteriormente, el caudal comienza a disminuir progresivamente con algunas oscilaciones, presentando una caída más abrupta alrededor de las 15:00:03, y llegando casi a 0 m³/h al final del período observado. En contraste, la frecuencia, representada por la línea naranja, comienza cerca de 55 Hz y muestra una disminución gradual hasta estabilizarse en alrededor de 45 Hz hacia las 13:00:03. A partir de este punto, la frecuencia experimenta un ligero incremento hasta aproximarse a 50 Hz, manteniendo una relativa constancia con variaciones menores hasta el final del período observado. La relación inversa entre el caudal y la frecuencia en distintos intervalos destaca un patrón consistente, indicando posibles ajustes regulatorios en el sistema para gestionar el flujo y la estabilidad operativa.

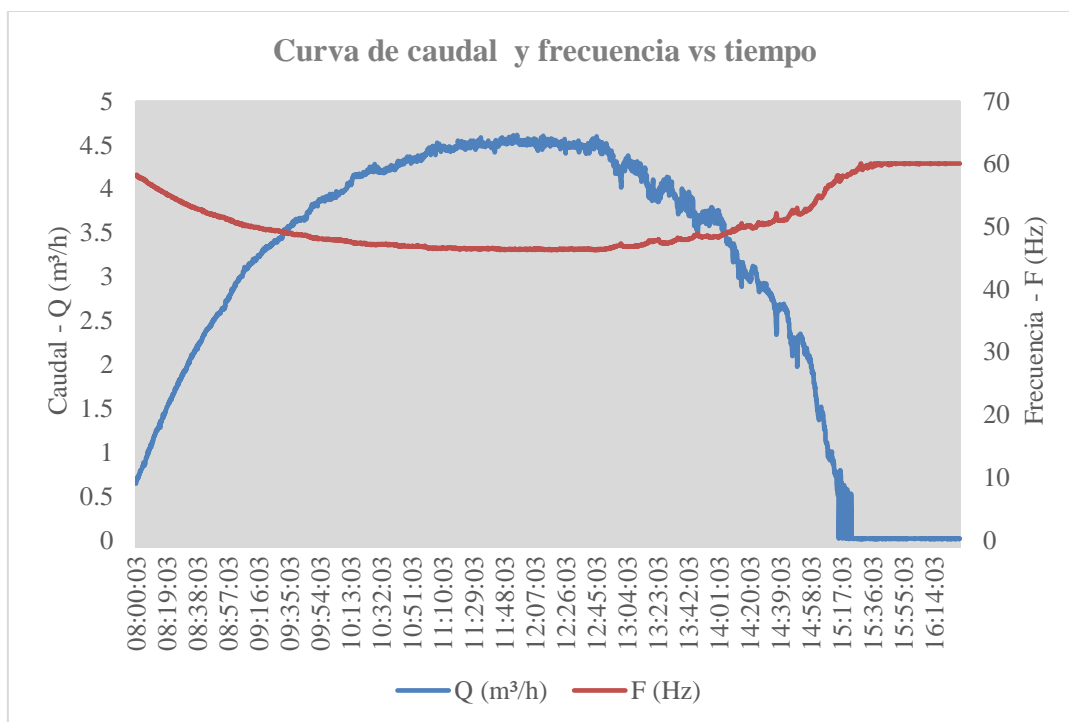


Figura 35. Comportamiento del caudal y frecuencia vs tiempo a 55 m.c.a Stairs (Fuente propia).

a. Curva de irradiancia y de altura manométrica vs tiempo a 45 m.c.a.

El grafico muestra la relación entre la irradiancia (Gt) y la altura manométrica (HT) a lo largo del tiempo, desde las 08:00:06 hasta las 15:59:16. La irradiancia, representada por la línea azul, comienza cerca de 600 W/m² y aumenta gradualmente hasta alcanzar aproximadamente 1000 W/m² a las 11:47:36, manteniéndose luego estable con ligeras oscilaciones hasta las 14:48:36, momento en el cual comienza a disminuir nuevamente hasta los 600 W/m² al final del período observado. Por otro lado, la altura manométrica, indicada por la línea naranja, empieza cerca de 45 m.c.a., sube levemente hasta aproximadamente 45.1 m.c.a. hacia las 09:00:46, y se mantiene relativamente constante con ligeras oscilaciones alrededor de 44.7 m.c.a. durante la mayor parte del día, mostrando una ligera tendencia descendente a partir de las 14:49:36, finalizando en aproximadamente 44.98 m.c.a. La estabilidad en la altura manométrica, a pesar de las variaciones significativas en la irradiancia, sugiere la eficacia de los mecanismos de control o regulación en el sistema hidráulico para mitigar los efectos de las fluctuaciones de irradiancia a lo largo del día.

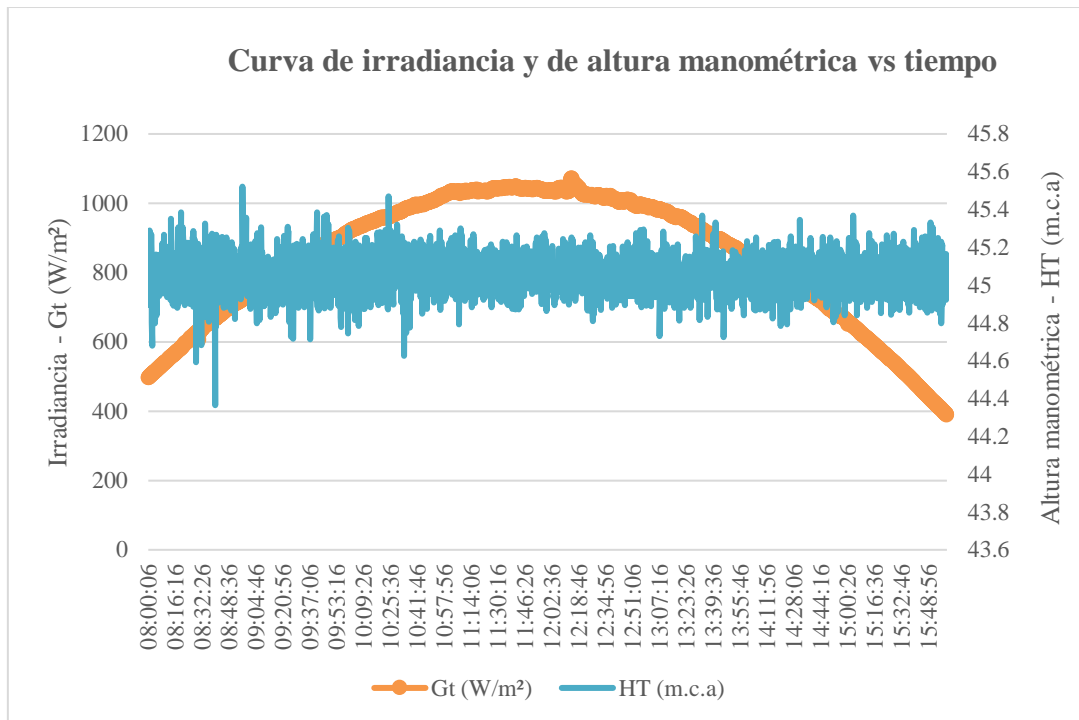


Figura 36. Comportamiento de la irradiancia y de altura manométrica vs tiempo a 45 m.c.a Stairs (Fuente propia).

b. Curva de irradiancia y de altura manométrica vs tiempo a 50 m.c.a.

El gráfico muestra la relación entre la irradiancia (Gt) en W/m^2 y la altura manométrica (HT) en m.c.a a lo largo de un día, desde las 08:00:07 hasta las 16:10:57. La irradiancia empieza en aproximadamente $600 W/m^2$ a las 08:00 y aumenta rápidamente, alcanzando un pico cercano a $1000 W/m^2$ entre las 10:00 y las 14:00, para luego descender gradualmente a unos $400 W/m^2$ al final del periodo. La altura manométrica comienza cerca de $49.9 m.c.a$ y se mantiene estable alrededor de $50.0 m.c.a$ con pequeñas fluctuaciones durante la mayor parte del día. A partir de las 14:30, muestra variaciones más pronunciadas y una tendencia decreciente, llegando a aproximadamente $49.2 m.c.a$ a las 16:10:57. La correlación sugiere que la irradiancia influye en la altura manométrica, con estabilidad durante las horas de alta irradiancia y una disminución posterior.

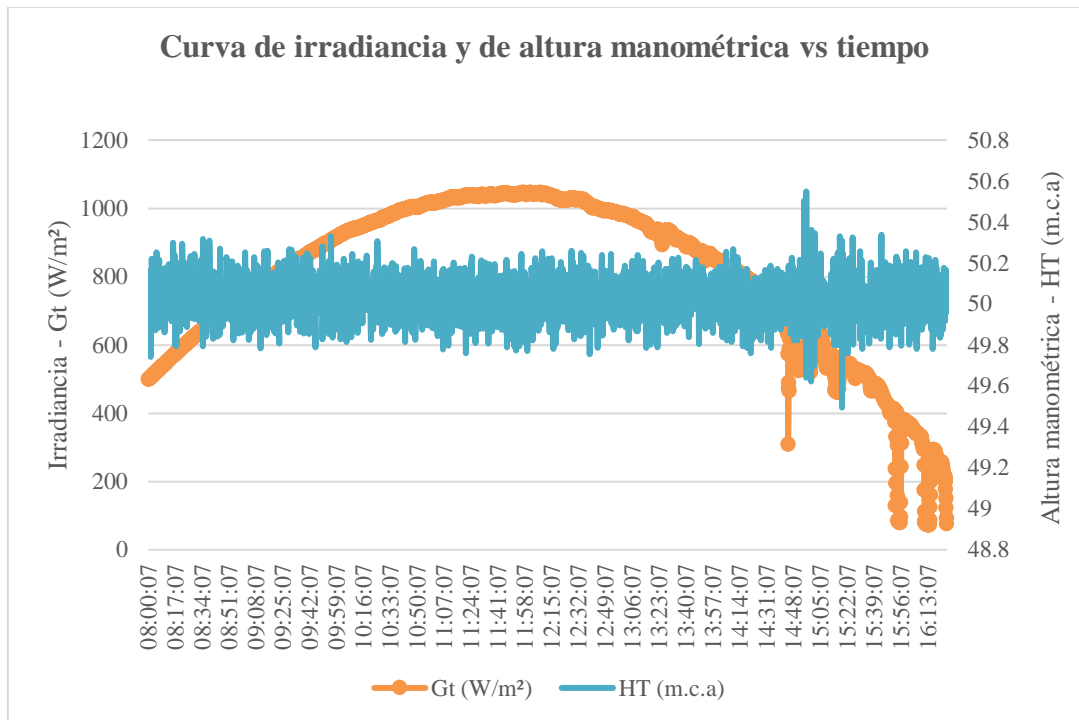


Figura 37. Comportamiento de la irradiancia y de altura manométrica vs tiempo a 50 m.c.a Stairs (Fuente propia).

c. Curva de irradiancia y de altura manométrica vs tiempo a 55 m.c.a.

El gráfico muestra la relación entre la irradiancia (Gt) en W/m^2 y la altura manométrica (HT) en m.c.a a lo largo de un día, desde las 08:00:03 hasta las 16:16:03. La irradiancia, representada por la línea azul, inicia alrededor de $600 W/m^2$ a las 08:00:03, subiendo rápidamente hasta alcanzar su punto máximo cercano a $1000 W/m^2$ entre las 10:30 y las 13:30, seguido de un descenso gradual, llegando a aproximadamente $500 W/m^2$ al final del periodo. La altura manométrica, mostrada por la línea naranja, comienza cerca de 55.3 m.c.a, fluctuando ligeramente entre 55.3 y 55.6 m.c.a hasta las 13:30. A partir de esta hora, se observan variaciones más pronunciadas y una tendencia descendente, disminuyendo a unos 53.5 m.c.a a las 16:16:03. Además, se notan picos significativos en la altura manométrica después de las 14:30, alcanzando valores máximos cercanos a 56.6 m.c.a antes de disminuir nuevamente. Estos datos indican una clara correlación entre la irradiancia y la altura manométrica, con estabilidad relativa en la HT durante las horas de alta irradiancia y una mayor variabilidad y disminución durante las horas de menor irradiancia.

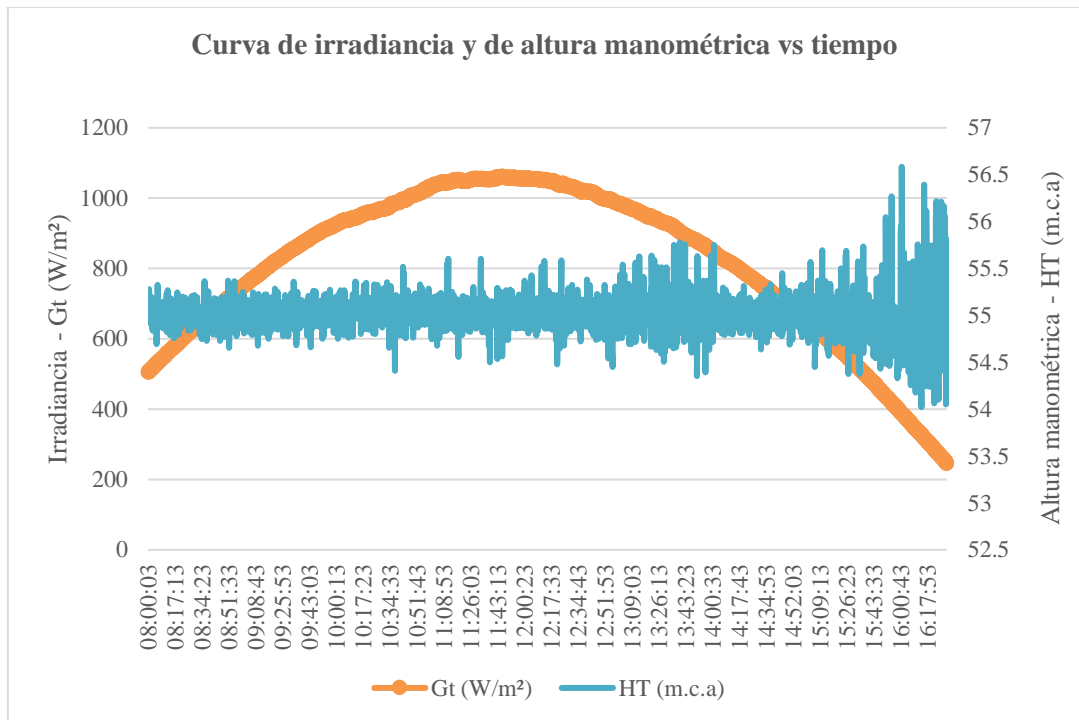


Figura 38. Comportamiento de la irradiancia y de altura manométrica vs tiempo a 55 m.c.a Stairs (Fuente propia).

a. Curva de irradiancia y caudal vs tiempo a 45 m.c.a

El gráfico muestra la relación entre la irradiancia (Gt) en W/m^2 y el caudal (Q) en m^3/h a lo largo de un día, desde las 08:00:06 hasta las 15:50:26. La irradiancia, representada por la línea azul, comienza alrededor de $200 W/m^2$ a las 08:00:06 y aumenta gradualmente, alcanzando su máximo cercano a $1000 W/m^2$ entre las 11:30 y las 13:00, para luego descender progresivamente hasta llegar a $0 W/m^2$ al final del periodo. El caudal, indicado por la línea naranja, inicia en aproximadamente $2 m^3/h$, incrementándose de manera constante hasta aproximadamente $5.5 m^3/h$ a las 11:00, manteniéndose relativamente estable con ligeras fluctuaciones durante el pico de irradiancia, y descendiendo nuevamente después de las 14:00 hasta llegar a $0 m^3/h$ a las 15:50:26. La correlación entre ambas variables es evidente, ya que el caudal aumenta y se estabiliza durante las horas de alta irradiancia y disminuye conforme la irradiancia disminuye. Los datos detallan cómo el caudal responde a los cambios en la irradiancia a lo largo del día, mostrando un comportamiento sincrónico entre las dos variables.

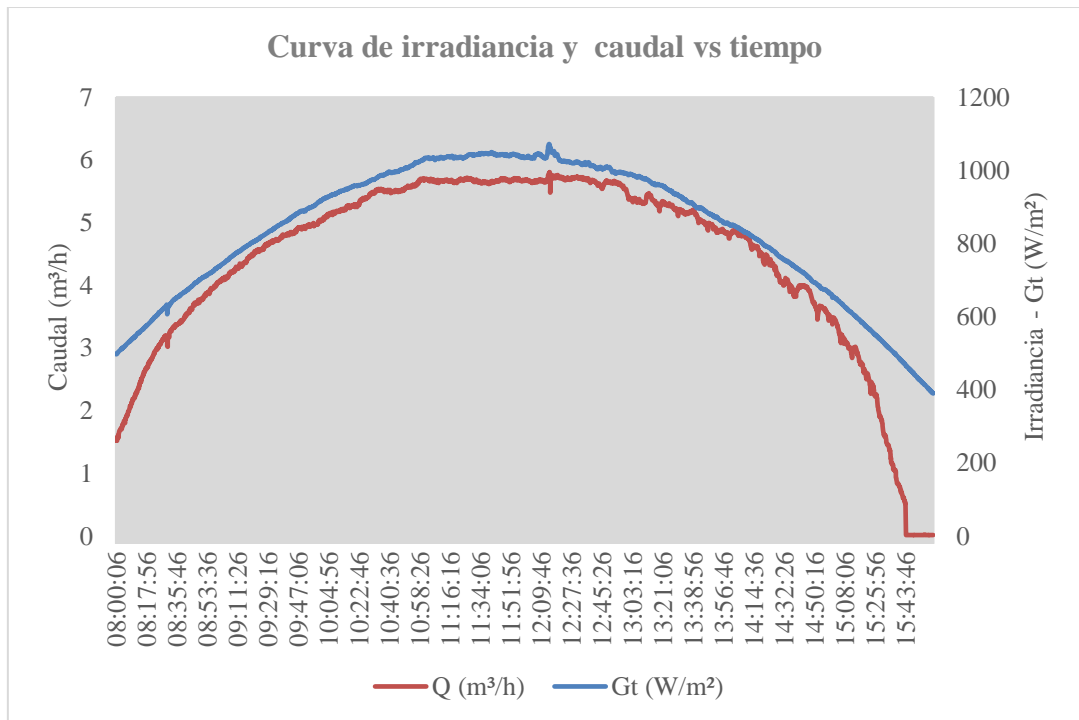


Figura 39. Comportamiento de la irradiancia y caudal vs tiempo a 45 m.c.a Stairs (Fuente propia).

b. Curva de irradiancia y caudal vs tiempo a 50 m.c.a

El gráfico muestra la relación entre el caudal (Q) en metros cúbicos por hora (m³/h) y la irradiancia global (Gt) en vatios por metro cuadrado (W/m²) en función del tiempo a lo largo del día, desde las 08:00:07 hasta las 16:13:07. En el eje izquierdo y derecho se encuentran las unidades de caudal y de irradiancia, respectivamente. El caudal, representado por la línea azul, empieza en aproximadamente 1 m³/h, aumentando progresivamente hasta alcanzar un máximo de cerca de 5 m³/h alrededor de las 12:00 horas, manteniéndose estable y luego disminuyendo rápidamente después de las 14:30 horas. La irradiancia, indicada por la línea naranja, sigue un patrón similar, comenzando en 0 W/m², incrementándose rápidamente hasta alrededor de 1000 W/m² aproximadamente a las 12:00 horas, y disminuyendo de manera brusca a partir de las 14:30 horas. Ambas curvas presentan un descenso notable después de este punto, con fluctuaciones más pronunciadas en la irradiancia durante el final del período observado.

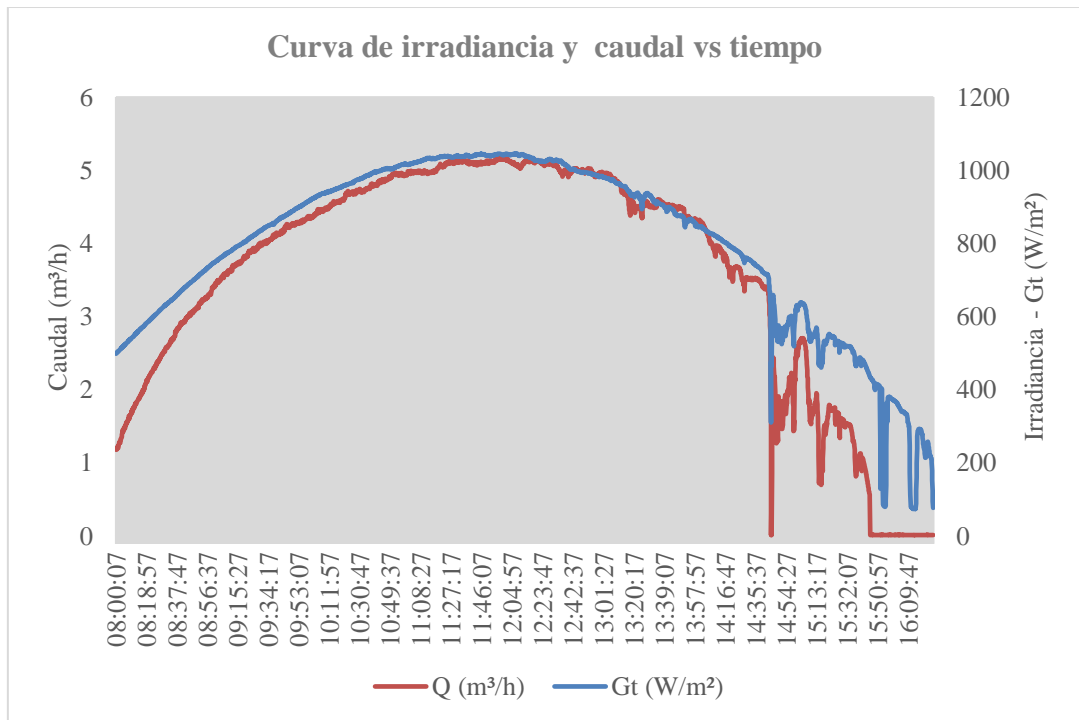


Figura 40. Comportamiento de la irradiancia y caudal vs tiempo a 50 m.c.a Stairs (Fuente propia).

c. Curva de irradiancia y caudal vs tiempo a 55 m.c.a

El gráfico muestra la relación entre el caudal (Q) en metros cúbicos por hora (m^3/h) y la irradiancia global (Gt) en vatios por metro cuadrado (W/m^2) en función del tiempo a lo largo del día, desde las 08:00:03 hasta las 16:20:03. En el eje izquierdo se representan los valores de caudal, mientras que en el eje derecho se indican los valores de irradiancia. El caudal, representado por la línea naranja, inicia cerca de 0 m^3/h , aumentando progresivamente hasta alcanzar un máximo de aproximadamente 4.5 m^3/h a las 12:33:03, manteniéndose estable durante varias horas antes de decrecer abruptamente después de las 14:44:33. Por otro lado, la irradiancia, indicada por la línea azul, empieza en 0 W/m^2 , incrementándose rápidamente hasta alrededor de 1000 W/m^2 a las 12:33:03, luego decrece gradualmente con fluctuaciones hasta llegar a 0 W/m^2 cerca de las 15:49:53, manteniéndose en ese nivel hasta el final del período observado. Ambas curvas reflejan una tendencia de aumento y luego disminución a lo largo del día, con el caudal mostrando un patrón más sostenido y la irradiancia presentando variaciones más marcadas en la fase de descenso.

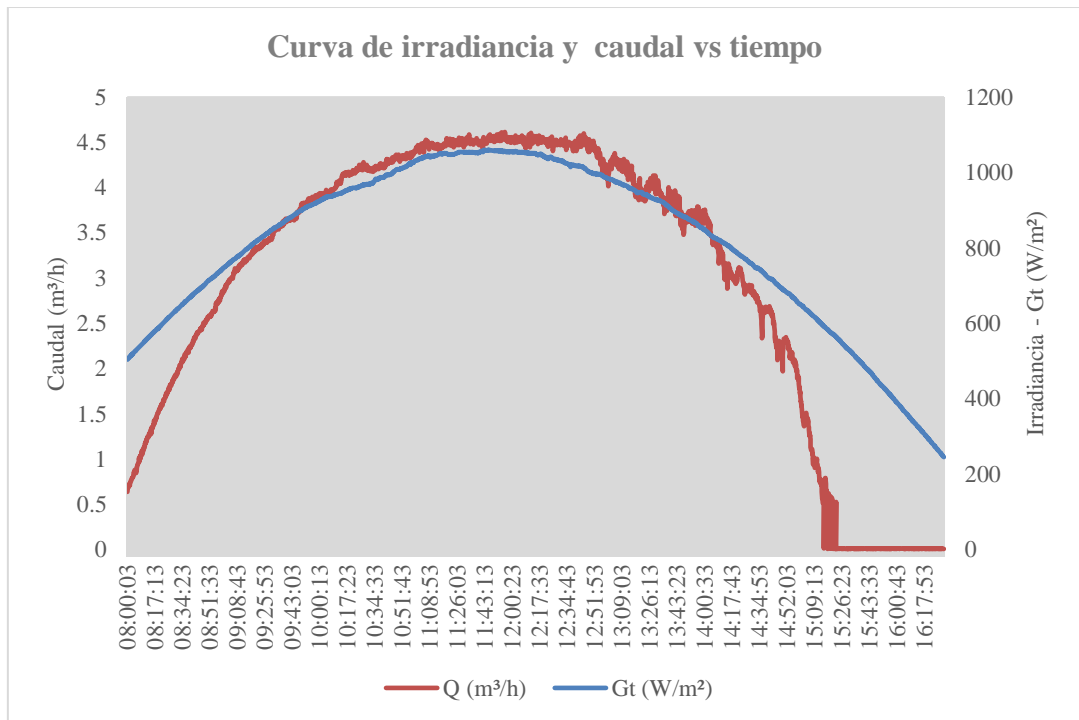


Figura 41. Comportamiento de la irradiancia y caudal vs tiempo a 55 m.c.a Stairs (Fuente propia).

a. Curva de irradiancia y tensión vs tiempo a 45 m.c.a de la bomba Stairs

El gráfico presenta una curva I-V (corriente-voltage) en función del tiempo, que abarca desde las 08:00:06 hasta las 15:49:26. Se muestran dos variables: la corriente (I_{cc}) medida en amperios (A) y el voltaje (V_{cc}) en voltios (V). El eje izquierdo indica la corriente, que varía entre 0 y 8 A, mientras que el eje derecho señala el voltaje, fluctuando entre 0 y 350 V. Inicialmente, la corriente comienza cerca de 4 A y aumenta hasta aproximadamente 7 A alrededor de las 08:30:26, manteniéndose estable hasta las 11:44:06, tras lo cual experimenta una ligera caída antes de estabilizarse nuevamente alrededor de las 13:00:26. Posteriormente, decrece gradualmente hasta las 15:49:26, donde termina cerca de 1 A. El voltaje, por otro lado, comienza alrededor de 325 V, descendiendo de manera gradual hasta alcanzar aproximadamente 275 V a las 11:00:26. Luego, sigue una tendencia relativamente estable con ligeras fluctuaciones hasta las 13:30:26, cuando empieza a descender de nuevo, llegando a aproximadamente 100 V al final del periodo. A lo largo del gráfico, se observa un punto de intersección alrededor de las 12:08:26, donde las curvas de corriente y voltaje se cruzan, indicando un cambio significativo en la relación entre estas dos variables.

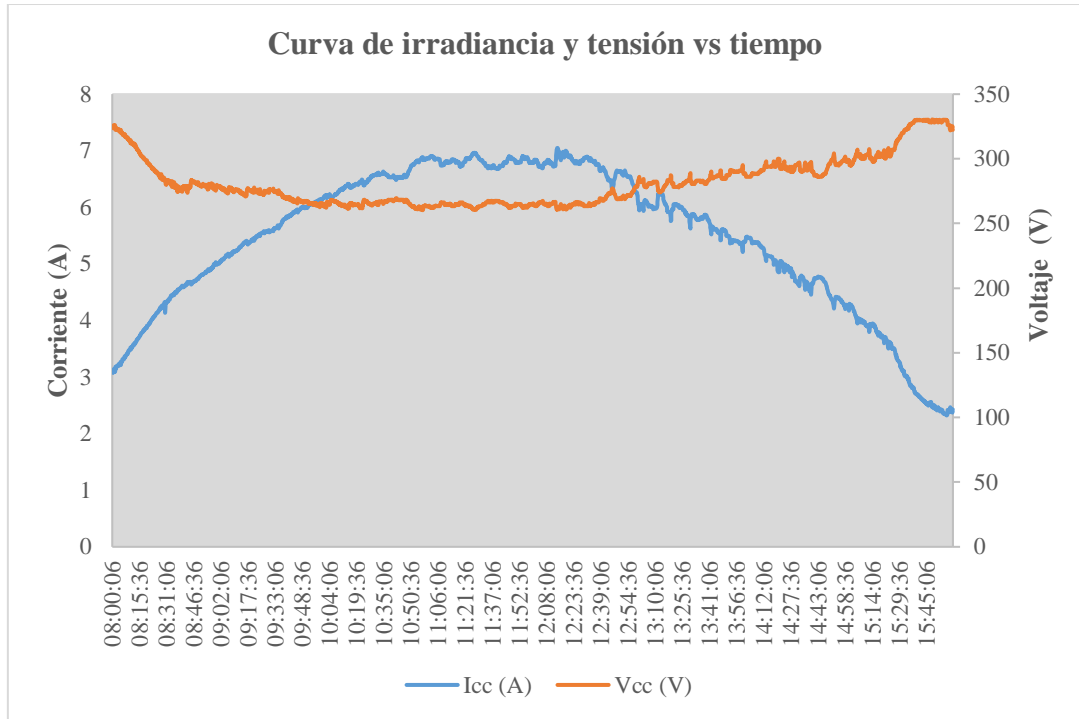


Figura 42. Comportamiento de corriente y tensión vs tiempo a 45 m.c.a Stairs (Fuente propia).

b. Curva de irradiancia y tensión vs tiempo a 50 m.c.a de la bomba Stairs

El gráfico presenta la evolución de la corriente (I_{cc}) en amperios (A) y el voltaje (V_{cc}) en voltios (V) a lo largo del tiempo, desde las 08:00:07 hasta las 16:10:47. En el eje izquierdo se representa la corriente, que varía de 0 a 8 A, mientras que en el eje derecho se muestra el voltaje, fluctuando entre 0 y 400 V. Inicialmente, la corriente comienza alrededor de 3 A y aumenta gradualmente hasta llegar a aproximadamente 7 A alrededor de las 10:45:07. Luego, la corriente se mantiene relativamente estable hasta las 13:00:07, momento en el cual comienza a disminuir, con una caída más pronunciada después de las 14:00:07 y una fluctuación notable hasta finalizar cerca de 0 A hacia el final del periodo. El voltaje, por otro lado, empieza alrededor de 350 V y presenta una tendencia descendente hasta estabilizarse cerca de los 300 V desde las 10:00:07 en adelante. Posteriormente, se observan fluctuaciones considerables en el voltaje a partir de las 14:00:07, con picos que superan los 300 V y caídas que alcanzan los 0 V hacia el final del periodo registrado.

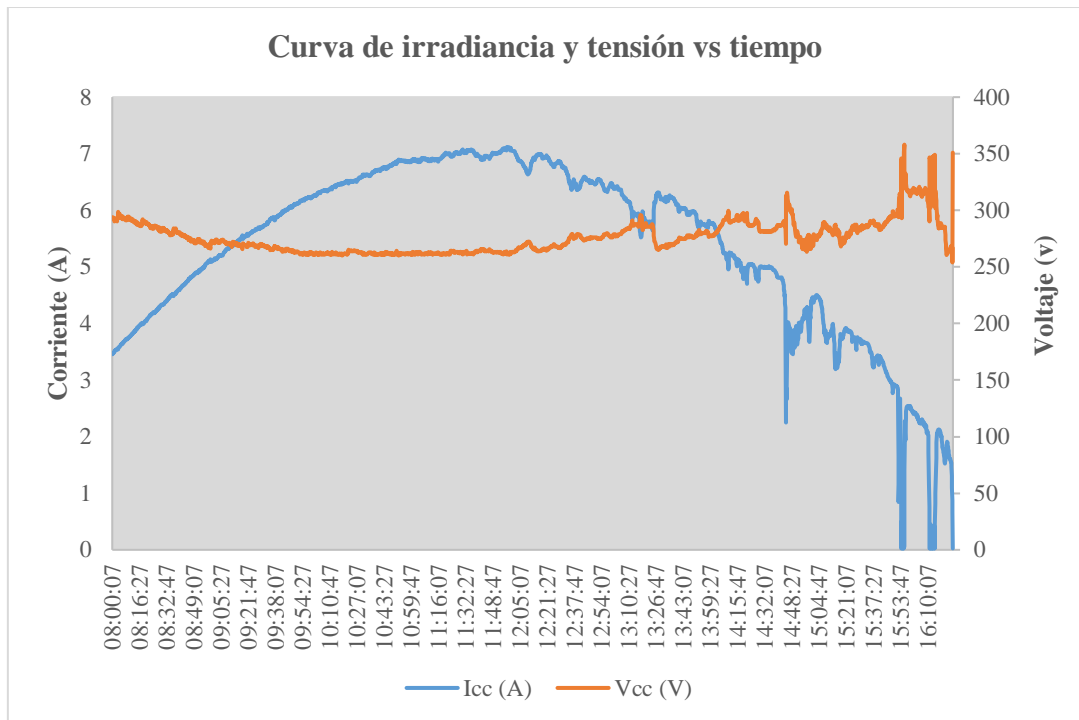


Figura 43. Comportamiento de corriente y tensión vs tiempo a 50 m.c.a Stairs (Fuente propia)

c. Curva de irradiancia y tensión vs tiempo a 55 m.c.a de la bomba Stairs

El gráfico muestra la evolución de la corriente (Icc) en amperios y la tensión (Vcc) en voltios a lo largo del tiempo desde las 08:00:03 hasta las 16:16:03. La corriente (representada por la línea azul) comienza en aproximadamente 5.7 A a las 08:00:03, aumentando gradualmente hasta alcanzar un pico cercano a los 6.9 A alrededor de las 11:50:33. Posteriormente, la corriente muestra una tendencia general decreciente, con fluctuaciones hasta llegar a un valor cercano a 0.7 A a las 16:16:03. La tensión (representada por la línea naranja) empieza en aproximadamente 305 V, y presenta una leve disminución inicial, seguida por una ligera recuperación y estabilización en torno a los 290-295 V hasta las 12:23:03. A partir de este punto, la tensión muestra una tendencia decreciente más pronunciada, con valores oscilando alrededor de 260 V antes de una disminución más marcada que la lleva a aproximadamente 70 V al final del periodo de observación.

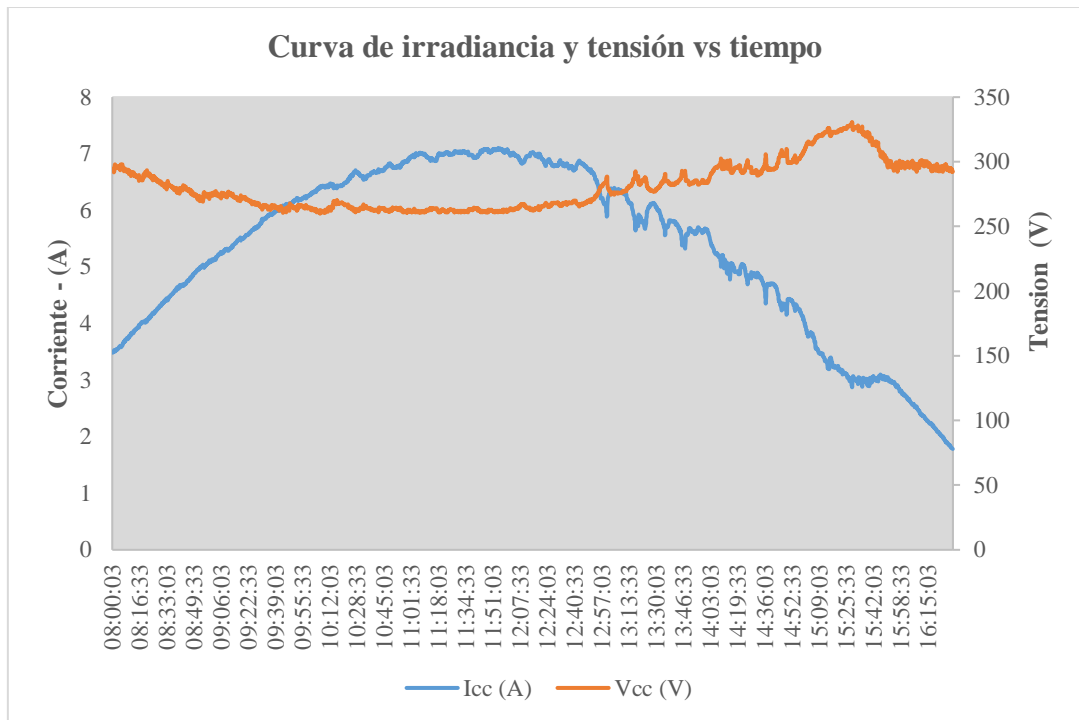


Figura 44. Comportamiento de corriente y tensión vs tiempo a 55 m.c.a Stairs (Fuente propia).

4.2.2 Diagramas de la bomba sumergible Pedrollo

Los diagramas de la bomba sumergible Pedrollo proporcionan una comprensión detallada de su rendimiento en comparación con la bomba Stairs, revelando diferencias clave en eficiencia y caudal en diversas condiciones operativas, como se muestran en las siguientes curvas.

a. Curva de potencia C.C. y eficiencia de bomba vs tiempo a 45 m.c.a

La gráfica presenta la relación entre la potencia de corriente continua (C.C.) y la eficiencia de una bomba a lo largo del tiempo, desde las 08:13:50 hasta las 16:06:50. En el eje vertical izquierdo se muestra la potencia C.C. en vatios (W), que varía de 0 a 1800 W, mientras que en el eje vertical derecho se representa la eficiencia de la bomba en porcentaje (%), que oscila entre 0% y 45%. La curva de potencia C.C. (línea azul) y la curva de eficiencia (línea naranja) están trazadas contra el tiempo en el eje horizontal. Inicialmente, la potencia C.C. y la eficiencia aumentan rápidamente desde las 08:13:50, alcanzando un pico alrededor de las 09:35:50 donde la potencia se estabiliza cerca de los 1600 W y la eficiencia alrededor del 35%. Este comportamiento se mantiene con pequeñas fluctuaciones hasta aproximadamente las 15:00:00, donde ambas curvas comienzan a descender de manera significativa.

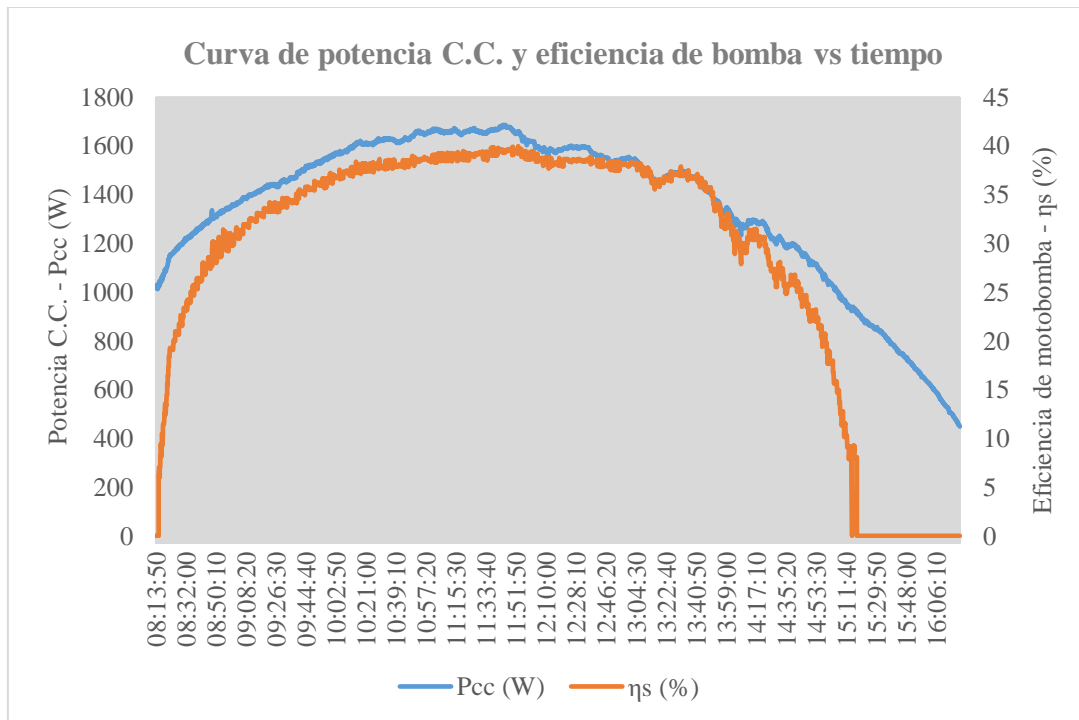


Figura 45. Comportamiento de la potencia c.c. y eficiencia vs tiempo a 45 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2HP (Fuente propia).

b. Curva de potencia C.C. y eficiencia de bomba vs tiempo a 50 m.c.a

La gráfica muestra la evolución de la potencia en corriente continua (C.C.) en vatios (W) y la eficiencia de la bomba en porcentaje (%) en función del tiempo, comprendido desde las 08:29:04 hasta las 15:21:34. La curva azul, que representa la potencia eléctrica (Pcc), comienza con valores cercanos a 0 W y experimenta un incremento progresivo hasta alcanzar su primer pico significativo alrededor de las 10:00:00, donde se aproxima a los 1600 W. Posteriormente, entre las 10:00:00 y las 13:30:00, la potencia mantiene una variación dentro de un rango relativamente estable, fluctuando entre 1200 W y 1700 W, aunque con ligeras caídas y picos intermitentes. Tras las 13:30:00, se observa una tendencia decreciente en la potencia, bajando hasta aproximadamente 800 W a las 15:21:34, momento en que la curva termina su recorrido. Por otro lado, la curva naranja, que corresponde a la eficiencia de la bomba (η), comienza a incrementarse de manera constante en las primeras horas del día, alcanzando un máximo cercano al 30% alrededor de las 10:00:00, momento en que se estabiliza por un breve período. No obstante, a partir de este punto, la eficiencia empieza a mostrar fluctuaciones abruptas. Entre las 10:30:00 y 15:00:00, se pueden apreciar descensos significativos en la eficiencia, con caídas pronunciadas que la llevan en múltiples ocasiones por debajo del 15%, y en algunos

casos extremos, por debajo del 5%. En contraste con la estabilidad relativa de la potencia, la eficiencia muestra una variabilidad mucho mayor, con comportamientos erráticos a lo largo del día. Esta fluctuación en la eficiencia, a menudo independiente de los cambios en la potencia, podría estar relacionada con factores internos del sistema de bombeo, tales como pérdidas mecánicas, variaciones en la carga hidráulica o el desempeño del motor bajo diferentes condiciones operativas, lo que sugiere la necesidad de un análisis más profundo para optimizar el rendimiento general del sistema.

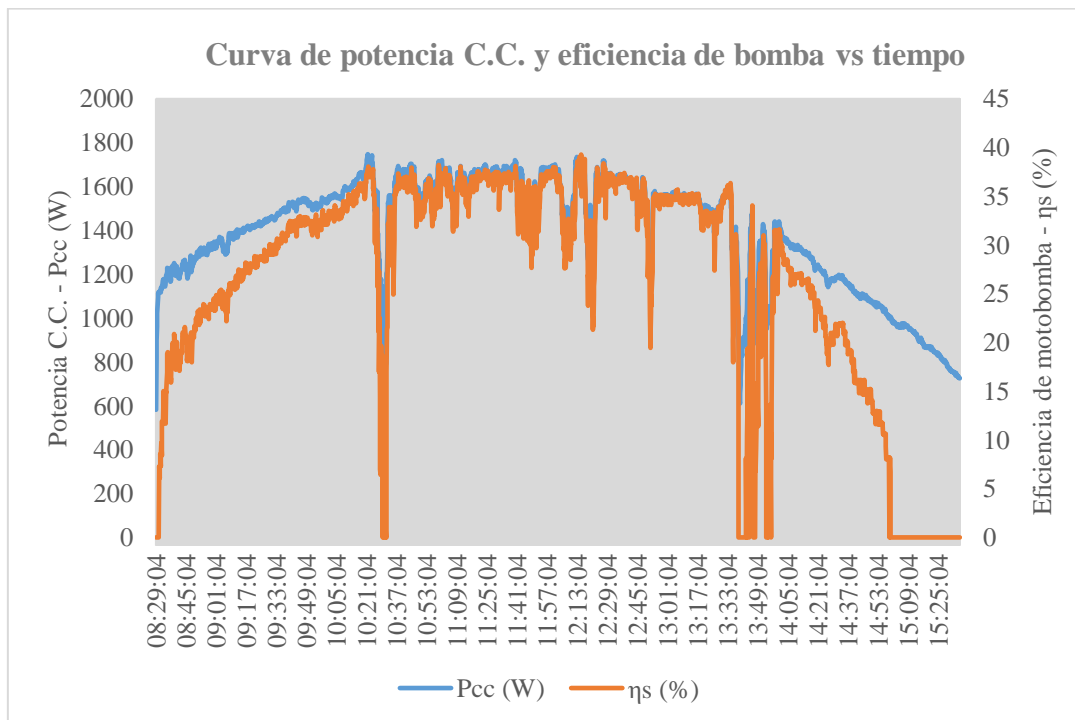


Figura 46. Comportamiento de la potencia c.c. y eficiencia vs tiempo a 50 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2HP (Fuente propia).

c. Curva de potencia C.C. y eficiencia de bomba vs tiempo a 55 m.c.a

La curva de potencia Pcc, representada en color azul, muestra un incremento gradual desde las 08:05:48, alcanzando un pico de aproximadamente 1600 W entre las 13:35:48 y las 14:05:48, seguido de una disminución hasta cerca de 0 W alrededor de las 16:20:48. Inicialmente, la potencia muestra pequeñas fluctuaciones hasta las 09:05:48, después de lo cual comienza un ascenso más pronunciado hasta las 12:05:48, momento en el cual se estabiliza con ligeras variaciones hasta el descenso final iniciado alrededor de las 14:35:48. La eficiencia de la bomba, representada en color naranja, inicia en 0% a las 08:05:48 y presenta un aumento abrupto hasta cerca del 25% alrededor de las 09:05:48. A partir de ahí, la eficiencia muestra una

tendencia ascendente con varias fluctuaciones hasta alcanzar su máximo cercano al 32% entre las 12:05:48 y las 13:35:48. Posteriormente, la eficiencia desciende gradualmente hasta llegar nuevamente a 0% alrededor de las 16:20:48.

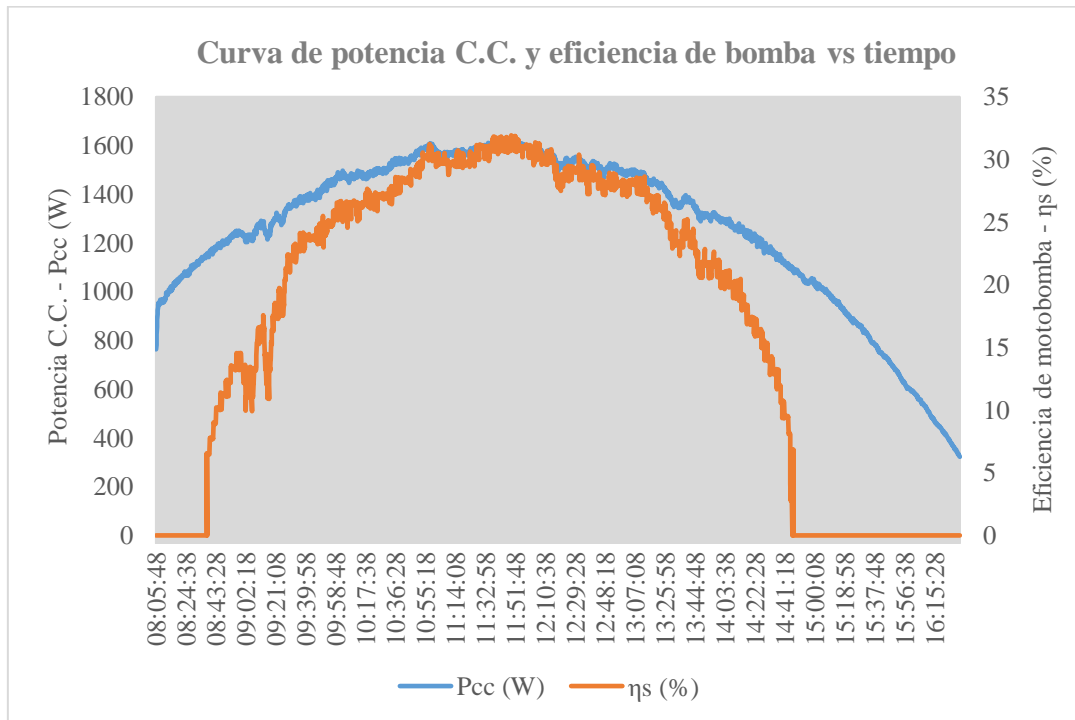


Figura 47. Comportamiento de la potencia c.c. y eficiencia vs tiempo a 55 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2HP (Fuente propia).

a. Curva de tensión C.C. y temperatura del módulo vs tiempo a 45 m.c.a

La figura 48 ilustra la relación entre la potencia en corriente continua (C.C.), medida en vatios (W), y la eficiencia de una bomba en porcentaje (%), a lo largo de un período de tiempo que abarca desde las 08:05:48 hasta las 16:13:18. En el eje vertical izquierdo se observa la potencia, que varía entre 0 W y 1800 W, mientras que el eje vertical derecho indica la eficiencia de la bomba, con un rango que va de 0% a 35%. La curva azul, que representa la potencia (Pcc), muestra un incremento gradual en las primeras horas, comenzando alrededor de 0 W y llegando a aproximadamente 1400 W entre las 10:00:00 y las 13:00:00, manteniéndose en este rango durante un periodo relativamente estable. A partir de las 13:00:00, la potencia comienza a decrecer de manera constante, cayendo abruptamente a 0 W poco después de las 15:40:00. Por otro lado, la curva naranja, que indica la eficiencia de la bomba (η), comienza en 0% y sube de manera abrupta hasta un valor cercano al 30% a las 09:30:00. A partir de ese punto, la eficiencia presenta fluctuaciones menores, manteniéndose por encima del 25% hasta aproximadamente las 12:00:00. Después

de este pico, la eficiencia comienza a decaer gradualmente, siguiendo una tendencia similar a la de la potencia, disminuyendo de manera más significativa a partir de las 13:00:00 hasta caer por debajo del 10% después de las 14:30:00. Finalmente, al igual que la potencia, la eficiencia llega a 0% hacia las 15:50:00. El comportamiento de ambas curvas sugiere una correlación directa entre la potencia suministrada y la eficiencia del sistema de bombeo, con una estabilidad en ambos parámetros durante la mayor parte del día, seguida de una disminución notable hacia el final del período observado.

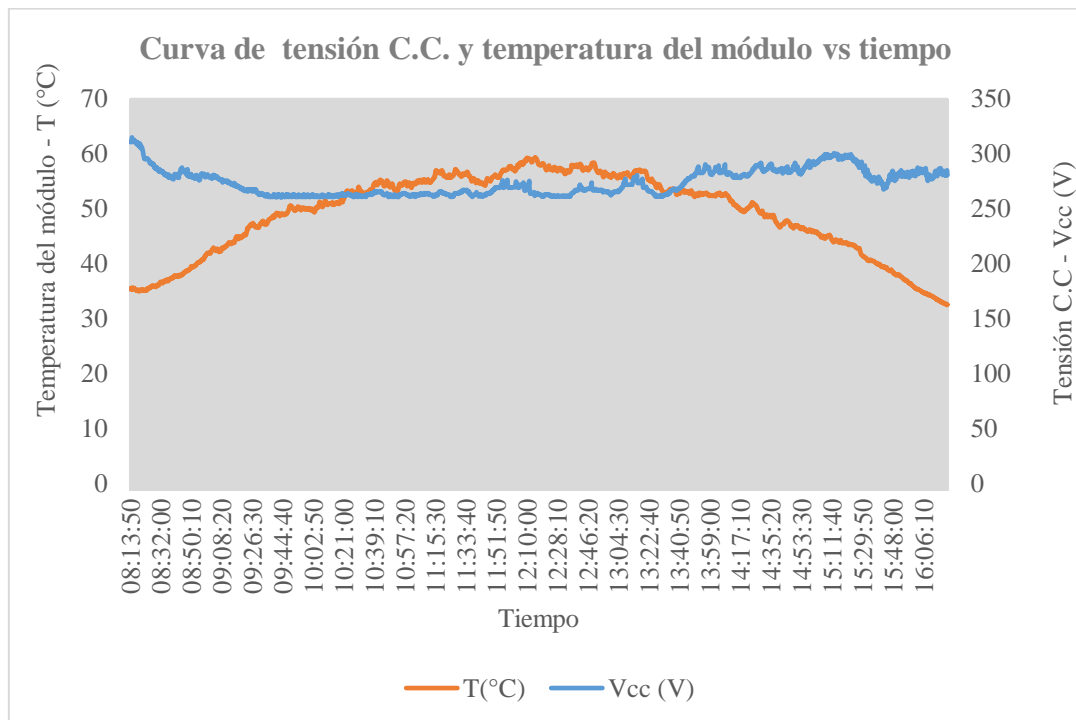


Figura 48. Comportamiento de la tensión c.c. y temperatura del módulo vs tiempo a 45 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2HP (Fuente propia).

b. Curva de tensión C.C. y temperatura del módulo vs tiempo a 50 m.c.a

En la figura, se aprecia que la temperatura del módulo comienza alrededor de los 40°C y experimenta un incremento gradual hasta superar los 60°C alrededor de las 09:00, manteniéndose relativamente constante con ligeras fluctuaciones durante el resto del período de observación. Por otro lado, la tensión de corriente continua inicia en aproximadamente 300V, mostrando una tendencia ligeramente descendente hasta estabilizarse en torno a los 250V hacia el final del período. Notablemente, se observan pequeñas fluctuaciones en ambos parámetros, pero la temperatura del módulo parece estar más influenciada por los cambios ambientales o del sistema,

mientras que la tensión de corriente continua presenta una disminución progresiva más estable.

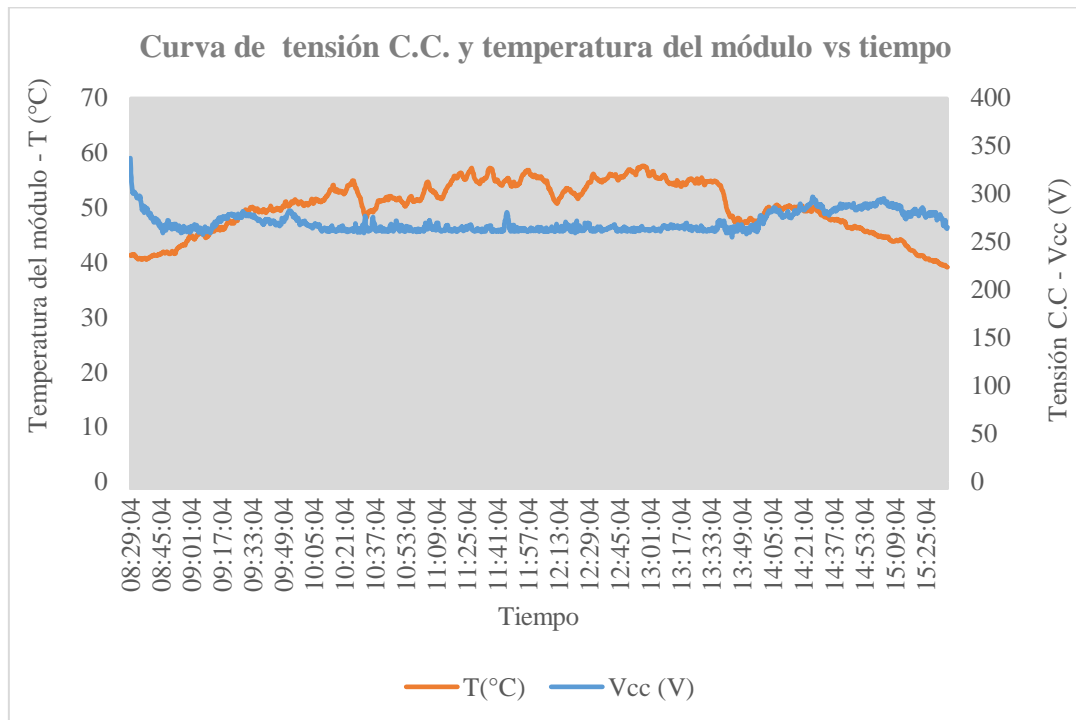


Figura 49. Comportamiento de la tensión c.c. y temperatura del módulo vs tiempo a 50 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2HP (Fuente propia).

c. Curva de tensión C.C. y temperatura del módulo vs tiempo a 55 m.c.a

La imagen que muestra la evolución de la temperatura del módulo (T en °C) y la tensión de corriente continua (Vcc en V) a lo largo del tiempo. En el eje horizontal, se registra el tiempo en intervalos de aproximadamente 30 minutos, comenzando a las 08:05:48 y finalizando a las 16:25:48. El eje vertical izquierdo representa la temperatura del módulo, con un rango de 0°C a 60°C, mientras que el eje vertical derecho muestra la tensión de corriente continua, con un rango de 0V a 350V. Las dos variables están diferenciadas por colores: la temperatura del módulo se muestra con una línea naranja y la tensión de corriente continua con una línea azul. La temperatura del módulo empieza alrededor de 40°C, aumentando rápidamente en las primeras horas hasta estabilizarse alrededor de los 50°C, con ligeras oscilaciones a lo largo del día. Por su parte, la tensión de corriente continua inicia cerca de los 300V, manteniéndose relativamente constante hasta aproximadamente las 14:00, cuando empieza a decrecer progresivamente, alcanzando cerca de 200V al final del período observado. Es destacable que, mientras la temperatura del módulo se mantiene relativamente estable tras el incremento inicial, la tensión de corriente

continua muestra una tendencia descendente más marcada a partir del mediodía, sugiriendo una posible correlación inversa entre estos dos parámetros a lo largo del tiempo de observación.

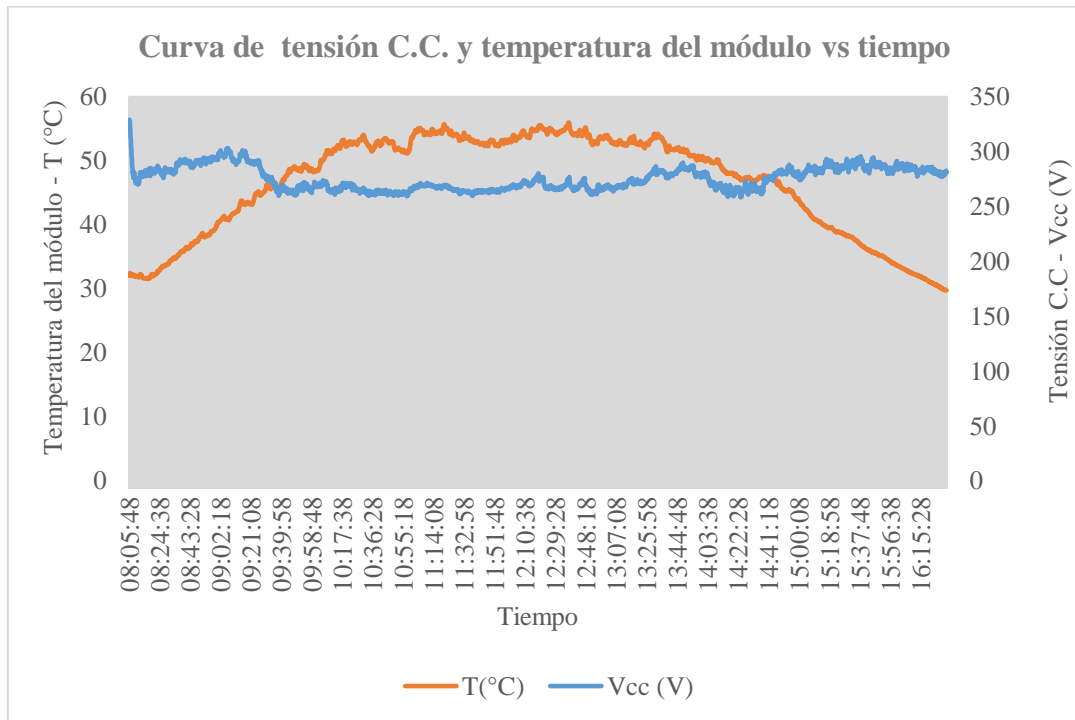


Figura 50. Comportamiento de la tensión c.c. y temperatura del módulo vs tiempo a 55 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2HP (Fuente propia).

a. Curva da potencia C.C vs irradiancia a 45 m.c.a

La gráfica presenta la relación entre la potencia de corriente continua (C.C.) medida en vatios (W) y la irradiancia medida en vatios por metro cuadrado (W/m²). La gráfica muestra que a medida que la irradiancia aumenta desde 0 W/m² hasta cerca de 1000 W/m², la potencia C.C. también incrementa. Al inicio, con irradiancias bajas de hasta 200 W/m², la potencia C.C. se encuentra por debajo de los 400 W. Entre 200 W/m² y 600 W/m² de irradiancia, la potencia aumenta significativamente de 400 W a aproximadamente 1200 W, evidenciando una relación casi lineal. Desde 600 W/m² hasta cerca de 1000 W/m², la potencia alcanza valores máximos de alrededor de 1600 W, aunque con algunas oscilaciones que sugieren variaciones en la eficiencia del sistema. En resumen, la gráfica ilustra que la potencia C.C. aumenta con la irradiancia, con una tasa de incremento más notable en los rangos medios de irradiancia.

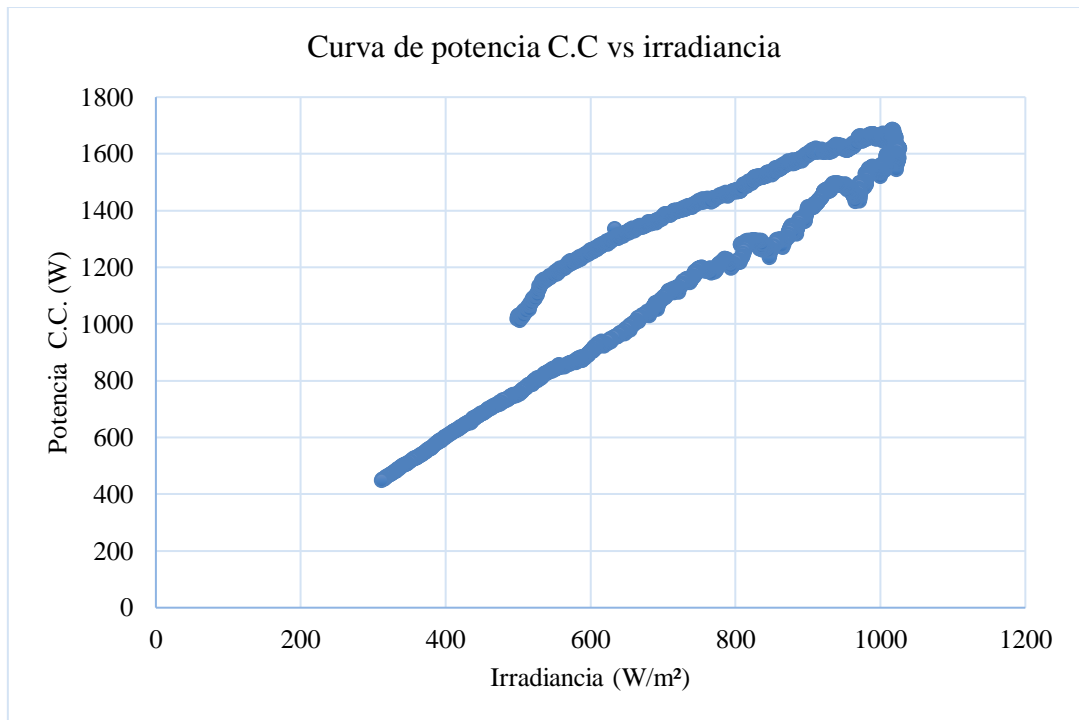


Figura 51. Comportamiento de la potencia c.c vs irradiancia a 45 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2HP (Fuente propia).

b. Curva de potencia C.C vs irradiancia a 50 m.c.a

La gráfica muestra una relación positiva entre la potencia de corriente continua (C.C.) en vatios y la irradiancia en vatios por metro cuadrado (W/m²). En niveles bajos de irradiancia (0-200 W/m²), la potencia C.C. varía de 0 a 400 W con una gran dispersión de datos. A medida que la irradiancia aumenta de 200 a 400 W/m², la potencia se incrementa entre 400 y 800 W, mostrando una tendencia más lineal. Entre 400 y 600 W/m², la potencia sube a 800-1200 W con menor dispersión. Para irradiancias de 600 a 1000 W/m², la potencia alcanza 1200-1600 W, manteniendo una relación lineal con ligeras fluctuaciones. En niveles máximos de irradiancia cercanos a 1000 W/m², la potencia se aproxima a 1780 W con mínima dispersión, indicando un rendimiento más consistente del sistema en alta irradiancia

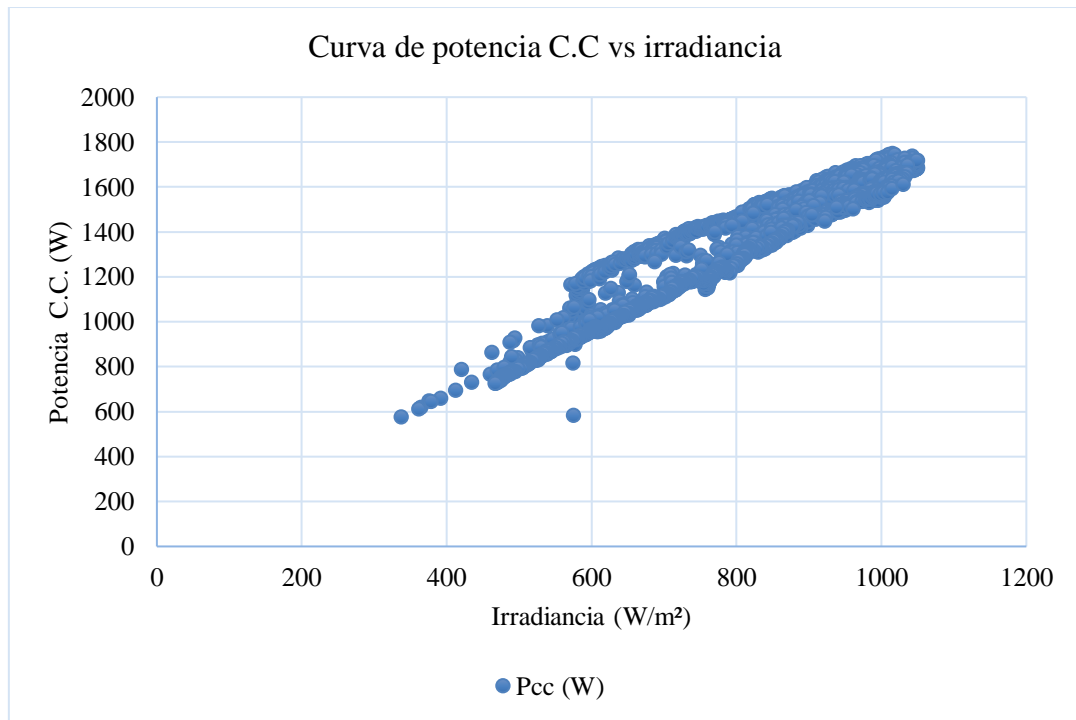


Figura 52. Comportamiento de la potencia c.c vs irradiancia a 50 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2HP (Fuente propia).

c. Curva de potencia C.C vs irradiancia a 55 m.c.a

La imagen muestra una gráfica de dispersión que relaciona la potencia de corriente continua (C.C) en vatios (W) con la irradiancia en vatios por metro cuadrado (W/m^2). El eje horizontal representa la irradiancia con valores que van desde 0 hasta 1000 W/m^2 , mientras que el eje vertical representa la potencia C.C. en un rango de 0 a 1800 W. Los datos se distribuyen de manera creciente en forma de una curva que tiende a ser aproximadamente lineal, especialmente en el intervalo de irradiancia que va desde los 0 hasta los 800 W/m^2 , donde la potencia se incrementa de manera proporcional con la irradiancia. Al observar los detalles de los puntos de datos, se puede notar un aumento sostenido en la potencia conforme la irradiancia también aumenta, indicando una clara dependencia de la potencia generada en función de la irradiancia recibida. En los niveles más bajos de irradiancia, aproximadamente entre 0 y 200 W/m^2 , la potencia es menor a los 200 W, mientras que al alcanzar niveles superiores de irradiancia, alrededor de los 1000 W/m^2 , la potencia se aproxima a 1600 W. La dispersión de los puntos es mínima, lo que sugiere una relación consistente entre ambas variables. Sin embargo, se observa un ligero desvío o fluctuación en la curva alrededor de los 700 W/m^2 de irradiancia, lo cual podría

indicar alguna variabilidad en las mediciones o en las condiciones operativas de los equipos.

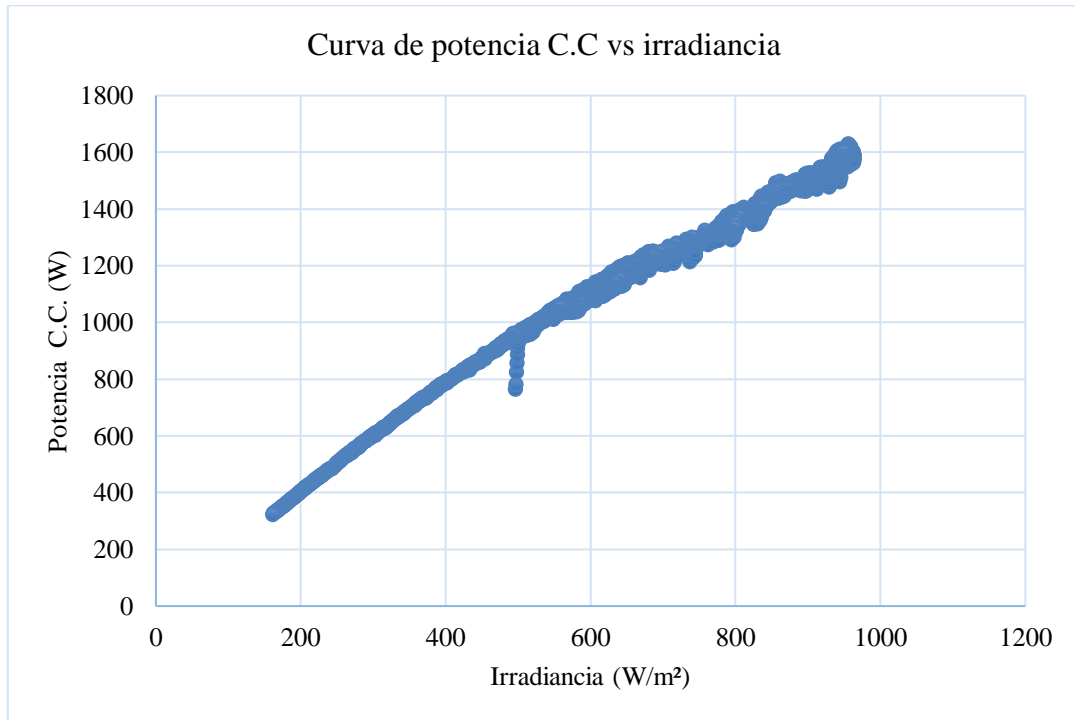


Figura 53. Comportamiento de la potencia c.c vs irradiancia a 55 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2HP (Fuente propia).

a. Curva de caudal vs potencia C.C. a 45 m.c.a

La figura 54 muestra la relación entre el caudal, en metros cúbicos por hora (m^3/h), y la potencia en corriente continua (C.C.), expresada en vatios (W). El eje horizontal abarca de 0 a 1800 W, mientras que el eje vertical cubre de 0 a 6 m^3/h . Los datos se dividen en dos secciones. En la primera, desde 0 hasta aproximadamente 800 W, el caudal se mantiene prácticamente en 0 m^3/h , lo que indica que no se genera flujo significativo en este rango de potencia. Esto sugiere que el sistema requiere superar un umbral de potencia para comenzar a operar eficientemente. A partir de los 800 W, el caudal empieza a incrementarse, aunque de manera muy leve al inicio. En la segunda sección, desde los 1000 W en adelante, el caudal aumenta notablemente con la potencia, exhibiendo un comportamiento exponencial. Al llegar a los 1400 W, el caudal supera los 4 m^3/h , y cuando la potencia alcanza los 1600 W, el caudal se aproxima a los 5 m^3/h . Este patrón revela que una vez que el sistema alcanza un nivel adecuado de potencia, la relación entre caudal y potencia se vuelve mucho más efectiva, con un incremento considerable en el flujo a medida que la potencia continúa subiendo. El comportamiento no lineal observado es importante para el

análisis de sistemas de bombeo u otros dispositivos dependientes de flujo de fluido y potencia aplicada, ya que indica que bajo condiciones de baja potencia no se genera caudal apreciable, pero al superar un umbral determinado, el caudal aumenta rápidamente.

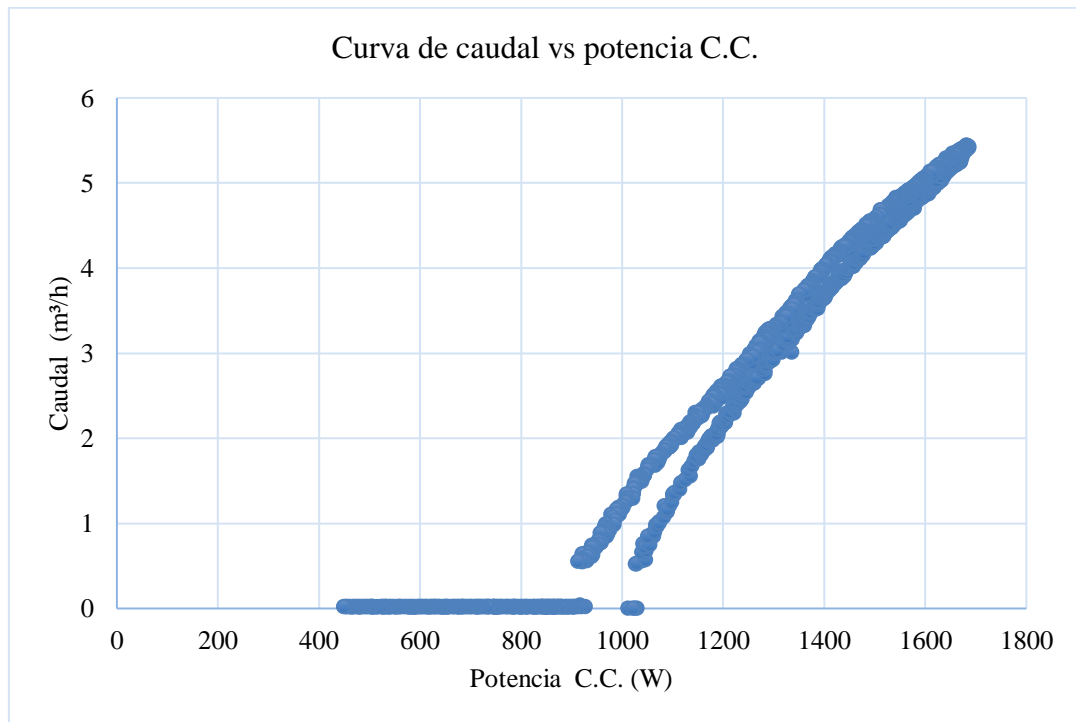


Figura 54. Comportamiento del caudal vs potencia c.c. a 45 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2HP (Fuente propia).

b. Curva de caudal vs potencia C.C. a 50 m.c.a

La figura 55 muestra la relación entre el caudal en metros cúbicos por hora (m^3/h) y la potencia en corriente continua (C.C.) en vatios (W). En el eje horizontal, la potencia C.C. se extiende desde 0 hasta 2000 W, mientras que el caudal en el eje vertical varía desde 0 hasta 6 m^3/h . Al analizar los datos, se observa que en los primeros 800 W, el caudal es prácticamente nulo, permaneciendo cercano a 0 m^3/h , lo que indica que el sistema no genera caudal significativo en este rango de potencia. A partir de aproximadamente 900 W, se empieza a detectar un incremento en el caudal, aunque inicialmente es leve y con algo de dispersión en los datos, mostrando valores que oscilan entre 0 y 1 m^3/h en este rango. A medida que la potencia C.C. continúa aumentando, se observa un cambio significativo en el comportamiento del caudal. A partir de los 1000 W, el caudal comienza a crecer de manera más pronunciada y constante, exhibiendo una tendencia claramente ascendente. Al llegar a los 1500 W, el caudal alcanza los 3 m^3/h , mientras que a los 1800 W se aproxima

a los 5 m³/h. El patrón de la curva indica un comportamiento exponencial en la relación entre el caudal y la potencia, lo que sugiere que, una vez superado un umbral crítico de potencia, el sistema incrementa su eficiencia hidráulica, generando un caudal cada vez mayor a medida que se incrementa la potencia aplicada.

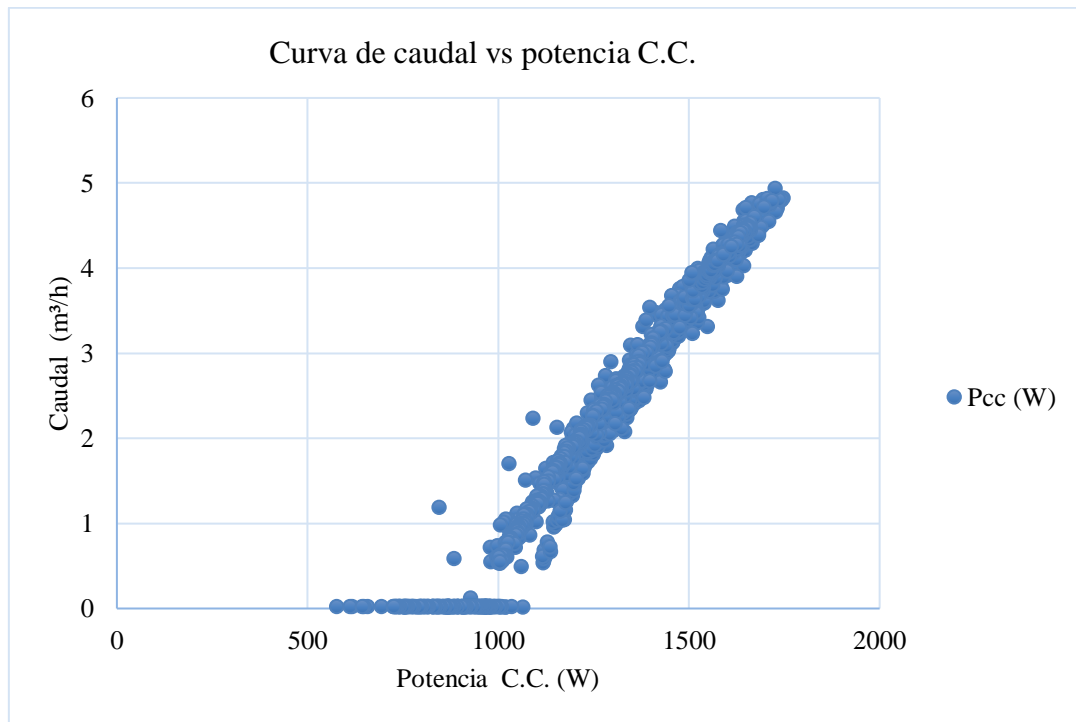


Figura 55. Comportamiento del caudal vs potencia c.c. a 50 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2HP (Fuente propia).

c. Curva de caudal vs potencia C.C. a 55 m.c.a

La figura 56 muestra la relación entre el caudal (en metros cúbicos por hora, m³/h) y la potencia de corriente continua (C.C.) en vatios (W). El título de la gráfica indica que se trata de una “Curva de caudal vs potencia C.C.” El eje horizontal está etiquetado como “Potencia C.C. (W)”, con un rango que se extiende desde 0 hasta 1800 W. Por otro lado, el eje vertical está etiquetado como “Caudal (m³/h)”, con un rango que va desde 0 hasta 4 m³/h. Los puntos de datos muestran una tendencia bastante clara: hasta aproximadamente los 1000 W, el caudal es prácticamente nulo, es decir, se observa una zona horizontal cercana a 0 m³/h. Este comportamiento sugiere que hasta cierto punto de potencia no hay un caudal significativo o este es mínimo. A partir de los 1000 W, el caudal comienza a aumentar de manera acelerada y consistente. En este punto, los valores de caudal muestran una curva ascendente que alcanza un máximo cercano a los 3,5 m³/h cuando la potencia se aproxima a los 1600 W. La distribución de los puntos de datos en la gráfica parece ser bastante

densa, lo que indica que se han registrado múltiples mediciones en el intervalo entre 1000 y 1600 W. Este comportamiento podría estar asociado a un dispositivo que requiere una cierta cantidad mínima de energía para iniciar un flujo considerable de caudal, lo que sugiere la existencia de una relación no lineal entre la potencia y el caudal, especialmente en la primera parte de la curva. Una vez alcanzado el umbral de los 1000 W, la relación se vuelve aproximadamente lineal, como se aprecia en la inclinación de la curva desde ese punto en adelante. Esta relación es importante para sistemas que dependen de la potencia eléctrica para generar o mantener un flujo, como bombas o ventiladores en sistemas hidráulicos o neumáticos.

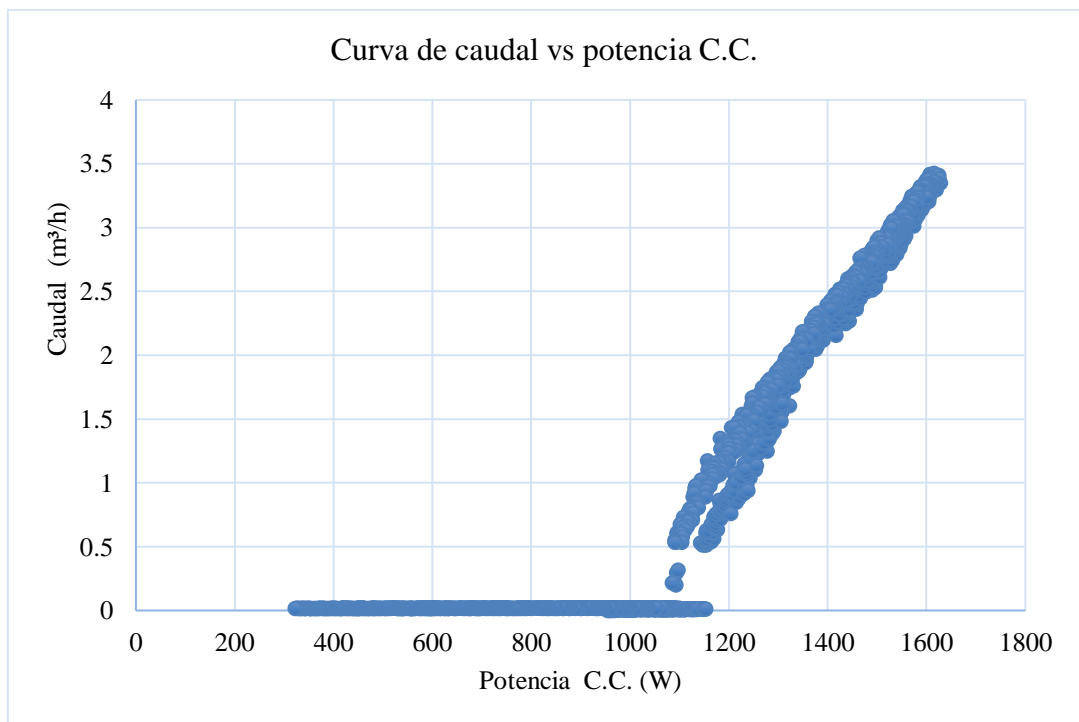


Figura 56. Comportamiento del caudal vs potencia c.c. a 55 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2HP (Fuente propia).

a. Curva de caudal y frecuencia vs tiempo a 45 m.c.a

La gráfica muestra el comportamiento del caudal (Q) en metros cúbicos por hora (m^3/h) y la frecuencia (F) en hertzios (Hz) a lo largo de un día, abarcando el periodo desde las 08:13:50 hasta las 16:06:20. En cuanto al caudal, se observa un aumento rápido desde 0 hasta aproximadamente $5 m^3/h$ alrededor de las 09:00, seguido por un periodo de estabilidad, donde el caudal se mantiene en torno a ese valor con pequeñas fluctuaciones. A partir de las 14:00, el caudal comienza a disminuir de forma gradual, y esta tendencia descendente se acentúa hasta llegar a prácticamente $0 m^3/h$ cerca de las 15:50. En paralelo, la frecuencia se mantiene constante durante gran parte del

tiempo, con valores ligeramente superiores a 50 Hz, pero al igual que el caudal, comienza a decrecer levemente después de las 14:00. Esta disminución se intensifica a partir de las 15:00, y hacia las 15:50 la frecuencia cae bruscamente a alrededor de 30 Hz. Este comportamiento sugiere una relación entre la frecuencia y el caudal, donde la reducción en la frecuencia parece coincidir con la disminución del caudal, lo que podría reflejar la interacción de ambos parámetros en un sistema controlado por frecuencia, como una bomba o dispositivo similar que ajuste el caudal en función de los cambios en la frecuencia.

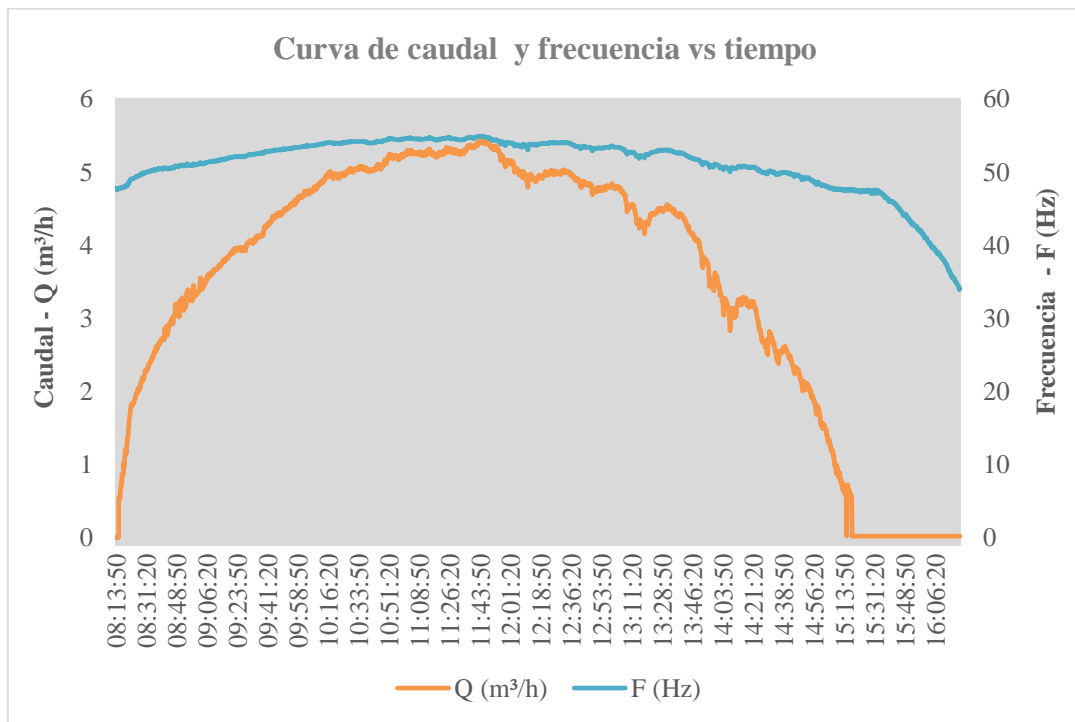


Figura 57. Comportamiento del caudal y frecuencia vs tiempo a 45 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2HP (Fuente propia).

b. Curva de caudal y frecuencia vs tiempo a 50 m.c.a

La gráfica presentada muestra la relación entre el caudal (Q) en metros cúbicos por hora (m³/h) y la frecuencia (F) en hertzios (Hz) a lo largo de un intervalo de tiempo que abarca desde las 08:29:04 hasta las 15:22:04. En el eje izquierdo, se representa el caudal, con un rango que va de 0 a 6 m³/h, mientras que en el eje derecho se muestra la frecuencia, que varía entre 0 y 70 Hz. A lo largo del tiempo, el comportamiento del caudal muestra una fase inicial de aumento progresivo desde valores cercanos a 0 m³/h hasta aproximadamente 4 m³/h entre las 09:00 y las 09:45. Luego, el caudal se mantiene relativamente estable alrededor de los 4 m³/h, con algunas fluctuaciones importantes, especialmente entre las 10:00 y las 13:00, donde

se registran varias caídas abruptas y recuperaciones rápidas del flujo. En cuanto a la frecuencia, ésta inicia con valores cercanos a los 50 Hz y se mantiene bastante estable durante las primeras horas del gráfico. Sin embargo, alrededor de las 13:00, se observa un incremento repentino, alcanzando cerca de los 65 Hz. Después de este aumento, la frecuencia vuelve a estabilizarse en torno a los 60 Hz hasta el final del intervalo de tiempo. A partir de las 13:30, el caudal empieza a experimentar una tendencia descendente, coincidiendo con ciertas fluctuaciones de la frecuencia, que podrían estar relacionadas con ajustes o variaciones en el sistema. Hacia las 15:00, el caudal cae bruscamente a valores cercanos a 0 m³/h, lo que podría indicar una interrupción o cese en el flujo, mientras que la frecuencia también muestra una disminución significativa, aunque menos drástica que el caudal.

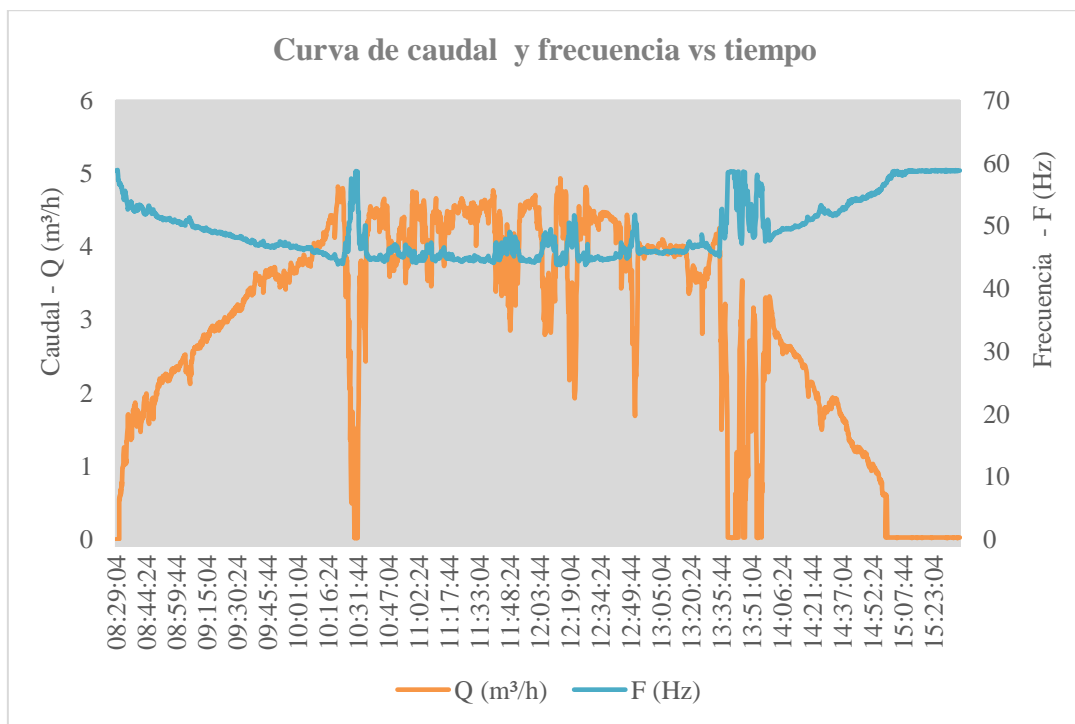


Figura 58. Comportamiento del caudal y frecuencia vs tiempo a 50 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2HP (Fuente propia).

c. Curva de caudal y frecuencia vs tiempo a 55 m.c.a

La gráfica muestra el comportamiento del caudal (Q) en metros cúbicos por hora (m³/h) y la frecuencia (F) en hertzios (Hz) a lo largo del tiempo, desde las 08:05:48 hasta las 16:15:28. En el eje izquierdo se observa el caudal, que varía entre 0 y 4 m³/h, mientras que en el eje derecho se presenta la frecuencia, fluctuando entre 0 y 60 Hz. La curva naranja, que representa el caudal, comienza cerca de 0 m³/h en la mañana, y aumenta de manera constante hasta alcanzar un máximo de

aproximadamente $3,5 \text{ m}^3/\text{h}$ a las 10:45. Después de este pico, se mantiene fluctuando ligeramente alrededor de este valor hasta las 14:03, cuando experimenta una caída rápida, alcanzando casi $0 \text{ m}^3/\text{h}$ a las 15:48. Por otro lado, la curva azul que indica la frecuencia empieza en 50 Hz, manteniéndose estable entre 50 y 55 Hz hasta las 14:43, para luego descender progresivamente, llegando a unos 35 Hz hacia el final del periodo representado. La relación entre el caudal y la frecuencia parece ser inversamente proporcional en algunos momentos, sobre todo al final de la jornada, donde ambos parámetros descienden simultáneamente. Esta representación sugiere que el sistema ajusta tanto el caudal como la frecuencia a lo largo del tiempo, probablemente en respuesta a cambios en las condiciones operativas, como podría ocurrir en un proceso industrial o hidráulico que requiere un control preciso de ambos factores para optimizar el rendimiento del sistema.

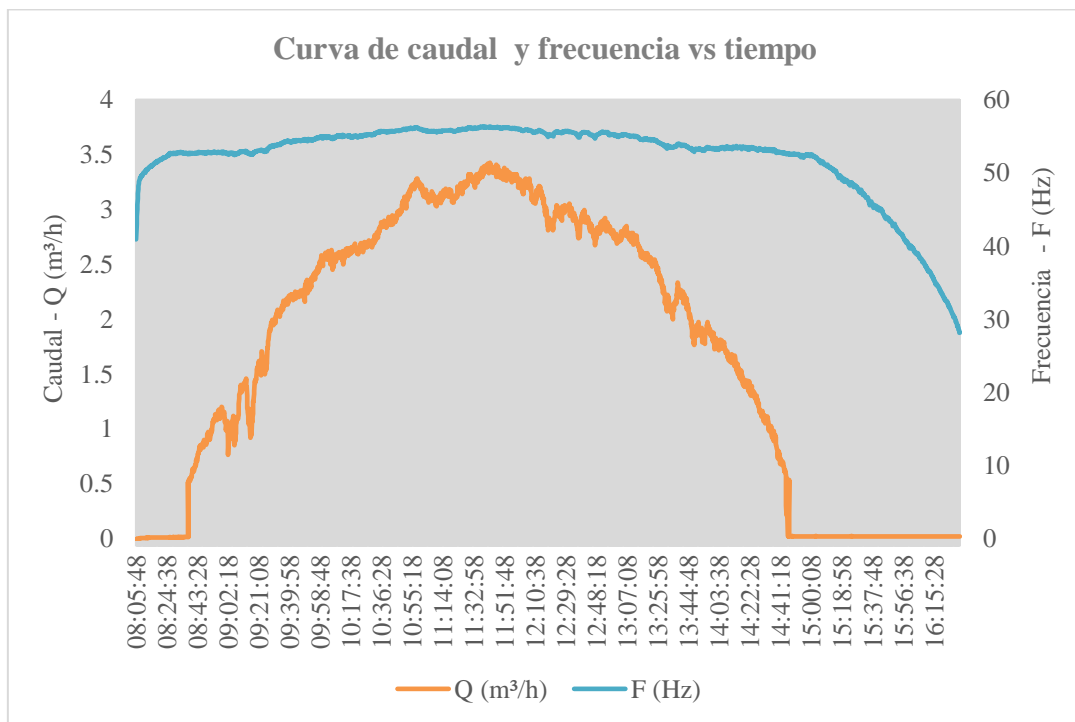


Figura 59. Comportamiento del caudal y frecuencia vs tiempo a 55 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2HP (Fuente propia).

a. Curva de irradiancia y de altura manométrica vs tiempo a 45 m.c.a

El gráfico muestra como la irradiancia aumenta de 500 a aproximadamente $1000 \text{ W}/\text{m}^2$, y la altura manométrica sube de 44.8 a 45 m.c.a. Entre las 09:10:10 y las 12:40:30, la irradiancia se mantiene estable alrededor de $1000 \text{ W}/\text{m}^2$, mientras la altura manométrica se mantiene en 45 m.c.a. De las 12:40:30 a las 14:00:30, la irradiancia disminuye gradualmente de 1000 a $900 \text{ W}/\text{m}^2$, y la altura manométrica

desciende ligeramente de 45 a 44.9 m.c.a. Entre las 14:00:30 y las 15:35:30, la irradiancia fluctúa entre 800 y 1000 W/m² con varios picos, mientras la altura manométrica se mantiene alrededor de 45 m.c.a.

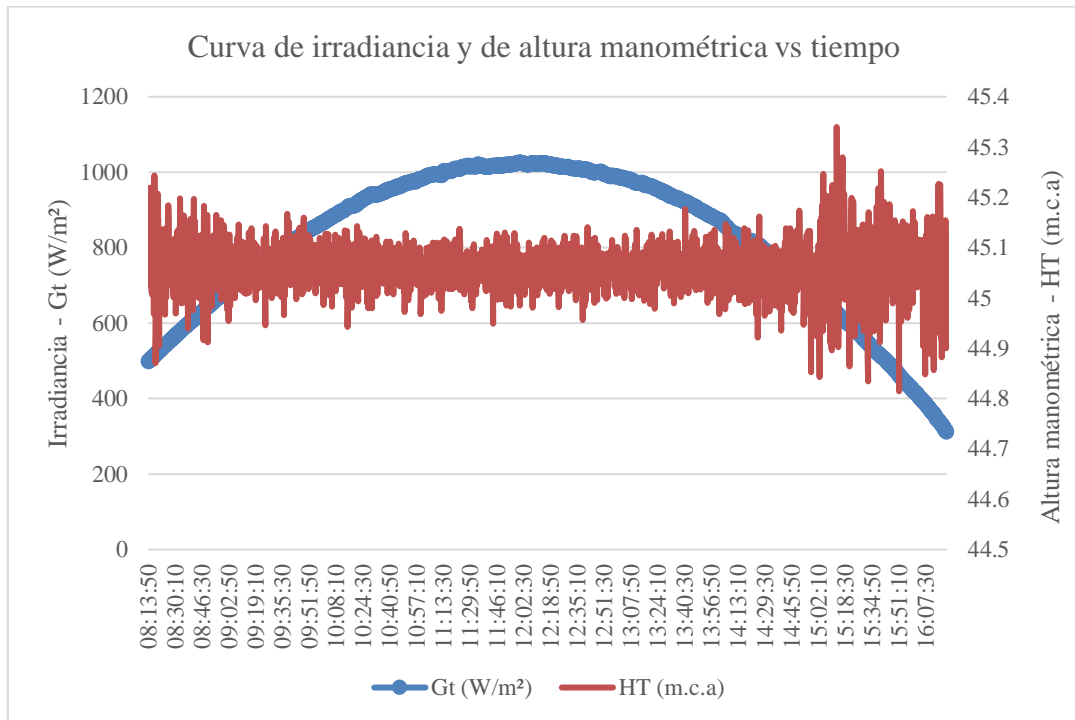


Figura 60. Comportamiento de la irradiancia y de la altura manométrica vs tiempo a 45 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2HP (Fuente propia).

b. Curva de irradiancia y de altura manométrica vs tiempo a 50 m.c.a

La gráfica muestra la relación entre la irradiancia (Gt) en W/m² y la altura manométrica total (HT) en metros de columna de agua (mca) a lo largo del tiempo, desde las 08:29:04 hasta las 15:52. :44. En el eje izquierdo, se presenta la irradiancia, que oscila entre 200 y 1200 W/m², mientras que el eje derecho muestra la altura manométrica, que varía entre 49 y 50.6 mca. La curva azul, que representa la irradiancia, presenta un comportamiento fluctuante. . Inicia alrededor de los 700 W/m² a las 08:29:04, ya lo largo del día exhibe picos de hasta 1000 W/m² hacia las 10:40, con variaciones constantes hasta el final del periodo. Se observan descensos abruptos, como los que ocurren a las 13:35 y las 14:40, donde la irradiancia cae por debajo de los 600 W/m². Por otro lado, la curva roja, que representa la altura manométrica, es más estable, oscilando alrededor de los 50,2 mca durante gran parte del día. Sin embargo, se detectan algunas caídas leves, como a las 13:30, cuando baja momentáneamente a menos de 49.8 mca, lo que podría indicar eventos transitorios o ajustes operativos en el sistema. La estabilidad de la altura manométrica sugiere

que el sistema está diseñado para mantener una presión constante, pese a las fluctuaciones en la irradiancia, que es más susceptible a factores externos como el clima.

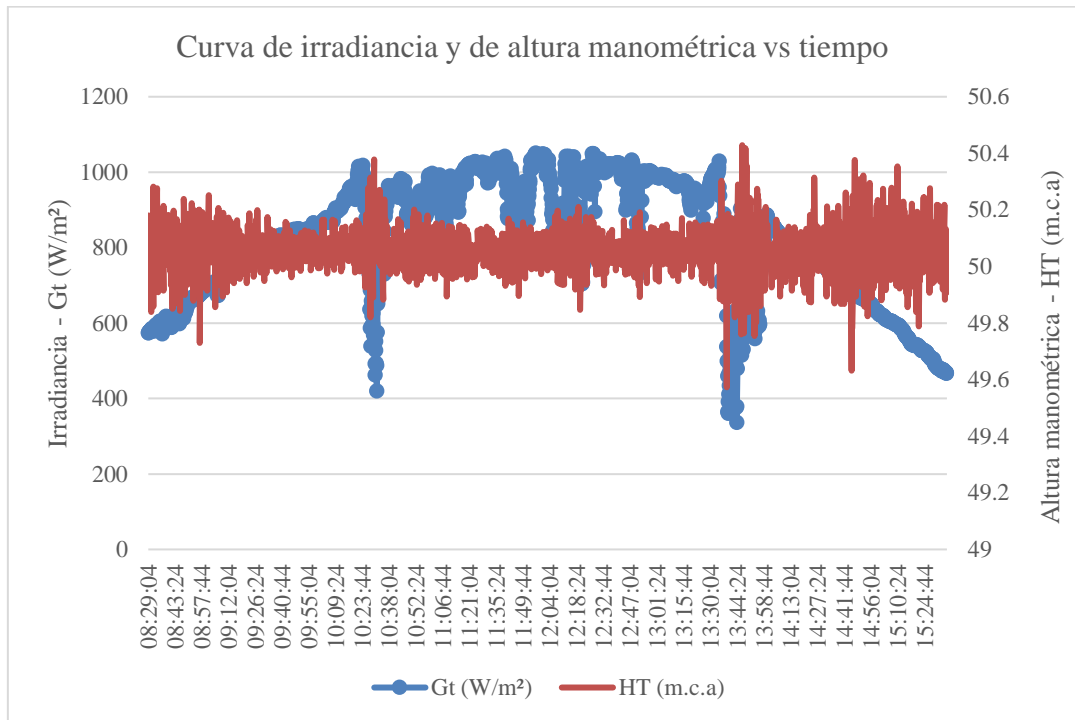


Figura 61. Comportamiento de la irradiancia y de la altura manométrica vs tiempo a 50 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2HP (Fuente propia).

c. Curva de irradiancia y de altura manométrica vs tiempo a 55 m.c.a

La gráfica muestra cuando la irradiancia incrementa constantemente alcanzando cerca de 1000 W/m^2 hasta las 12:08:48, y se mantiene alta, alrededor de 1000 W/m^2 con algunas fluctuaciones menores hasta las 13:08:18. Desde este punto, se observa una ligera disminución oscilando entre 900 y 1000 W/m^2 hasta las 14:09:28, y luego una disminución continua, descendiendo gradualmente hacia 400 W/m^2 al final del período observado a las 16:15:38. La altura manométrica comienza en torno a 55.1 m.c.a a las 08:05:48, con oscilaciones menores entre 54.9 y 55.2 m.c.a hasta las 09:08:08. A continuación, muestra variaciones menores, manteniéndose cerca de 55.2 m.c.a hasta las 12:08:48, con fluctuaciones ligeras y algunos picos hasta 55.4 m.c.a hasta las 13:08:18.

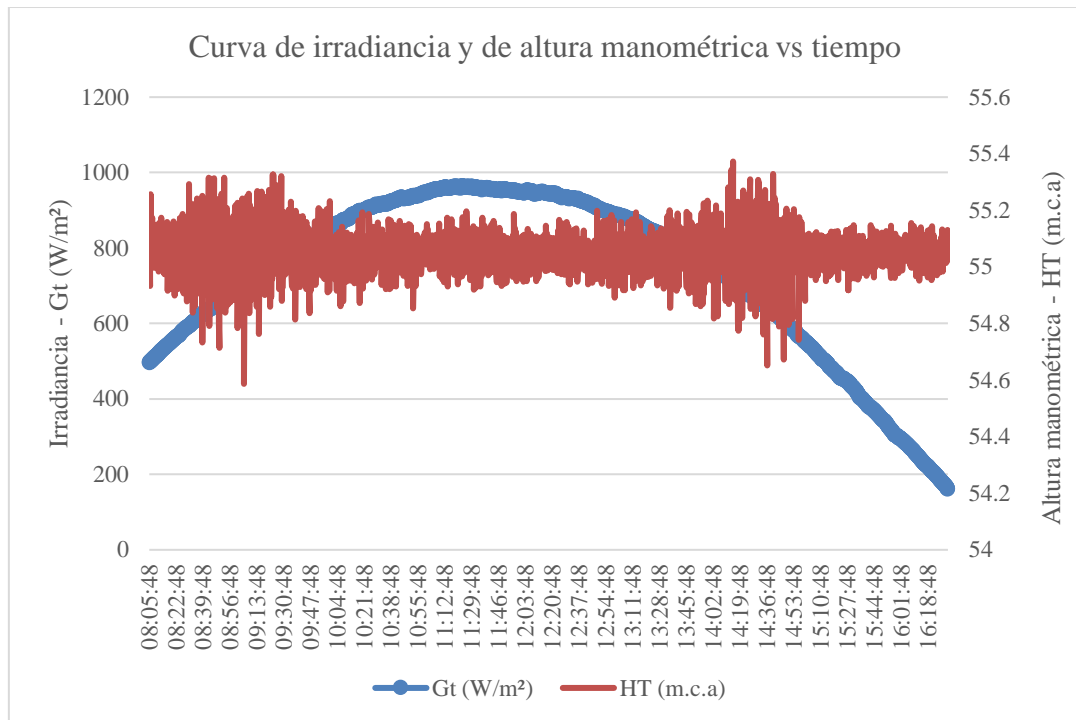


Figura 62. Comportamiento de la irradiancia y de la altura manométrica vs tiempo a 55 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2HP (Fuente propia).

a. Curva de irradiancia y caudal vs tiempo a 45 m.c.a

La gráfica muestra la relación entre la irradiancia (Gt) en W/m^2 y el caudal (Q) en metros cúbicos por hora (m^3/h) a lo largo del tiempo, abarcando desde las 08:13:50 hasta las 16:06:10. El eje vertical izquierdo representa el caudal, con un rango de 0 a 6 m^3/h , mientras que el eje vertical derecho presenta la irradiancia, que varía entre 0 y 1200 W/m^2 . La curva roja, que corresponde al caudal (Q), comienza cerca de 0 m^3/h en las primeras horas del día, alrededor de las 08:13:50, y aumenta de forma progresiva hasta alcanzar un valor máximo de aproximadamente 5.5 m^3/h a las 11:53:40. Luego, el caudal mantiene un comportamiento relativamente constante hasta las 13:23:40, cuando comienza a disminuir gradualmente, presentando una caída más pronunciada después de las 14:30, hasta llegar a casi 0 m^3/h a las 15:48:10. Por otro lado, la curva azul, que representa la irradiancia (Gt), inicia en un valor aproximado de 200 W/m^2 en las primeras horas del día, y sigue una trayectoria ascendente hasta llegar a un máximo cercano a los 1000 W/m^2 alrededor de las 11:00:10. Posteriormente, la irradiancia comienza a descender de manera gradual, alcanzando valores por debajo de los 400 W/m^2 a las 15:48:10, y terminando alrededor de 100 W/m^2 al final del periodo registrado. Es evidente que existe una correlación entre el caudal y la irradiancia: ambos parámetros aumentan durante las

primeras horas del día, alcanzando sus respectivos picos alrededor del mediodía, para luego descender conjuntamente durante la tarde.

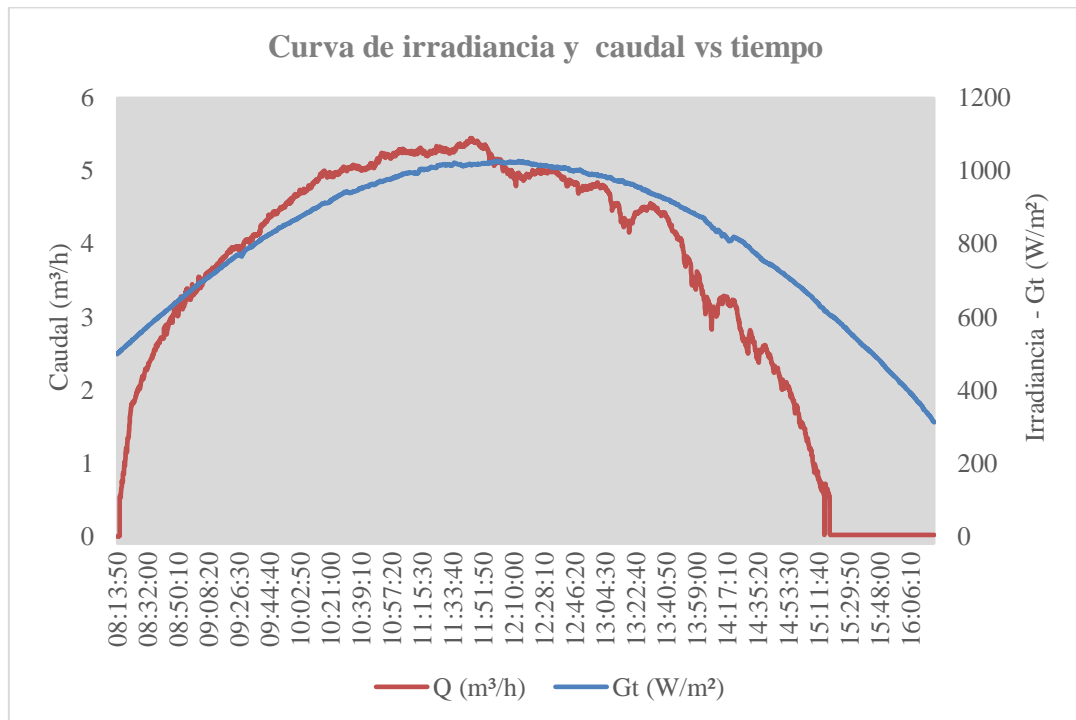


Figura 63. Comportamiento de la irradiancia y caudal vs tiempo a 45 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2HP (Fuente propia).

b. Curva de irradiancia y caudal vs tiempo a 50 m.c.a

El gráfico muestra algunas fluctuaciones, para luego caer bruscamente a 0 m³/h. Se recupera rápidamente a cerca de 4 m³/h, fluctuando entre 3 y 5 m³/h hasta una nueva caída a 0 m³/h a las 13:45:24. Posteriormente, el caudal se recupera a cerca de 4 m³/h y disminuye gradualmente hasta alrededor de 1 m³/h, con fluctuaciones finales antes de caer a 0 m³/h. La irradiancia, por su parte, sube de manera constante desde un valor bajo hasta alrededor de 600 W/m² a las 10:21:44, alcanzando su máximo de aproximadamente 1000 W/m² a las 12:27:44, con fluctuaciones entre 800 y 1000 W/m². A partir de las 13:39:24, la irradiancia disminuye de manera continua y suave, llegando a cerca de 300 W/m² a las 15:28:24. Ambos picos, de caudal e irradiancia, coinciden cerca del mediodía, indicando una correlación directa, aunque la irradiancia disminuye más gradualmente que el caudal, el cual muestra caídas bruscas y recuperaciones rápida.

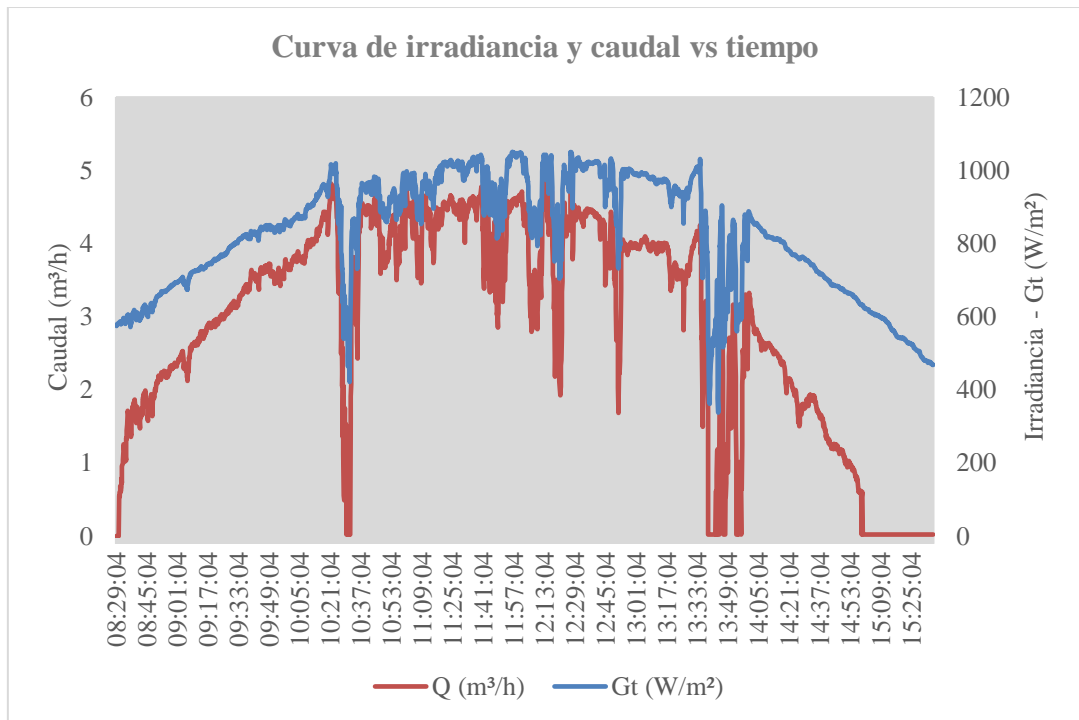


Figura 64. Comportamiento de la irradiancia y caudal vs tiempo a 50 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2HP (Fuente propia).

c. Curva de irradiancia y caudal vs tiempo a 55m

El gráfico muestra como el caudal alcanza su pico máximo de cerca de 3.5 m³/h alrededor de las 12:30:48, manteniéndose en una meseta con fluctuaciones alrededor de los 3 m³/h, para luego comenzar a disminuir después de las 13:30:48 y descender gradualmente hasta cerca de 0.5 m³/h a las 14:35:28, cayendo rápidamente a 0 m³/h alrededor de las 14:43:48 y manteniéndose así hasta el final del período observado. La irradiancia, por su parte, comienza en un valor bajo, sube de manera constante hasta aproximadamente 600 W/m² a las 10:00:48, y sigue aumentando hasta alcanzar su máximo de aproximadamente 1000 W/m² entre las 12:30:48 y las 13:00:48, para luego empezar a disminuir de manera continua y suave, llegando a cerca de 100 W/m² a las 16:20:48. Ambos picos coinciden alrededor del mediodía, indicando una correlación directa, aunque la disminución en la irradiancia es más gradual y suave en comparación con el caudal, que muestra una caída más abrupta después de las 14:43:48.

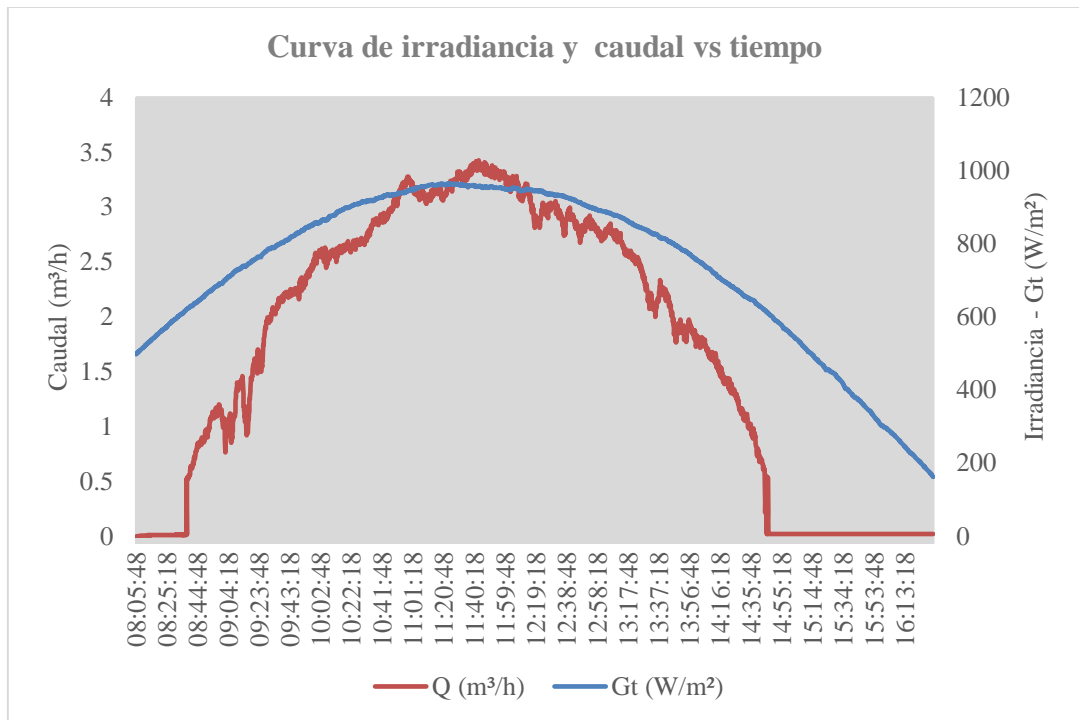


Figura 65. Comportamiento de la irradiancia y caudal vs tiempo a 55 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2HP (Fuente propia).

a. Curva I-V vs tiempo a 45 m.c.a

El gráfico muestra la relación entre la corriente (I_{cc}) en amperios (A) y la tensión de circuito abierto (V_{cc}) en voltios (V) respecto al tiempo, evaluando su comportamiento durante un día de operación. En el eje vertical izquierdo, se observa la escala de corriente, mientras que en el eje derecho se representa la tensión. La corriente inicia aproximadamente a 4 A a las 08:13:50 y presenta un ascenso gradual hasta alcanzar un máximo de alrededor de 6.5 A hacia las 10:30, manteniendo una estabilidad con ligeras fluctuaciones hasta cerca de las 13:30, donde empieza a descender bruscamente, cayendo hasta aproximadamente 2 A cerca de las 15:30. Por otro lado, la tensión (V_{cc}), que inicia alrededor de 315 V a las 08:13:50, experimenta una ligera disminución durante las primeras horas del día, oscilando entre 300 V y 310 V desde las 09:30 hasta las 13:00. Posteriormente, entre las 13:00 y las 15:00, se notan fluctuaciones más pronunciadas con pequeñas caídas y recuperaciones, pero siempre manteniéndose alrededor de los 300 V. Finalmente, después de las 15:00, la tensión también muestra un descenso significativo, alcanzando valores cercanos a los 250 V hacia las 16:00. Este comportamiento es típico en sistemas fotovoltaicos, donde la irradiancia solar influye directamente tanto en la corriente como en la

tensión de los paneles solares. Las caídas de ambos parámetros en las horas finales del día reflejan la disminución de la irradiancia conforme el sol se aproxima al ocaso.

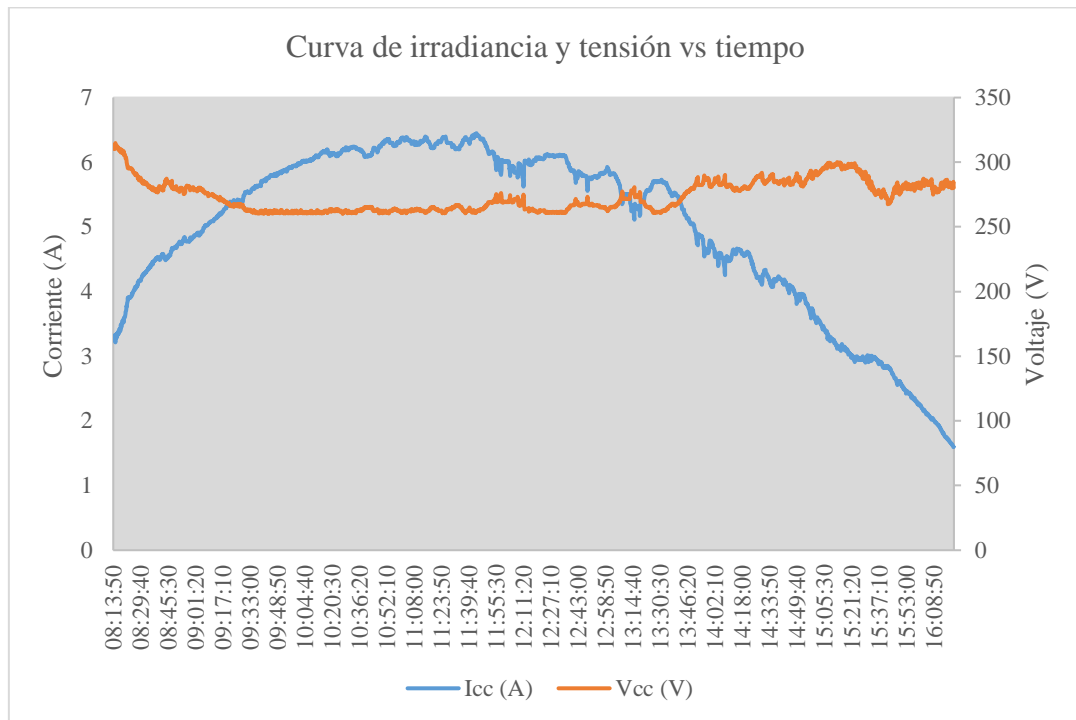


Figura 66. Comportamiento de corriente y tensión vs tiempo a 45 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2HP (Fuente propia).

b. Curva I-V vs tiempo a 50 m.c.a

El gráfico muestra la corriente, representada por una línea azul, comienza cerca de 3.5 A, aumenta rápidamente a aproximadamente 5.5 A a las 08:45:04, y fluctúa entre 4 A y 6 A hasta las 10:35:04. Posteriormente, muestra picos que alcanzan hasta 7 A y presenta fluctuaciones significativas entre las 11:14:04 y las 13:35:04, con caídas ocasionales a casi 0 A. Después de las 13:35:04, la corriente disminuye gradualmente hasta acercarse a 0 A al final del período. El voltaje, mostrado con una línea naranja, comienza cerca de 275 V, disminuye ligeramente a 250 V a las 08:45:04, y se mantiene relativamente constante entre 250 V y 275 V hasta las 13:35:04. Posteriormente, experimenta una ligera tendencia al alza, estabilizándose cerca de 275 V al final del intervalo. La corriente es altamente dinámica y variable, mientras que el voltaje es más estable con fluctuaciones menores.

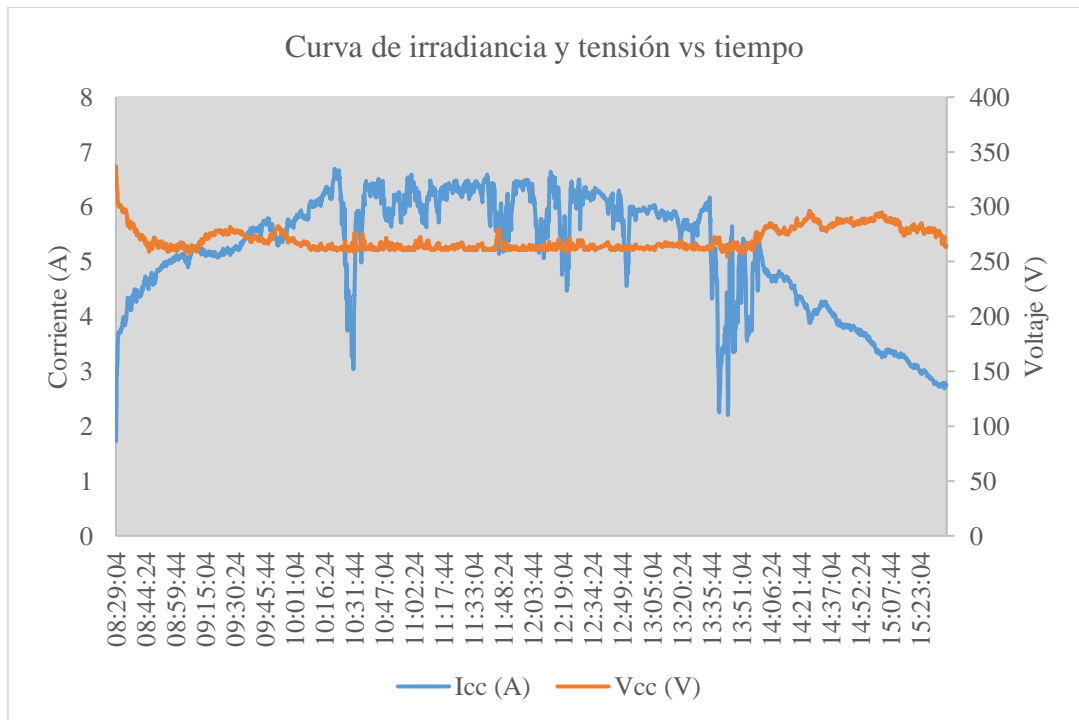


Figura 67. Comportamiento de corriente y tensión vs tiempo a 50 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2HP (Fuente propia).

c. Curva I-V vs tiempo a 55 m.c.a

El gráfico muestra el comportamiento de la corriente de cortocircuito (I_{cc}) en amperios (A) y la tensión (V) a lo largo del día en un sistema fotovoltaico. En el eje vertical izquierdo se representa la corriente, y en el derecho, la tensión, mientras que el eje horizontal muestra el tiempo desde las 08:05:48 hasta las 16:15:28. Al inicio de la jornada, la corriente comienza en aproximadamente 2 A, aumentando de manera constante hasta alcanzar su punto máximo de alrededor de 6.5 A a las 10:35. Posteriormente, se estabiliza entre 5 A y 6 A, con ligeras fluctuaciones, hasta las 13:00. A partir de ese momento, la corriente comienza a descender gradualmente, con una caída más abrupta después de las 15:00, llegando nuevamente a los 2 A hacia el final del día.

En cuanto a la tensión, esta comienza en torno a los 320 V, disminuyendo ligeramente durante las primeras horas. A lo largo del período entre las 09:00 y las 13:00, la tensión se mantiene relativamente estable, fluctuando alrededor de los 300 V. Sin embargo, después de las 13:00, las fluctuaciones son más evidentes, aunque la tensión sigue oscilando cerca de los 300 V. Al igual que la corriente, la tensión también experimenta una caída notable después de las 15:00, llegando a aproximadamente 200 V hacia el final del día. Este comportamiento es característico

de los sistemas fotovoltaicos, donde tanto la corriente como la tensión dependen directamente de la irradiancia solar, que disminuye a medida que el día avanza y la luz solar disminuye.

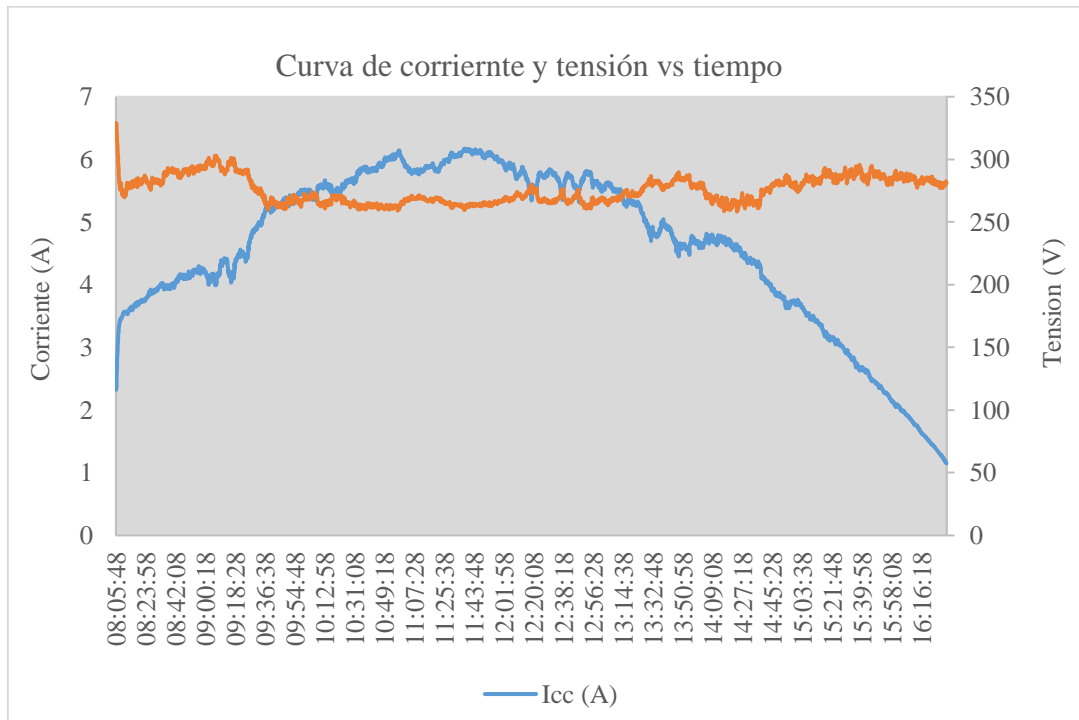


Figura 68. Comportamiento de corriente y tensión vs tiempo a 55 m.c.a de la bomba Pedrollo de 2HP (Fuente propia)

4.2.3 Comparación de eficiencia de bombas en condiciones reales y catálogo a diferentes alturas

Tabla 11

Promedio de datos del periodo de evaluación de dos bombas sumergibles

Alturas medidas	Datos de entrada - Sol real							Valores calculados				
	I _{cc} (A)	V _{cc} (V)	G _t (W/m ²)	H _T (m.c.a)	Q (m ³ /h)	F (Hz)	T(°C)	P _{cc} (W)	E _{EL} (Wh)	E _H (Wh)	η _s (%)	
STAIRS - ST-3510-40M-T200												
45m	5.4	281.5					43.9	54.1			34.3	
	6	2	838.25	45.06	4.42	4	6	1516.28	4.21	1.50	9	
50m	5.3	276.2					44.7	52.1			30.6	
	7	8	799.03	50.03	3.59	2	0	1465.48	4.07	1.35	4	
55m	5.3	281.1					50.6	53.2			27.5	
	5	0	811.17	55.00	3.01	1	9	1479.92	4.11	1.25	2	
Pedrollo - SR 33G/20 -F												
45m	4.9	273.6					51.0	49.0			28.8	
	8	2	812.64	45.06	3.50	7	3	1349.98	3.75	1.19	6	
50m	5.1	269.9					49.1	50.0			26.4	
	9	5	822.91	50.06	2.91	2	8	1392.68	3.87	1.10	3	
55m	4.6	275.3					52.1	46.4			17.5	
	1	9	730.98	55.05	1.71	7	3	1261.29	3.50	0.71	4	

El gráfico compara la eficiencia de dos bombas, “Pedrollo” y “STAIRS,” evaluadas tanto en condiciones reales de operación bajo exposición solar como según las especificaciones del catálogo, en un rango de altura manométrica de 45 a 55 metros de columna de agua (m.c.a). Se observa que la eficiencia de la bomba “Pedrollo” bajo condiciones reales disminuye consistentemente desde aproximadamente 28.86% a 45 m.c.a hasta alrededor de 17.54% a 55 m.c.a. Por otro lado, la eficiencia reportada en el catálogo se mantiene prácticamente constante, con un leve incremento de 46% a 48% en el mismo rango de alturas. En el caso de la bomba “STAIRS,” la eficiencia en condiciones reales comienza en aproximadamente 34.39% a 45 m.c.a y desciende a 27.52% a 55 m.c.a, mientras que la eficiencia según el catálogo muestra una reducción desde aproximadamente 55% a 46 m.c.a hasta 45% a 54 m.c.a.

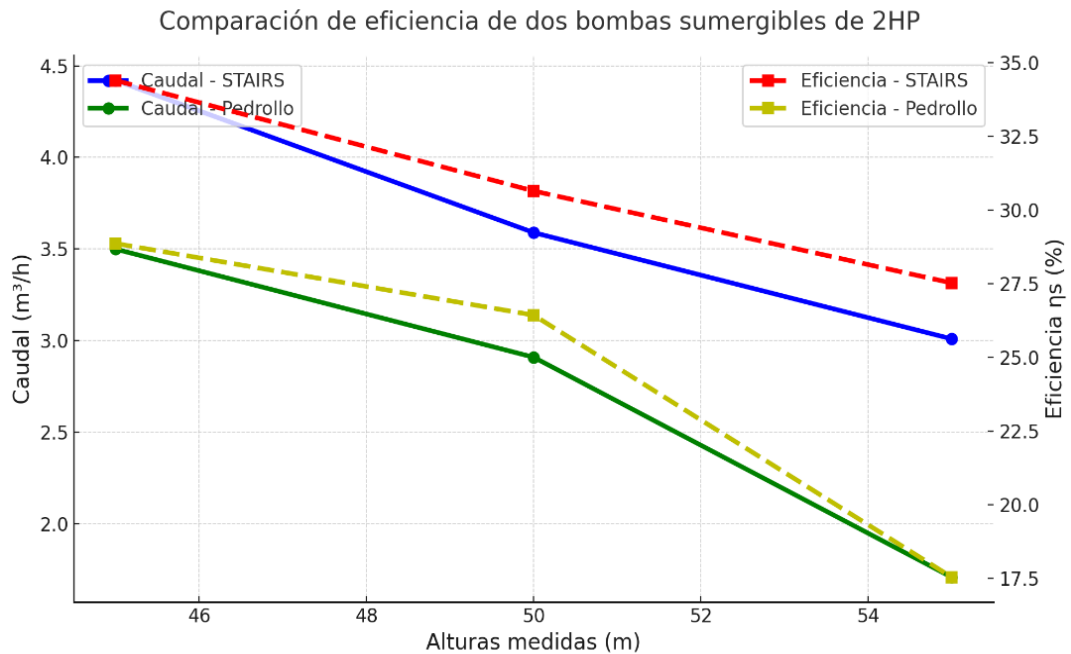


Figura 69. Análisis comparativo de la eficiencia de bombas en condiciones operativas reales vs. especificaciones de catálogo en alturas manométricas variables (Fuente propia)

4.3 Resultados obtenidos con la fuente CC

El gráfico compara la eficiencia energética de dos bombas sumergibles, la Pedrollo y la Stairs, tanto en valores catalogados como medidos. Se observa que, para ambas bombas, los valores medidos son consistentemente inferiores a los catalogados. En la bomba Pedrollo, la eficiencia catalogada aumenta progresivamente hasta un máximo de 63% a 59 m.c.a, para luego caer abruptamente; en cambio, la eficiencia medida alcanza su pico en 42.55 m.c.a con un 41.84%, disminuyendo de manera más gradual hasta cero. Por su parte, la bomba Stairs presenta eficiencias catalogadas más estables, alcanzando un 60% en 38 m.c.a, mientras que los valores medidos muestran una tendencia descendente más pronunciada desde su máximo de 49% en 37.96 m.c.a. Las curvas evidencian que las eficiencias reales son inferiores a las especificadas, destacando la importancia de considerar las variaciones en condiciones operativas reales al elegir estos equipos.

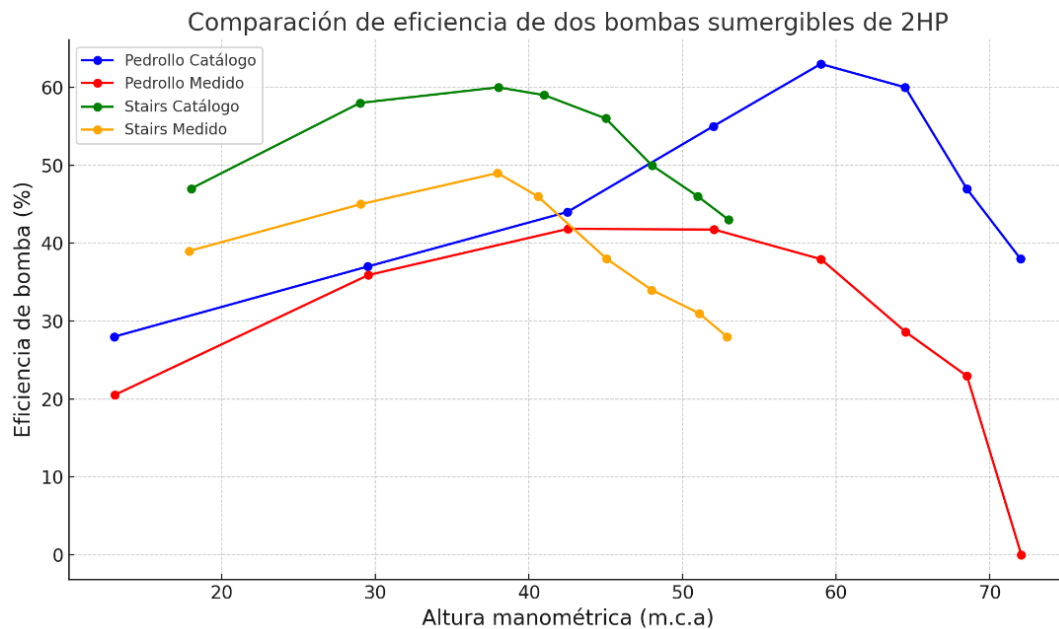


Figura 70. Comparación de la eficiencia energética de bombas sumergibles Pedrollo y Stairs valores catalogados vs medidos. (Fuente propia).

4.3.1 Evaluación del comportamiento de la bomba Pedrollo de 2HP medido y teórico

El gráfico muestra el rendimiento de una bomba sumergible Pedrollo modelo 4SR33G-T, comparando los datos teóricos proporcionados por el catálogo con los valores reales medidos en campo. En el eje vertical se representa el caudal en metros cúbicos por hora (m^3/h), mientras que en el eje horizontal se presenta la altura manométrica total (HT) en metros de columna de agua (m.c.a.). Según el catálogo, la bomba proporciona un caudal de $12 m^3/h$ a 10 m.c.a., mientras que los datos medidos en campo son menores, registrando aproximadamente $9 m^3/h$ para la misma altura. A medida que aumenta la altura manométrica, el caudal disminuye tanto en los valores teóricos como en los medidos, aunque estos últimos reflejan un rendimiento inferior. A 40 m.c.a., el caudal teórico se encuentra en torno a los $8 m^3/h$, mientras que en la medición real el caudal baja a unos $6 m^3/h$. A alturas mayores, esta divergencia es más pronunciada: a 60 m.c.a., el catálogo indica un caudal de $5 m^3/h$, mientras que los datos medidos alcanzan aproximadamente $3.5 m^3/h$. Finalmente, a 70 m.c.a., el caudal teórico es de $3 m^3/h$, mientras que en las mediciones reales se reduce a menos de $2 m^3/h$. Las diferencias entre el comportamiento teórico y el medido sugieren que las condiciones de operación en el campo, como las pérdidas por fricción o posibles problemas de cavitación, afectan significativamente el rendimiento de la bomba, lo que resalta la importancia de tener

en cuenta las condiciones reales de instalación para una evaluación precisa del equipo.

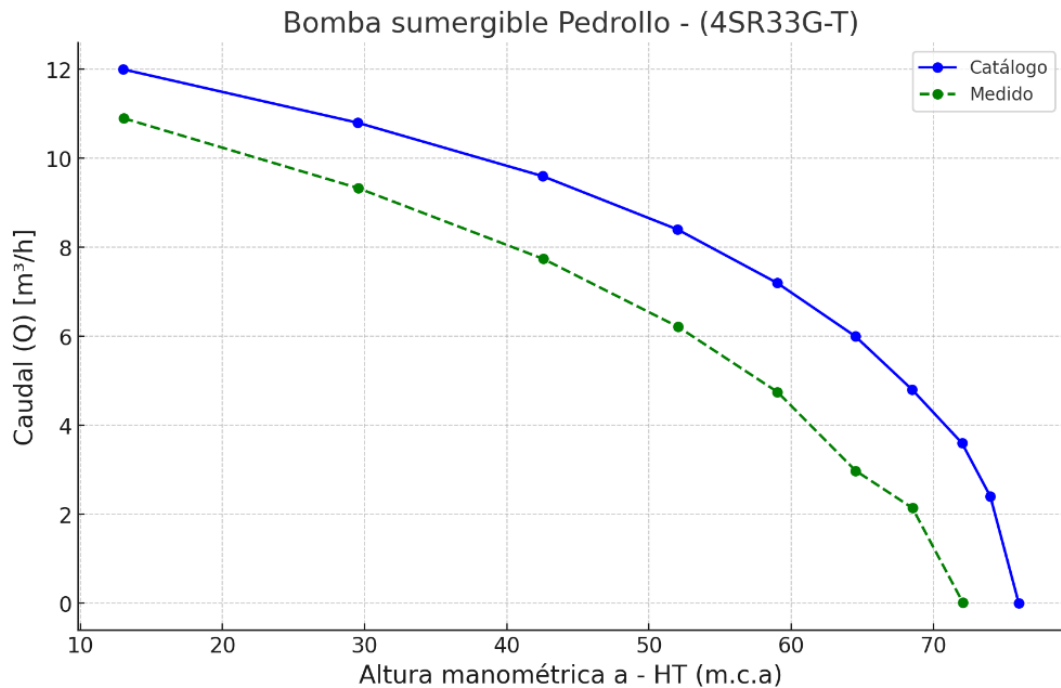


Figura 71. Comportamiento del Caudal (m^3/h) en función de la altura manométrica (m.c.a.) de la bomba sumergible Pedrollo de 2 HP (Fuente propia).

4.3.2 Evaluación del comportamiento de la bomba stairs de 2HP medido y teórico

La gráfica muestra las curvas de rendimiento de una bomba sumergible modelo “Stairs ST-3510-40M-T200”, comparando los datos obtenidos del catálogo con los valores medidos en campo, en función del caudal (Q) y la altura manométrica total (HT), expresada en metros de columna de agua (m.c.a.). La curva azul representa los valores proporcionados por el fabricante en condiciones estándar, mientras que la curva punteada verde refleja las mediciones realizadas en condiciones reales de operación. El comportamiento inicial, cercano a los 20 m.c.a., muestra un caudal de aproximadamente $9 \text{ m}^3/\text{h}$ tanto en los datos de catálogo como en los medidos. A medida que aumenta la altura manométrica, el caudal disminuye de manera esperada, manteniendo una tendencia descendente que es más notoria a partir de los 40 m.c.a. Entre los 40 y 50 m.c.a., se observa una pequeña divergencia entre ambas curvas, siendo el caudal medido ligeramente superior al especificado en el catálogo. Este comportamiento podría atribuirse a variables operativas como el estado del equipo, las condiciones del fluido bombeado o posibles variaciones en la instalación hidráulica. A partir de los 50 m.c.a., ambas curvas tienden a converger nuevamente,

alcanzando un caudal cercano a los 4 m³/h. Para una altura de 60 m.c.a., el caudal en ambas curvas es de alrededor de 3 m³/h, lo que sugiere que la bomba sigue operando dentro de parámetros aceptables, aunque con una leve sobreestimación en el catálogo respecto al desempeño real en ciertas condiciones.

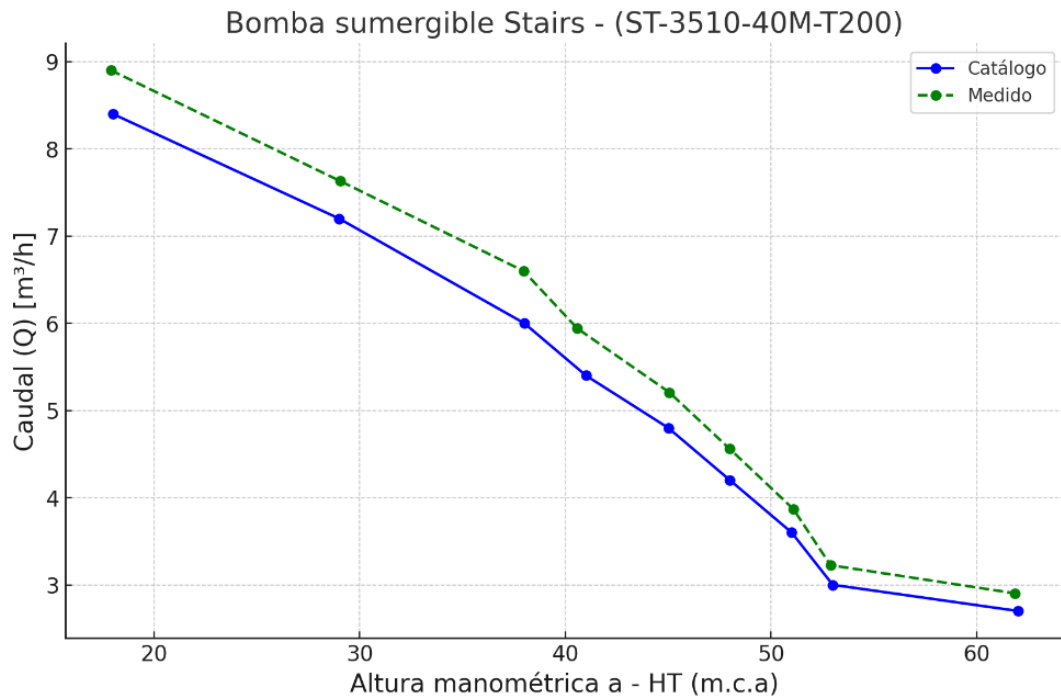


Figura 72. Comparación de caudal en función de la altura manométrica: datos reales vs. catálogo para la bomba sumergible Stairs (Fuente propia).

4.3.3 Comparación entre Stairs y Pedrollo

En general, la bomba Stairs de 2 HP mostró un rendimiento superior en términos de caudal y mantenimiento de la eficiencia a diferentes alturas, especialmente por encima de los 50 metros. Por otro lado, la bomba Pedrollo, aunque eficiente a 45 metros, mostró una mayor disminución en su desempeño a mayores alturas, lo que indica una mayor variabilidad en su funcionamiento bajo condiciones más exigentes.

4.4 Discusión

La altitud a más de 3800 msnm tiene un impacto significativo en el rendimiento de las bombas, afectando tanto la eficiencia de los motores eléctricos como la capacidad de generar caudales adecuados. La disminución en la densidad del aire y la presión atmosférica contribuyen a la pérdida de eficiencia en la conversión de energía, lo que se refleja en los resultados obtenidos para ambas bombas. La bomba Stairs, con su

diseño más robusto, mostró una mejor adaptación a estas condiciones adversas, manteniendo un rendimiento más estable que la Pedrollo.

Los resultados subrayan la importancia de un diseño fotovoltaico que se ajuste a las condiciones específicas de operación, especialmente en regiones de alta altitud. La capacidad del sistema para suministrar energía suficiente y constante a las bombas es crucial para maximizar el rendimiento y la eficiencia. En este contexto, el diseño propuesto con 52 paneles de 50W organizados en 13 paneles en serie y 4 ramas en paralelo, aunque no implementado, podría ofrecer un rendimiento optimizado para las bombas evaluadas.

Las diferencias en el rendimiento de las bombas Stairs y Pedrollo a diferentes alturas sugieren que la elección de la bomba adecuada debe considerarse cuidadosamente según las condiciones de operación específicas. Las aplicaciones futuras en entornos similares deberían tener en cuenta no solo el rendimiento a alturas óptimas, sino también la capacidad de la bomba para mantener su eficiencia y caudal a mayores altitudes, donde las condiciones son más extremas.

4.5 Prácticas recomendadas para el mantenimiento del módulo del sistema de bombeo fotovoltaico

Las prácticas que se recomiendan realizar en el banco de ensayos del módulo de bombeo fotovoltaicos se describen de la siguiente forma:

4.5.1 Mantenimiento de la matriz fotovoltaica

El mantenimiento de los paneles fotovoltaicos es esencial por varias razones. En primer lugar, la acumulación de suciedad, polvo, hojas, y otros residuos en la superficie de los paneles puede reducir significativamente su eficiencia. Estudios han demostrado que la suciedad puede disminuir la producción de energía hasta en un 20%. Además, el mantenimiento regular ayuda a identificar y corregir problemas potenciales antes de que se conviertan en fallas mayores, lo que puede resultar en costosos tiempos de inactividad y reparaciones.

a. Tipos de Mantenimiento

El mantenimiento de los paneles fotovoltaicos se puede dividir en dos categorías principales: preventivo y correctivo. El mantenimiento preventivo incluye inspecciones periódicas y limpiezas rutinarias para asegurar que los paneles estén en

condiciones óptimas. Las limpiezas generalmente se realizan con agua desmineralizada y cepillos suaves para evitar dañar la superficie de los paneles.

El mantenimiento correctivo, por otro lado, implica la reparación o reemplazo de componentes defectuosos. Esto puede incluir la sustitución de módulos dañados, la reparación de conexiones eléctricas defectuosas, o la solución de problemas con el inversor. La detección temprana de estos problemas a través de inspecciones regulares puede minimizar el impacto en la producción de energía y reducir los costos de reparación.

b. Pasos para el mantenimiento de paneles fotovoltaicos

Se recomienda realizar tareas mensuales

Inspección Visual: revisar los paneles solares para detectar suciedad, polvo, hojas o cualquier tipo de obstrucción.

Limpieza de Paneles: Para mantener los paneles solares en óptimas condiciones, se recomienda limpiarlos temprano en la mañana, en la tarde o en días nublados, cuando están más frescos, para evitar el choque térmico. La limpieza debe realizarse con agua destilada y herramientas suaves como esponjas de cerdas suaves o paños de microfibra, evitando el uso de detergentes abrasivos. Si es necesario, puede utilizarse un detergente biodegradable muy diluido. La frecuencia de limpieza varía según el entorno. En los meses de junio y julio, cuando hay vientos fuertes en Juliaca, se genera más polvo, lo que hace necesario limpiar los paneles mensualmente. En otros meses, cuando los vientos no son constantes, una limpieza trimestral o semestral puede ser suficiente. Antes de la limpieza, se debe desconectar el sistema para evitar riesgos eléctricos. La limpieza debe hacerse con movimientos suaves para evitar daños en la superficie, y los paneles deben enjuagarse bien y secarse para evitar manchas de agua que podrían reducir su eficiencia.



Figura 73. Limpieza de una celda fotovoltaica (Tiwari & Kalamkar, 2018)

4.5.2 Mantenimiento del módulo de pruebas de bombas

Para el mantenimiento del módulo, se recomienda realizar una revisión cada dos meses si el fluido utilizado contiene un refrigerante antioxidante, ya que el agua del grifo en el laboratorio de fotovoltaica de la Universidad Nacional de Juliaca, sede Ayabacas, es pesada y rica en minerales. Durante las pruebas iniciales, se observó que en tan solo dos días aparecieron corrosiones de óxido alrededor del módulo y la bomba. Para evitar estos problemas, es crucial usar un refrigerante antioxidante en el fluido de trabajo, además de considerar el uso de agua destilada en lugar de agua del grifo para reducir el riesgo de corrosión. Se deben realizar inspecciones visuales cada dos meses para detectar signos tempranos de corrosión, limpiar el sistema regularmente para eliminar acumulaciones de minerales, asegurarse de que el refrigerante antioxidante esté en las concentraciones adecuadas y reponerlo según las recomendaciones del fabricante, y revisar y mantener la bomba para garantizar su funcionamiento óptimo. Implementando estas prácticas de mantenimiento, se puede prolongar la vida útil del módulo y asegurar su eficiencia en el laboratorio de fotovoltaica. el mantenimiento del módulo se recomienda que se realice cada 2 meses si el fluido que se utiliza se encuentra con un refrigerante antioxidante esto porque el agua del grifo que se encuentra en el laboratorio de fotovoltaica de la universidad nacional de Juliaca sede ayabacas es pesada, porque durante la prueba de ensayos al

inicio se vio que en dos días ya se encontraba con corrosiones de oxido alrededor del módulo y la bomba.



Figura 74. Módulo de del banco de pruebas con fluido del grifo más el aditivo (antioxidante). (Fuente propia)

4.5.3 Mantenimiento de las bombas sumergibles

El mantenimiento adecuado de las bombas sumergibles tipo lapicero es crucial para asegurar su funcionamiento eficiente y prolongar su vida útil; este proceso incluye la limpieza tanto del exterior como de los componentes internos, especialmente cuando se detectan signos de corrosión. Para garantizar la seguridad, se desconectó la bomba de la fuente de alimentación eléctrica antes de retirarla cuidadosamente del módulo de pruebas de agua, evitando daños al cableado y a la estructura. Se realizó una inspección visual detallada para identificar desgaste, corrosión o daño físico, seguida de una limpieza de la superficie externa con agua y un cepillo suave. Se recomienda que en un plazo de uno o dos años se realice la limpieza de los componentes internos, como impulsores y difusores, para que este y limpios, y así se eliminaran cuidadosamente la corrosión observada. En ese tiempo también se tiene que revisar el sello mecánico para detectar posibles fugas y de esta manera se lubricar los rodamientos según las especificaciones del fabricante esto para asegurar la vida útil de las bombas. Del mismo modo se tiene que utilizar un multímetro, en el cual se mida la resistencia de los devanados del motor y se realice una prueba de aislamiento para asegurar que no hubiera cortocircuitos ni fugas eléctricas. Este mantenimiento regular es esencial para prevenir la corrosión, mantener la eficiencia

y evitar fallos prematuros, asegurando que las bombas funcionen de manera fiable en el laboratorio de fotovoltaica de la Universidad Nacional de Juliaca.



a) bomba sumergible limpia

b) bomba sumergible con una breve corrosión externa

Figura 75. Mantenimiento de la bomba sumergible (Fuente propia).

a. Frecuencia del mantenimiento

- Inspección visual y limpieza externa: cada 12 semanas.
- Limpieza interna de componentes (impulsores y difusores): cada 1-2 años.
- Revisión del sello mecánico y lubricación de rodamientos: cada 1-2 años.
- Pruebas eléctricas (resistencia de devanados y prueba de aislamiento): cada 6 meses.
- Mantenimiento correctivo: cuando se detecten fallas o irregularidades.

b. Procedimiento de mantenimiento

- Desconexión de la fuente de alimentación: desconectar la bomba de la fuente eléctrica.
- Retiro de la bomba del módulo de pruebas: retirar cuidadosamente la bomba para evitar daños al cableado y a la estructura.
- Inspección visual: verificar signos de desgaste, corrosión o daños físicos en la estructura externa.
- Inspeccionar el cableado en busca de cortes, desgaste o aislamiento dañado.
- Limpieza externa: utilizar agua limpia y un cepillo suave para limpiar la superficie externa de la bomba.
- Eliminar cualquier suciedad, sedimentos o residuos que puedan haber acumulado.
- Inspeccionar nuevamente después de la limpieza para detectar cualquier daño previamente oculto por la suciedad.

c. Limpieza interna de componentes (cada 1-2 años)

- Desmontar cuidadosamente la bomba para acceder a los componentes internos.
- Asegurarse de seguir las instrucciones del fabricante para el desmontaje adecuado.
- Limpieza de impulsores y difusores
- Limpiar los impulsores y difusores con un cepillo suave y agua limpia.
- Eliminar cualquier corrosión observada utilizando los métodos recomendados por el fabricante.
- Inspección de componentes
- Revisar los componentes internos en busca de desgaste, daños o corrosión.

d. Revisión del sello mecánico y lubricación de rodamientos (cada 1-2 años)

- Inspección del sello mecánico
- Verificar la integridad del sello mecánico.
- Detectar posibles fugas que puedan indicar la necesidad de reemplazo.
- Lubricación de rodamientos
- Lubricar los rodamientos de acuerdo con las especificaciones del fabricante.
- Utilizar el lubricante recomendado para evitar daños por fricción y desgaste

e. Registro y documentación

- Registro de mantenimiento: llevar un registro detallado de cada mantenimiento realizado, incluyendo fecha, trabajos realizados, observaciones y firma del responsable.
- Historial de mantenimiento: mantener un historial de mantenimiento para cada bomba, permitiendo un seguimiento del estado y las acciones correctivas realizadas a lo largo del tiempo.

f. Responsables

- Equipo de mantenimiento: personal técnico capacitado en la universidad nacional de Juliaca.
- Supervisión: responsable del laboratorio de fotovoltaica.

g. Consideraciones de seguridad

- Seguridad Eléctrica: Asegurarse de que la bomba esté completamente desconectada de la fuente de alimentación antes de iniciar cualquier procedimiento.
- Equipo de Protección Personal (EPP): Utilizar guantes, gafas de seguridad y equipo adecuado durante el mantenimiento.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

La bomba Stairs demuestra una eficiencia energética superior a la Pedrollo, alcanzando un 50% a 40 metros de altura manométrica (m.c.a.), con un rendimiento constante entre 30 y 50 m.c.a. En contraste, la bomba Pedrollo alcanza solo un 38% de eficiencia a 40 m.c.a. y experimenta una caída notable en su rendimiento a partir de esa altura, especialmente más allá de los 60 m.c.a. Esto indica que, en altitudes superiores a 3800 msnm, la Stairs es más eficiente y confiable.

La evaluación se realizó bajo condiciones idénticas para ambas bombas, usando un banco de pruebas alimentado por 54 paneles solares de 50 W dispuestos en tres strings de 18 paneles. Se concluyó que la Stairs opera de manera óptima entre 30 y 50 m.c.a. Adicionalmente, se diseñó un sistema fotovoltaico teórico con 52 paneles de 50 W en 13 series y 4 ramas en paralelo para alimentar una bomba de 2HP, con la capacidad de generar energía suficiente en condiciones similares.

La alta irradiancia solar en altitudes superiores a 3800 msnm mejora la generación de energía, pero también aumenta el riesgo de sobrecalentamiento de los componentes eléctricos, afectando su eficiencia. Las bajas temperaturas, si bien aumentan la eficiencia de los paneles, pueden comprometer la durabilidad y el funcionamiento de las bombas. Es esencial emplear materiales resistentes a temperaturas extremas y sistemas de refrigeración adecuados.

Se concluye que es vital realizar inspecciones bimensuales para evitar la acumulación de polvo, residuos y corrosión, garantizando así la eficiencia del sistema. El uso de agua destilada y refrigerantes antioxidantes es efectivo para prevenir la corrosión y asegurar el funcionamiento continuo de las bombas y del sistema fotovoltaico.

5.2 Recomendaciones

Con base en los hallazgos del proyecto de investigación actual, se proponen las siguientes sugerencias:

- Diseñar el sistema de bombeo solar considerando un rango de radiación solar entre 500-800 W/m², ya que más del 60% de la energía solar total se encuentra en este

rango. Implementar tecnologías avanzadas en los paneles solares para mejorar su eficiencia en condiciones de baja irradiancia.

- Realizar estudios del tipo de fluido que se encuentra en la Universidad Nacional de Juliaca sede Ayabacas.
- Se recomienda que antes de realizar una prueba en el módulo se configure y verifique las conexiones de la matriz fotovoltaica, esto porque cada bomba sumergible trabaja a distintos amperajes.
- Se recomienda que todas las pruebas de las bombas sumergibles que se realicen en el módulo de pruebas sean trifásicas 220V esto es por el variador con el cual trabaja el módulo.

5.3 Sugerencia de trabajos de investigación futuros

A continuación, presentamos algunas sugerencias para trabajos de investigación futuros relacionado al presente tema de investigación desarrollado:

- Investigar el desarrollo de nuevos materiales que puedan mejorar la eficiencia y durabilidad de las bombas solares sumergibles en condiciones extremas. Por ejemplo, materiales que mantengan su integridad a bajas temperaturas y alta altitud.
- Realizar estudios comparativos de nuevas marcas y modelos de bombas solares sumergibles para identificar opciones que ofrezcan un rendimiento superior en condiciones similares a las evaluadas en esta investigación.
- Explorar el impacto de otras variables climáticas, como la humedad y la presión atmosférica, en el rendimiento de las bombas solares sumergibles. Esto puede incluir estudios de campo en diferentes regiones geográficas.
- Desarrollar y evaluar tecnologías avanzadas de monitoreo y automatización para el mantenimiento y operación de sistemas de bombeo solar. Estas tecnologías pueden incluir sensores inteligentes y sistemas de control automatizados.

CAPITULO VI

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andina. (11 de Julio de 2023). <https://andina.pe/>. Obtenido de <https://andina.pe/agencia/noticia-puno-instalan-sistemas-bombeo-agua-potable-paneles-solares-huancane-946904.aspx>
- Arvin Sohrabi, M. M. (February de 2024). Comparative analysis of integrating standalone renewable energy sources with brackish water reverse osmosis plants: Technical and economic perspectives. *Desalination*, 571, 16. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.117106>
- Banco Mundial. (mayo de 2017). Nueva tecnología de riego, una opción que mejora la calidad de vida de los pequeños agricultores del Ecuador. pág. 4. Obtenido de <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2017/05/04/riego-tecnificado-ecuador.print>
- Bonnesoeur, V., Locatelli, B., Guariguata, M., Ochoa-Tocachi, B., Vanacker, V., Mao, Z., & Mathez-Stiefel, S. (2019). Impacts of forests and forestation on hydrological services in the Andes: A systematic review. *Forest Ecology and Management*, 433, 569-584. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.033>
- Boutelhig, A., Bakelli, Y., Mahammed, I., & Arab, A. (March de 2012). Performances study of different PV powered DC pump configurations for an optimum energy rating at different heads under the outdoor conditions of a desert area. *Energy*, 39, 33-39. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.10.016>
- Brito, A. U. (2006). *Otimização do acoplamento de geradores fotovoltaicos a motores de corrente alternada através de conversores de frequência comerciais para acionar bombas centrífugas*. Universidade De Sao~ Paulo USP, São Paulo. doi:<https://doi.org/10.11606/T.86.2018.tde-05112018-160811>
- Carroquino, J., Dufo-López, R., & Bernal-Agustín, J. (April de 2015). Sizing of off-grid renewable energy systems for drip irrigation in Mediterranean crops. *Renewable Energy*, 566-574. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.069>
- Chandel, S., Naiik, M., & Chandel, R. (September de 2015). Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water

- supplies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 1084-1099.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.083>
- Cronos corporation. (15 de Junio de 2024). Obtenido de <https://cronoscorporation.com/industrial/how-technology-can-help-contractors-be-more-efficient/>
- Dajes Castro, J. (2020). *Errores en las balanzas debido a la aceleración de la gravedad*. Servicio Nacional de Metrología del Indecopi. Obtenido de <https://bvirtual.indecopi.gob.pe/colec/erroresbalanzas.pdf>
- Data Acquisition . (12 de Junio de 2024). *Keysight*. Obtenido de <https://www.keysight.com/us/en/product/34970A/34970a-data-acquisition-control-mainframe-modules.html>
- Dimitriou, K., Tsagkaraki, M., Tavernaraki, K., Papoutsidaki, K., Malandraki, M., Petrinoli, K., . . . Mihalopoulos, N. (June de 2024). The effect of mixed layer across air mass trajectory pathways on PM2.5 constituent levels: The case of a major urban center in the Eastern Mediterranean. *Atmospheric Pollution Research*, 14.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.apr.2024.102129>
- Dirección General de Eficiencia Energética. (2024). *Balance Nacional de Energía 2022*. Ministerio de Energía y Minas, Área de Planeamiento Energético, Lima.
- El derecho humano al agua y al saneamiento. (2010). *Welcome to the United Nations*. Obtenido de https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/pdf/human_right_to_water_and_sanitation_media_brief_spa.pdf
- Epochautomation. (1 de Julio de 2024). *Preventive Maintenance For Submersible Pumps*. Obtenido de <https://epochautomation.com/preventive-maintenance-for-submersible-pumps/>
- Flores Melendez, T. A. (2009). Avaliação de sistemas fotovoltaicos de bombeamento. *Programa de Pós-Graduação em Energia*. Universidade De São Paulo, São Paulo.
- Hall, S. M. (2018). Chapter 7 - Pumps. En *R. o. Engineers*.
doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811037-9.00007-2>
- Hydraulic Institute . (15 de junio de 2024). *The Global Authority on Pumps and Pumping Systems*. Obtenido de <https://www.pumps.org/>

- IEA. (2024). *La AIE pone a disposición de forma gratuita una mayor cantidad de sus datos y estadísticas a través de páginas actualizadas sobre países y regiones*. Agencia Internacional de Energía 50.
- IPCC. (2019). Calentamiento global de 1,5°C. *Intergovernmental Panel on Climate Change*, pág. 32.
- IPCC. (2021). *Cambio climático 2021. The physical Science Basis*. Suiza: IPCC Sixth Assessment Report . Obtenido de https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_Spanish.pdf
- IRENA. (2021). *Renewable Power Generation Costs in 2020*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. Obtenido de https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2020.pdf?rev=c9e8dfcd1b2048e2b4d30fef671a5b84
- Kannaujia, V., Bhore, S., & Goyal, H. (February de 2024). A case study on the failure analysis of 1 hp house hold electrical submersible pump in Prayagraj India. *Engineering Failure Analysis*, 156, 27. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107742>
- Karassik, I. J., Messina, J. P., Cooper, P., & Heald, C. C. (2001). *Pump Handbook*. New York: McGRAW-HILL.
- Kenneth, J. (2002). BOMBAS. En *Selección, uso y mantenimiento* (págs. 185-293). Londres: McGRAW-HILL.
- Khatib, T. (2021). *Photovoltaic Water Pumping Systems*. Academic Press is an imprint of Elsevier.
- Kiprono, A. W., & Ibáñez Llarío , A. (2020). Solar Pumping for Water Supply. *Harnessing solar power in humanitarian and development contexts*, 85-145. Obtenido de <https://thesolarhub.org/wp-content/uploads/2020/11/9781780447810-a.pdf>
- M. Huss, ,. B. (2017). Toward mountains without permanent snow and ice. *aguapublications*, 18. Obtenido de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1002/2016ef000514>
- Meléndez, T. (2009). Avaliação de sistemas fotovoltaicos de bombeamento. *Universidade de São Paulo*. Tesis doctoral.

- Mohammed, Y., Mohammed, K. F., & Azzedinne, T. (April de 2019). A fast and simplified method using non-linear translation of operating points for PV modules energy output and daily pumped water to predict the performance of a stand-alone photovoltaic pumping system at different heads. *Renewable Energy*, 133, 248-260. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.004>
- MRWATT. (18 de abril de 2024). *Make your own energy*. Obtenido de <https://www.mrwatt.eu/es/content/come-funziona-una-cella-solare>
- Muhsen, DH, Khatib, T., & Abdulabbas, T. (January de 2018). Sizing of a standalone photovoltaic water pumping system using hybrid multi-criteria decision making methods. *Solar Energy*, 1003-1015. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.11.044>
- NASA METEOROLOGY. (2024). *The power project*. Recuperado el 15 de 02 de 2024, de <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- NOAA. (2021). Obtenido de <https://www.weather.gov/media/epz/wxcalc/pressureAltitude.pdf>
- Pedrollo 4SR33G. (15 de julio de 2023). *Pedrollo*. Obtenido de <https://cdn.autosolar.pe/pdf/datasheet-pedrollo-4sr33g-2hp-4sr45g-2hp-5hp.pdf>
- Resende, L. C. (2023). Recuperado el Mayo de 2024
- Sharma, R., Sharma, S., & Tiwari, S. (2020). Design optimization of solar PV water pumping system. *Materials Today: Proceedings*, 21, 7. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.32>
- Shashi, E., Pramila, S., & Menon, M. (August de 2010). NPSH and Pump Cavitation. *Working Guide to Pumps and Pumping Stations*, 93, 149-156. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-828-0.00007-X>
- ST-3510, Stairs 4". (13 de Junio de 2023). *Bombas de agua*. Obtenido de <https://cdn.autosolar.pe/pdf/manual-hidraulica.pdf>
- Tiwari, A. K., & Kalamkar, V. R. (2018). Effects of total head and solar radiation on the performance of solar water pumping system. *Renewable Energy*, 118, 919-927. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.004>

- Valer Morales, L. R. (2016). *Sistemas fotovoltaicos de bombeamento com conversores de frequência e motobombas de fabricação nacional: avaliação e orientações para sua implantação*. Universidade de São Paulo, São Paulo. Obtenido de <https://repositorio.usp.br/item/002798353>
- Varejão, F. M., Sousa Mello, L. H., Pellegrini Ribeiro, M., Oliveira-Santos, T., & Loureiros Rodrigues, A. (15 de March de 2024). An open source experimental framework and public dataset for vibration-based fault diagnosis of electrical submersible pumps used on offshore oil exploration. *Knowledge-Based Systems*, 288. doi:<https://doi.org/10.1016/j.knosys.2024.111452>
- Varejão, F., Sousa Mello, L., Ribeiro, M., Oliveira-Santos, T., & Loureiros Rodrigues, A. (2024). An open source experimental framework and public dataset for vibration-based fault diagnosis of electrical submersible pumps used on offshore oil exploration. *Knowledge-Based Systems*, 14. doi:<https://doi.org/10.1016/j.knosys.2024.111452>
- Viejo Zubicaray, M., & Álvarez Fernandez, J. (2004). Bombas. En *Teoría, diseño y aplicaciones* (Tercera ed., pág. 240). Mexico: Limusa.
- WEG. (15 de ABRIL de 2023). *CFW500*. Obtenido de https://www.weg.net/catalog/weg/ES/es/Drives/Convertidores-de-Frecuencia/OEM-y-Proposito-General/Convertidor-de-Frecuencia-CFW500/Convertidor-de-Frecuencia-CFW500/p/mkt_wdc_global_variable_speed_drive_CFW500
- WEG. (18 de Abril de 2023). *CFW500 Solar Drive*. Obtenido de https://www.weg.net/catalog/weg/ES/es/Drives/Convertidores-de-Frecuencia/OEM-y-Proposito-General/Convertidor-de-Frecuencia-CFW500/Convertidor-de-Frecuencia-CFW500/p/Mkt_wdc_global_variable_speed_drive_CFW500
- Wei, Q., Tan, C., Gao, X., Guan, X., & Shi, X. (February de 2024). Research on early warning model of electric submersible pump wells failure based on the fusion of physical constraints and data-driven approach. *Geoenergy Science and Engineering*, 233. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.212489>
- World water reserve. (2023). *Water Management*. Obtenido de <https://worldwaterreserve.com/pumping-water-from-a-river/>

- Yaichi, M., Fellah, M. K., Tayebi, A., & Boutadara, A. (April de 2019). A fast and simplified method using non-linear translation of operating points for PV modules energy output and daily pumped water to predict the performance of a stand-alone photovoltaic pumping system at different heads. *Renewable Energy*, 13. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.004>
- Yancachajlla Tito, U., Quispe Huaman, L., & Vilca Huayta, O. A. (2020). Evaluation of the Peak-Sun Hour on a Tilted Surface in the City of Juliaca. (2. I. Electronics, Ed.) *IEEE Xplore*, 1-4. doi:10.1109/INTERCON50315.2020.9220191
- Zhang, T., Wang, F., Gao, Y., Liu, Y., Guo, Q., & Zhao, Q. (April de 2023). Optimization of a solar-air source heat pump system in the high-cold and high-altitude area of China. (X. Zhao, Ed.) *Energy*, 268, 11. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126653>

ANEXOS

ANEXO 1. Ficha técnica de la bomba sumergible de 2 HP de la marca Stairs.

40M

MOTORI SOMMERSI 4" IN BAGNO D'OLIO RAVVOLGIBILI

Motori progettati per funzionare in pozzi di 4" di diametro fino a 100 metri.

Motore a magneti lussuosi in lega di alluminio e acciaio inossidabile, con un alto livello di protezione contro l'umidità e l'olio. Il motore è progettato per funzionare in pozzi di 4" di diametro fino a 100 metri. Il motore è progettato per funzionare in pozzi di 4" di diametro fino a 100 metri.

CARATTERISTICHE DEL PRODOTTO

CAPACITÀ DI LAVORO E RENDIMENTO: il motore è progettato per funzionare in pozzi di 4" di diametro fino a 100 metri.

SUPPORTO SUPERFICIALE: il motore è progettato per funzionare in pozzi di 4" di diametro fino a 100 metri.

PROTEZIONE CONTRO L'UMIDITÀ: il motore è progettato per funzionare in pozzi di 4" di diametro fino a 100 metri.

PROTEZIONE CONTRO L'OLIO: il motore è progettato per funzionare in pozzi di 4" di diametro fino a 100 metri.

STATORE: a 24 denti, appositamente studiato per ottenere il massimo rendimento elettrico. È realizzato in acciaio inossidabile e ha un alto livello di protezione contro l'umidità e l'olio.

CONNESSIONE CAVO E ALIMENTAZIONE: il motore è progettato per funzionare in pozzi di 4" di diametro fino a 100 metri.

PROTEZIONE CONTRO L'UMIDITÀ: il motore è progettato per funzionare in pozzi di 4" di diametro fino a 100 metri.



4" REMINDABLE OIL FILLED SUBMERSIBLE MOTORS

Motors designed to work in 4" oil wells wells. The use of very high quality Magnesium alloy materials and our special mechanical design and high performing electrical features. All cast in contact with copper in the 4" stainless steel. The power cable with an increase in the cable diameter to allow higher flows.

PRODUCT FEATURES

POWER AND EFFICIENCY: the motor is designed to work in 4" oil wells wells.

TOP PROTECTION: cast in contact with copper in the 4" stainless steel.

MOISTURE PROTECTION: the motor is designed to work in 4" oil wells wells.

MOISTURE PROTECTION: the motor is designed to work in 4" oil wells wells.

STATOR: with 24 slots, specifically developed to achieve maximum electric yield. High speed and mirrored in selected material to ensure high efficiency and low losses.

WINDING AND CONNECTION: the motor is designed to work in 4" oil wells wells.

MOISTURE PROTECTION: the motor is designed to work in 4" oil wells wells.

TESTED: all motors are tested at the end of the line. An

ELECTRICAL DATA - 50/60Hz

Type	P ₁ (HP)	P ₂ (kW)	Voltage (V)	I _n (A)	I _{sc} (A)	rpm	cosφ	Capacitor (µF)	Thrust load (kg)	Length (m)	Weight (kg)	Cable section (mm²)	Cable Length (m)	
40M-9050	0.5	0.37	230	1.8	12	2810	0.87	20	2000	311.3	8.45	4 x 1.5	1.7	
40M-9075	0.75	0.55	230	1.4	16	2810	0.88	25	2000	331.3	7.2	4 x 1.5	1.7	
40M-9100	1	0.75	230	1.1	20	2810	0.88	30	2000	350.3	6.45	4 x 1.5	1.7	
40M-9200	2	1.5	230	0.7	35	2810	0.83	60	2000	430.3	11.05	4 x 1.5	1.7	
40M-9300	3	2.2	230	0.5	47	2820	0.83	80	2000	491.3	14.8	4 x 1.5	1.7	
40M-9400	4	3	230	0.4	55	2820	0.84	75	80	500	15.1	4 x 1.5	1.7	
40M-9500	5	3.7	230	0.3	65	2810	0.85	75	100/100/100	500	15.9	4 x 2	2.7	
40M-9500	5	4	230	0.3	104	2840	0.83	75	100/100/100	500	20.95	4 x 2	2.7	
40M-T650	0.5	0.37	230	2.2	8.9	2855	0.78	27	-	2000	311.3	8.45	4 x 1.5	1.7
40M-T675	0.75	0.55	230	1.8	6.8	2850	0.78	22	-	2000	331.3	7.2	4 x 1.5	1.7
40M-T700	1	0.75	230	1.4	10.5	2820	0.74	22	-	2000	350.3	6.45	4 x 1.5	1.7
40M-T750	1.5	1.1	400	0.9	20	2820	0.68	28	-	2000	371.3	9.25	4 x 1.5	1.7
40M-T800	2	1.5	400	0.7	30	2820	0.64	70	-	2000	390.3	10.2	4 x 1.5	1.7
40M-T900	3	2.2	400	0.5	40	2820	0.68	75	-	2000	430.3	11.05	4 x 1.5	1.7
40M-T900	3	2.2	400	0.5	47	2820	0.68	75	-	2000	450	11.9	4 x 1.5	1.7
40M-T900	3	2.2	400	0.5	55	2810	0.68	75	-	2000	481.3	14.8	4 x 1.5	1.7
40M-T900	3	2.2	400	0.5	65	2820	0.68	75	-	2000	491.3	14.9	4 x 1.5	1.7
40M-T650	0.5	0.37	230	1.8	8.9	2840	0.83	78	-	6000	506	16.1	4 x 2	2.7
40M-T750	1.5	1.1	400	0.9	16.5	2820	0.68	78	-	6000	506	16.1	4 x 2	2.7
40M-T900	3	2.2	400	0.5	22.7	2820	0.78	78	-	6000	506	16.1	4 x 2	2.7
40M-T900	3	2.2	400	0.5	27.4	2820	0.68	78	-	6000	506	16.1	4 x 2	2.7
40M-T900	3	2.2	400	0.5	30.5	2820	0.68	81	-	6000	506	16.1	4 x 2	2.7

ELECTRICAL DATA - 60Hz

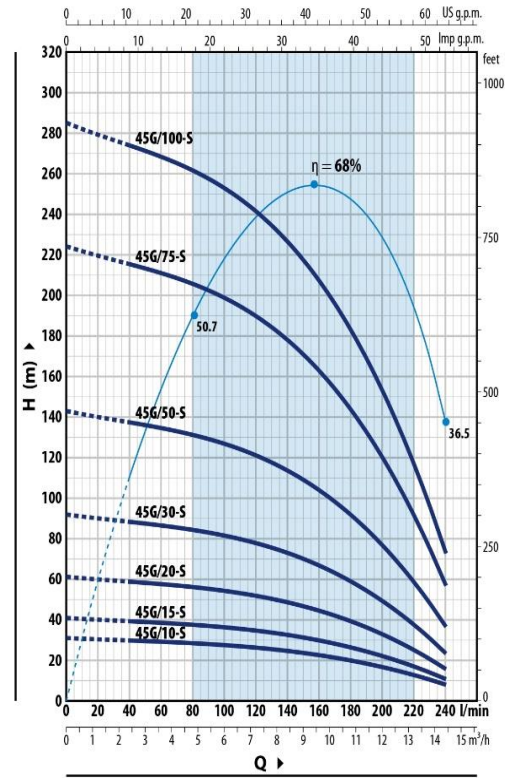
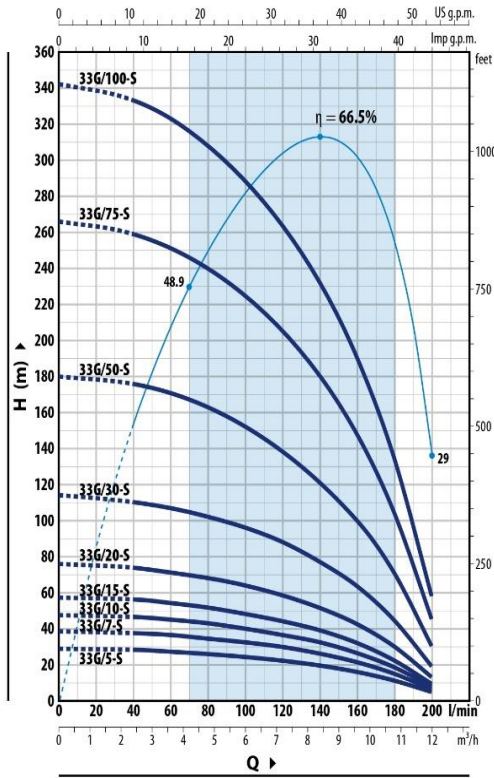
Type	P ₁ (HP)	P ₂ (kW)	Voltage (V)	I _n (A)	I _{sc} (A)	rpm	cosφ	Capacitor (µF)	Thrust load (kg)	Length (m)	Weight (kg)	Cable section (mm²)	Cable Length (m)	
40M-9050	0.5	0.37	230	1.8	12	3450	0.82	20	1.6	2000	331.3	7.2	4 x 1.5	
40M-9075	0.75	0.55	230	1.4	16	3420	0.85	25	1.5	2000	350.3	6.45	4 x 1.5	
40M-9100	1	0.75	230	1.1	20	3430	0.85	30	1.4	2000	371.3	10.2	4 x 1.5	
40M-9150	1.5	1.1	230	0.8	30	3430	0.84	40	1.8	2000	386.3	11.25	4 x 1.5	
40M-9200	2	1.5	230	0.6	40	3430	0.84	60	1.25	2000	430.3	11.05	4 x 1.5	
40M-9300	3	2.2	230	0.4	50	3420	0.86	80	1.15	2000	450	11.9	4 x 1.5	
40M-9500	5	3.7	230	0.3	65	3480	0.83	75	100/100/100	115	500	15.9	4 x 2	
40M-9500	5	4	230	0.3	107	3420	0.83	75	100/100/100	115	500	20.95	4 x 2	
40M-T650	0.5	0.37	230	2.2	11.5	3445	0.77	27	-	1.6	2000	311.3	8.45	4 x 1.5
40M-T675	0.75	0.55	230	1.8	10.3	3435	0.77	22	-	1.5	2000	331.3	7.2	4 x 1.5
40M-T700	1	0.75	230	1.4	11.5	3450	0.72	22	-	1.4	2000	350.3	6.45	4 x 1.5
40M-T750	1.5	1.1	400	0.9	20.5	3480	0.82	28	-	1.4	2000	371.3	9.25	4 x 1.5
40M-T800	2	1.5	400	0.7	30	3440	0.83	28	-	1.3	2000	371.3	9.25	4 x 1.5
40M-T900	3	2.2	400	0.5	40	3420	0.83	28	-	1.25	2000	390.3	10.2	4 x 1.5
40M-T900	3	2.2	400	0.5	47	3420	0.83	28	-	1.25	2000	430.3	11.05	4 x 1.5
40M-T900	3	2.2	400	0.5	55	3420	0.83	28	-	1.15	2000	450	11.9	4 x 1.5
40M-T900	3	2.2	400	0.5	65	3420	0.83	28	-	1.15	2000	481.3	14.9	4 x 1.5
40M-T950	3.5	4	230	0.3	87	3440	0.74	77	-	1.15	5000	505	15.1	4 x 2
40M-T950	3.5	4	230	0.3	137	3440	0.74	77	-	1.15	5000	505	15.1	4 x 2
40M-T750	1.5	1.1	400	0.9	16.5	3480	0.74	80	-	1.15	5000	505	15.1	4 x 2
40M-T900	3	2.2	400	0.5	22.7	3480	0.78	81	-	1.15	5000	505	15.1	4 x 2
40M-T900	3	2.2	400	0.5	27.4	3480	0.78	81	-	1.15	5000	505	15.1	4 x 2
40M-T900	3	2.2	400	0.5	30.5	3440	0.77	81	-	1.15	5000	505	15.1	4 x 2

ANEXO 2. Ficha técnica de la bomba sumergible de 2HP de la marca Pedrollo.



CURVAS Y DATOS DE PRESTACIONES

60 Hz



4SR33G-S

MODELO		N. ETAPAS	POTENCIA (P ₂)		Q m ³ /h l/min	H metros											
Monofásica	Trifásica		kW	HP		0	2.4	3.6	4.8	6.0	7.2	8.4	9.6	10.8	12.0		
4SRm 33G/5 - S	4SR 33G/5 - S	3	0.37	0.50	0	28.5	28	26.8	25.7	24.1	22.1	19.4	15.9	11.1	5		
4SRm 33G/7 - S	4SR 33G/7 - S	4	0.55	0.75	40	38	37	36	34	32	29.5	25.9	21.2	14.9	6.5		
4SRm 33G/10 - S	4SR 33G/10 - S	5	0.75	1	60	47.5	46.5	44.5	43	40	37	32.5	26.5	18.6	8		
4SRm 33G/15 - S	4SR 33G/15 - S	6	1.1	1.5	80	57	55.5	53.5	51.5	48	44	39	32	22.3	9.5		
4SRm 33G/20 - S	4SR 33G/20 - S	8	1.5	2	100	76	74	72	68.5	64.5	59	52	42.5	29.5	13		
4SRm 33G/30 - S	4SR 33G/30 - S	12	2.2	3	120	114	111	107	103	96	88	78	63.5	44.5	19		
4SRm 33G/50 - S	4SR 33G/50 - S	19	3.7	5	140	181	176	170	162	153	140	123	101	70.5	30.5		
-	4SR 33G/75 - S	28	5.5	7.5	160	267	259	251	239	225	206	182	148	104	45		
-	4SR 33G/100 - S	36	7.5	10	180	343	333	322	308	289	265	233	191	134	57.5		

4SR45G-S

MODELO		N. ETAPAS	POTENCIA (P ₂)		Q m ³ /h l/min	H metros							
Monofásica	Trifásica		kW	HP		0	2.4	4.8	7.2	9.6	12.0	14.4	
4SRm 45G/10 - S	4SR 45G/10 - S	3	0.75	1	0	30.5	29.5	28	25.9	22.2	16.4	7.5	
4SRm 45G/15 - S	4SR 45G/15 - S	4	1.1	1.5	40	41	39	37.5	34.5	29.5	21.8	10.5	
4SRm 45G/20 - S	4SR 45G/20 - S	6	1.5	2	60	61	59	56	52	44.5	32.5	15.5	
4SRm 45G/30 - S	4SR 45G/30 - S	9	2.2	3	80	92	88	84	78	66.5	49	23	
4SRm 45G/50 - S	4SR 45G/50 - S	14	3.7	5	100	143	137	131	121	104	76	36	
-	4SR 45G/75 - S	22	5.5	7.5	120	224	216	206	190	163	120	57	
-	4SR 45G/100 - S	28	7.5	10	140	286	274	262	242	207	153	72.5	

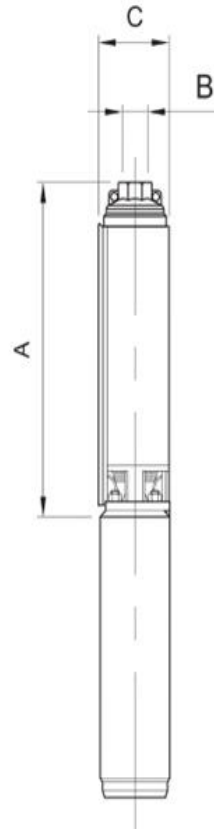
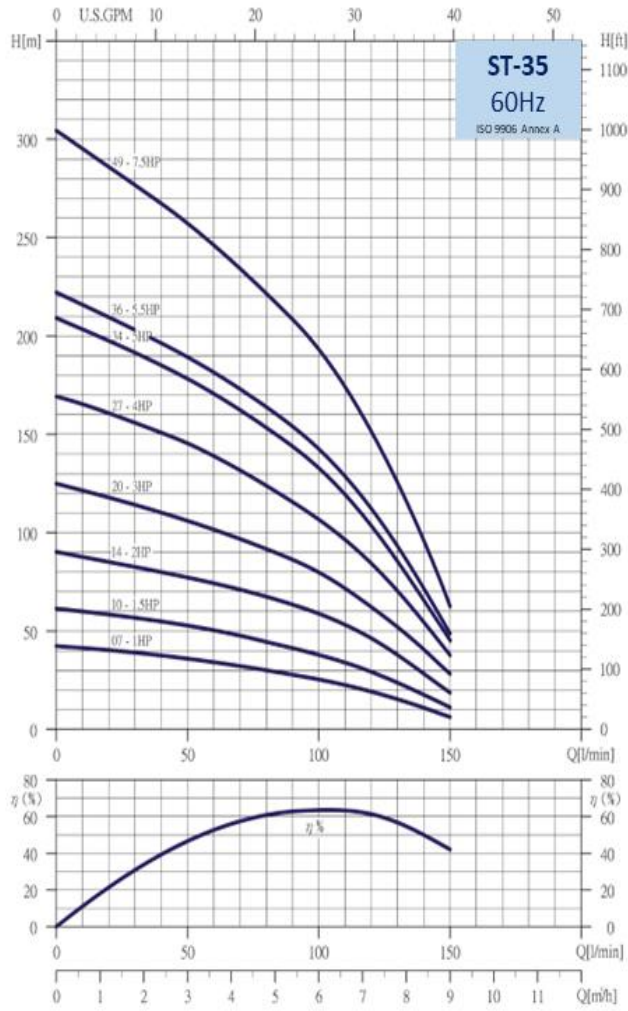
Q = Caudal H = Altura manométrica total

Tolerancia de las curvas de prestación según EN ISO 9906 Grado 3B.

Performance Curves

ST-35

ST 4"



		Selection Chart													
PUMP TYPE	STAGES	MOTOR		Q=DELIVERY											
		KW	HP	Q [l/min]											
				45	50	60	70	80	90	100	120	140			
				Q [m³/h]											
				H=TOTAL HEAD IN METERS											
				0	2.7	3	3.6	4.2	4.8	5.4	6	7.2	8.4		
ST-3507	7	0.75	1	42		36	34	32	30	28	25	19	11		
ST-3510	10	1.1	1.5	62		53	51	48	45	41	38	29	18		
ST-3514	14	1.5	2	90		77	74	71	68	63	59	46	28		
ST-3520	20	2.2	3	125		107	102	97	92	86	80	62	40		
ST-3527	27	3	4	169		145	139	131	123	115	107	84	55		
● ST-3534	34	3.7	5	208		178	170	162	153	143	132	103	66		
● ST-3536	36	4	5.5	221		190	181	173	164	154	143	112	72		
● ST-3549	49	5.5	7.5	302		257	246	234	222	209	193	151	96		

The ● means outer sleeve made by 2 pieces

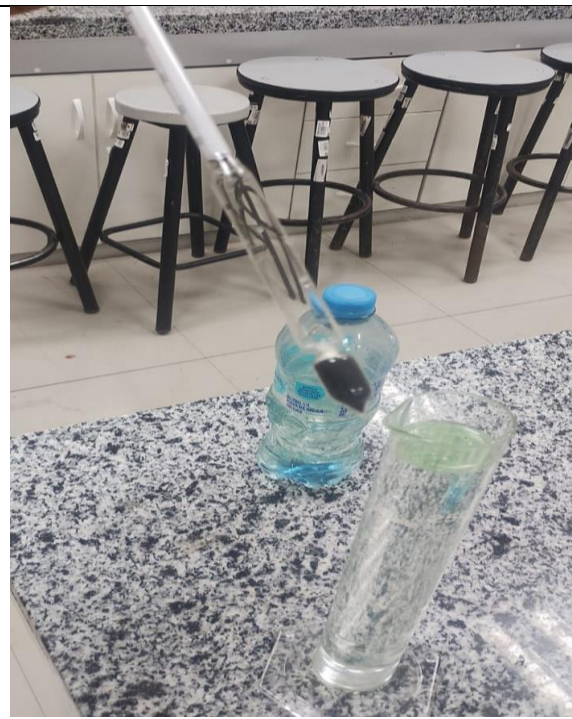
Dimensions and Weights				
Pump Type	Dimensions(mm)			N/W (kg)
	A	B	C	
ST-3507	390	NPT: 2"	98	3.7
ST-3510	483		98	4.6
ST-3514	607		98	5.7
ST-3520	831		98	7.5
ST-3527	1066		99	10.6
ST-3534	1325		98	12.6
ST-3536	1384		98	13.2
ST-3549	1863		98	16.9

ANEXO 4. Medición de la densidad del tipo de fluido utilizado en el módulo de pruebas



Prueba de densidad del agua utilizada en el módulo de pruebas.



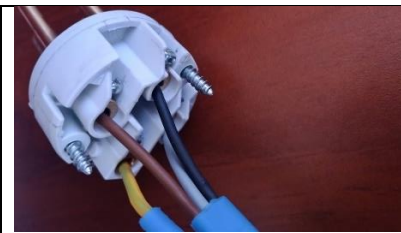

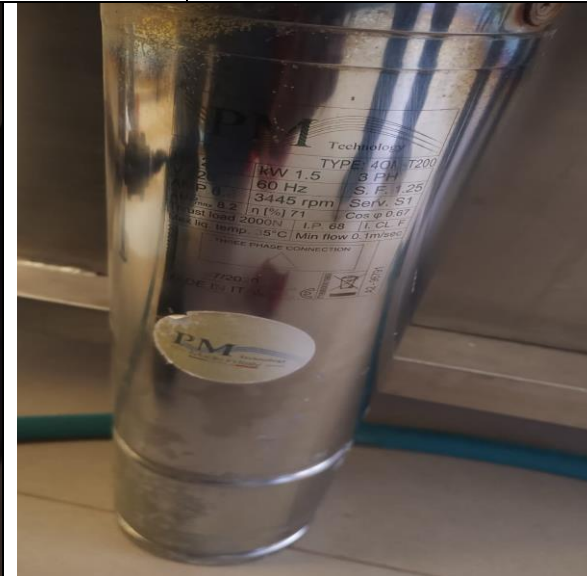


Equipo de medición- potenciómetro



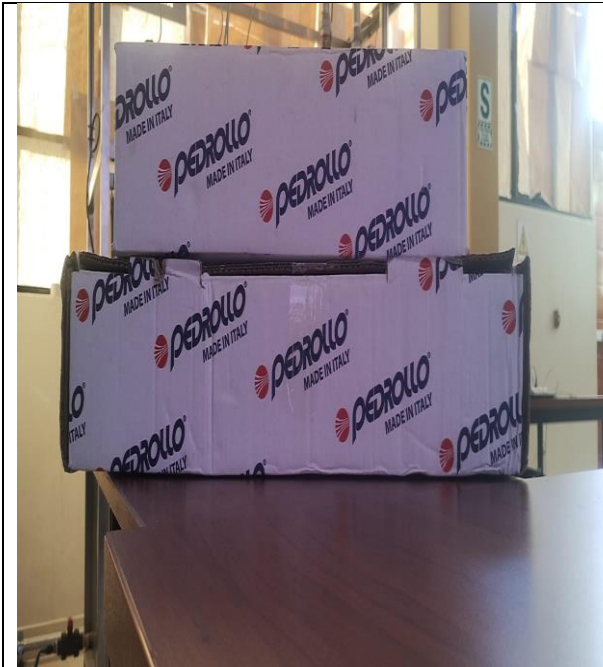
Equipo de medición - conductímetro

Equipo de medición – densímetro

ANEXO 5. Bomba sumergible Stairs

		
<p>Corrosión del componente de conexión del fluido y la tubería de la bomba.</p>	<p>Equipo de conexión de la bomba hacia el tablero - memebre</p>	<p>Conecion de la bomba y el suich.</p>
		
<p>Acoplamiento de la bomba con el módulo de pruebas</p>	<p>Motor de la bomba PM Technology-Stair – 40M-T200</p>	
		
<p>Hidráulica de la bomba Stairs</p>	<p>Datos de la bomba Stairs</p>	

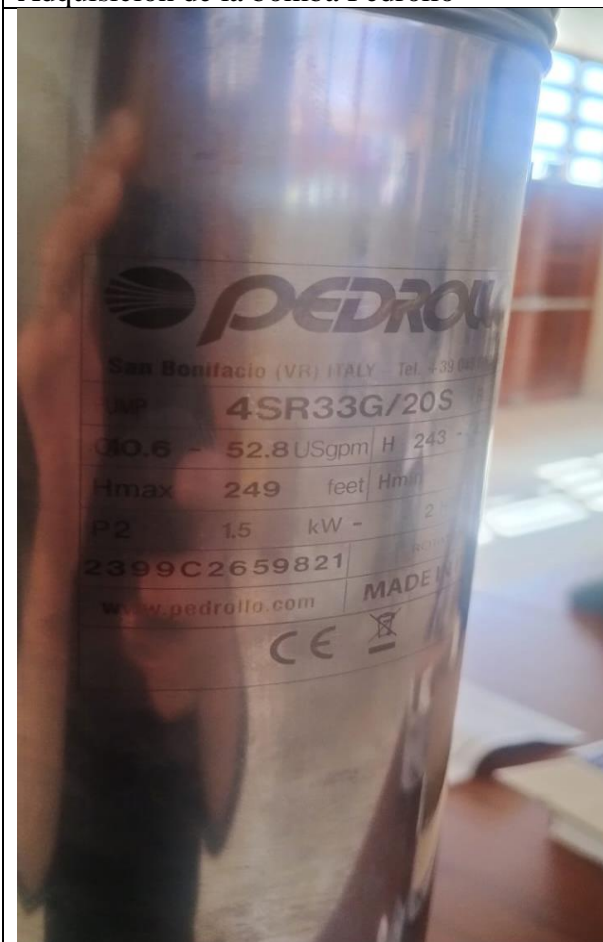
ANEXO 6. Bomba sumergible Pedrollo



Adquisición de la bomba Pedrollo



Etiqueta del equipo

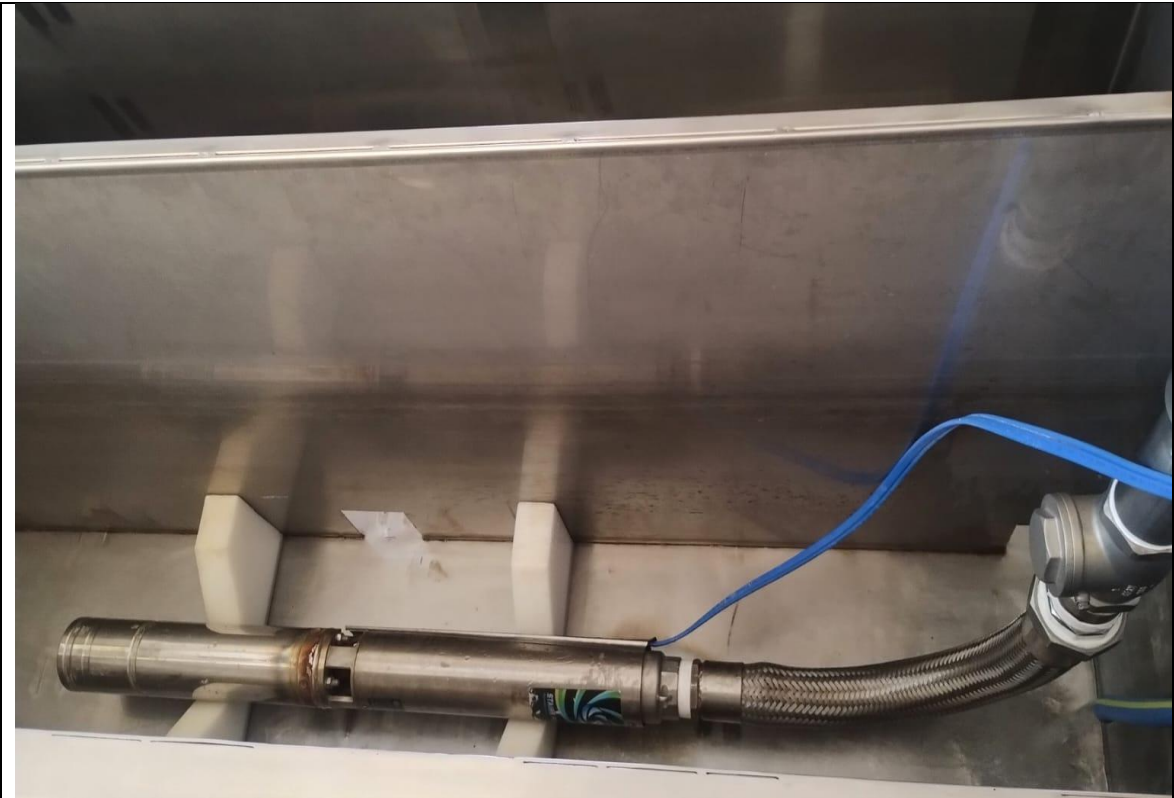


Hidráulica de la bomba Pedrollo

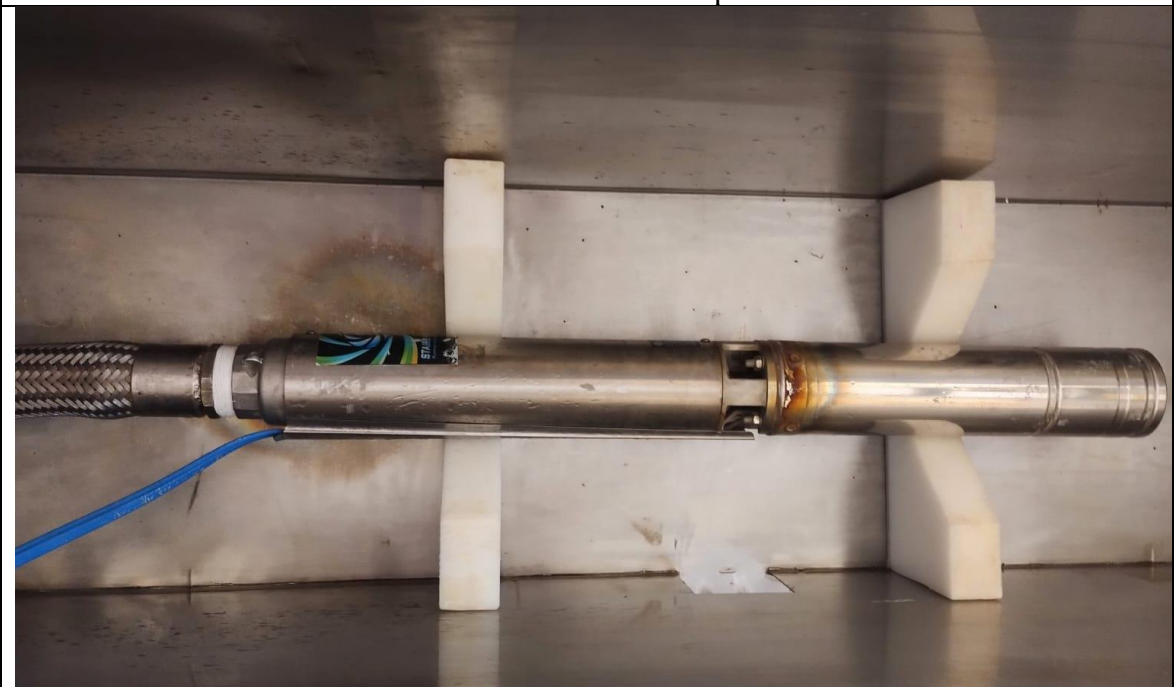


Motor de la bomba Pedrollo

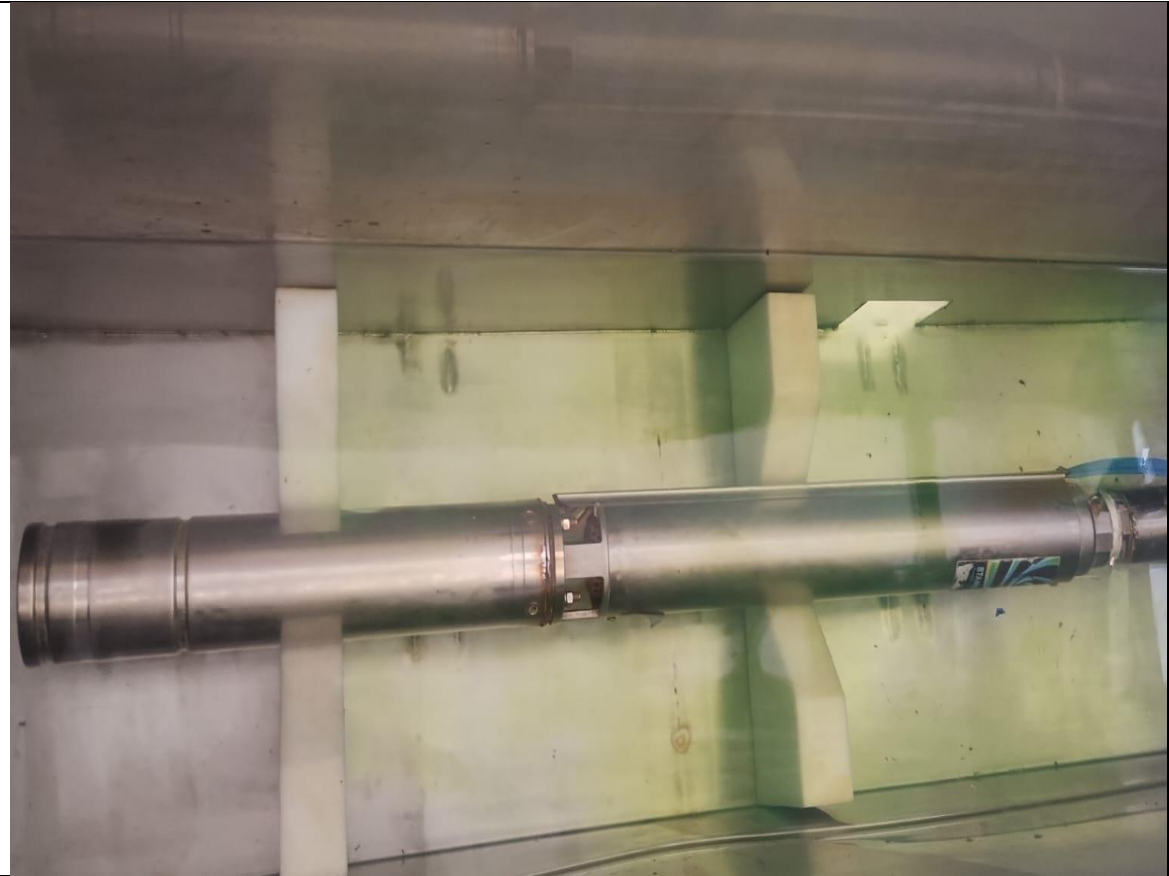
ANEXO 7. Bbomba sumergible Stairs en el módulo de prueba



Posicionamiento de una bomba stairs en el módulo de prueba



Bomba stairs

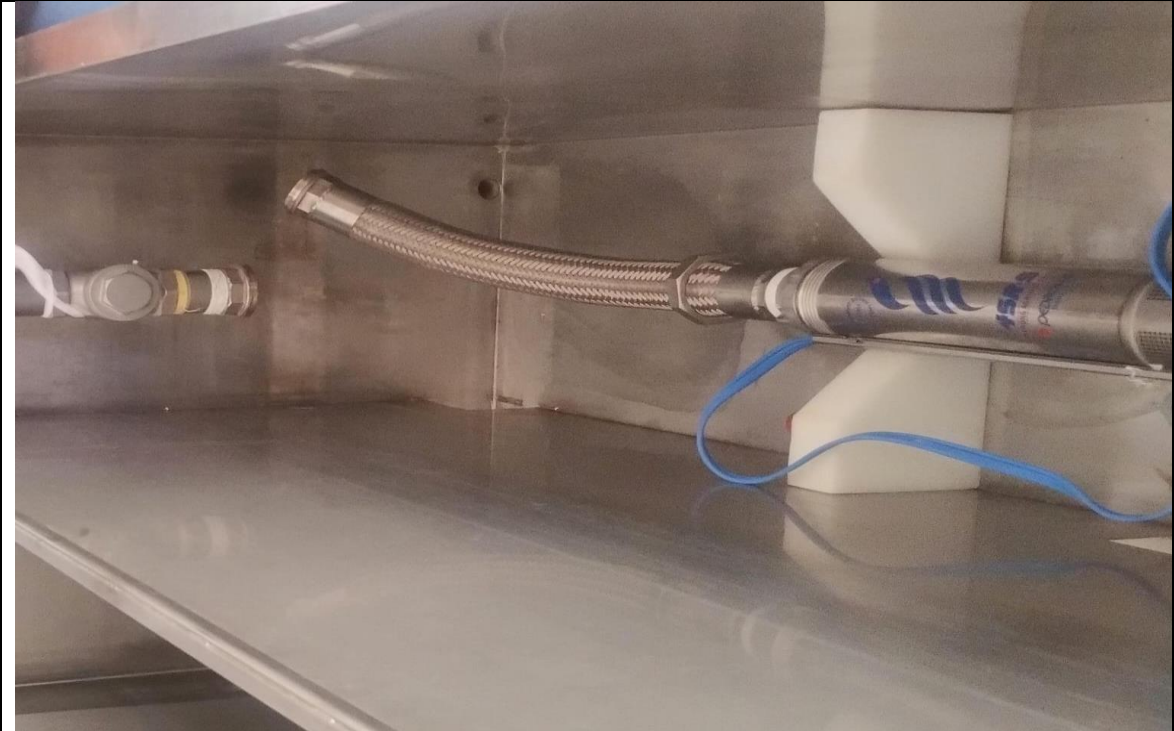


Bomba stairs con el fluido de agua más el aditivo (antioxidante)

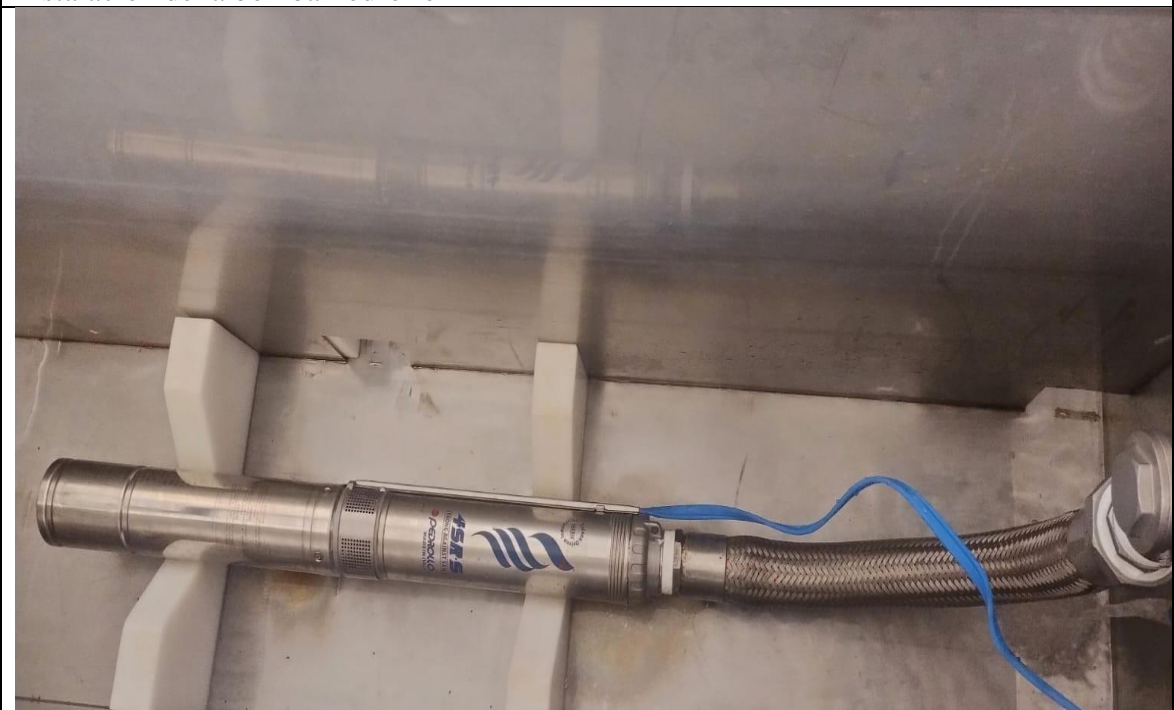


Colocación de la bomba stairs

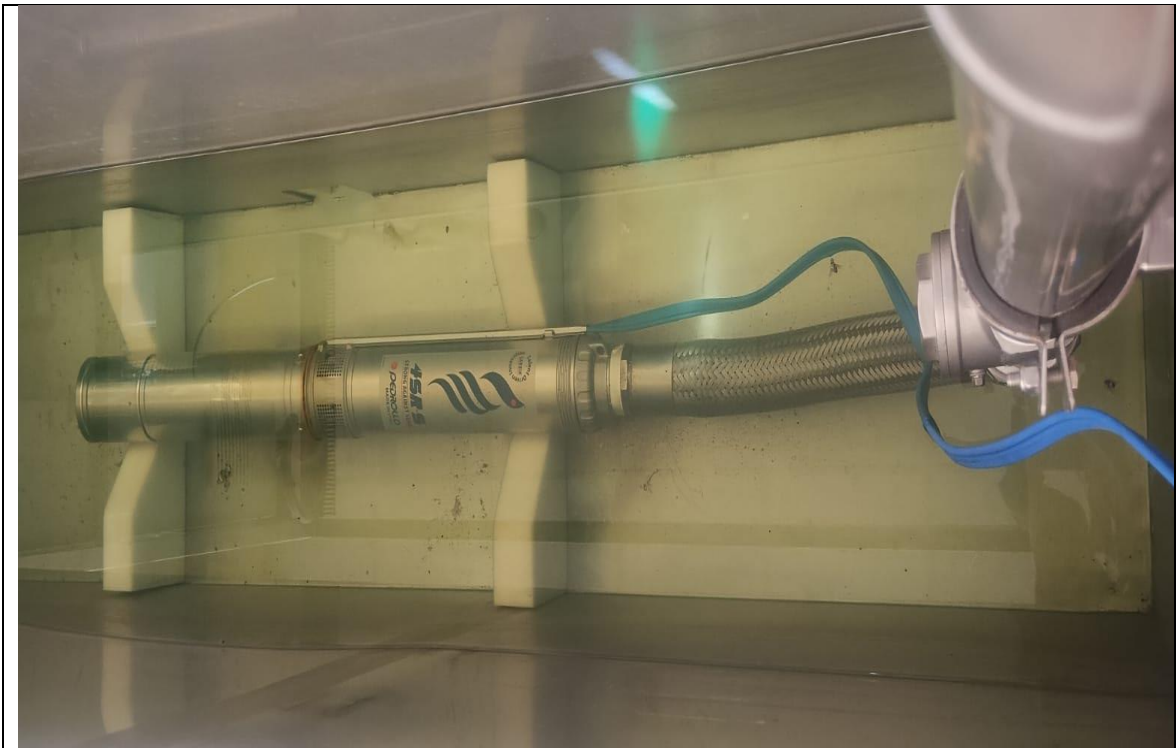
ANEXO 8. Bomba sumergible Pedrollo en el módulo de pruebas



Instalación de la bomba Pedrollo



Bomba Pedrollo



Bomba Pedrollo con el fluido de agua más el aditivo (antioxidante)

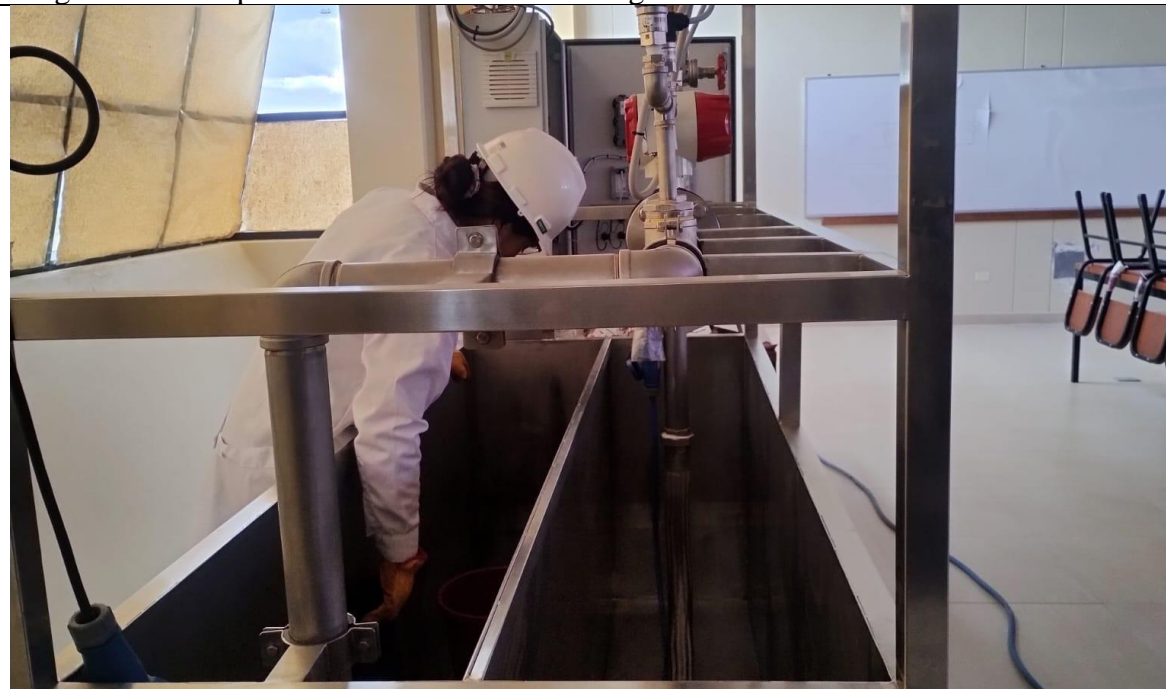


Funcionamiento de la bomba Pedrollo

ANEXO 9. Imágenes fotográficas de las evaluaciones de cada bomba



Programando los parámetros de la bomba sumergible en el tablero de control



Realizando el acoplamiento de la bomba sumergible

UNW



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
"Universidad Pública de Calidad"