

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



UCSC

Evaluación de Sistema de Bombeo Fotovoltaico considerando distintos sistemas de seguimiento solar

Jaime Sandoval Lobos

Informe de Habilitación Profesional para optar al título de:
Ingeniero Civil Eléctrico

Profesor Patrocinante:
Dr. Guillermo Ramírez A.

Profesores Guía:
Dr. Samuel Vergara R.
Dr. Ricardo Lizana F.

Concepción, noviembre de 2025

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCION
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor patrocinante:
Dr. Guillermo Ramírez A.

Evaluación de Sistema de Bombeo Fotovoltaico considerando distintos sistemas de seguimiento solar

Jaime Sandoval Lobos

Informe de Habilitación Profesional para optar al Título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Noviembre 2025

Resumen

Los sistemas de bombeo fotovoltaicos se han consolidado como una alternativa real para el abastecimiento de agua en zonas rurales, agrícolas e industriales con acceso limitado a la red eléctrica o con costos elevados de combustibles fósiles. Esto también ha sido impulsado por el cambio hacia fuentes de energía renovables por sobre las no renovables.

Este informe evalúa un sistema de bombeo fotovoltaico con tres sistemas de seguimiento solar: un eje, un eje inclinado y doble eje. Se consideran dos conexiones del motor (delta y estrella). Se midieron tensiones y corrientes en DC y AC, caudal y presiones, con el fin de calcular la potencia DC, la potencia de entrada, la potencia convertida y la potencia hidráulica, junto con las eficiencias del inversor, del motor, la eficiencia hidráulica y la eficiencia global. El análisis, se divide en mañana (llave parcialmente cerrada) y tarde (llave abierta). También, se realizará una evaluación del fenómeno de cavitación, mediante el método, análisis de corriente del estator.

El montaje experimental se desarrolló en el laboratorio Microred de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, utilizando un equipo de adquisición Dspace MicroLabBox y las plataformas ControlDesk y MATLAB para registro y procesamiento de los datos. Se emplearon sensores de presión y caudal, además de sondas de voltaje y corriente.

Los resultados obtenidos, muestran que en conexión delta los sistemas seguimiento solar presentan rendimientos eléctricos e hidráulicos similares, con pequeñas diferencias entre ellos. Lo mismo ocurre con los seguidores en configuración estrella. Respecto al rendimiento, en conexión delta se alcanza una mejor eficiencia eléctrica e hidráulica en comparación con la configuración estrella.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, que siempre me han brindado su apoyo incondicional, dando todo su cariño y recursos para que nunca me falta nada, y pueda ser la persona que soy, hoy en día.

También, agradecer a mi grupo de amigos de la universidad, por el apoyo mutuo y los buenos momentos vividos.

Asimismo, agradecer a Alfredo Morales y Jorge Nuñez, por la buena disposición y apoyo en el laboratorio de Microred.

Igualmente, agradecer a mi profesor guía, el Dr. Guillermo Ramírez, por su buena predisposición y enseñanzas, a lo largo de estos meses.

Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	VII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	12
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL	12
1.2. COMPONENTES DE UN SBFV	13
1.2.1 Subsistema de generación de energía	13
1.2.2 Subsistema de control	13
1.2.3 Subsistema electromecánico	13
1.3. TRABAJOS PREVIOS	14
1.4. RENDIMIENTO Y APLICACIÓN DE UN SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO	14
1.5. MODELOS DE ESTIMADORES MOTOR INDUCCIÓN.....	17
1.6. CAVITACIÓN	18
1.7. DISCUSIÓN	18
1.8. HIPÓTESIS DE TRABAJO	19
1.9. OBJETIVOS	19
1.9.1 Objetivo General	19
1.9.2 Objetivos Específicos	19
1.10. ALCANCES Y LIMITACIONES	20
1.11. TEMARIO Y METODOLOGÍA	20
CAPÍTULO 2. SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO CON SEGUIMIENTO SOLAR.....	22
2.1. INTRODUCCIÓN	22
2.2. COMPONENTES DEL SBFV	22
2.2.1 Panel fotovoltaico	22
2.2.2 Inversor	24
2.2.3 Bomba de agua.....	25
2.2.4 Cavitación	27
CAPÍTULO 3. MONTAJE EXPERIMENTAL	30
3.1. INTRODUCCIÓN	30
3.2. SENSORES DE PRESIÓN Y CAUDAL	31
3.2.1 Sensor de presión	31
3.2.2 Sensor de caudal.....	31
3.3. SONDAS DE VOLTAJE Y CORRIENTE	32
3.3.1 Sonda de voltaje	32
3.3.2 Sonda de corriente	33
3.4. DSPACE MICROLABBOX 1202	33
3.5. AJUSTE VISUALIZACIÓN DE VARIABLES	34
3.6. CONEXIÓN SISTEMAS DE SEGUIMIENTO SOLAR A BOMBA DE AGUA	37
CAPÍTULO 4. MODELOS DE ESTIMACIÓN DE VELOCIDAD Y TORQUE.....	39
4.1. INTRODUCCIÓN	39
4.2. CAMBIO DE COORDENADAS ABC A DQ.....	39
4.3. MODELO HÍBRIDO.....	40
4.3.1 Modelo de Voltaje.....	40
4.3.2 Modelo de Corriente	40
4.3.3 Modelo Final	41
4.4. ESTIMACIÓN TORQUE	42
4.5. MODELO BEMF-MRAS	42
4.6. ARREGLOS VISUALIZACIÓN VELOCIDAD Y TORQUE.....	44
4.7. POTENCIAS.....	46
4.7.1 Potencia DC	46
4.7.2 Potencia de entrada al motor	46
4.7.3 Potencia convertida	46
4.7.4 Potencia hidráulica	47
4.8. EFICIENCIA DEL SISTEMA	47

4.8.1	Eficiencia total del sistema.....	47
4.8.2	Eficiencia del inversor.....	47
4.8.3	Eficiencia del motor.....	48
4.8.4	Eficiencia hidráulica.....	48
CAPÍTULO 5. EVALUACIÓN SISTEMA DE BOMBEO CON DIFERENTES SISTEMAS DE SEGUIMIENTO SOLAR.....		49
5.1.	INTRODUCCIÓN	49
5.2.	SETUP REGISTRO DE DATOS EXPERIMENTALES.....	49
5.2.1	Registro datos de irradiancia	50
5.3.	EVALUACIÓN SBFV CONEXIÓN EN ESTRELLA	52
5.3.1	Pruebas SBFV con sistema de seguimiento solar de un eje.....	52
5.3.2	Pruebas SBFV con sistema de seguimiento solar de un eje inclinado.....	60
5.3.3	Pruebas SBFV con sistema de seguimiento solar con doble eje.....	68
5.4.	EVALUACIÓN SBFV CONEXIÓN EN DELTA.....	78
5.4.1	Pruebas SBFV con sistema de seguimiento solar de un eje.....	78
5.4.2	Pruebas SBFV con sistema de seguimiento solar con un eje inclinado.....	85
5.4.3	Pruebas SBFV con sistema de seguimiento solar con doble eje.....	93
5.5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	103
5.5.1	Análisis volumen de agua acumulado	103
5.5.2	Análisis volumen de agua acumulado normalizado	104
5.5.3	Análisis energía DC normalizada.....	104
5.5.4	Análisis volumen de agua acumulada por energía DC	106
CAPÍTULO 6. DETECCIÓN DE CAVITACIÓN MEDIANTE ANÁLISIS DE CORRIENTE DE ESTATOR.....		108
6.1.	INTRODUCCIÓN	108
6.2.	MOTOR CURRENT SIGNATURE ANALYSIS	108
6.3.	PRUEBAS EXPERIMENTALES CON APERTURA PROGRESIVA DE LLAVE DE PASO MOTOR CONEXIÓN ESTRELLA.....	110
6.4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	117
CAPÍTULO 7. CONCLUSIÓN		122
7.1.	SUMARIO	122
7.2.	CONCLUSIONES.....	122
7.3.	TRABAJOS FUTUROS.....	125
ANEXO A. ESPECTROS DE FRECUENCIA EN CONEXIÓN DELTA.....		129

Lista de Tablas

Tabla 2.3. Parámetros inversor ABB ACS355.....	25
Tabla 2.4. Parámetros bomba de agua CMT 100/00 PENTAX.....	26
Tabla 3.1. Parámetros sensor WIKA A-10.	31
Tabla 3.2. Parámetros sensor caudal AS5000 IFE.....	32
Tabla 3.3. Parámetros Dspace MicroLabBox 1202.	34
Tabla 5.1. Promedio de parámetros obtenidos por los sistemas de seguimiento solar en conexión estrella.	77
Tabla 5.2. Horas de operación de sistemas de seguimiento solar en estrella.....	77
Tabla 5.3. Promedio de parámetros obtenidos por los sistemas de seguimiento solar en conexión delta.	102
Tabla 5.4. Horas de operación de sistemas de seguimiento solar en delta.....	102
Tabla 6.1. Parámetros del sistema bajo diferentes configuraciones de la llave de paso en conexión estrella.	116
Tabla 6.2. Parámetros del sistema bajo diferentes configuraciones de la llave de paso en conexión delta.	117
Tabla 6.3. Fr calculado en conexión estrella.....	118
Tabla 6.4. Fr calculado en conexión delta.....	120

Lista de Figuras

Fig. 1.1. Esquema SBFV.....	13
Fig. 2.1. Microred UCSC [10].....	23
Fig. 2.2. Inversor de bomba solar ACS355 ABB.....	25
Fig. 2.3. Bomba de agua CTM 100/00 PENTAX [15].	26
Fig. 2.4. Curva caudal bomba de agua CMT 100/00 PENTAX [15].	27
Fig. 2.5. Curva eficiencia vs caudal bomba de agua CMT 100/00 PENTAX [15].	27
Fig. 3.1. Setup SBFV laboratorio UCSC.	30
Fig. 3.2. Sensor de Presión A-10 WIKA.....	31
Fig. 3.3. Sensor de caudal SA5000 IFE.	32
Fig. 3.4. Sonda voltaje DP-25 Pintek.	32
Fig. 3.5. Sonda de corriente i30s Fluke.....	33
Fig. 3.6. Dspace MicroLabBox 1202.	33
Fig. 3.7. Diagrama arreglo voltajes.....	34
Fig. 3.8. (a) Voltaje de fase Van con y sin filtro pasa bajo 500 [Hz], (b) zoom ciclos Van con y sin filtro.....	35
Fig. 3.9. Diagrama arreglo corrientes.....	36
Fig. 3.10. (a) Corriente de fase con y sin filtro pasa bajo 500 [Hz], (b) zoom ciclos corriente de fase con y sin filtro.	36
Fig. 3.11. Inversores SUNNY TRIPOWER ubicados en laboratorio Microred.	37
Fig. 3.12. Área de conexión inversor SUNNY TRIPOWER.....	38
Fig. 3.13. Conectores de enlace.....	38
Fig. 4.1. Diagrama modelo híbrido [11].....	42
Fig. 4.2. Modelo BEMF-MRAS [11].....	43
Fig. 4.3 Filtros para velocidad y torque	44
Fig. 4.4. Velocidad con y sin filtro pasa bajo de 5 [Hz].....	45
Fig. 4.5. Torque con y sin filtro pasa bajo de 5 [Hz].	45
Fig. 5.1. Setup recopilación de datos.	50
Fig. 5.2. Sensor de irradiación fijo.....	51
Fig. 5.3. Sensor de irradiancia en seguidor solar de doble eje.	51
Fig. 5.4. Sensor S-LIB-M003 HOBO [19].....	52
Fig. 5.5. Irradiancia 5 de septiembre.....	53
Fig. 5.6. (a) Corriente DC y (b) Voltaje DC.	54
Fig. 5.7. (a) Corriente de fase A y (b) voltaje de fase AB.....	55
Fig. 5.8. (a) Caudal y (b) Presión.	56
Fig. 5.9. (a) Velocidad y (b) Torque.	57
Fig. 5.10. (a) Potencia DC y (b) Potencia de entrada al motor.	58
Fig. 5.11. (a) Potencia convertida y (b) Potencia hidráulica.	59
Fig. 5.12. Eficiencia: (a) Global, (b) Inversor, (c) Motor y (d) Hidráulica.....	60
Fig. 5.13. Irradiancia 29 de septiembre.....	61
Fig. 5.14. (a) Corriente DC y (b) Voltaje DC.	62
Fig. 5.15. (a) Corriente y (b) Voltaje de fase.	63
Fig. 5.16. (a) Caudal y (b) Presión.	64
Fig. 5.17. (a) Velocidad y (b) Torque.	65
Fig. 5.18. (a) Potencia DC y (b) Potencia de salida del inversor.	66

Fig. 5.19. (a) Potencia convertida y (b) Potencia hidráulica.	67
Fig. 5.20. Eficiencia: (a) Global, (b) Inversor, (c) Motor e (d) Hidráulica.	68
Fig. 5.21. Irradiancia 25 de agosto.	69
Fig. 5.22. (a) Corriente DC y (b) Voltaje DC.	70
Fig. 5.23. (a) Corriente de fase y (b) Voltaje de fase.	71
Fig. 5.24. (a) Caudal y (b) Presión.	72
Fig. 5.25. (a) Velocidad y (b) Torque.	73
Fig. 5.26. (a) Potencia DC y (b) Potencia de salida del inversor.	74
Fig. 5.27. (a) Potencia convertida y (b) Potencia hidráulica.	75
Fig. 5.28. Eficiencia: (a) Global, (b) Inversor, (c) Motor e (d) Hidráulica.	76
Fig. 5.29. Irradiancia 5 de octubre.	78
Fig. 5.30. (a) Corriente DC y (b) Voltaje DC.	79
Fig. 5.31. (a) Corriente de fase y (b) Voltaje de fase.	80
Fig. 5.32. (a) Caudal y (b) Presión.	81
Fig. 5.33. (a) Velocidad y (b) Torque.	82
Fig. 5.34. (a) Potencia DC y (b) Potencia de salida inversor.	83
Fig. 5.35. (a) Potencia convertida y (b) Potencia hidráulica.	84
Fig. 5.36. Eficiencia: (a) Global, (b) Inversor, (c) Motor e (d) Hidráulica.	85
Fig. 5.37. Irradiancia 23 de junio.	86
Fig. 5.38. (a) Corriente DC y (b) Voltaje DC.	87
Fig. 5.39. (a) Corriente de fase y (b) Voltaje de fase.	88
Fig. 5.40. (a) Caudal y (b) Presión.	89
Fig. 5.41. (a) Velocidad y (b) Torque.	90
Fig. 5.42. (a) Potencia DC y (b) Potencia salida de inversor.	91
Fig. 5.43. (a) Potencia convertida y (b) Potencia hidráulica.	92
Fig. 5.44. Eficiencia: (a) Global, (b) Inversor, (c) Motor e (d) Hidráulica.	93
Fig. 5.45. Irradiancia 30 de septiembre.	94
Fig. 5.46. (a) Corriente DC y (b) Voltaje DC.	95
Fig. 5.47. (a) Corriente de fase y (b) Voltaje de fase.	96
Fig. 5.48. (a) Caudal y (b) Presión.	97
Fig. 5.49. (a) Velocidad y (b) Torque.	98
Fig. 5.50. (a) Potencia DC y (b) Potencia de salida inversor.	99
Fig. 5.51. (a) Potencia convertida y (b) Potencia hidráulica.	100
Fig. 5.52. Eficiencia: (a) Global, (b) Inversor, (c) Motor e (d) Hidráulica.	101
Fig. 5.53. Volumen de agua acumulado.	103
Fig. 5.54. Volumen de agua acumulado normalizado por horas de operación.	104
Fig. 5.55. Energía DC normalizado por horas de operación.	105
Fig. 5.56. m^3/kWh normalizado por horas de operación.	106
Fig. 6.1. Espectro de frecuencia de corriente en baja frecuencia.	110
Fig. 6.2. Espectro de frecuencia corriente de fase con 5 vueltas de cerrado de llave de paso.	111
Fig. 6.3. Espectro de frecuencia corriente de fase con 4 vueltas de cerrado de llave de paso.	112
Fig. 6.4. Espectro de frecuencia corriente de fase con 3 vueltas de cerrado de llave de paso.	113
Fig. 6.5. Espectro de frecuencia corriente de fase con 2 vueltas de cerrado de llave de paso.	114
Fig. 6.6. Espectro de frecuencia corriente de fase con 1 vuelta de cerrado de llave de paso.	115
Fig. 6.7. Espectro de frecuencia corriente de fase con 0 vueltas de cerrado de llave de paso.	116
Fig. 6.8. (a) fr vs caudal y (b) fr vs presión conexión estrella.	119
Fig. 6.9. (a) fr vs caudal y (b) fr vs presión conexión delta.	120

Fig. A. 1. Espectro de frecuencia corriente de fase con 5 vueltas de cerrado de llave de paso.	129
Fig. A. 2. Espectro de frecuencia corriente de fase con 4 vueltas de cerrado de llave de paso.	129
Fig. A. 3. Espectro de frecuencia corriente de fase con 3 vueltas de cerrado de llave de paso.	130
Fig. A. 4. Espectro de frecuencia corriente de fase con 2 vueltas de cerrado de llave de paso.	130
Fig. A. 5. Espectro de frecuencia corriente de fase con 1 vuelta de cerrado de llave de paso.	131
Fig. A. 6. Espectro de frecuencia corriente de fase con 0 vueltas de cerrado de llave de paso.	131

Abreviaciones

UCSC	: Universidad Católica de la Santísima Concepción.
SBFV	: Sistema de Bombeo Fotovoltaico.
DC	: Corriente continua.
AC	: Corriente alterna.
MPPT	: Seguimiento del punto de máxima potencia.
MRAS	: Model Reference Adaptive System.

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción General

En los últimos años, el calentamiento global y el agotamiento de recursos utilizados para la generación de energía, han sido grandes problemáticas en el mundo, por lo que se ha impulsado el desarrollo e implementación de fuentes de energía que no contaminen al medio ambiente y no se agoten con el paso del tiempo. Una de las fuentes de energía más utilizada, es la energía solar, empleada en diferentes aplicaciones, una de ellas es su uso en los sistemas de bombeo para el riego y extracción de agua [1].

Los sistemas de bombeo fotovoltaico (SBFV) son una gran opción para ayudar a disminuir diferentes problemáticas, como la obtención y distribución de agua, y la reducción de gases contaminantes que afectan al mundo. Estos sistemas de bombeo fotovoltaicos, son especialmente importantes en zonas donde es complejo el acceso a la red eléctrica o a la obtención de combustibles fósiles, para alimentar a los sistemas de bombeo tradicionales [2].

El funcionamiento de estos sistemas es el siguiente: primero, los paneles solares captan la energía del sol y la transforman en energía eléctrica en forma de corriente continua. Después, mediante un inversor, dicha energía, se transforma en corriente alterna y puede ser utilizada para alimentar al equipo de bombeo. Para la captación de la energía solar, existen diferentes configuraciones, como el seguimiento fijo, seguimiento en un eje y seguimiento en dos ejes. Estos tipos de seguidores, permiten captar diferentes niveles de irradiancia, produciendo una mayor o menor cantidad de energía, lo que afecta el desempeño del sistema de bombeo durante su operación [3]. Por lo tanto, es importante realizar un correcto análisis ante la elección de uno de estos seguidores, para el sistema donde se vaya a utilizar.

Este proyecto, evalúa el rendimiento de un sistema de bombeo fotovoltaico ubicado en el laboratorio Microred UCSC, utilizando diferentes sistemas de seguimiento solar. Se obtendrán de variables de voltaje, corriente, caudal, presión, velocidad y torque presentes en el sistema y bomba de agua. Se analizarán los valores instantáneos y acumulados durante el día de prueba de estas variables eléctricas e hidráulicas. A través de esta investigación, se busca determinar cuál de los sistemas de seguimiento ofrece un mejor rendimiento en condiciones reales de operación, contribuyendo así a optimizar el uso de la energía solar en aplicaciones de bombeo de agua.

1.2. Componentes de un SBFV

Un SBFV está compuesto por tres subsistemas: generación de energía, control y electromecánico. Es vital el correcto funcionamiento de cada uno de estos, para obtener el mayor rendimiento del sistema.

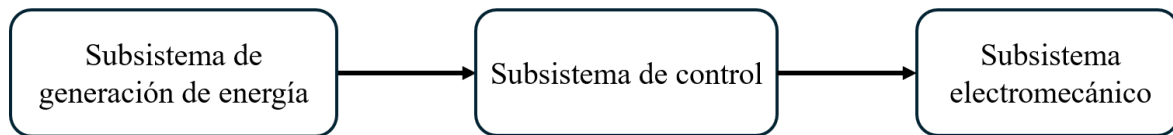


Fig. 1.1. Esquema SBFV.

1.2.1 Subsistema de generación de energía

Este subsistema está compuesto por paneles fotovoltaicos, cuya labor es alimentar eléctricamente al SBFV. El número de paneles puede variar dependiendo de la potencia necesaria para operar el sistema. Estos pueden estar montados en una estructura fija o con seguimiento solar, ya sea de uno o dos ejes, permitiendo aprovechar de mejor manera las condiciones de irradiancia y con ello, aumentar el rendimiento del SBFV durante el día de operación.

1.2.2 Subsistema de control

Este subsistema está compuesto por un inversor o controlador de carga. El inversor es el responsable de transformar la corriente continua generada por los paneles, en corriente alterna, lo que hace posible el funcionamiento de equipos que requieren este tipo de alimentación. Dicho elemento, puede contar con un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), el que puede mejorar el rendimiento en la producción de energía.

1.2.3 Subsistema electromecánico

El subsistema electromecánico está formado por el motor y la bomba, donde el motor convierte la energía eléctrica en energía mecánica y la bomba la transforma en energía hidráulica. La elección de la bomba de agua es un aspecto esencial, ya que existen distintos tipos según su aplicación. En estos sistemas se utilizan principalmente bombas sumergibles, centrífugas y de desplazamiento positivo.

Las bombas sumergibles destacan por su buen caudal y su capacidad para elevar agua a mayores profundidades, aunque su mantenimiento es más complejo. Las centrífugas funcionan bien en alturas bajas y entregan caudales altos, pero son susceptibles a cavitación. Las bombas de desplazamiento positivo son adecuadas para alturas elevadas, ya que ofrecen buena succión, aunque con caudales menores.

1.3. Trabajos Previos

La revisión bibliográfica realizada, se dividirá en tres ítems. El primer ítem se centra en información con respecto a los beneficios económicos, medio ambientales y rendimiento que conlleva la implementación de sistemas de bombeo fotovoltaicos, principalmente en el sector de la agricultura. También, se presenta información de diferentes sistemas de seguimiento solar y su cantidad de energía generada por cada uno, lo que influye en el rendimiento del sistema de bombeo fotovoltaico. Además, se presenta información importante sobre como realizar una correcta evaluación de estos sistemas de bombeo. En el segundo ítem, se muestra modelos para realizar la estimación de velocidad y torque de un motor de inducción, es importante la correcta obtención de estas variables para realizar el análisis de rendimiento para el SBFV. El tercer ítem, cuenta con información sobre el fenómeno de cavitación que se produce en las bombas de agua, esta condición puede causar ineficiencia o daños al sistema de bombeo, por lo tanto, es importante reconocerlo e implementar acciones para prevenirlo. Asimismo, se presenta información sobre el monitoreo de la cavitación, a través del análisis del espectro de frecuencia de la corriente de estator, medida en la bomba de agua.

1.4. Rendimiento y aplicación de un sistema de bombeo fotovoltaico

- ♣ Flörke, M.; Schneider, C.; McDonald, R.I. Water competition between cities and agriculture driven by climate change and urban growth. *Nat. Sustain.* 2018, 1, 51–58 [4].

Este documento, evidencia la competencia para obtener recursos hídricos entre las ciudades y la agricultura, en 482 ciudades alrededor del mundo debido al cambio climático y el crecimiento urbano. El texto analiza, que, según un estudio, para el año 2050 se espera que entre 3,500 y 4,400 millones de personas vivan bajo escasez hídrica. También, se señala que una mejora de la eficiencia del riego en la agricultura puede servir para obtener más agua para el sector urbano. Los sistemas de bombeo fotovoltaicos pueden ocupar un gran lugar en estos procesos, ya sea en la extracción del agua en diferentes lugares del mundo, como también una fuente que no aporta negativamente al

calentamiento global evitando empeorar la escasez hídrica.

- ♣ Guno, C.S.; Agaton, C.B. Socio-Economic and Environmental Analyses of Solar Irrigation Systems for Sustainable Agricultural Production. *Sustainability* 2022, 14, 6834 [5].

Este documento, realiza un análisis socioeconómico y ambiental sobre la implementación de sistemas de bombeo fotovoltaicos para agricultores en Filipinas. Se señala que los agricultores recuperarán su inversión de los sistemas de bombeo fotovoltaicos en un promedio de 2,88 años, considerando que los agricultores que consumen más combustible recuperarán su inversión antes que aquellos que consuman menos combustible. También, señala que el cambio a los sistemas de bombeo fotovoltaicos sobre los que ocupan diésel, reduce en 5,24 toneladas de CO₂ equivalente al año. En cuanto a lo social, el documento señala que un 69% de los agricultores estaría dispuesto a realizar la inversión para pasar a sistemas de bombeo fotovoltaicos, mientras que el 26% no lo haría y un 5% retrasaría su inversión. Por lo tanto, los sistemas de bombeo fotovoltaicos pueden ser una gran opción en la agricultura considerando diferentes variables para su implementación.

- ♣ Demirdelen, T.; Alici, H.; Esenboğa, B.; Güldürek, M. Performance and Economic Analysis of Designed Different Solar Tracking Systems for Mediterranean Climate. *Energies* 2023, 16, 4197 [6].

Este documento, realiza un análisis de rendimiento y costo de un sistema de seguimiento solar fijo, un sistema de seguimiento solar en un eje y de un sistema de seguimiento solar en dos ejes. En una prueba de 15 días, para los tres sistemas de seguimiento solar, el seguimiento solar en dos ejes, es el que generó más energía con 34,127.61 [Wh], después el seguimiento solar en un eje con 32,095.89 [Wh] y, por último, el seguimiento fijo con 25,788.89 [Wh]. También, de las pruebas realizadas a los diferentes sistemas, se muestra, que el seguimiento solar en un eje recupera su inversión 0.39 años más tarde que el fijo y el sistema de seguimiento solar en dos ejes, recupera su inversión en 1.48 años más tarde que el fijo. Es importante considerar estas variables al momento de implementar estos sistemas de seguimiento solar, ya que pueden ser los utilizados en el sistema de bombeo.

- ♣ Bione J, Vilela OC, Fraidenraich N. Comparison of the performance of PV water pumping systems driven by fixed, tracking and V-trough generators. *Sol Energy* 2004;76:703–11 [7].

Este documento, realiza una comparación del rendimiento de un sistema de bombeo

fotovoltaico con tres sistemas de seguimiento solar: sistema fijo, sistema con seguimiento y V-trough. Las pruebas realizadas en este documento, muestra, que el sistema de bombeo fotovoltaico con seguimiento solar movió un volumen de agua anual igual a 1,41 veces el volumen generado por el sistema de bombeo fijo. El estudio muestra que el sistema de bombeo fotovoltaico con seguimiento solar, obtiene una mayor irradiancia, lo que tiene una relación directa con el volumen de agua transportado. Por lo tanto, es importante evaluar diferentes sistemas de seguimiento solar en un sistema de bombeo para observar sus relaciones con el caudal.

- ♣ Gutierrez J, Merino G, Lara D, Salazar L. Hydraulic assessment of a photovoltaic system driving a conventional AC surface electric pump. Department of Mechanization and Energy, Faculty of Agricultural Engineering, Universidad de Concepcion, Chile [8].

El documento presenta la evaluación del rendimiento hidráulico de un sistema de bombeo fotovoltaico en función de la irradiancia obtenida. Se presenta la comparación grafica de variables como caudal, presión y potencia AC, DC e hidráulica en relación con la irradiancia medida en los días en que se realizarón las pruebas. Esto, es una buena forma de evaluación, ya que relaciona directamente la irradiancia con los parámetros obtenidos del sistema. además, permite determinar las horas de funcionamiento optimo del sistema de bombeo, dependiendo de la irradiancia del día y así, entregarle diferentes funciones al sistema.

- ♣ Odeh. A, Yohanis. Y.G, Norton. B. Influence of pumping head, insolation and PV array size on PV water pumping system performance. P.O. Box 1236 Swieleh, Amman 11910, Jordan,2005 [9].

Este documento, trata sobre la evaluación de un sistema de bombeo ante el cambio de diferentes parámetros importantes, como la altura de bombeo, irradiación y tamaño del sistema fotovoltaico. El texto, presenta diversas fórmulas para evaluar la eficiencia de las diferentes etapas que componen este sistema. Estas evaluaciones incluyen, en primer lugar, el análisis de la energía eléctrica generada por los paneles fotovoltaicos, considerando aspectos como la irradiancia, tamaño de la superficie que cubren los paneles y sus características eléctricas. Segundo, se realiza la evaluación de la energía que entra con la energía hidráulica, que sale de la bomba. Por último, realiza un análisis global del sistema de bombeo fotovoltaico.

- ♣ F. Rebolledo, P. Mendoza-Araya, G. Ramirez, G. Carvajal. Performance evaluation of different solar modules and mounting structures on an on-grid photovoltaic system in south-central Chile. Energy for Sustainable Development. 2022 [10].

El texto, presenta la evaluación de diferentes paneles solares, ya sea, en una estructura fija o con seguimiento solar, ubicados en la Universidad Católica de la Santísima Concepción. Se muestra, las características y rendimiento de los diferentes sistemas de seguimiento (un eje, un eje inclinado y dos ejes) y paneles solares (monocristalinos) que serán utilizados en este proyecto, por lo tanto, es importante, la comprensión y análisis de este texto.

1.5. Modelos de estimadores motor inducción

- ♣ Videla Soto A. A. Análisis desempeño de sistema de bombeo fotovoltaico. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico. Universidad Católica de la Santísima Concepción. 2023 [11].

En esta tesis se realiza el análisis de un sistema de bombeo fotovoltaico ubicado en la UCSC. El documento utiliza diferentes modelos para la estimación de la velocidad y torque de un motor de inducción, estos modelos serán utilizados en este proyecto de habilitación profesional. Para la estimación de la velocidad, se utilizó el modelo MRAS, que utiliza las variables de voltaje y corrientes del motor para obtener la velocidad. Además, para la estimación del torque, se tiene que obtener el flujo, este se obtiene utilizando el modelo híbrido, que mezcla los flujos de rotor en coordenadas qd, mediante modelos de voltaje y corriente de estator del motor de inducción.

- ♣ Vas P. Sensorless Vector and Direct Torque Control. Oxford science publications. 1998 [12].

Este libro explica el control vectorial y de torque sin sensores para accionamientos como maquinas sincrónicas y máquinas de inducción. Para estas últimas, establece un método para estimar la velocidad del rotor para un motor, llamado Model Reference Adaptive System (MRAS), este utiliza el voltaje y corriente medida, también utiliza modelos de voltaje y corriente para el motor, los que compara y la salida de estos dos modelos debe tener un error igual a cero, por lo que se utiliza un controlador PI.

1.6. Cavitación

- ♣ Rodríguez Varela Gómez J. Análisis teórico y experimental de cavitación en bombas centrifugas. Departamento de Energía. Universidad de Oviedo. 2018 [13].

Este documento realiza un análisis del fenómeno de cavitación que se produce en las bombas centrifugas. El texto señala que la cavitación es un fenómeno que ocurre cuando un líquido alcanza su presión de vapor de tal forma que, parte de las moléculas que lo componen, cambian inmediatamente a estado de vapor, formándose burbujas. Estas burbujas formadas, luego, al aumentar su presión empiezan a implosionar dentro de la bomba, lo que provoca efectos no deseados. Los efectos que produce la cavitación son una disminución en el rendimiento de la bomba, erosión ya que la implosión de las burbujas choca con los materiales de la bomba, también se produce ruido y vibraciones.

- ♣ Yin L, Xiong Z, Hui S, Shouqi Y and Jianping Y. Research on the induction motor current signature for centrifugal pump at cavitation condition. 2015 [14].

Este documento, realiza una investigación sobre el comportamiento del espectro de frecuencia de la corriente de estator, ante el fenómeno de cavitación en una bomba de agua. El texto, muestra que, al disminuir la presión en la succión, lo que provoca una mayor cavitación, el espectro de frecuencia de la corriente cambia. Al aumentar la cavitación, el espectro de frecuencia se vuelve más ancho y aumenta su nivel de ruido. Esto, es un buen indicio, ya que da la posibilidad de desarrollar técnicas de diagnóstico y monitoreo no invasivas basadas en el análisis espectral de la corriente. Dichas técnicas permitirían detectar de manera temprana problemas de cavitación, mejorando la eficiencia operativa, reduciendo el mantenimiento correctivo y prolongando la vida útil de los equipos hidráulicos.

1.7. Discusión

La revisión bibliográfica realizada, muestra que los sistemas de bombeo fotovoltaicos, presentan beneficios respecto a los sistemas de bombeo tradicionales, alimentados mediante la red eléctrica o combustibles fósiles. Estos sistemas, pueden ser aplicados para el riego o la acumulación de agua, tanto en zonas rurales como urbanas. Asimismo, es posible evidenciar que estos sistemas de bombeo fotovoltaicos, no producen una contaminación al medioambiente, lo que, para la actualidad, es un gran beneficio, debido a los problemas de contaminación ambiental. Además, se muestra la

capacidad de producir energía con distintos sistemas de seguimiento solar, lo que puede aumentar el rendimiento de un sistema de bombeo fotovoltaico. También, se presentan diversas formas de evaluar un sistema de bombeo fotovoltaico, que van desde, evaluar la eficiencia en la generación de energía de los paneles solares, que luego alimenta a la bomba de agua, hasta, realizar una comparación grafica de los parámetros eléctricos medidos en función a la irradiación disponible en las pruebas realizadas.

En la revisión de los modelos para la estimación de velocidad y torque se determinó el modelo MRAS, el que trabaja con modelos de voltaje y corriente para estimar la velocidad. También, para estimar el torque, se muestra el modelo híbrido. En este, primero se deberá calcular el flujo para luego estimar el torque. Estos modelos, serán los utilizados para la estimación de las variables en este proyecto.

Los textos revisados sobre cavitación, muestran la importancia de prevenir este fenómeno, ya que puede producir daños y disminuir el rendimiento de la bomba de agua. La cavitación, ocurre cuando la presión del fluido en la zona de succión desciende por debajo de la presión de vapor del líquido, lo que provoca la formación de burbujas que, al colapsar violentamente, generan impactos que deterioran superficies internas en el equipo. También, se presenta una manera de monitorear este problema, que consiste en registrar la corriente de estator en el motor de la bomba y realizar un análisis de su espectro de frecuencia. Esto, permitiría diagnosticar de manera menos invasiva y más económica, la operación en una bomba de agua.

1.8. Hipótesis de trabajo

Es posible cuantificar diferencias significativas en el desempeño del sistema de bombeo fotovoltaico al utilizar distintos sistemas de seguimiento solar. Se anticipa que el seguimiento de doble eje incrementa la captación de irradiancia y la energía disponible para el bombeo, resultando en mayores volúmenes de agua extraída en comparación con configuraciones de un eje y estructuras fijas.

1.9. Objetivos

1.9.1 Objetivo General

Evaluar rendimiento de Sistema de bombeo fotovoltaico utilizando diferentes sistemas de seguimiento solar para su alimentación.

1.9.2 Objetivos Específicos

- Comprender los distintos elementos del setup experimental que componen el sistema bombeo fotovoltaico existente.
- Diseñar e implementar pruebas experimentales definitivas considerando distintas conexiones del motor.
- Evaluar desempeño del sistema de bombeo fotovoltaico con los sistemas de seguimiento solar en dos ejes, un eje inclinado y un eje.
- Comparación de eficiencia energética entre los tres sistemas de seguimiento solar.
- Investigar la detección de cavitación en la bomba de agua a través de variables eléctricas.

1.10. Alcances y Limitaciones

En este proyecto, se realizarán pruebas en un sistema de bombeo fotovoltaico instalado en el laboratorio de MicroRed de la UCSC, estas, tendrán una duración de día completo. Se utilizarán los sistemas de seguimiento solar en dos ejes, un eje y un eje inclinado. También, en las diferentes pruebas, el motor deberá estar conectado en delta o estrella.

Para realizar las pruebas de este SBFV, se deberá contar con un cielo totalmente despejado o parcialmente despejado. También, la ejecución de estas mediciones, dependerá de la disponibilidad de los equipos presentes en el Laboratorio de MicroRed.

1.11. Temario y Metodología

El capítulo 1, presenta el proyecto de habilitación profesional, sus objetivos, hipótesis, alcances y limitaciones. También, muestra una revisión bibliográfica, que sirve para dar contexto de los principales usos y parámetros a evaluar en los SBFV.

El capítulo 2, realiza una descripción de los componentes del SBFV instalado en la UCSC. Además, se explica el fenómeno de cavitación en bombas de agua.

El capítulo 3, presenta y describe los equipos utilizados para la obtención de parámetros eléctricos e hidráulicos en el SBFV. También, explica la utilización de algunos filtros para la mejora de las variables medidas.

El capítulo 4, realiza una descripción de los modelos de utilizados para la estimación de torque y velocidad del motor. Además, describe la obtención de parámetros eléctricos, útiles para la

evaluación del SBFV.

El capítulo 5, muestra y analiza los resultados obtenidos de los diferentes sistemas de seguimiento solar, con sus respectiva conexión del motor (estrella o delta).

El capítulo 6, presenta y evalúa los resultados de la detección de cavitación en la bomba de agua, mediante el análisis de corriente de estator.

El capítulo 7, muestra las conclusiones obtenidas de las pruebas experimentales realizadas, además de un resumen de lo ejecutado en este proyecto.

La metodología para este proyecto de evaluación de SBFV, fue:

Revisión de bibliografía para conocer las aplicaciones e impactos, sociales, económicos y ambientales. Además, de encontrar parámetros para la correcta evaluación de estos sistemas.

Luego, se realiza una descripción de los componentes del SBFV, para conocer sus parámetros de funcionamiento y puedan operar de manera correcta en las pruebas. Lo mismo, ocurre con los equipos de registro de datos. Después, se configuran los diferentes dispositivos (del SBFV y registro de datos) y se ejecutan pruebas preliminares para observar si trabajan de buena forma.

Teniendo todo configurado y probado, se empieza con las pruebas del SBFV. Estas, tienen el fin de comparar el rendimiento del sistema de bombeo con los diferentes seguidores solares. Se realizaron seis pruebas de día completo para el SBFV: tres utilizando los sistemas de seguimiento solar con la bomba de agua en conexión estrella y otras tres con la bomba configurada en delta.

Después, se evaluó el fenómeno de cavitación del sistema de bombeo, pero esta vez conectado a la red. Estas pruebas, consistían en operar el sistema bajo diferentes condiciones impuestas por una llave de paso. Esta, comienza con 5 vueltas de cerrado y se va abriendo progresivamente hasta quedar totalmente abierta. Estos resultados, se evaluaron mediante el análisis de la corriente de estator del motor.

Capítulo 2. Sistema de Bombeo Fotovoltaico con seguimiento solar

2.1. Introducción

Los sistemas de bombeo fotovoltaicos son una gran opción para obtener y distribuir agua a nivel global, ya que estos no necesitan de combustibles fósiles o la red eléctrica para su alimentación y lograr su operación. Estos sistemas, utilizan la energía solar captada a través de los paneles fotovoltaicos para alimentarse y lograr su funcionamiento, por lo tanto, al utilizar una fuente de alimentación limpia y de menor costo operativo, los SBFV se presentan como una alternativa muy conveniente en la actualidad.

Los principales usos de estos sistemas de bombeo fotovoltaicos son en sectores agrícolas, principalmente para el riego y almacenamiento de agua. También, en zonas rurales, donde es difícil el acceso a la electricidad o a combustibles fósiles, para la obtención de agua.

En este capítulo se describirán los principales componentes del SBFV a utilizar. Además, se explicará el fenómeno de cavitación, el que afecta negativamente a las bombas de agua.

2.2. Componentes del SBFV

A continuación, se explicarán los componentes del sistema de bombeo fotovoltaico que se utilizarán en este proyecto de habilitación profesional, el que se encuentra ubicado en las instalaciones de la Microred UCSC.

2.2.1 Panel fotovoltaico

La Microred de la Universidad Católica de la Santísima Concepción cuenta con tres sistemas de seguimiento solar, que se muestran en la Fig. 2.1. El primero es el seguidor solar en un eje (HSAT), luego, está el seguidor solar en un eje con una inclinación de 20° (TSAT) y, por último, se encuentra el seguidor solar de doble eje (DuAT). Para estos tres sistemas de seguimiento solar, se realizarán pruebas, para la evaluación del SBFV. También, en la imagen se logra apreciar el laboratorio de Microred, lugar en el que se encuentra el montaje del sistema de bombeo.

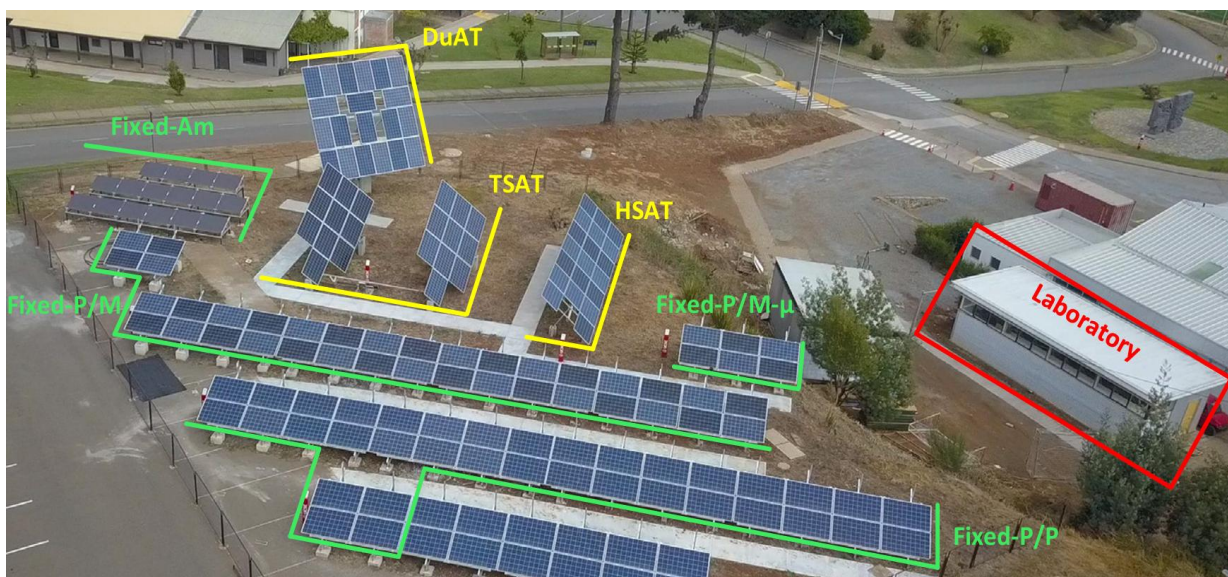


Fig. 2.1. Microred UCSC [10].

Los sistemas de seguimiento solar, presentan sus parámetros de generación que se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Parámetros de generación sistemas de seguimiento solar [10].

Parámetros	String policristano	String Monocristalino
Potencia máxima	2700 [W]	2800 [W]
Voltaje de operación	317 [V]	314 [V]
Voltaje máximo	388 [V]	393 [V]
Corriente de operación	8,37 [A]	8,91[A]
Corriente de cortocircuito	9,09 [A]	9,38[A]

Cada sistema de seguimiento solar cuenta con 10 paneles solares policristalinos, conectados en serie y otros 10 paneles solares monocristalinos, igualmente en serie. Estos paneles son los encargados de alimentar el sistema, ya que captan la irradiación y la transforman en energía eléctrica. La salida de estos paneles, está conectada al inversor, ya que se necesita pasar de corriente continua a corriente alterna para alimentar a la bomba de agua. Para la realización de las pruebas experimentales, solo se utilizarán los paneles solares monocristalinos. Estos paneles son de la marca Yingui Solar, modelo YL280D-30b. Las características de operación se presentan en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Parámetros paneles solares monocristalinos.

Parámetros	Monocristalino
Potencia máxima	280 [W]
Voltaje máximo	31,4 [V]
Corriente máxima	8,91 [A]
Voltaje circuito abierto	39,3 [V]
Corriente en cortocircuito	9,38 [A]
Eficiencia modulo	17,2 %
Dimensiones	1650x990x35[mm]
Peso	18,5 [kg]

2.2.2 Inversor

El inversor utilizado en el sistema de bombeo fotovoltaico es un inversor de bomba solar ACS355 de la marca ABB, que se muestra en la Fig.2.2. Para la puesta en marcha de este inversor, se debe realizar una configuración de parámetros, por lo que se deben ingresar los datos de la bomba de agua, que se encuentran en su placa. También, se deben ingresar los datos de máxima corriente, máximo voltaje y máxima potencia provenientes de la generación de energía por parte de los paneles fotovoltaicos. El inversor puede funcionar de manera local o de manera remota. Además, el inversor cuenta con un algoritmo de MPPT, el que obtiene la máxima potencia de los paneles fotovoltaicos en cualquier instante. Este dispositivo, puede conectarse tanto a la red como a los paneles solares, pero nunca los dos a la vez, ya que ocasionaría un fallo en el equipo.

Este dispositivo es muy importante, ya que transforma la corriente continua generada por los paneles fotovoltaicos en corriente alterna, para alimentar a la bomba de agua. El inversor, controla a la bomba de agua (la que está compuesta por un motor de inducción) mediante control escalar. Una vez introducidos los parámetros de la bomba de agua en el inversor, es importante realizar un proceso de auto calibración, el que identifica características del motor, que servirán para realizar cálculos internos en el equipo. Este procedimiento se realiza a través del parámetro 9910 del inversor.

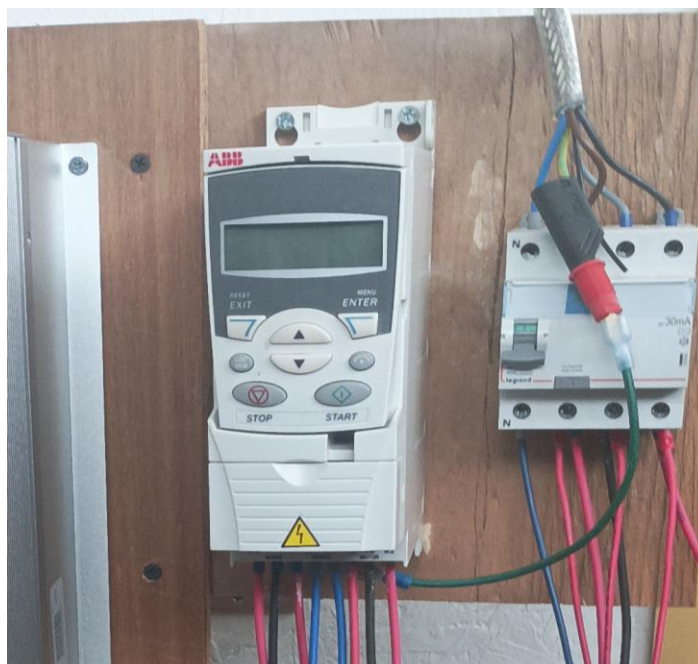


Fig. 2.2. Inversor de bomba solar ACS355 ABB.

La tabla 2.3 muestra parámetros de operación del inversor ABB ACS355.

Tabla 2.1. Parámetros inversor ABB ACS355.

Parámetros	Valor
Voltaje DC mínimo	225 [V]
Voltaje DC máximo	640 [V]
Eficiencia máxima	97%
Frecuencia nominal	50 [Hz]

2.2.3 Bomba de agua

La bomba de agua utilizada en el sistema de bombeo fotovoltaico que se muestran en la Fig. 2.3. Es una bomba de agua centrífuga modelo CMT 100/00 trifásica, marca PENTAX. Este dispositivo es el encargado de succionar el agua desde el estanque para luego impulsarla hacia las tuberías.

Esta bomba de agua consta de dos partes, la primera parte, es la encargada de transformar la energía eléctrica proveniente del inversor en energía mecánica, esta parte es la del motor de inducción. Luego, la segunda parte, transforma la energía mecánica en energía hidráulica para el movimiento del agua, esta sección es de la bomba hidráulica. En la tabla 2.4 se muestran los parámetros de la bomba de agua.



Fig. 2.3. Bomba de agua CTM 100/00 PENTAX [15].

Tabla 2.2. Parámetros bomba de agua CMT 100/00 PENTAX.

Parámetros	Valor (Δ / Y)
Potencia nominal	740 [W]
Voltaje nominal	230 / 400 [V]
Corriente nominal	3.46 / 2 [A]
Velocidad nominal	2800 [rpm]
Frecuencia nominal	50 [Hz]
Caudal máximo	90 [l / min]

La curva de operación de la bomba de agua se muestra en la Fig. 2.4. Esta, muestra que a una mayor altura manométrica (presión), el caudal de la bomba de agua disminuye y viceversa. Estas curvas son esenciales para optimizar el rendimiento de los sistemas hidráulicos y asegurar que la bomba funcione de manera eficiente en el sistema donde se instala. La curva identificada con el número 100 es la correspondiente para la bomba de agua.

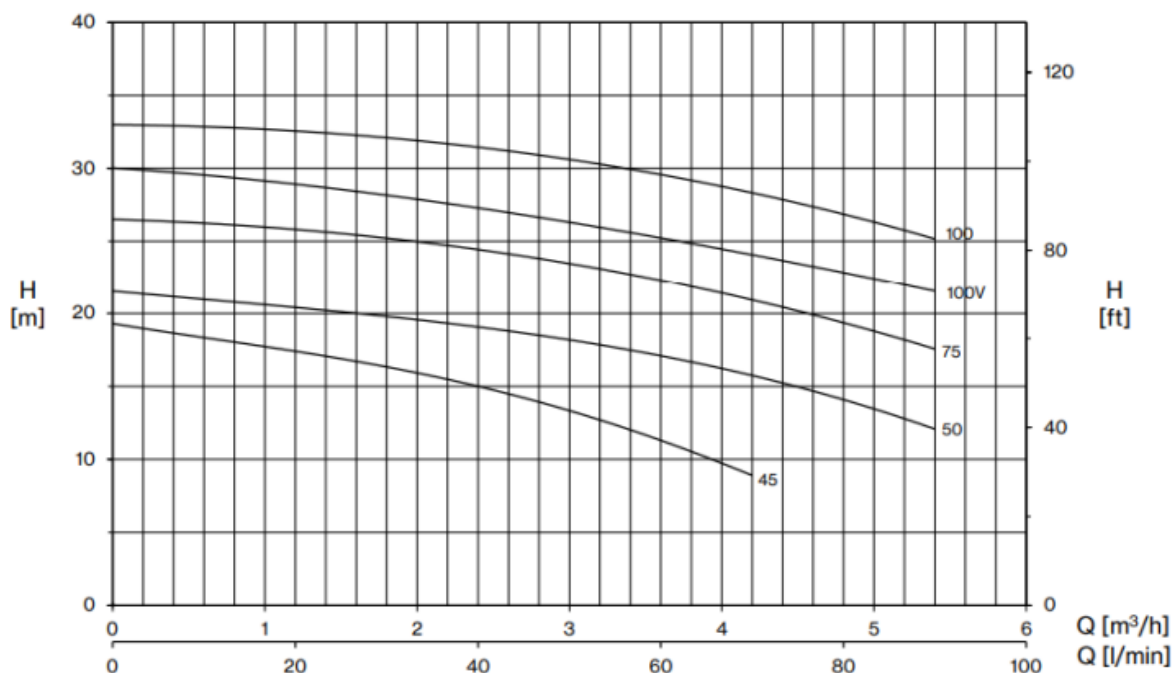


Fig. 2.4. Curva caudal bomba de agua CMT 100/00 PENTAX [15].

En la Fig. 2.5 se observa la curva de eficiencia vs caudal de la bomba de agua utilizada.

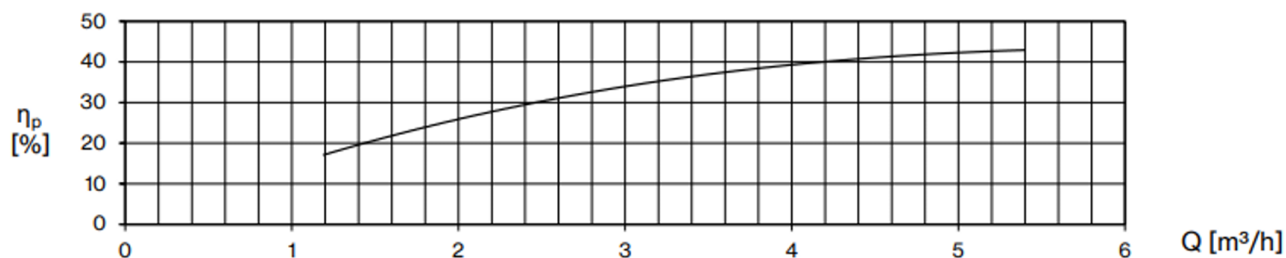


Fig. 2.5. Curva eficiencia vs caudal bomba de agua CMT 100/00 PENTAX [15].

2.2.4 Cavitación

Uno de los principales problemas en las bombas de agua es la cavitación, este fenómeno, ocurre cuando el fluido que es bombeado, disminuye su presión por debajo de su presión de vapor, provocando la aparición de burbujas que implosionan dentro de la bomba. La cavitación puede producir daños como erosión en los componentes del interior, provocar ruidos, vibraciones y generar una pérdida de rendimiento de la bomba de agua, lo que es un signo confiable, de que se produce cavitación. Por lo tanto, es importante monitorear este fenómeno, para evitar pérdidas de rendimiento y alargar la vida útil del equipo. Un tipo de cavitación es la de succión, esta ocurre cuando el líquido

bombeado que entra a la bomba de agua, reduce su presión considerablemente, formando burbujas en el ojo del impulsor, como se observa en la Fig. 2.6, estas burbujas con el caudal se moverán hacia zonas de mayor presión, donde estas implosionarán, causando daños internos en la bomba de agua. Esto, provoca que la bomba de agua opere demasiado a la derecha en relación con su curva de caudal vs presión.

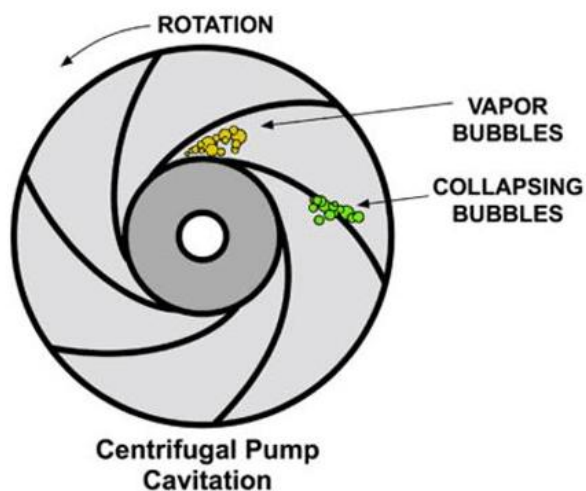


Fig. 2.6. Cavitación de succión [16].

En la Fig. 2.7 se muestran los daños por cavitación de succión en una bomba de agua, el colapso de las burbujas genera una erosión en la turbina de la bomba. La continua erosión debilita el material de las palas del impulsor, reduciendo su capacidad para generar flujo eficiente y afectando el rendimiento global de la bomba.



Fig. 2.7. Daños por cavitación de succión [17].

Otro tipo de cavitación es la de descarga, esta ocurre cuando la presión de descarga del líquido es excesivamente alta o cuando el líquido que mueve la bomba no puede salir de esta. Esto provoca que el fluido recircule dentro de la bomba de agua. En la Fig. 2.8 se muestra donde ocurre la cavitación de descarga.

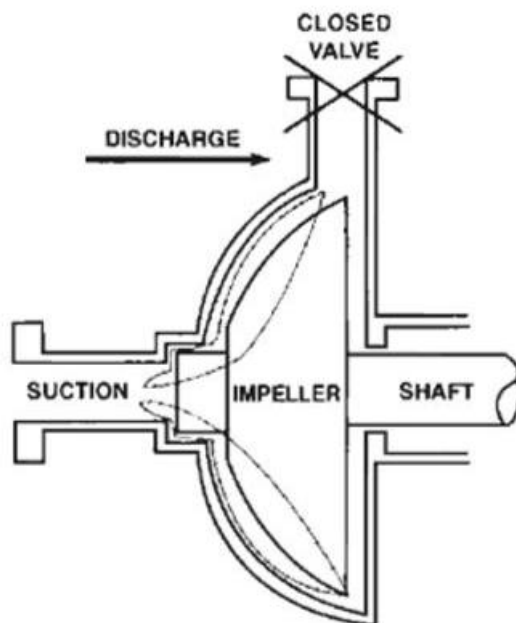


Fig. 2.8. Cavitación de descarga [18].

Este tipo de cavitación tiene dos orígenes principales. Primero, la circulación interna del fluido, desde áreas de alta presión a zonas de baja presión, crea una región de baja presión en el espacio entre el impulsor y la carcasa de la bomba, donde puede formarse cavitación. Segundo, el fluido puede recircular dentro de la bomba, lo que provoca un sobrecalentamiento rápido del líquido. En ambos casos, la cavitación causa la implosión de las burbujas, generando ondas de choque que erosionan rápidamente las puntas del impulsor y la carcasa. En situaciones extremas, la cavitación de descarga, puede llegar a romper el eje del impulsor.

Capítulo 3. Montaje experimental

3.1. Introducción

Para la obtención de variables como la presión y caudal se utilizarán sensores instalados en las tuberías del setup del SBFV, el cual se muestra en la Fig. 3.1. Además, se obtendrán variables de voltaje y corriente a través de sondas. Los sensores de presión están enumerados como 1 y 3 en la Fig. 3.1 y el sensor de caudal es el número 2. La enumeración 4, corresponde a una llave de paso, utilizada para establecer diferentes presiones en la pruebas experimentales y así evaluar el SBFV ante diferentes condiciones hidráulicas. Por último, el número 5 corresponde a la bomba de agua CMT 100/00 PENTAX utilizada.

Para trabajar con las distintas variables obtenidas, estos sensores y sondas van conectadas a un dispositivo llamado Dspace MicroLabBox 1202, que registra los datos de las variables y con el uso de distintos softwares como Control Desk y Matlab, se pueden utilizar para la estimación de variables de velocidad y torque, además de graficar los datos obtenidos del SBFV.

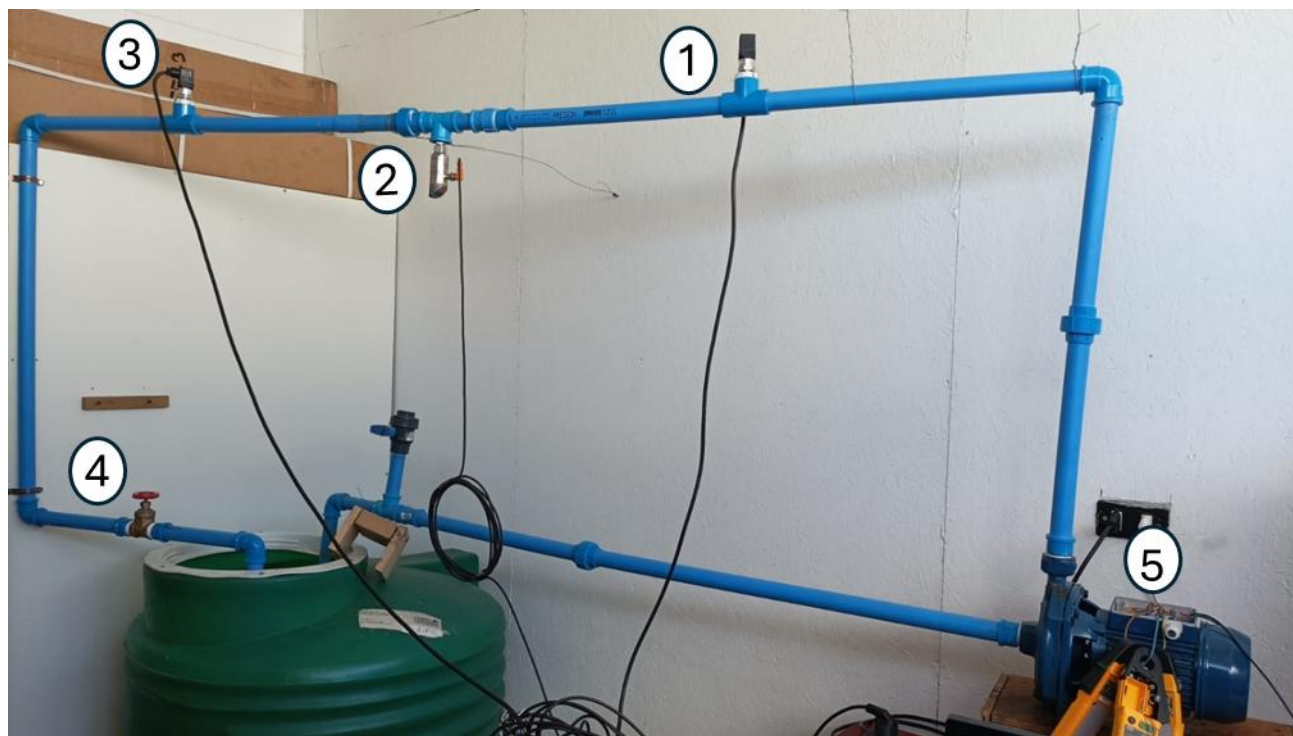


Fig. 3.1. Setup SBFV laboratorio UCSC.

3.2. Sensores de presión y caudal

Estos sensores permiten la obtención de datos de presión y caudal del agua transportada por la bomba centrífuga. A continuación, se detallarán los sensores utilizados en el setup del SBFV.

3.2.1 Sensor de presión

El sensor de presión utilizado se muestra en la Fig. 3.2 es de la marca WIKA modelo A-10. Este sensor se utiliza principalmente en el área industrial como en bombas, compresores, hidráulica y neumática. En la tabla 3.1 se muestran los parámetros del sensor para su operación.



Fig. 3.2. Sensor de Presión A-10 WIKA.

Tabla 3.1. Parámetros sensor WIKA A-10.

Parámetros	Valor
Alimentación (DC)	14-30 V
Señal de salida (DC)	0-10 V
Medición	0-20 bar
Tiempo de respuesta	<4 ms

3.2.2 Sensor de caudal

El sensor utilizado para registrar el flujo de agua que recorre el setup del SBFV es el SA5000 de la marca IFE que se muestra en la Fig.3.3. Este dispositivo puede medir caudal del agua, aire y aceite. Los parámetros para la correcta utilización de este sensor, se encuentran en la tabla 3.2.



Fig. 3.3. Sensor de caudal SA5000 IFE.

Tabla 3.2. Parámetros sensor caudal AS5000 IFE.

Parámetros	Valor
Alimentación (DC)	18-30 V
Señal de salida análoga	4-20 mA

3.3. Sondas de voltaje y corriente

Las sondas se utilizan para obtener el voltaje y corriente del estator del motor, ya que estos son necesarias, para los modelos de estimación de velocidad y torque que se verán en los próximos capítulos. A continuación, se muestran las sondas empleadas.

3.3.1 Sonda de voltaje

La sonda modelo DP-25 marca Pintek, que se muestra en la Fig. 3.4, es el dispositivo utilizado para la obtención del voltaje del motor. Esta sonda va conectada hacia la Dspace MicroLabBox de manera analógica.



Fig. 3.4. Sonda voltaje DP-25 Pintek.

3.3.2 Sonda de corriente

La sonda modelo i30s marca Fluke, que se muestra en la Fig. 3.5, es el dispositivo utilizado para la obtención de la señal de corriente del motor. Esta sonda va conectada hacia la Dspace MicroLabBox de manera análoga.



Fig. 3.5. Sonda de corriente i30s Fluke.

3.4. Dspace MicroLabBox 1202

El dispositivo que se muestra en la Fig. 3.6 permite registrar los datos de presión, caudal, voltaje y corriente, medidos por los sensores y sondas en tiempo real. Este dispositivo cuenta con un paquete de software Dspace, en el cual se encuentra uno, llamado ControlDesk que permite el acceso al software en tiempo real durante el trabajo de obtención de datos. También existe el Real-Time Interfaz (RTI) para Simulink, el cual permite añadir modelos para la estimación de variables con los datos obtenidos.



Fig. 3.6. Dspace MicroLabBox 1202.

En la tabla 3.3 se muestra el número de entradas y salidas, las escalas de voltaje que permite y datos del procesador con que cuenta la Dspace MicroLabBox.

Tabla 3.3. Parámetros Dspace MicroLabBox 1202.

Parámetros	Valor
Entradas analógicas	24 canales ($\pm 10[V]$)
Salidas analógicas	16 canales ($\pm 10[V]$, $\pm 8[V]$)
Procesador	Dual Core de 2 [Ghz]
Memoria	1 [Gb]

3.5. Ajuste visualización de variables

Para la correcta visualización de las variables de voltaje, medidas por las sondas, se deben realizar algunos arreglos. Al conectar las sondas a la MicroLabBox, se deberá agregar una atenuación de 10 veces la entrada de la MicroLabBox, también se agregará una atenuación de 200 por las sondas. Todas estas atenuaciones se verán reflejadas como ganancias en el software Simulink. Además, se adiciona la acción de un filtro paso bajo con frecuencia de corte 500 Hz para eliminar el ruido presente en las variables y mejorar su visualización final. En la Fig. 3.7 se observa un diagrama de los arreglos implementados.

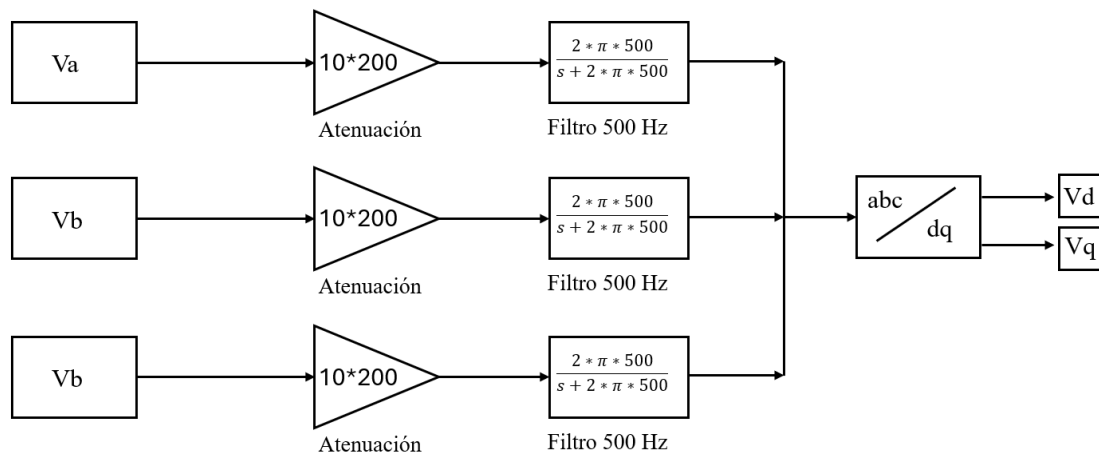


Fig. 3.7. Diagrama arreglo voltajes

La Fig. 3.8 muestra la medición de una fase del voltaje para el motor de inducción conectado en estrella y la aplicación de un filtro paso bajo de 500[Hz] para eliminar el ruido de la señal.

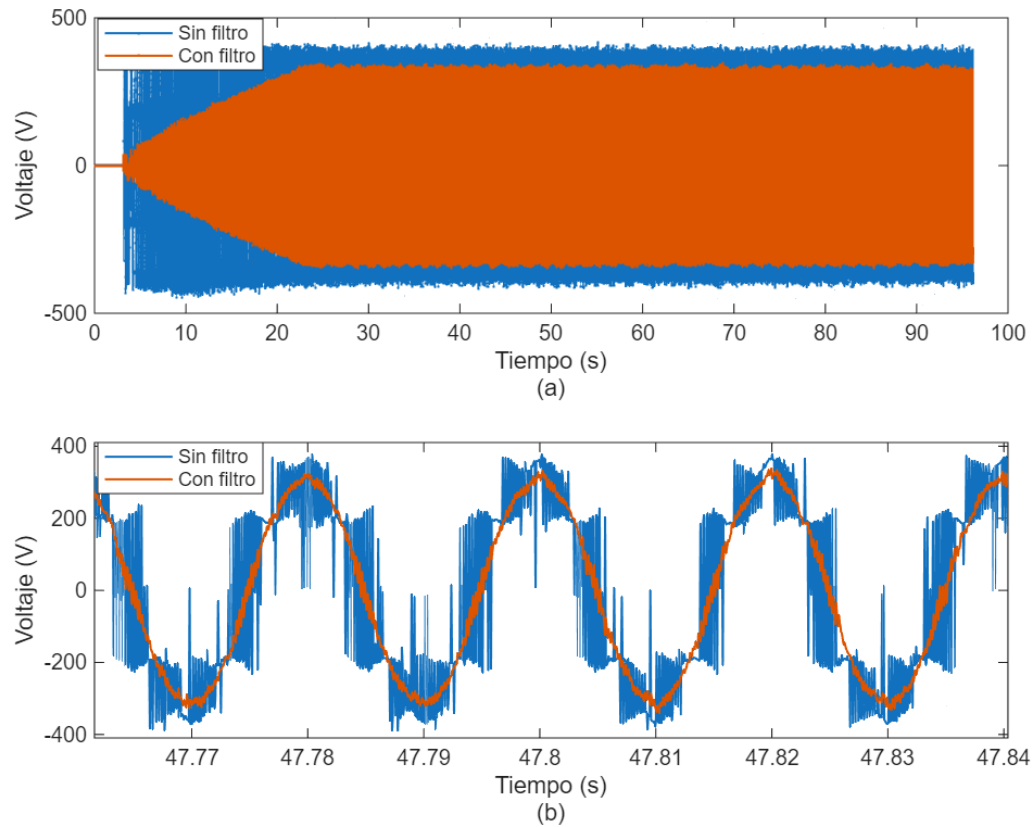


Fig. 3.8. (a) Voltaje de fase V_{an} con y sin filtro pasa bajo 500 [Hz], (b) zoom ciclos V_{an} con y sin filtro.

Para las variables de corriente, obtenidas por las sondas, se repite el proceso anterior, realizado con el voltaje, solo que la atenuación de las sondas de corriente es de 10. En la Fig. 3.9 se presenta un diagrama de los arreglos realizados para las corrientes medidas.

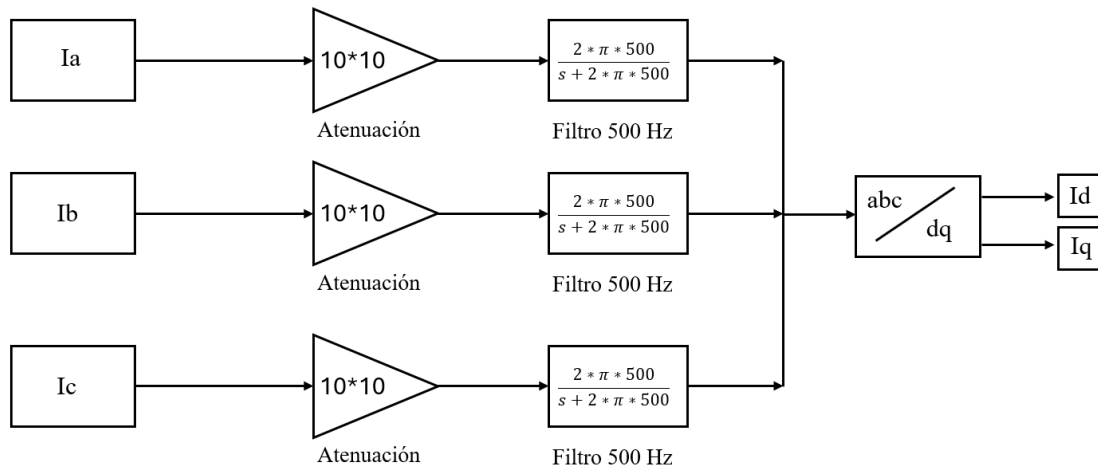


Fig. 3.9. Diagrama arreglo corrientes.

La Fig. 3.10 muestra la aplicación de un filtro paso bajo de 500[Hz] en la medición de corriente para el motor de inducción. Se reduce considerablemente el ruido con la aplicación del filtro.

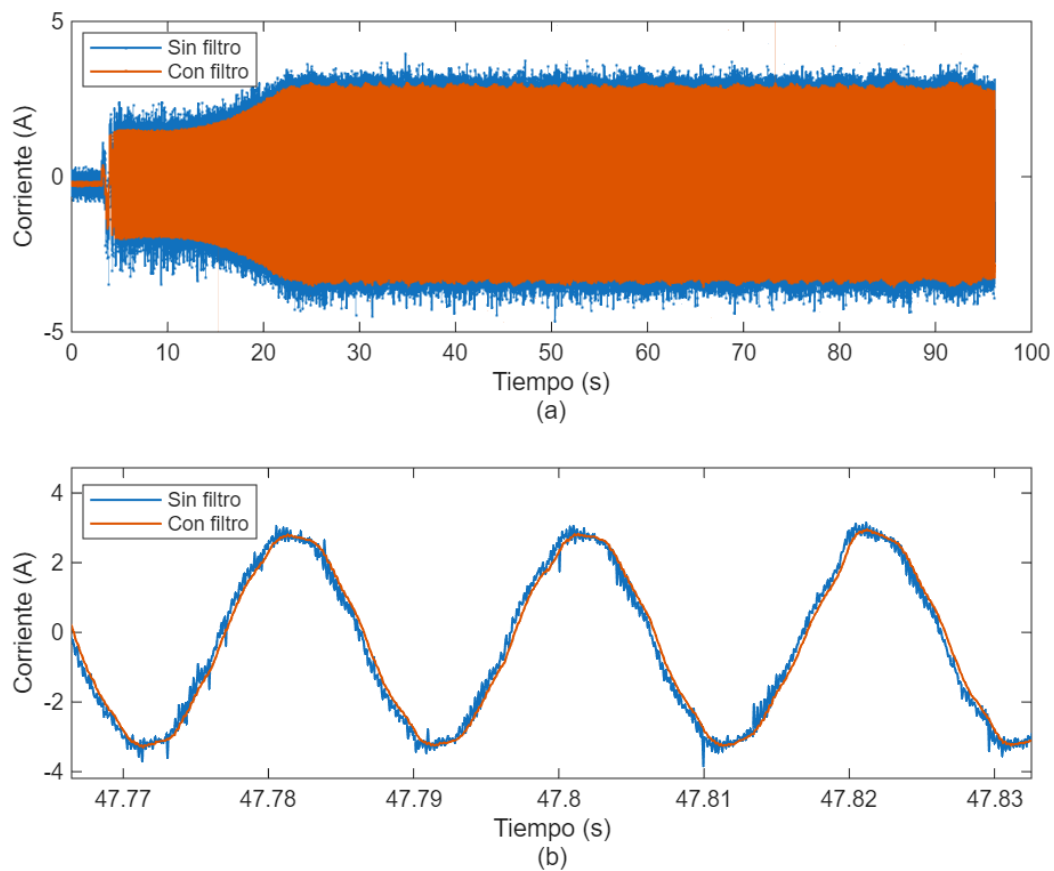


Fig. 3.10. (a) Corriente de fase con y sin filtro pasa bajo 500 [Hz], (b) zoom ciclos corriente de fase con y sin filtro.

3.6. Conexión sistemas de seguimiento solar a bomba de agua

Para alimentar eléctricamente a la bomba de agua desde los paneles solares, se deben realizar ciertas conexiones. En la Fig. 3.11 se muestran los inversores de la marca SUNNY TRIPOWER que están conectados a los strings de paneles solares. El inversor número 1, corresponde a los paneles solares con sistema de seguimiento solar en dos ejes. Para el inversor número 2, los paneles solares con seguimiento en un eje con inclinación. Por último, el inversor 3, está asociado a los paneles solares con seguimiento en un eje.



Fig. 3.11. Inversores SUNNY TRIPOWER ubicados en laboratorio Microred.

La alimentación desde los paneles solares hacia el inversor ABB ACS355, se obtiene desde unos terminales presentes en los inversores SUNNY TRIPOWER. Estos terminales son la conexión hacia los paneles solares. Los inversores deben estar apagados al momento de la conexión, para que no intervengan en el consumo de la energía y solo funcionen como intermediarios de enlace entre los paneles y el inversor ABB. Esta conexión se realiza mediante los terminales positivos y negativos que se muestran en la Fig. 3.12. Las letras A y B corresponden a los terminales positivos y las letras G y H a los negativos.

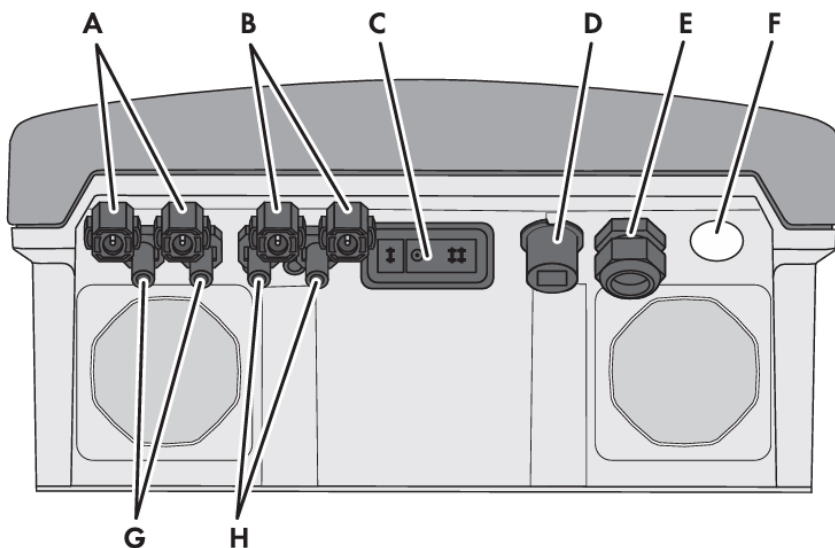


Fig. 3.12. Área de conexión inversor SUNNY TRIPOWER.

Luego, se acoplan los conectores macho y hembra que se muestran en la Fig. 3.13 a los terminales B y H. El de la izquierda corresponde al conector hembra (negativo) y el de la derecha, el macho (positivo). Luego, los conectores tipo banana que se observan en la imagen, se unen a otros conectores tipo banana que llevan la conexión hacia el inversor ABB ACS355. Por lo tanto, ya conectados los paneles solares con el inversor, este puede alimentar a la bomba de agua.



Fig. 3.13. Conectores de enlace.

Capítulo 4. Modelos de estimación de velocidad y torque

4.1. Introducción

Para la evaluación del SBFV se necesitan variables como velocidad y torque que produce el motor de inducción. Estas variables se obtendrán a través de estimadores, los cuales son modelos que utilizan el voltaje y corriente medidos por las sondas, que, mediante diferentes fórmulas del motor de inducción, logran la estimación de la velocidad y torque. El modelo híbrido es utilizado para la estimación del flujo de rotor, el cual combina modelos de voltaje y corriente del motor de inducción, una vez obtenido el flujo se puede evaluar el torque. Para estimar la velocidad, se utiliza el modelo BMF-MRAS. También, se presentan ecuaciones para la obtención de diferentes parámetros de potencia.

4.2. Cambio de coordenadas abc a dq

Como se trabaja con un motor de inducción trifásico, es conveniente realizar un cambio de coordenadas a las variables de voltaje, corriente y flujo hacia coordenadas dq esto es, para facilitar las expresiones y cálculos que se realizarán más adelante. Este cambio de coordenadas permite al motor de inducción asemejarse a un motor de corriente continua y así manipular los modelos de manera más sencilla.

Primero se debe realizar la transformación de las coordenadas abc a $\alpha\beta$, este cambio de coordenadas pasa de variables trifásicas a bifásicas, siendo α la parte real y β la parte imaginaria. $\alpha\beta$ están desfasadas en 90° y siguen siendo variables sinusoidales. Como realizar el cambio de coordenadas abc a $\alpha\beta$ se muestran en la ecuación 4.1, que consiste en una multiplicación de matrices.

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Una vez realizado el cambio de coordenadas a $\alpha\beta$, ahora se deben transformar a dq, este cambio, transforma las variables de señales sinusoidales a variables continuas. Es importante este cambio ya que permite que las variables continuas puedan ser aplicadas en un controlador

proporcional integral. En la ecuación 4.2 se observa la multiplicación de matrices, la cual lleva al cambio de $\alpha\beta$ y a dq.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

4.3. Modelo Híbrido

Para la estimación del flujo de rotor en coordenadas “dq” en el motor de inducción se ocupará el modelo híbrido, el cual mezcla, los flujos de rotor “dq” obtenidos de los modelos de voltaje y corriente.

4.3.1 Modelo de Voltaje

Este modelo de voltaje establece que para la obtención del flujo de rotor “dq” se necesita medir los voltajes y corrientes de estator del motor de inducción, estos voltajes y corrientes son medidos a través de las sondas y transformados de coordenadas “abc” a “dq”. El modelo presenta mejores estimaciones a velocidades más altas del motor. Las ecuaciones de flujo de rotor para este modelo son:

$$\lambda_{dr}^s = \frac{L_r}{L_m} (\lambda_{ds}^s - \sigma L_s i_{ds}^s) \quad (4.3)$$

$$\lambda_{qr}^s = \frac{L_r}{L_m} (\lambda_{qs}^s - \sigma L_s i_{qs}^s) \quad (4.4)$$

Donde: L_m es inductancia mutua, L_s es inductancia perdida del estator, $L_r = L_s + L_m$ y $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s}$

4.3.2 Modelo de Corriente

Para este modelo de corriente se necesita la velocidad del motor de inducción, la cual es estimada por el modelo BEMF-MRAS y la corriente de estator en coordenadas “dq”. Este modelo funciona mejor en bajas velocidades del motor. Las ecuaciones para el flujo de rotor son:

$$\frac{d\lambda_{dr}^s}{dt} = \left(\frac{L_m}{T_r}\right) i_{ds}^s - \omega_r \lambda_{qr}^s - \left(\frac{1}{T_r}\right) \lambda_{dr}^s \quad (4.5)$$

$$\frac{d\lambda_{qr}^s}{dt} = \left(\frac{L_m}{T_r}\right) i_{qs}^s + \omega_r \lambda_{dr}^s - \left(\frac{1}{T_r}\right) \lambda_{qr}^s \quad (4.6)$$

Donde: $T_r = \frac{L_r}{r_s}$ y ω_r es velocidad motor (rad/s).

4.3.3 Modelo Final

Como el modelo híbrido consiste en la combinación de los modelos de voltaje y corriente para estimar el flujo de rotor referido al estator en coordenadas “dq”, ahora se reemplazan las ecuaciones 4.3 y 4.4 en las ecuaciones 4.5 y 4.6 se obtiene:

$$\frac{d\lambda_{dr}^s}{dt} \left((1 - \sigma)T_s + T_r \right) = \frac{L_m}{L_r} v_{ds}^s + \omega_r T_r \lambda_{qr}^s - \lambda_{dr}^s - \frac{d\lambda_{ds}^s}{dt} \sigma L_m T_s \quad (4.7)$$

$$\frac{d\lambda_{qr}^s}{dt} \left((1 - \sigma)T_s + T_r \right) = \frac{L_m}{L_r} v_{qs}^s + \omega_r T_r \lambda_{dr}^s - \lambda_{qr}^s - \frac{d\lambda_{qs}^s}{dt} \sigma L_m T_s \quad (4.8)$$

Donde: $T_s = \frac{L_s}{r_s}$

En la Fig. 4.1 se muestra el diagrama de bloques para el modelo híbrido de las ecuaciones 4.7 y 4.8 para la estimación del flujo de rotor. Este diagrama del modelo híbrido será implementado en el software Simulink.

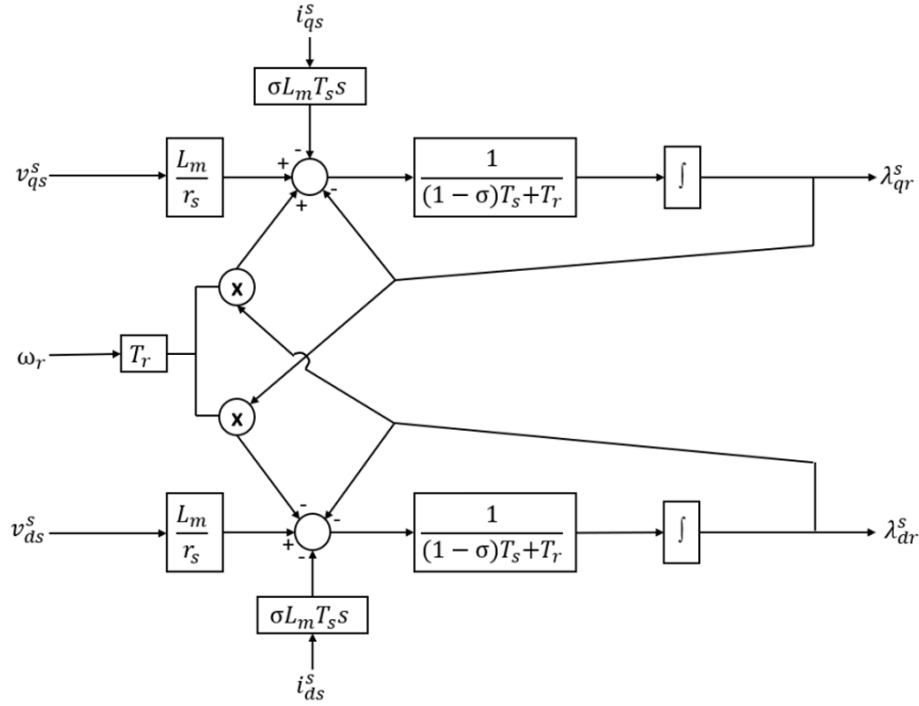


Fig. 4.1. Diagrama modelo híbrido [11]

4.4. Estimación Torque

Ya obtenida la estimación del flujo de rotor referido al estator en coordenadas “dq” con el modelo explicado anteriormente, ahora se puede determinar el torque del motor de inducción. La fórmula para el torque queda definida como:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{dr}^s i_{qs}^s - \lambda_{qr}^s i_{ds}^s) \quad (4.9)$$

Donde: P es Polos.

4.5. Modelo BEMF-MRAS

El Model Reference Adaptive System estima la velocidad del motor de inducción, este consiste en tomar un modelo de referencia y un modelo adaptativo, donde el modelo adaptativo incluye la variable de velocidad del motor. Para estos modelos se realizará una comparación de su salida mediante un controlador PI para que el error entre estos dos sea igual a cero y se logre la estimación de la velocidad.

Agregando back e.m.f based (BEMF) al MRAS, en este modelo mejora la estimación de la velocidad ya que el cálculo del error entre el modelo de referencia y el adaptativo es más rápido y preciso. Esta estimación utiliza los valores de voltaje y corriente medidos por las sondas y también los modelos de voltaje y corriente mencionados anteriormente. El modelo de referencia para el BEMF MRAS queda definido como:

$$e_{md}^* = v_{ds} - \left(r_s i_{ds} + \sigma L_s \frac{di_{ds}^s}{dt} \right) \quad (4.10)$$

$$e_{mq}^* = v_{qs} - \left(r_s i_{qs} + \sigma L_s \frac{di_{qs}^s}{dt} \right) \quad (4.11)$$

El modelo adaptativo queda establecido como:

$$e_{md} = \frac{L_m^2}{L_r} \left(\omega_r i_{mq} - \frac{1}{T_r} i_{md} + \frac{1}{T_r} i_{ds}^s \right) \quad (4.12)$$

$$e_{mq} = \frac{L_m^2}{L_r} \left(\omega_r i_{md} - \frac{1}{T_r} i_{mq} + \frac{1}{T_r} i_{qs}^s \right) \quad (4.13)$$

En la Fig. 4.2 se muestra el diagrama de bloques del modelo BEMF-MRAS, este diagrama será implementado en el software Simulink.

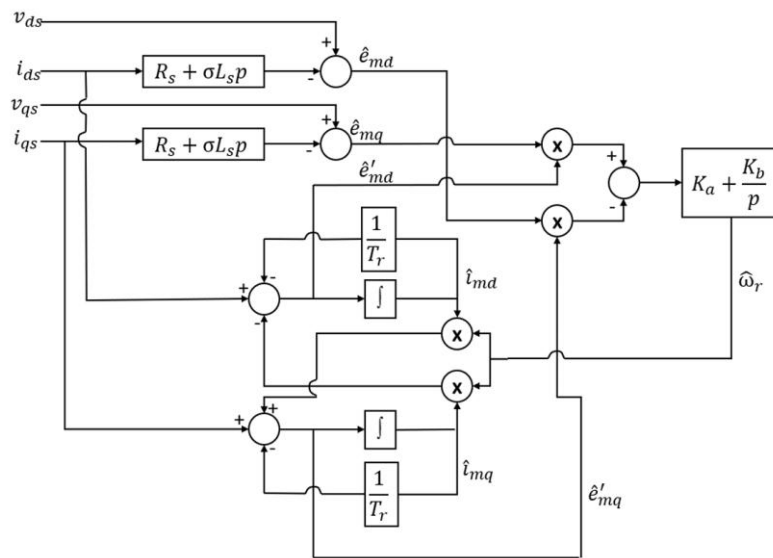


Fig. 4.2. Modelo BEMF-MRAS [11].

4.6. Arreglos visualización velocidad y torque

Para lograr una mejor visualización y análisis de las variables estimadas de velocidad y torque, se implementaron filtros pasa bajo en ambas señales. Estos filtros tienen como objetivo principal eliminar el ruido presente en las mediciones o estimaciones, que puede afectar negativamente la interpretación gráfica de los datos. La frecuencia de corte seleccionada para estos filtros es de 5 Hz, un valor que permite atenuar las componentes de alta frecuencia asociadas al ruido, mientras se conservan las características de las señales originales. En la Fig. 4.3 se observa un diagrama de los filtros implementados para las variables de velocidad y torque.

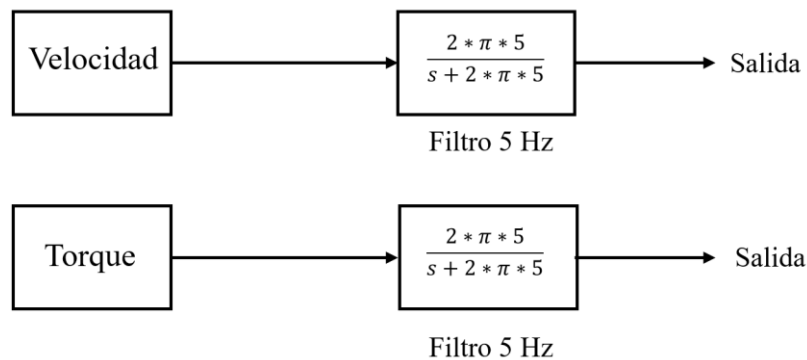


Fig. 4.3 Filtros para velocidad y torque

La Fig. 4.4 muestra la velocidad estimada por el modelo BEMF-MRAS, este modelo se aplicó de manera correcta ya que en la gráfica se puede observar una velocidad de aproximadamente 2800[RPM] a 50[Hz] debido al control escalar del motor, la cual es la velocidad del motor de inducción impuesta en su placa. También, se aplicó un filtro pasa bajo de 5 [Hz] para eliminar el ruido y mejorar la precisión y visualización de la señal para las pruebas a realizar.

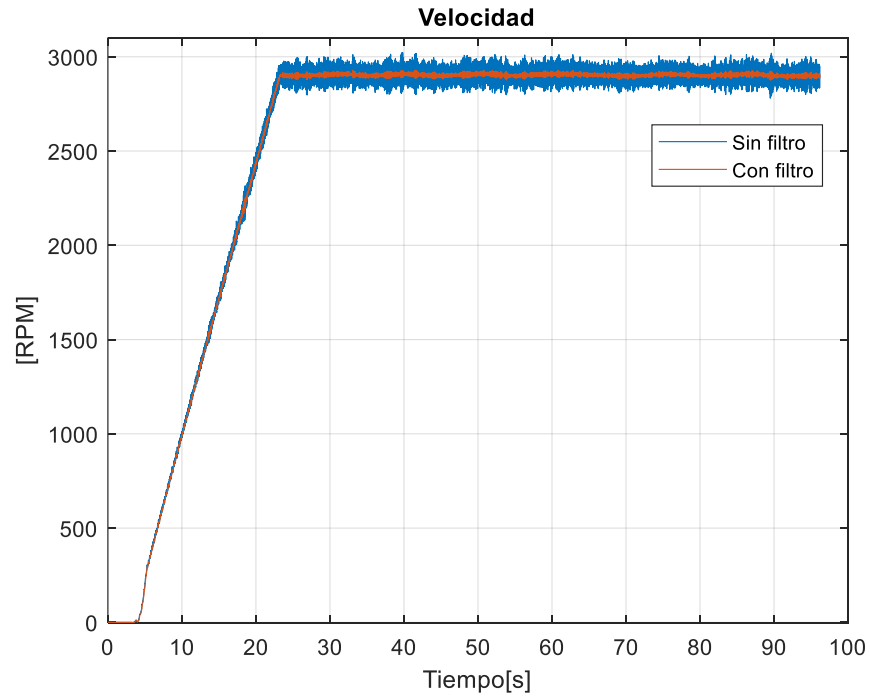


Fig. 4.4. Velocidad con y sin filtro pasa bajo de 5 [Hz].

La Fig. 4.5 muestra el torque estimado gracias al modelo híbrido que determina los flujos de rotor, necesarios para el cálculo de este. También, se aplicó un filtro paso bajo de 5[Hz] para mejorar la señal y eliminar el ruido de la medición.

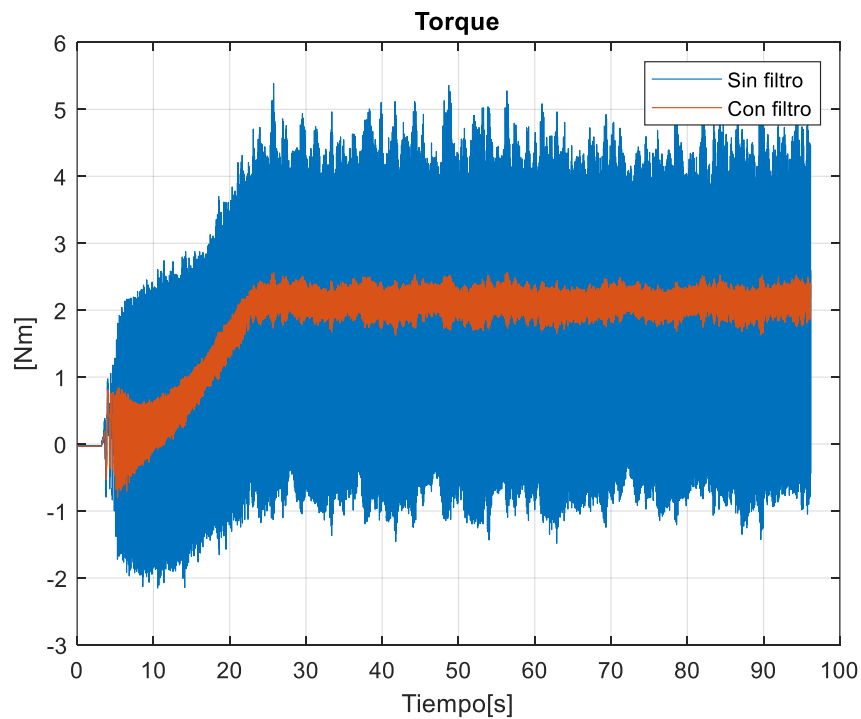


Fig. 4.5. Torque con y sin filtro pasa bajo de 5 [Hz].

4.7. Potencias

Para la evaluación del SBFV, se necesita obtener diferentes parámetros para determinar la eficiencia del sistema. Estos, corresponden a las diferentes potencias eléctricas, que se pueden encontrar en los diferentes procesos del SBFV. Primero, tenemos la potencia DC, que es generada por los paneles solares e ingresa al inversor ABB ACS355. Segundo, está la potencia que sale del inversor e ingresa al motor de inducción. Tercero, es la potencia que se convierte de eléctrica a mecánica al ingresar a la bomba de agua. Por último, está la potencia hidráulica, que es la energía utilizada para mover el agua.

4.7.1 Potencia DC

Esta potencia, es la energía entregada por los paneles solares hacia el inversor para alimentar a la bomba de agua. El cálculo de esta potencia se presenta en la ecuación 4.14.

$$P_{DC} = V_{DC} * I_{DC} \quad (4.14)$$

4.7.2 Potencia de entrada al motor

Esta potencia, es la energía convertida desde DC a AC por el inversor y que alimenta al motor de inducción presente en la bomba de agua. El cálculo de esta potencia se puede realizar mediante la expresión 4.15.

$$P_{entrada\ motor} = V_a * I_a + V_b * I_b + V_c * I_c \quad (4.15)$$

Donde: V_a, V_b y V_c son los voltajes de fase, y I_a, I_b y I_c son las corrientes de fase.

4.7.3 Potencia convertida

Este, es el valor de la potencia eléctrica que entra al motor de inducción y es convertida a potencia mecánica. Esta potencia, es la energía disponible en el eje del motor para realizar movimientos ante una carga. La potencia convertida, se puede calcular a través de la ecuación 4.16.

$$P_{convertida} = T * \omega_m \quad (4.16)$$

Donde: T es torque eléctrico (Nm) y ω_m es velocidad angular (rad/s).

4.7.4 Potencia hidráulica

Esta potencia, es la energía usada por la bomba de agua para mover el agua en el sistema de bombeo. Esta, se puede calcular mediante la expresión 4.17.

$$P_{Hidraulica} = \frac{C * p * 1000}{600} \quad (4.17)$$

Donde: C es caudal [L/min], p es presión [Bar], 600 es una constante que convierte [L/min] y [bar] en [W] y 1000 es para cambiar de [kW] a [W].

4.8. Eficiencia del sistema

Obtenidos los parámetros de potencia, es posible determinar la eficiencia de cada proceso que ocurre en el sistema de bombeo fotovoltaico. Esto, permite evaluar cómo se va transformando la energía durante las diferentes etapas y si existe o no, una buena conversión de esta.

4.8.1 Eficiencia total del sistema

Esta eficiencia evalúa la conversión de la energía que va desde la generada por los paneles solares, utilizada para alimentar al sistema, hasta, la energía hidráulica empleada para mover el agua. Esta eficiencia, se calcula a través de la expresión 4.18.

$$EF_{total} = \frac{P_{Hidraulica}}{P_{DC}} * 100 \quad (4.18)$$

4.8.2 Eficiencia del inversor

Aquí se evalúa la eficiencia en la conversión de energía DC a AC realizada por el inversor ABB ACS355 para alimentar al motor de inducción. Esto se puede calcular mediante 4.19.

$$EF_{inversor} = \frac{P_{salida\ inversor}}{P_{DC}} * 100 \quad (4.19)$$

4.8.3 Eficiencia del motor

Esta eficiencia evalúa la conversión de la energía eléctrica que llega al motor y es transformada en energía mecánica útil para hacer girar al eje. Esta eficiencia, se puede calcular mediante la fórmula 4.20.

$$EF_{motor} = \frac{P_{convertida}}{P_{entrada\ motor}} * 100 \quad (4.20)$$

4.8.4 Eficiencia hidráulica

La eficiencia hidráulica evalúa cuanto se aprovecha la energía mecánica que proporciona el motor para mover el fluido. Esto, se puede calcular a través de la expresión 4.21.

$$EF_{Hidraulica} = \frac{P_{Hidraulica}}{P_{convertida}} * 100 \quad (4.21)$$

Capítulo 5. Evaluación sistema de bombeo con diferentes sistemas de seguimiento solar

5.1. Introducción

Para el SBFV, se realizaron pruebas experimentales con tres configuraciones distintas de seguimiento solar: un eje simple, un eje inclinado y doble eje. También, para cada una de ellas, se configuró el motor de la bomba de agua, en conexión estrella y delta. En total, se llevaron a cabo seis pruebas: tres con el motor conectado en delta, una por cada tipo de sistema de seguimiento solar, y tres con el motor conectado en estrella, también una por cada sistema de seguimiento.

Estas pruebas, monitorean variables como: voltaje y corriente DC que llega al inversor, voltaje y corriente AC del motor, caudal y presión en el sistema de bombeo. Estas, permiten obtener diferentes parámetros como: potencia DC, potencia de entrada al motor, potencia convertida y potencia hidráulica. Con estos parámetros, se puede obtener la eficiencia del SBFV en sus diferentes etapas de operación. Por lo tanto, con la obtención de estas variables eléctricas e hidráulicas, se puede evaluar el sistema correctamente.

5.2. Setup registro de datos experimentales

Para el registro de los datos, se utilizó un setup ubicado en el laboratorio Microred de la UCSC. Este incluye un computador, que adquiere y procesa las señales a través del software Control Desk y Matlab. Los datos, son enviados al computador a través de una Dspce MicroLabBox, que recibe las mediciones de los sensores de presión y caudal, y de las sondas de voltaje y corriente. La alimentación de los sensores de presión y caudal, así como de las sondas de corriente, se realizó mediante una fuente de poder DC. En la Fig. 5.1 se observa el setup utilizado, con sus componentes enumerados. El procesador MicroLabBox está enumerado como 1 en la imagen, la fuente de poder DC tiene la enumeración 2, las sondas la 3 y el computador la 4.



Fig. 5.1. Setup recopilación de datos.

5.2.1 Registro datos de irradiancia

Para las mediciones de irradiancia presente en los días de pruebas, se utilizaron dos sensores: uno ubicado en los paneles solares con una estructura fija y otro, en los paneles con seguimiento solar de doble eje.

El sensor ubicado en los paneles solares fijos, se muestra en la Fig. 5.2. Este es el modelo SI-12TC, tiene una inclinación de 25° con una orientación norte, utiliza una celda solar monocristalina, y presenta un rango de medición de 0 hasta $1200 \text{ [W/m}^2\text{]}$. Los datos obtenidos de este sensor son registrados por una empresa externa llamada Meteocontrol, que mediante su plataforma VCOM (Centro de control virtual), proporciona las mediciones de irradiancia a la UCSC. También, el sensor presenta un intervalo de muestreo cada 5 minutos.



Fig. 5.2. Sensor de irradiación fijo.

El sensor ubicado en los paneles solares con seguimiento de doble eje, se muestra en la Fig. 5.3. Es el modelo S-LIB-M003 de la marca HOBO y presenta un rango de medición de 0 hasta 1280 $[W/m^2]$. Este se encuentra enlazado a una estación meteorológica presente en la UCSC. Los datos obtenidos son enviados el día 6 de cada mes a la UCSC, mediante la plataforma monitoreo ambiental LI-COR cloud y presentan un intervalo de muestreo de 5 minutos.



Fig. 5.3. Sensor de irradiancia en seguidor solar de doble eje.

En la Fig. 5.4 se muestra el sensor (piranómetro de silicio) con más detalle.



Fig. 5.4. Sensor S-LIB-M003 HOBO [19].

Los datos de irradiancia obtenidos por ambos sensores, no son representativos de la irradiancia real que incide sobre los paneles solares con seguimiento en un eje y un eje inclinado, ya que estos sistemas, no cuentan con sus propios sensores de irradiancia. Solo los paneles solares con seguimiento de doble eje, presentan una medición real de su irradiancia. Por lo tanto, la utilización de estos datos es solo una comparativa gráfica y presenta una idea de la irradiancia existente en los diferentes días de prueba entre un sensor fijo y otro ubicado en seguidor solar. En consecuencia, estos valores no serán utilizados para evaluar los tres sistemas.

5.3. Evaluación SBFV conexión en estrella

Con el motor de la bomba conectado en estrella, se realizaron tres pruebas de día completo para evaluar el SBFV. Cada prueba iniciaba con algunos giros de cerrado de la llave de paso, que se muestra en la Fig. 3.1 y al mediodía, la llave se abría por completo. El objetivo de estos cambios es someter el SBFV bajo diferentes condiciones hidráulicas, con el fin de evaluar su rendimiento frente a variaciones de presión y caudal. Además, se abría la llave de paso al mediodía para aprovechar los momentos de mayor irradiancia.

5.3.1 Pruebas SBFV con sistema de seguimiento solar de un eje

La Fig. 5.5 muestra la irradiancia medida el 5 de septiembre. Para el análisis, se promedió la irradiancia únicamente en los tramos estables del SBFV (estabilidad eléctrica e hidráulica). Entre el rango de las 9:35 y 12:15 horas, se promedió 985,88 [W/m²] con el sensor en el seguidor y 774,94 [W/m²] con el sensor fijo. En el tramo de las 12:15 y 14:26 horas, se registró 994,74 [W/m²] y 916 [W/m²] respectivamente. El sensor ubicado en el seguidor con doble eje, registra una mayor

irradiancia que con el sensor fijo, lo que es más representativo sobre la captación real de irradiancia por parte de los paneles solares.

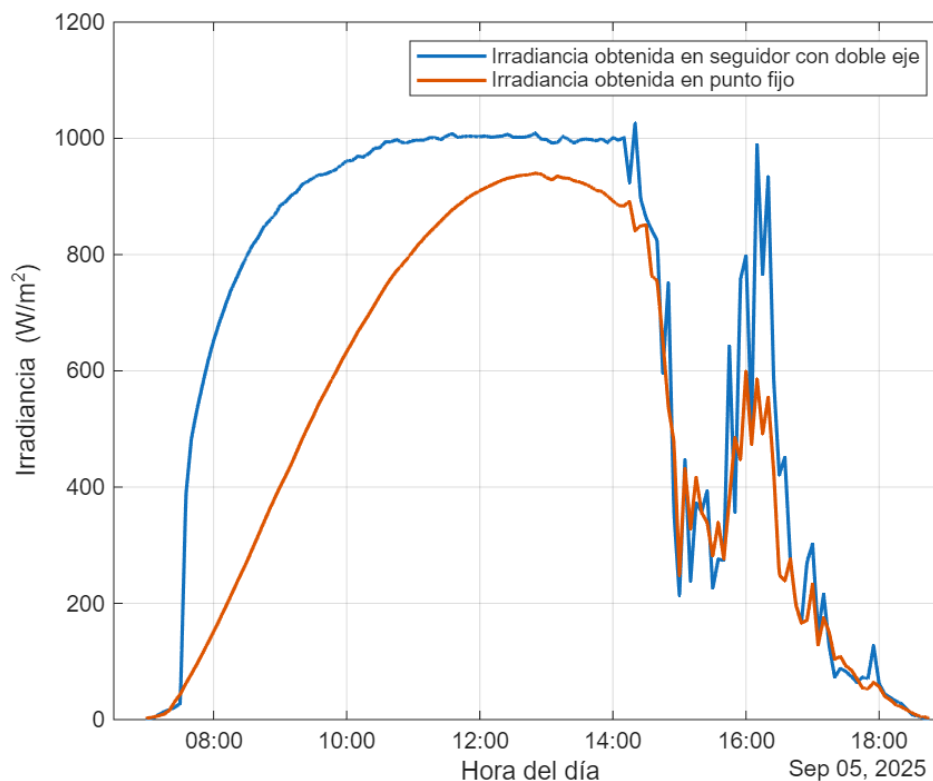


Fig. 5.5. Irradiancia 5 de septiembre.

En la Fig. 5.6 se muestra la corriente y voltaje DC generado por los paneles solares y que recibe el inversor ABB ACS355. La corriente (Fig. 5.6a) se estabiliza alrededor de las 8:20 horas, manteniéndose así, hasta las 12:15 horas, momento en que se abre la llave de paso. Durante ese lapso se registró un promedio de 2,33 [A]. Luego, entre las 12:15 y 14:30 horas se obtuvo un promedio de 2,42 [A]. Pasadas las 14:30 horas, se presenta distorsión en la gráfica, debido a la disminución de la irradiancia presente.

El voltaje DC (Fig. 5.6b) presenta un valor promedio de 342 [V] durante el tramo de mayor estabilidad. Alrededor de las 14:30 horas, los valores comienzan a variar, debido a la pérdida de irradiancia.

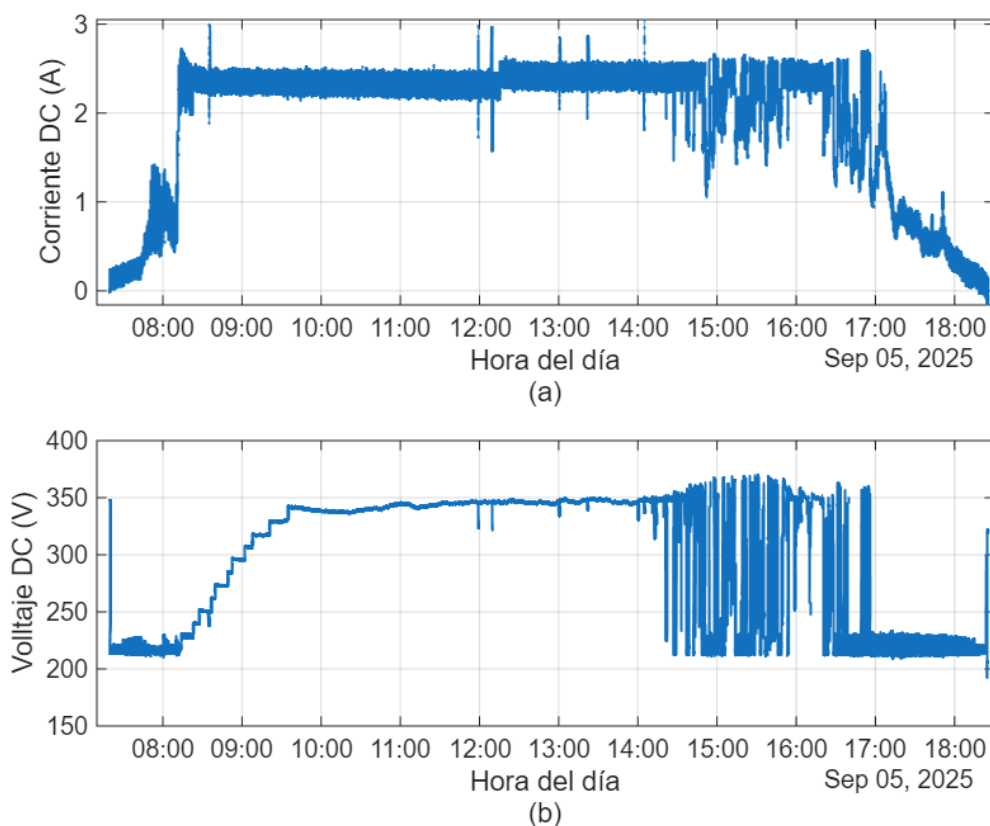


Fig. 5.6. (a) Corriente DC y (b) Voltaje DC.

En la Fig. 5.7 se muestra la corriente de fase A y el voltaje de fase AB del motor de inducción, que es alimentado desde el inversor ABB ACS355. La corriente (Fig. 5.7a) se estabiliza desde las 9:35 hasta las 12:15 horas, donde se obtuvo un promedio de 2,6 [A]. Luego, desde las 12:15 hasta las 14:30 horas, se registró un promedio de 2,7 [A]. Al abrir la llave de paso, aumenta el caudal, por lo tanto, el motor necesita una mayor corriente, por ello se observa un pequeño aumento en el parámetro. Después, debido a la disminución de la irradiancia, la corriente no se mantiene estable, perjudicando el rendimiento del motor.

El voltaje (Fig. 5.7b) presenta un valor peak de 181 [V] durante el tramo de mayor estabilidad y presenta variaciones, debido a la pérdida de irradiación en el día.

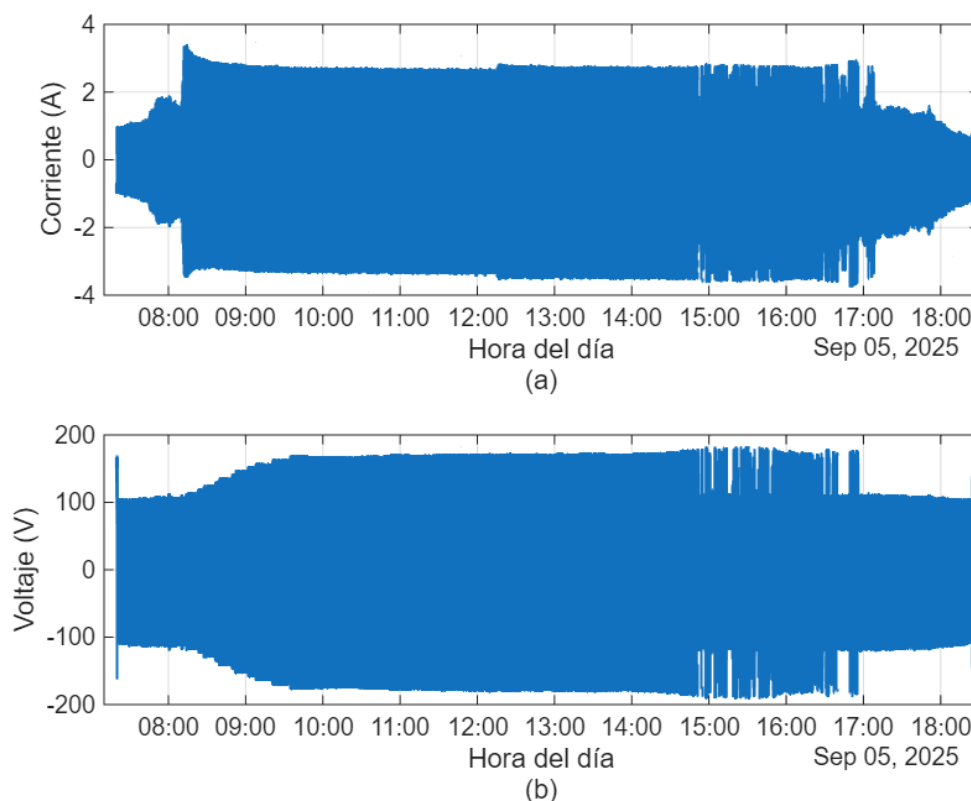


Fig. 5.7. (a) Corriente de fase A y (b) voltaje de fase AB.

En la Fig. 5.8 se muestran las variables de caudal [L/min] y presión [bar] presentes en el sistema de bombeo. El caudal (Fig. 5.8a) se estabiliza a las 9:35 horas y se mantiene así hasta las 12:15 horas, durante ese tiempo se registró un promedio de 60,67 [L/min]. Luego, desde las 12:15 horas (momento en que se abre la llave de paso) hasta las 14:35 horas, se obtuvo un promedio de 72,52 [L/min]. Después, el caudal presenta variaciones en sus valores, debido a la variación de la irradiancia y finalmente, alrededor de las 17:00 horas, comienza a decaer significativamente.

La presión (Fig. 5.8b) se estabiliza desde 9:35 hasta las 12:15 horas, promediando un valor de 0,32 [bar]. Luego desde las 12:15 hasta las 14:30 horas, se obtuvo un valor promedio de 0,0027 [bar]. Esta disminución se debe a que, al abrir la llave de paso, aumenta el caudal, lo que lleva a una disminución de la presión en las tuberías.

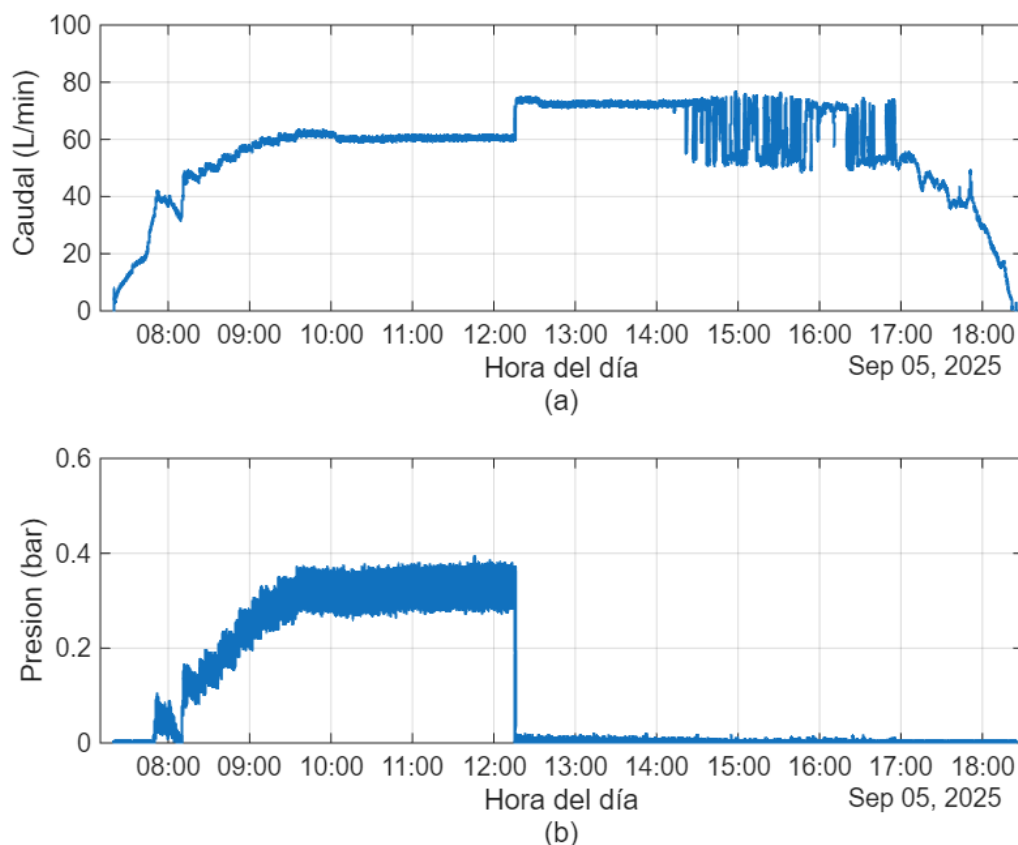


Fig. 5.8. (a) Caudal y (b) Presión.

La Fig. 5.9 muestra la velocidad y torque estimado de la bomba de agua. La velocidad (Fig. 5.9a) se estabiliza a las 9:35 horas y mantiene un valor promedio de 2652 [rpm] hasta las 12:15 horas. Luego al abrir la llave de paso, presenta un valor promedio de 2627 [rpm] hasta las 14:35 horas. Después, debido a la variación de la irradiancia, se observa oscilaciones en los valores de la velocidad, que terminan de disminuir completamente alrededor de las 17:00 horas.

El torque (Fig. 5.9b) se mantiene estable desde las 9:35 hasta las 12:15 horas, con un valor promedio de 2,01 [Nm]. Luego, desde las 12:15 hasta las 14:25 horas, se presenta un pequeño aumento del parámetro, promediando 2,09 [Nm]. Al igual que parámetros anteriores, el torque comienza a disminuir significativamente a partir de las 17:00 horas.

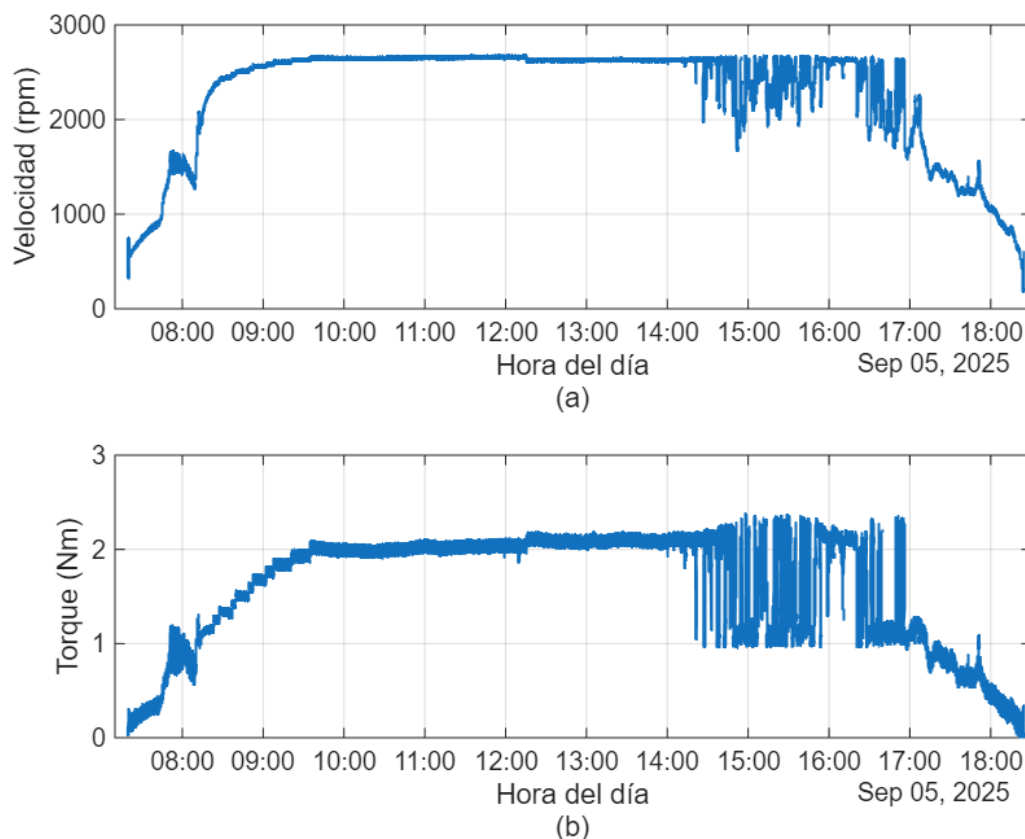


Fig. 5.9. (a) Velocidad y (b) Torque.

La Fig. 5.10 muestra la potencia DC y de entrada al motor. La potencia DC (Fig. 5.10a) se estabiliza a las 9:35 horas y alcanza un valor promedio de 798 [W] hasta las 12:15 horas. Luego, al abrir la llave de paso, se obtuvo un valor promedio de 839 [W] hasta las 14:35 horas. Mas tarde se presentan oscilaciones en los valores, debido a la variación de la irradiancia.

La potencia de entrada al motor (Fig. 5.10b) se estabiliza desde las 9:35 hasta las 12:15 horas promediando 780 [W]. Después, debido al aumento del caudal, se registra un aumento del valor de la potencia, alcanzando un promedio de 821 [W] hasta las 14:35 horas. Luego, los valores comienzan a variar y alrededor de las 17:00 horas comienzan a disminuir significativamente.

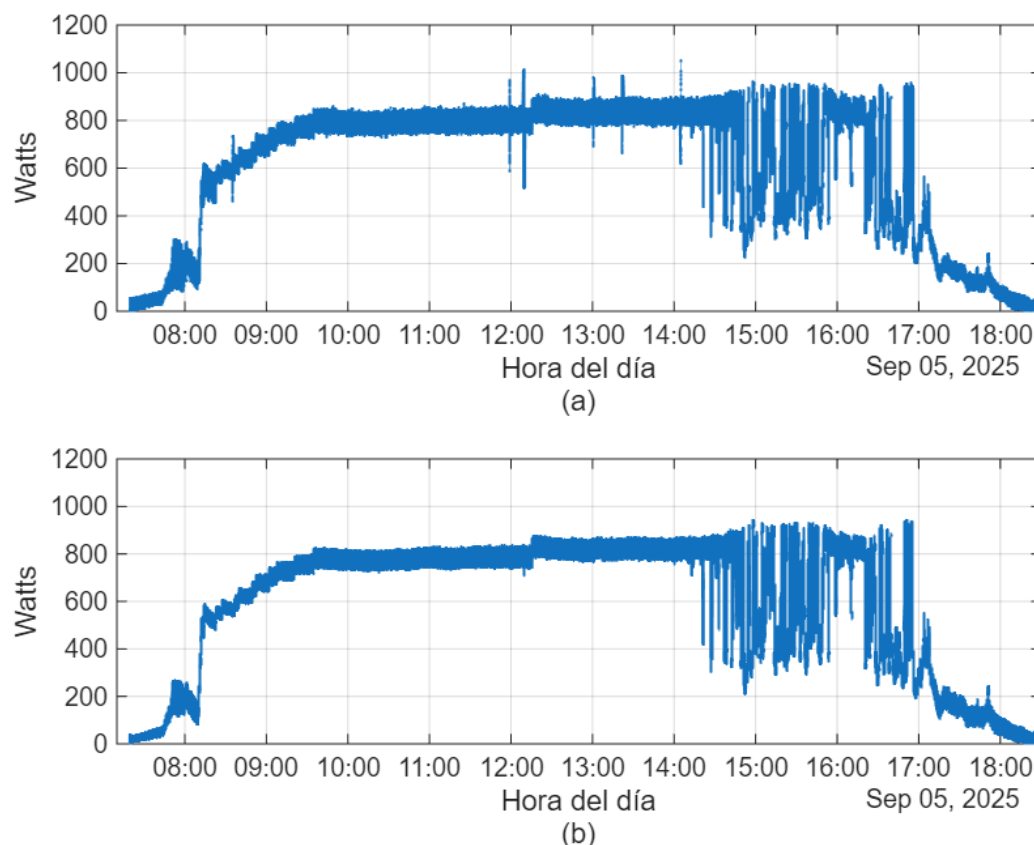


Fig. 5.10. (a) Potencia DC y (b) Potencia de entrada al motor.

La Fig. 5.11 muestra la potencia convertida e hidráulica. La potencia convertida (Fig. 5.11a) se estabiliza a las 9:35 horas y promedia 559 [W] hasta las 12:15 horas. Luego al abrir la llave de paso, promedia 575 [W] hasta las 14:35 horas. Después, comienza a disminuir sus valores debido a la variación de la irradiancia.

La potencia hidráulica (Fig. 5.11b) se mantiene estable desde las 9:35 horas hasta las 12:15 horas, promediando 33 [W]. luego, al aumentar el caudal, se registró un promedio de 0,32 [W] hasta las 14:35 horas. Esto, muestra que predomina la disminución de la presión por sobre el aumento del caudal, disminuyendo así el valor de potencia hidráulica.

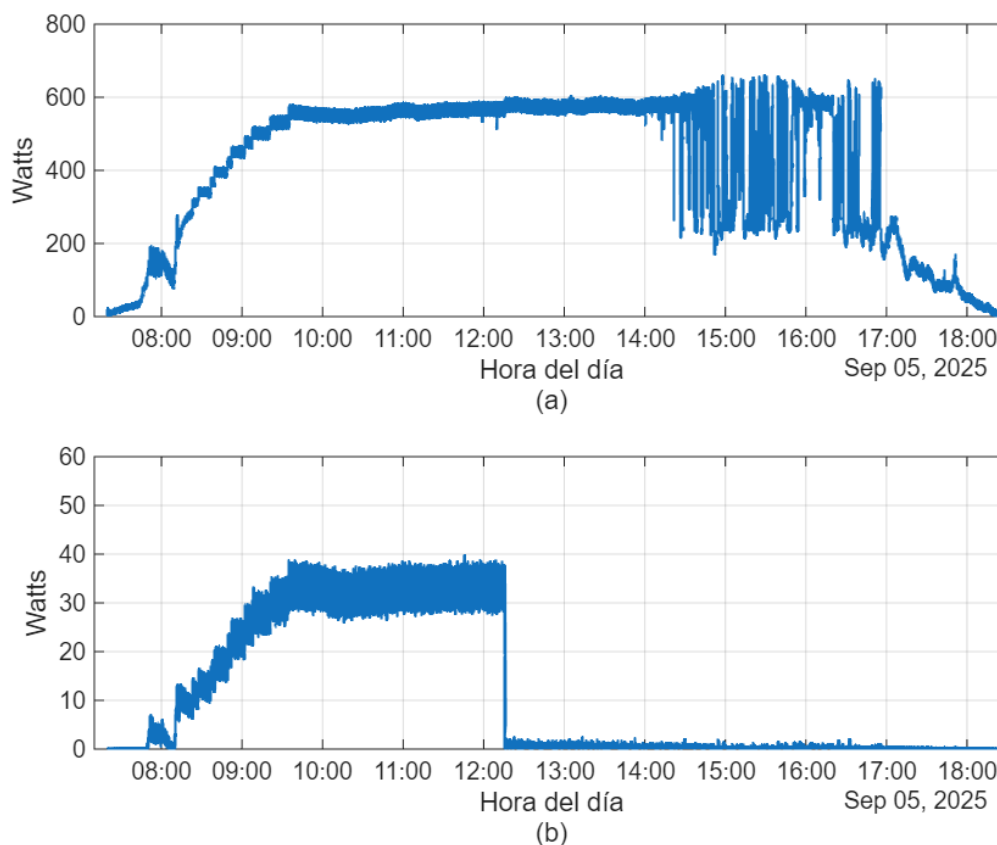


Fig. 5.11. (a) Potencia convertida y (b) Potencia hidráulica.

La Fig. 5.12 muestra la eficiencia: total de sistema, del inversor, del motor e hidráulica. Para la eficiencia total del sistema (Fig. 5.12a) en el rango de las 9:35 hasta las 12:15 horas, se presenta un promedio del 4,10%. Luego, al aumentar el caudal se obtuvo una eficiencia promedio del 0,038%.

La eficiencia del inversor (Fig. 5.12b), desde las 9:35 hasta las 12:15 horas presenta un promedio del 97%. Después, al abrir la llave de paso, se obtuvo un promedio del 97% hasta las 14:35 horas.

La eficiencia del motor (Fig. 5.12c) entre las 9:35 y las 12:15 horas, presento un promedio del 71%. Luego, al aumentar el caudal se obtuvo una eficiencia promedio del 70% hasta las 14:35 horas.

La eficiencia hidráulica (Fig. 5.12d) muestra un promedio del 5% desde las 9:35 hasta las 12:15 horas. Después, al aumentar el caudal se obtuvo un promedio del 0.05%.

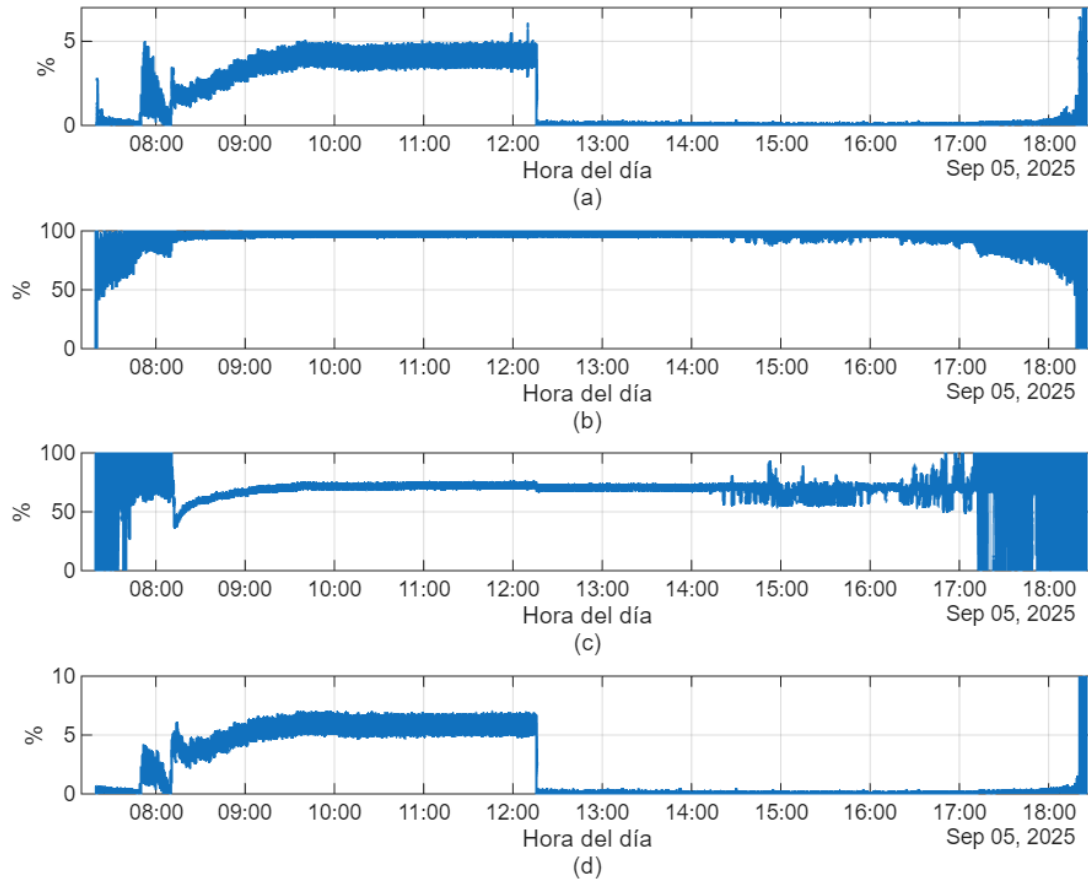


Fig. 5.12. Eficiencia: (a) Global, (b) Inversor, (c) Motor y (d) Hidráulica

5.3.2 Pruebas SBFV con sistema de seguimiento solar de un eje inclinado

La Fig. 5.13 muestra la irradiancia medida el 29 de septiembre. Para el análisis, se promedió la irradiancia únicamente en los tramos estables del SBFV (estabilidad eléctrica e hidráulica). Entre el rango de las 9:00 y 12:15 horas, se promedió 951,55 [W/m²] con el sensor en el seguidor y 635,48 [W/m²] con el sensor fijo. En el tramo de las 12:15 y 15:01 horas, se registró 1029 [W/m²] y 998 [W/m²] respectivamente.

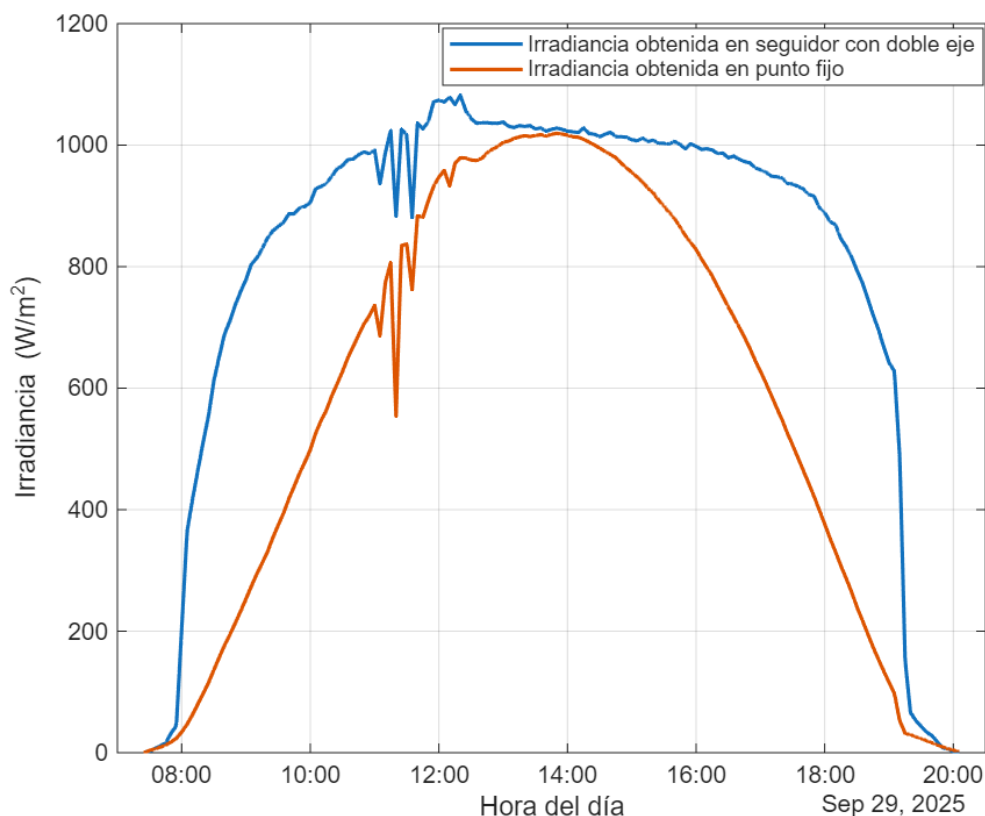


Fig. 5.13. Irradiancia 29 de septiembre.

En la Fig. 5.14 se muestra la corriente y voltaje DC generado por los paneles solares y que recibe el inversor ABB ACS355. La corriente (Fig. 5.14a) se estabiliza a partir de las 9:00 horas y registra un promedio de 2,33 [A] hasta las 12:15 horas, momento en que se abre la llave de paso. Luego, entre las 12:15 y 15:01 horas se obtuvo un promedio de 2,42 [A] Mas tarde, alrededor de las 18:40 horas, la corriente comienza a descender drásticamente.

El voltaje DC (Fig. 5.14b). muestra un promedio de 345 [V] durante la mayor parte del día y comienza a decaer pasadas las 17:50 horas.

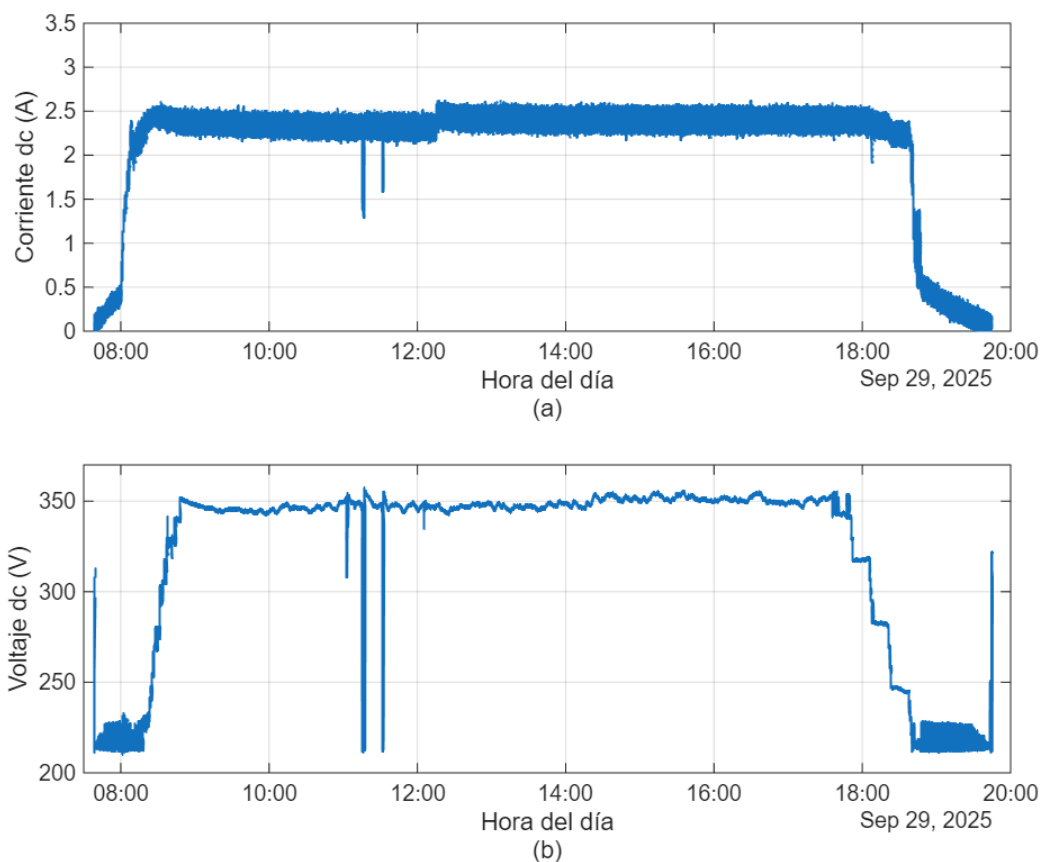


Fig. 5.14. (a) Corriente DC y (b) Voltaje DC.

En la Fig. 5.15 se muestra la corriente de fase A y el voltaje de fase AB del motor de inducción. La corriente (Fig. 5.15a) se estabiliza desde las 9:00 y hasta las 12:15 horas, se obtuvo un promedio de 2,65 [A]. Luego, desde las 12:15 hasta las 15:01 horas, se registró un promedio de 2,75 [A].

El voltaje (Fig. 5.15b), presenta un valor peak de 171 [V] durante el tramo de mayor estabilidad y comienza a decaer cerca de las 18:00 horas.

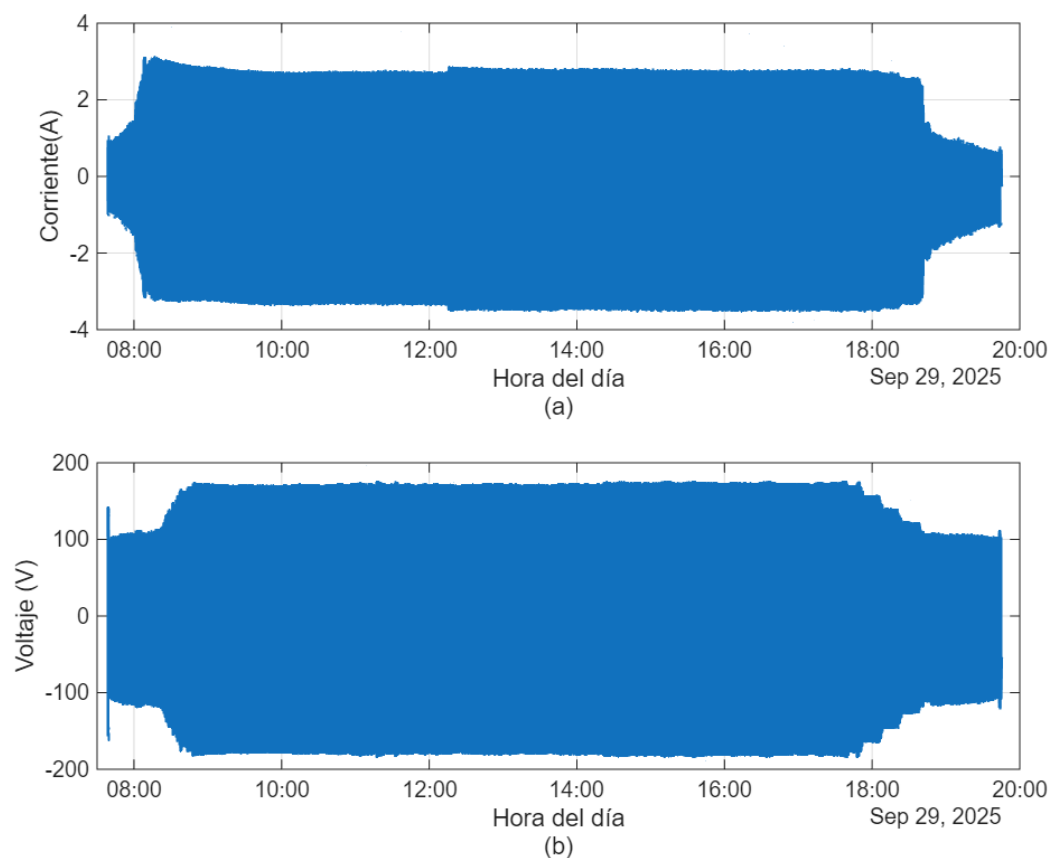


Fig. 5.15. (a) Corriente y (b) Voltaje de fase.

En la Fig. 5.16 se muestran las variables de caudal [L/min] y presión [bar] presentes en el sistema de bombeo. El caudal (Fig. 5.16a) se estabiliza a las 9:00 horas y mantiene un promedio 59,7 [L/min] hasta las 12:15 horas. Luego, al abrir la llave de paso, se obtuvo un promedio de 71,7 [L/min] hasta las 15:01 horas. Después, debido a la pérdida de irradiancia, el caudal comienza a disminuir alrededor de las 18:00 horas.

La presión (Fig. 5.16b) se estabiliza desde las 9:00 hasta las 12:15 horas, promediando un valor de 0,32 [bar]. Luego, desde las 12:15 hasta las 15:00 horas, se presentó un valor promedio de 0,0026 [bar].

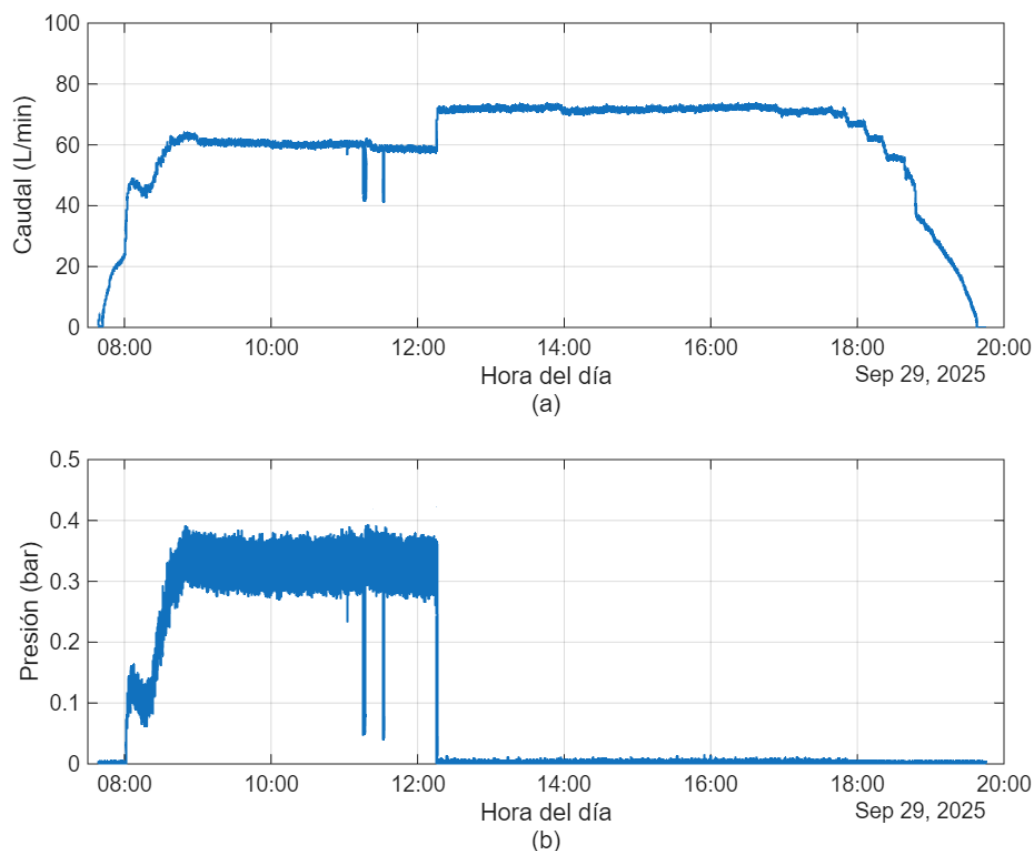


Fig. 5.16. (a) Caudal y (b) Presión.

La Fig. 5.17 muestra la velocidad y torque estimado de la bomba de agua. La velocidad (Fig. 5.17a) se estabiliza a las 9:00 horas y mantiene un valor promedio de 2648 [rpm] hasta las 12:15 horas. Luego al abrir la llave de paso, presenta un valor promedio de 2624 [rpm] hasta las 15:01 horas.

El torque (Fig. 5.17b) se mantiene estable desde las 9:00 hasta las 12:15 horas, con un valor promedio de 2,03 [Nm]. Luego, desde las 12:15 hasta las 15:01 horas, se presenta un promedio de 2,09 [Nm].

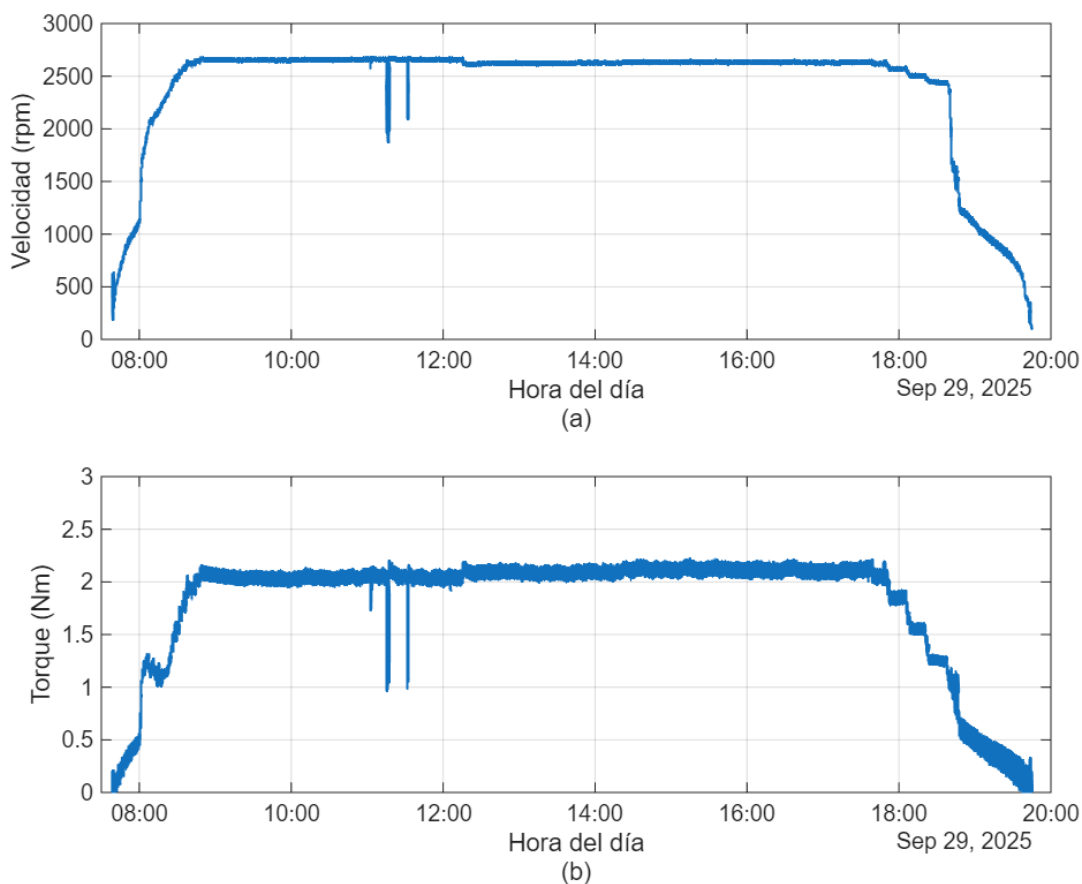


Fig. 5.17. (a) Velocidad y (b) Torque.

La Fig. 5.18 muestra la potencia DC y de entrada al motor. La potencia DC (Fig. 5.18a) se estabiliza a las 9:00 horas y alcanza un valor promedio de 806 [W] hasta las 12:15 horas. Luego, al abrir la llave de paso, se obtuvo un valor promedio de 842 [W] hasta las 15:01 horas.

La potencia de entrada al motor (Fig. 5.18b) se estabiliza desde las 9:00, hasta las 12:15 horas, presentando un promedio de 785 [W]. Después, al abrir la llave de paso, se registra un promedio de 824 [W] hasta las 15:01 horas.

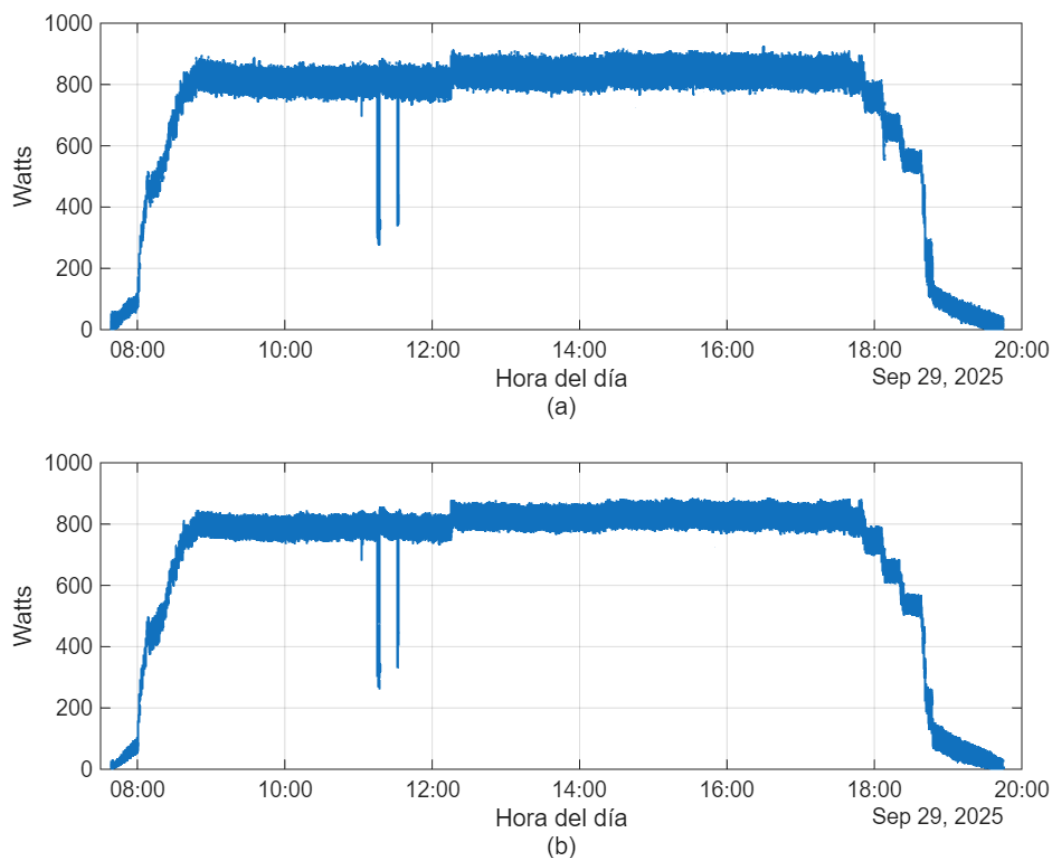


Fig. 5.18. (a) Potencia DC y (b) Potencia de salida del inversor.

La Fig. 5.19 muestra la potencia convertida e hidráulica. La potencia convertida (Fig. 5.19a) se estabiliza a las 9:00 horas y promedia 564 [W] hasta las 12:15 horas. Luego al abrir la llave de paso, promedia 576 [W] hasta las 15:00 horas.

La potencia hidráulica (Fig. 5.19b) se mantiene estable desde las 9:00 hasta las 12:15 horas, promediando 32.3 [W]. luego, al aumentar el caudal, se registró un promedio de 0,31 [W] hasta las 15 horas.

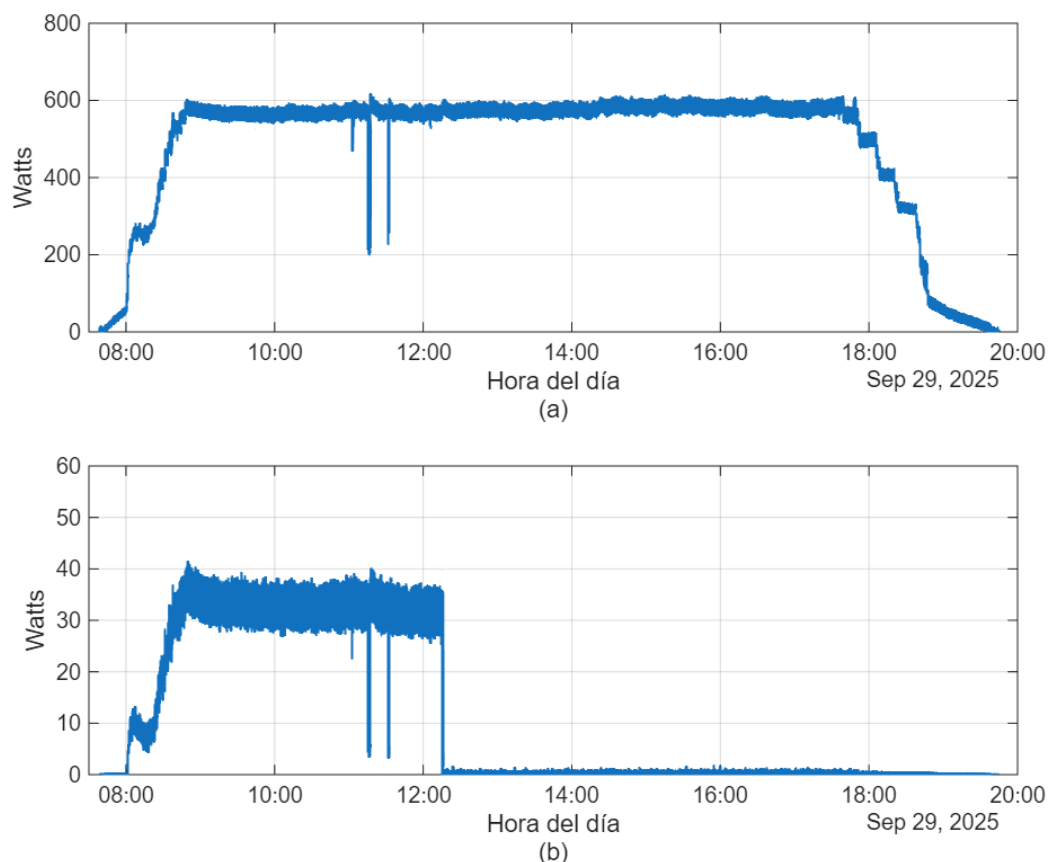


Fig. 5.19. (a) Potencia convertida y (b) Potencia hidráulica.

La Fig. 5.20 muestra la eficiencia: total de sistema, del inversor, del motor e hidráulica. Para la eficiencia total del sistema (Fig. 5.20a) en el rango de las 9:00 hasta las 12:15 horas, se presenta un promedio del 4%. Luego, al aumentar el caudal se obtuvo una eficiencia promedio del 0,037%.

La eficiencia del inversor (Fig. 5.20b), desde las 9:00 hasta las 12:15 horas presenta un promedio del 97,38%. Después, al abrir la llave de paso, se obtuvo un promedio del 97,8% hasta las 15:01 horas.

La eficiencia del motor (Fig. 5.20c) entre las 9:00 y las 12:15 horas, presento un promedio del 72,1%. Luego, al aumentar el caudal se obtuvo una eficiencia promedio del 70,3% hasta las 15:01 horas.

La eficiencia hidráulica (Fig. 5.20d) muestra un promedio del 5,71% desde las 9:00 hasta las 12:15 horas. Después, al aumentar el caudal se obtuvo un promedio del 0.054%.

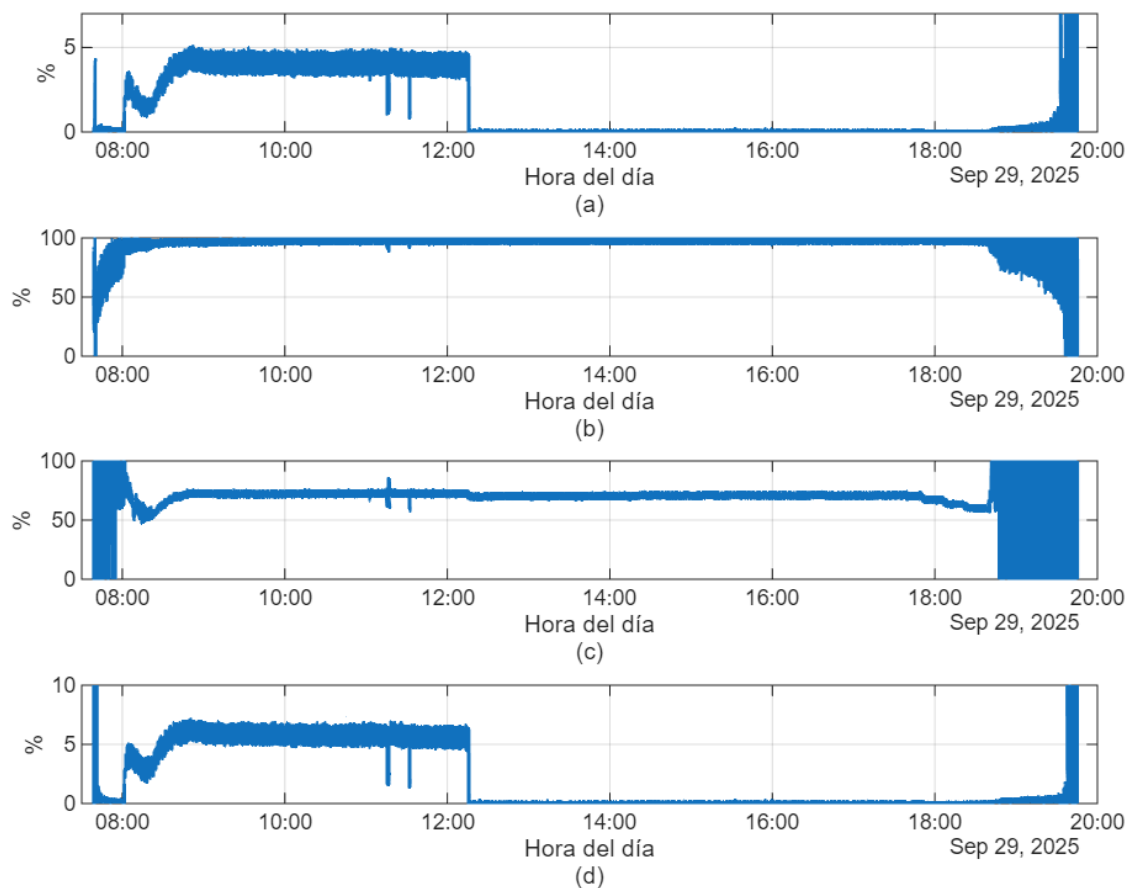


Fig. 5.20. Eficiencia: (a) Global, (b) Inversor, (c) Motor e (d) Hidráulica.

5.3.3 Pruebas SBFV con sistema de seguimiento solar con doble eje

La Fig. 5.21 muestra la irradiancia medida el 25 de agosto. Para el análisis, se promedió la irradiancia únicamente en los tramos estables del SBFV (estabilidad eléctrica e hidráulica). Entre el rango de las 9:00 y 12:15 horas, se promedió $942,2 \text{ [W/m}^2\text{]}$ con el sensor en el seguidor de doble y en el tramo de las 12:15 y 15:05 horas, se registró $981,5 \text{ [W/m}^2\text{]}$.

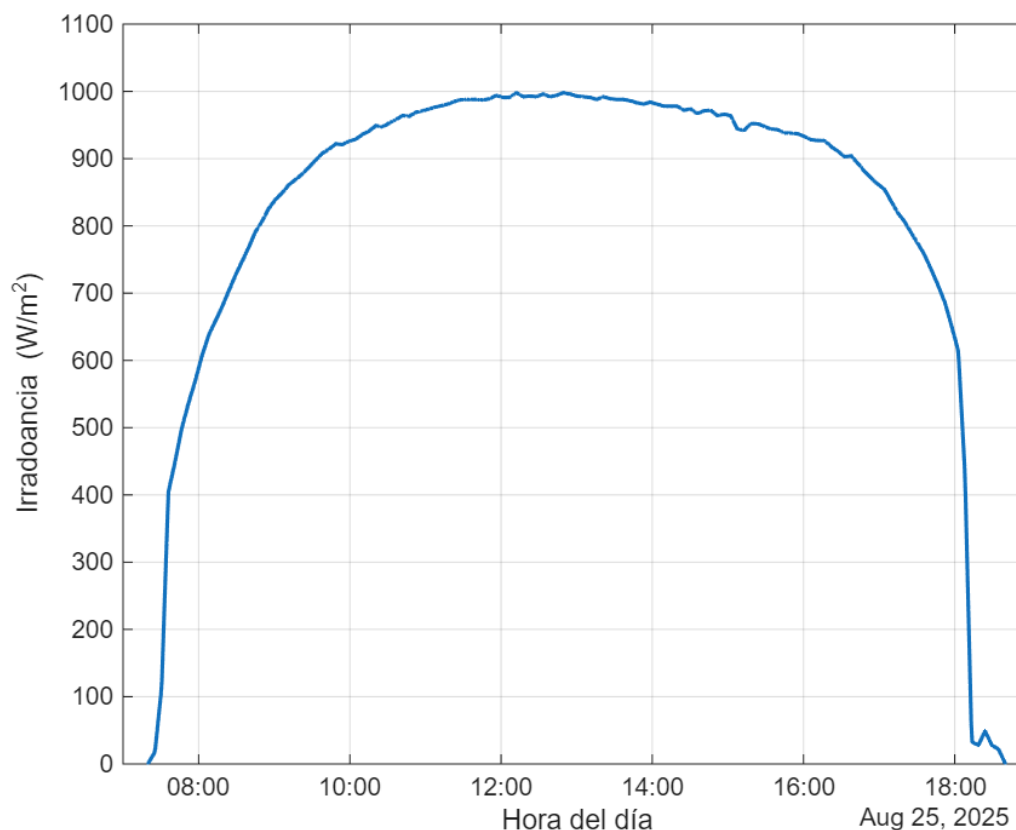


Fig. 5.21. Irradiancia 25 de agosto.

La Fig. 5.22 muestra el comportamiento de la corriente y el voltaje DC. La corriente DC (Fig. 5.22a) entre las 9:00 hasta las 12:15 horas, presenta un promedio de 2,33 [A]. Luego, al abrir la llave de paso, se obtuvo un promedio de 2,42 [A] hasta las 15:01 horas. Después, la corriente comienza a disminuir drásticamente pasadas las 17:35 horas, debido a la disminución de irradiancia presente en el día.

El voltaje DC (Fig. 5.22b) presenta un promedio de 351 [V] durante la mayor parte del día y comienza a decaer, pasadas las 17:34 horas.

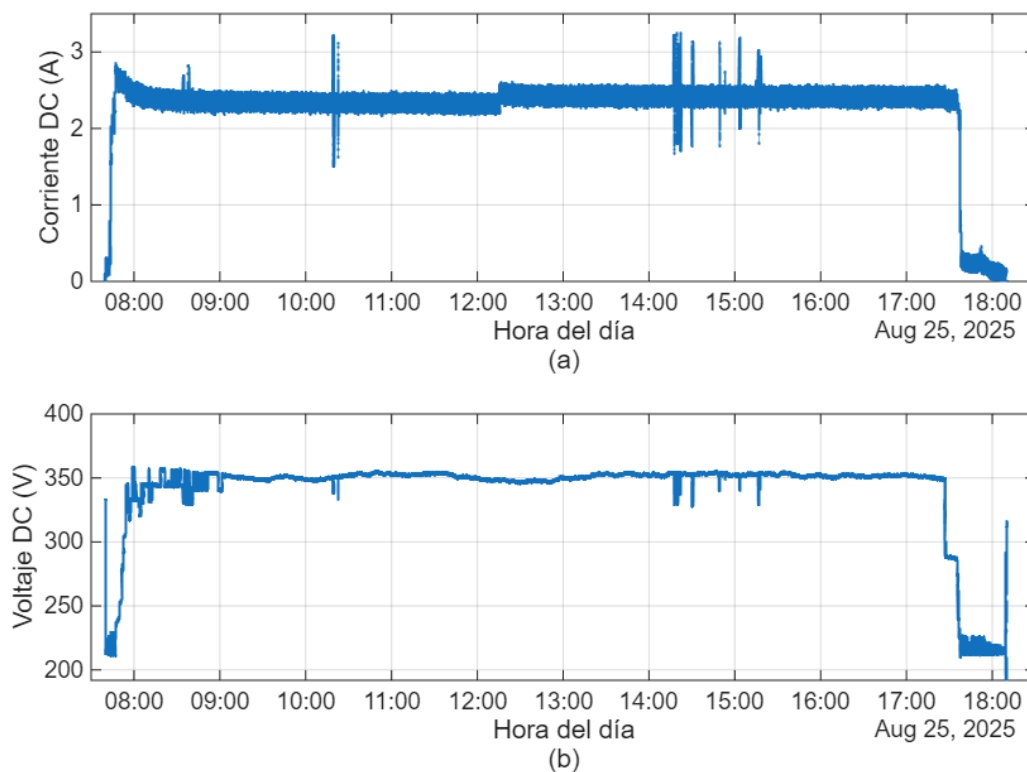


Fig. 5.22. (a) Corriente DC y (b) Voltaje DC.

La Fig. 5.23 presenta la corriente de fase A y el voltaje de fase AB del motor de inducción. La corriente de fase A (Fig. 23a) presenta un promedio de 2,6 [A] entre las 9:00 y 12:15 horas. Luego, al aumentar el caudal, se obtuvo un aumento del valor de corriente, promediando 2,71 [A] entre las 12:15 y 15:05 horas. Después, su valor comienza a decaer drásticamente pasadas las 17:35 horas.

El voltaje de fase AB (Fig.23b), obtiene un valor peak de 210 [V] durante el tramo de mayor estabilidad.

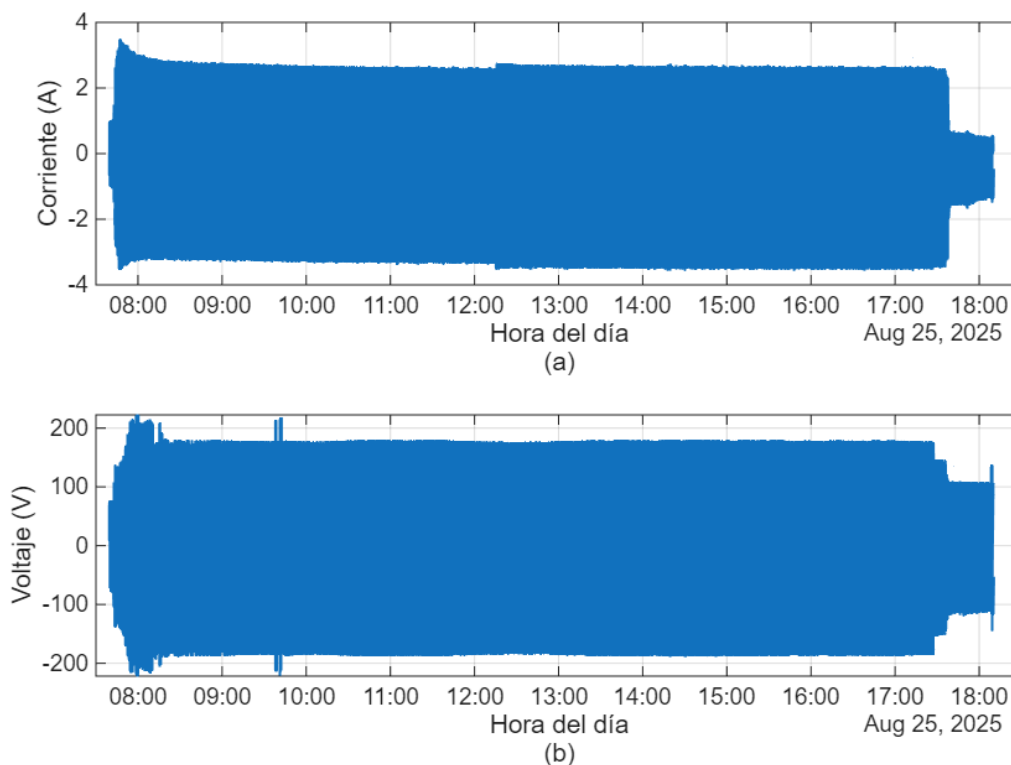


Fig. 5.23. (a) Corriente de fase y (b) Voltaje de fase.

La Fig. 5.24 muestra la evolución del caudal y la presión en el sistema de bombeo. El caudal (Fig. 5.24a) se estabiliza alrededor de las 9:00 horas y presenta un promedio de 62,6 [L/min] que se mantiene hasta las 12:15 horas. Luego, al abrir la llave de paso, se obtiene un aumento de caudal, promediando 73,8 [L/min] hasta las 15:05 horas. Después, el caudal comienza a disminuir drásticamente pasadas las 17:35 horas debido a la pérdida de irradiancia en el día.

La presión (Fig. 5.24b) se estabiliza desde 9:00 hasta las 12:15 horas, promediando un valor de 0,33 [bar]. Luego desde las 12:15 hasta las 15:05 horas, se obtuvo un valor promedio de 0,0029 [bar]. Esta disminución se debe a que, al abrir la llave de paso, aumenta el caudal, lo que lleva a una disminución de la presión en las tuberías.

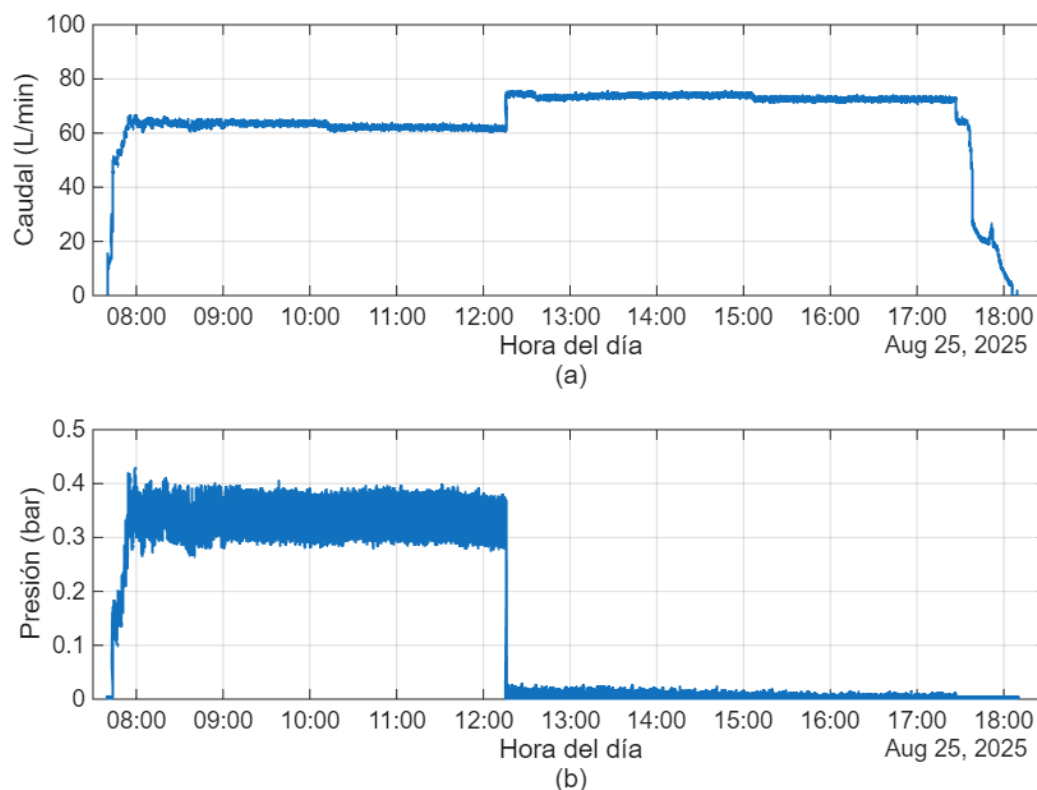


Fig. 5.24. (a) Caudal y (b) Presión.

La Fig. 5.25 muestra la evolución de la velocidad y el torque estimado durante el día de prueba. La velocidad (Fig. 5.25a) desde las 9:00 hasta las 12:15 horas presenta un promedio de 2674 [rpm]. Luego, al abrir la llave de paso, se obtiene una disminución de la velocidad, promediando 2644 [rpm] hasta las 15:05 horas. Mas tarde, comienza a decaer significativamente, pasadas las 17:35 horas.

El torque (Fig. 5.25b) presenta un promedio de 2,06 [Nm] entre las 9:00 y 12:15 horas. Luego al aumentar el caudal, se obtuvo un valor promedio de 2,1 [Nm]. Después, como los anteriores parámetros comienza a disminuir sus valores a partir de las 17:35 horas.

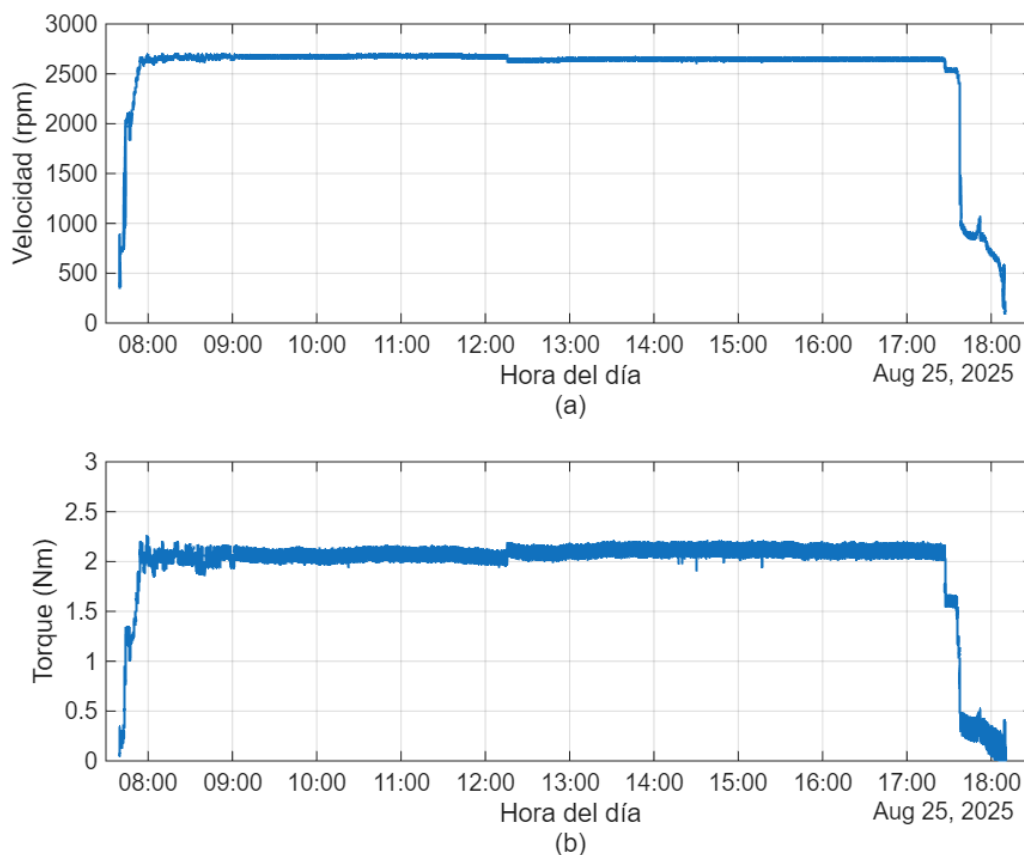


Fig. 5.25. (a) Velocidad y (b) Torque.

La Fig. 5.26 muestra la potencia DC y de entrada al motor. La potencia DC (Fig. 5.26a) se estabiliza a las 9:00 horas y alcanza un valor promedio de 822 [W] hasta las 12:15 horas. Luego, al abrir la llave de paso, se obtuvo un valor promedio de 854 [W] hasta las 15:05 horas. Mas tarde, comienza a decaer significativamente debido a la perdida de irradiancia, pasadas las 17:35 horas.

La potencia de entrada al motor (Fig. 5.26b) desde las 9:00 hasta las 12:15 horas, promedia un valor de 790 [W]. Después, debido al aumento del caudal, se registra un aumento del valor de la potencia, alcanzando un promedio de 821 [W] hasta las 15:05 horas. Luego, comienza a disminuir su valor a partir de las 17:35 horas.

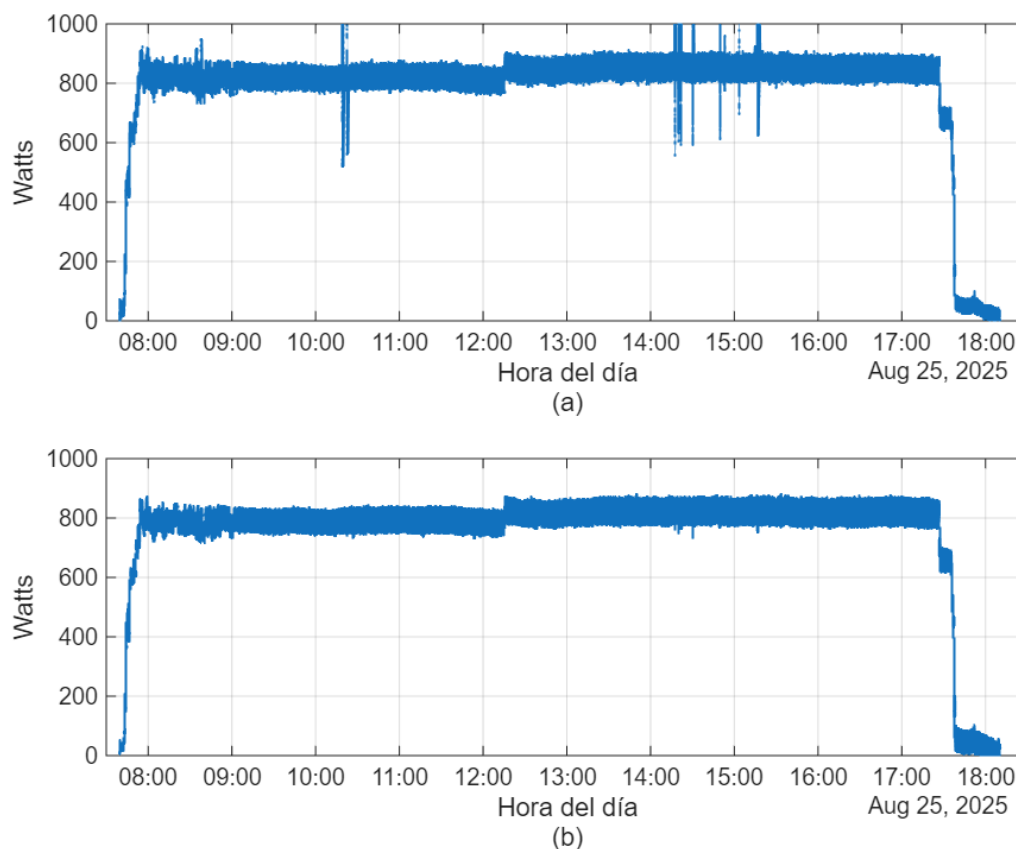


Fig. 5.26. (a) Potencia DC y (b) Potencia de salida del inversor.

La Fig. 5.27 presenta la potencia convertida y la potencia hidráulica en el sistema. La potencia convertida (Fig. 5.27a) presenta un promedio de 577 [W] entre las 9:00 y 12:15 horas. Luego, al abrir la llave de paso, se obtuvo un promedio de 583 [W] hasta las 15:05 horas. Después, al igual que parámetros anteriores, su valor comienza a decaer pasadas las 17:35 horas.

La potencia hidráulica (Fig. 5.27b) a partir de las 9:00 y hasta las 12:15 horas presenta un promedio de 35 [W]. Luego, al aumentar el caudal, se registró un promedio de 0,35 [W] hasta las 15:05 horas.

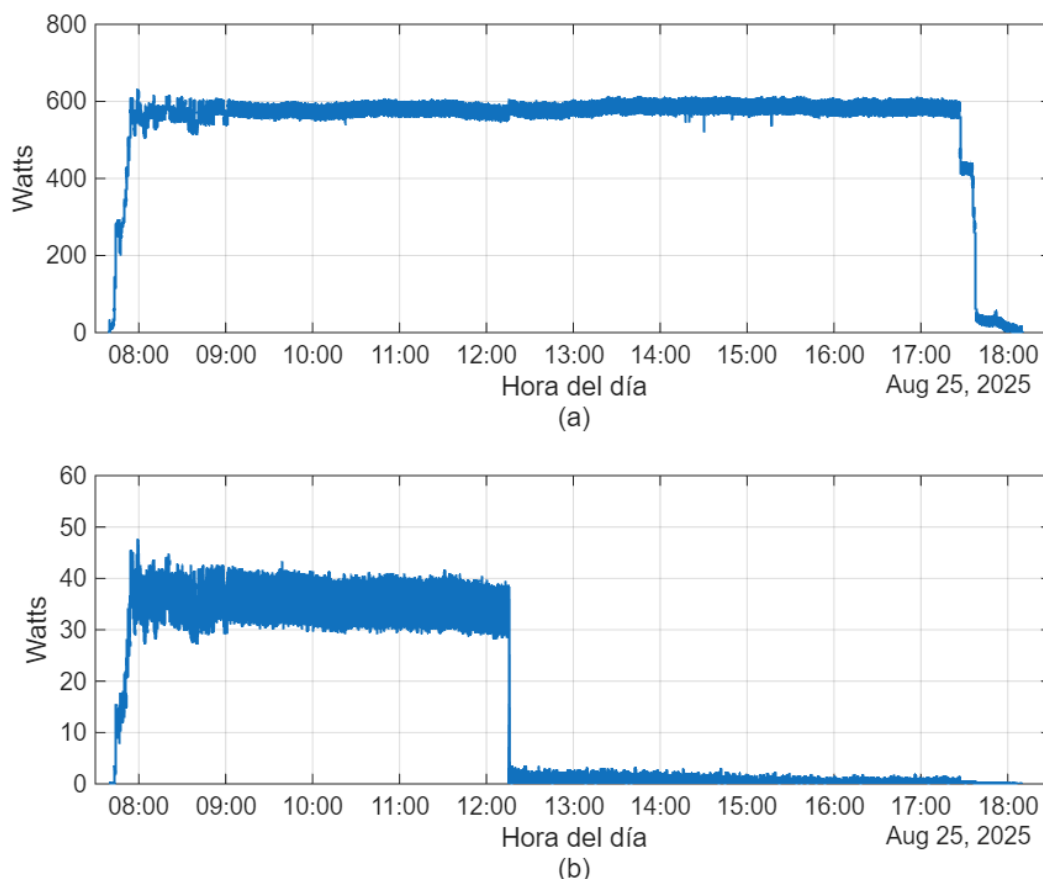


Fig. 5.27. (a) Potencia convertida y (b) Potencia hidráulica.

La Fig. 5.28 muestra la eficiencia: total de sistema, del inversor, del motor e hidráulica. La eficiencia total del sistema (Fig. 5.28a) en el rango de las 9:00 hasta las 12:15 horas, presenta un promedio del 4,28%. Luego, al aumentar el caudal se obtuvo una eficiencia promedio del 0,041%.

La eficiencia del inversor (Fig. 5.28b) desde las 9:00 hasta las 12:15 horas presenta un promedio del 96%. Después, al abrir la llave de paso, se obtuvo un promedio del 96% hasta las 15:05 horas.

La eficiencia del motor (Fig. 5.28c) entre las 9:00 y las 12:15 horas, presento un promedio del 73%. Luego, al aumentar el caudal se obtuvo una eficiencia promedio del 71% hasta las 15:05 horas.

La eficiencia hidráulica (Fig. 5.28d) muestra un promedio del 6% desde las 9:00 hasta las 12:15 horas. Después, al aumentar el caudal se obtuvo un promedio del 0.06%.

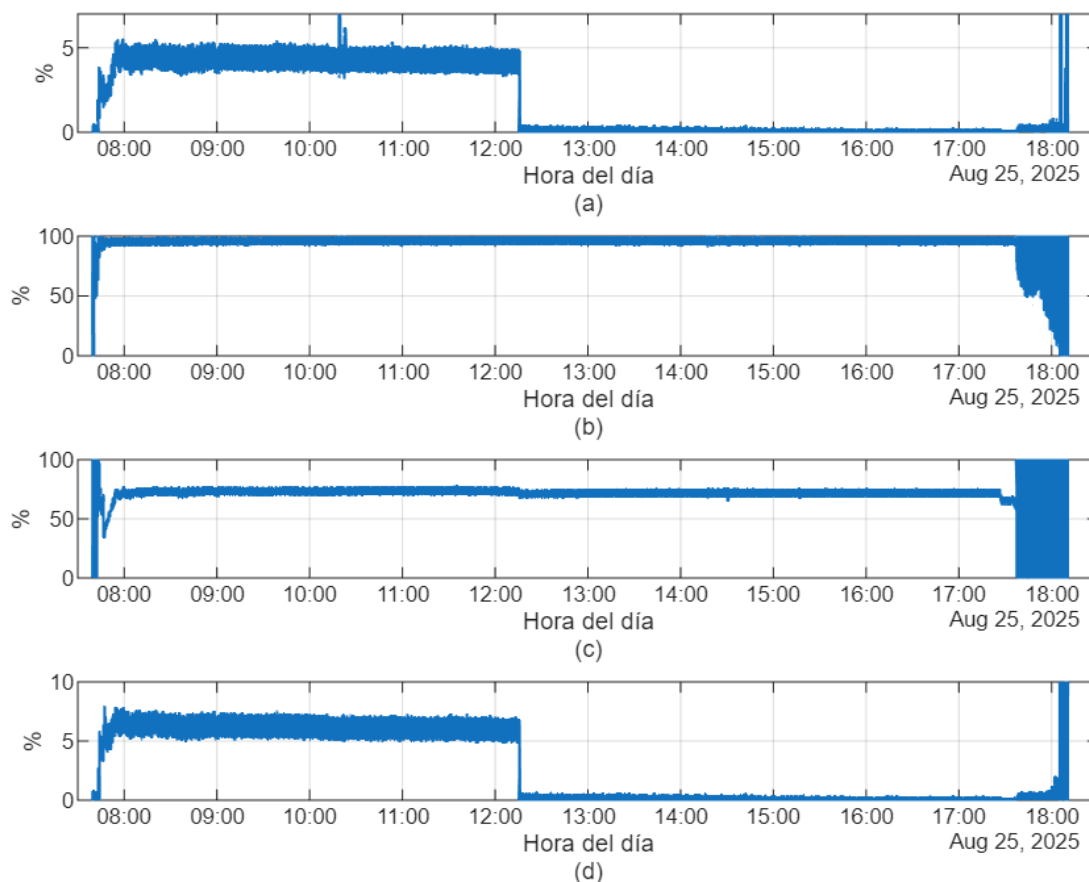


Fig. 5.28. Eficiencia: (a) Global, (b) Inversor, (c) Motor e (d) Hidráulica.

La Tabla 5.1 presenta los datos obtenidos en tramos de operación estable y de mayor irradiancia, para los distintos sistemas de seguimiento solar con el motor en conexión estrella. En la tabla, los valores de la izquierda de la división (/) representan al segmento de la mañana y el otro lado, el segmento de la tarde. El sistema de seguimiento de doble eje opera con parámetros un poco más cercanos a los valores nominales. Este sistema, con unas vueltas de cerrado de la llave de paso, supera el caudal del seguidor de un eje inclinado en 4,86% y del seguidor de un eje en 3,18%. Luego, con la apertura de la llave de paso, el caudal es un 2,93 % mayor que el del seguidor de un eje inclinado y un 1,76 % mayor que el del seguidor de un eje. Para todos los seguidores solares, en la tarde, se presenta una nula eficiencia global, lo que indica una mala conversión del energía en el sistema, debido a la casi inexistente presión. Por lo tanto, los tres sistemas de seguimiento solar en conexión estrella de la bomba de agua, presentan rendimientos hidráulicos y eléctricos similares, solo con pequeñas diferencias.

Tabla 5.1. Promedio de parámetros obtenidos por los sistemas de seguimiento solar en conexión estrella.

Parámetros	Un eje (05/09)	Un eje inclinado (29/09)	Dos ejes (25/08)
Irradiancia (seguidor) [W/m ²]	985,88/994,74	951,55/1029	942,2/981,5
Irradiancia (fijo) [W/m ²]	774,94/916	635,48/998	672,7/859,15
Corriente DC [A]	2,33/2,42	2,33/2,42	2,34/2,43
Voltaje DC [V]	342	345	351
Corriente de fase [A]	2,65/2,72	2,68/2,76	2,61/2,66
Voltaje de fase [A]	181	174	210
Caudal [l/min]	60,67/72,52	59,7/71,7	62,6/73,8
Presión [Bar]	0,32/0,0027	0,32/0,0026	0,33/0,0029
Velocidad [rpm]	2652/2627	2648/2624	2674/2644
Torque [Nm]	2,01/2,09	2,03/2,09	2,06/2,1
Potencia DC [W]	798/839	806/842	822/854
Potencia entrada al motor [W]	780/821	785/824	790/821
Potencia convertida [W]	559/575	564/576	577/583
Potencia hidráulica [W]	33/0,32	32,3/0,31	35/0,35
Eficiencia global [%]	4,1/0,038	4/0,037	4,28/0,041
Eficiencia inversor [%]	97/97	97,38/97,8	96/96
Eficiencia motor [%]	71/70	72,1/70,3	73/71
Eficiencia hidráulica [%]	5/0,05	5,71/0,054	6/0,06

La tabla 5.2 muestra las horas de operación de los tres sistemas de seguimiento solar.

Tabla 5.2. Horas de operación de sistemas de seguimiento solar en estrella.

Sistema de seguimiento solar	Horas de operación (mañana)	Horas de operación (tarde)	Horas de operación total	Fecha
Un eje estrella	4,92	6,17	11,09	05/09
Un eje inclinado estrella	4,6	7,5	12,1	29/09
Dos ejes estrella	4,58	5,92	10,5	25/08

5.4. Evaluación SBFV conexión en delta

Con el motor de la bomba conectado en delta, se realizaron tres pruebas de día completo para evaluar el SBFV. Cada prueba iniciaba con algunos giros de cerrado de la llave de paso y, al mediodía, la llave se abría por completo. El objetivo de estos cambios es someter el SBFV bajo diferentes condiciones hidráulicas, con el fin de evaluar su rendimiento frente a variaciones de presión y caudal. Además, se abría la llave de paso al mediodía para aprovechar los momento de máxima irradiancia.

5.4.1 Pruebas SBFV con sistema de seguimiento solar de un eje

La Fig. 5.29 muestra la irradiancia medida el 5 de octubre. Para el análisis, se promedió la irradiancia únicamente en los tramos estables del SBFV (estabilidad eléctrica e hidráulica). Entre el rango de las 10:23 y 10:47 horas, se promedió 986,67 $[\text{W}/\text{m}^2]$ con el sensor en el seguidor y 696,17 $[\text{W}/\text{m}^2]$ con el sensor fijo. En el tramo de las 12:48 y 14:43 horas, se registró 1048 $[\text{W}/\text{m}^2]$ y 1044 $[\text{W}/\text{m}^2]$ respectivamente.

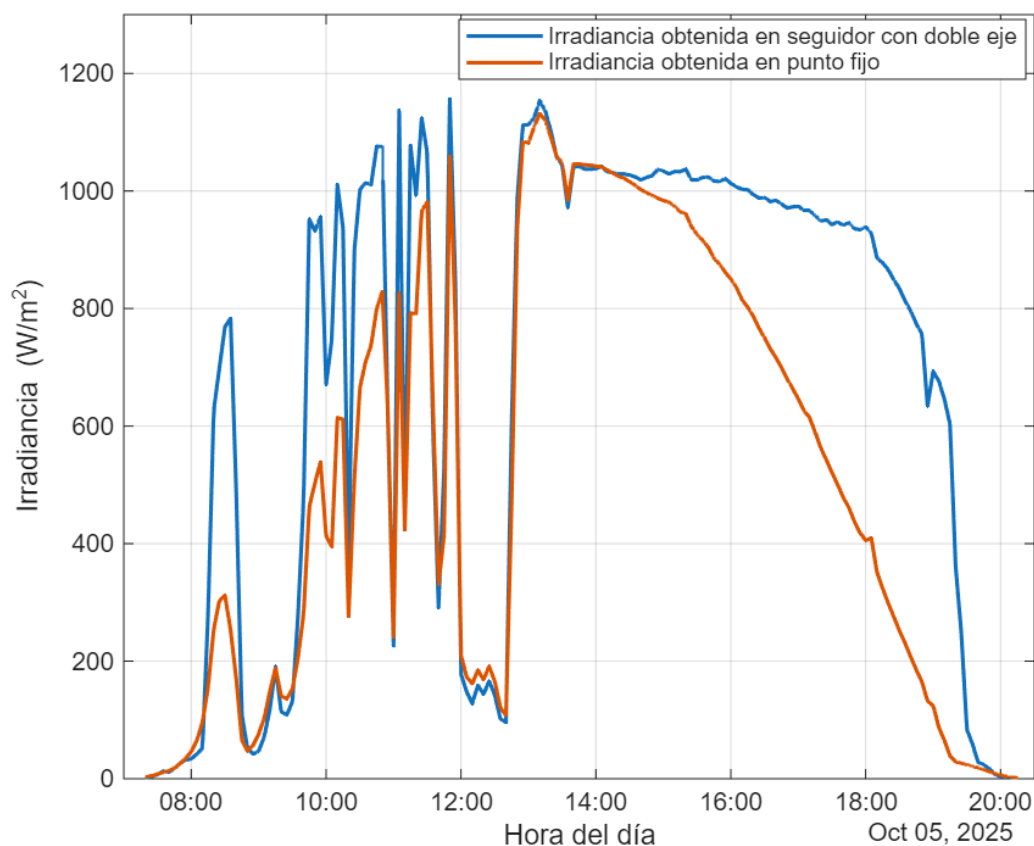


Fig. 5.29. Irradiancia 5 de octubre.

En la Fig. 5.30 se muestra la corriente y voltaje DC. La corriente (Fig. 5.30a) presenta un tramo de estabilidad entre las 10:23 y 10:47 horas, presentando un promedio de 3,47 [A]. Luego, entre las 12:47 y 14:43 horas, se obtuvo un promedio de 3,57 [A].

El voltaje DC (Fig. 5.30b) presenta un promedio de 341 [V] durante las 12:47 y 14:43 horas y comienza a decaer, cerca de las 18:30 horas.

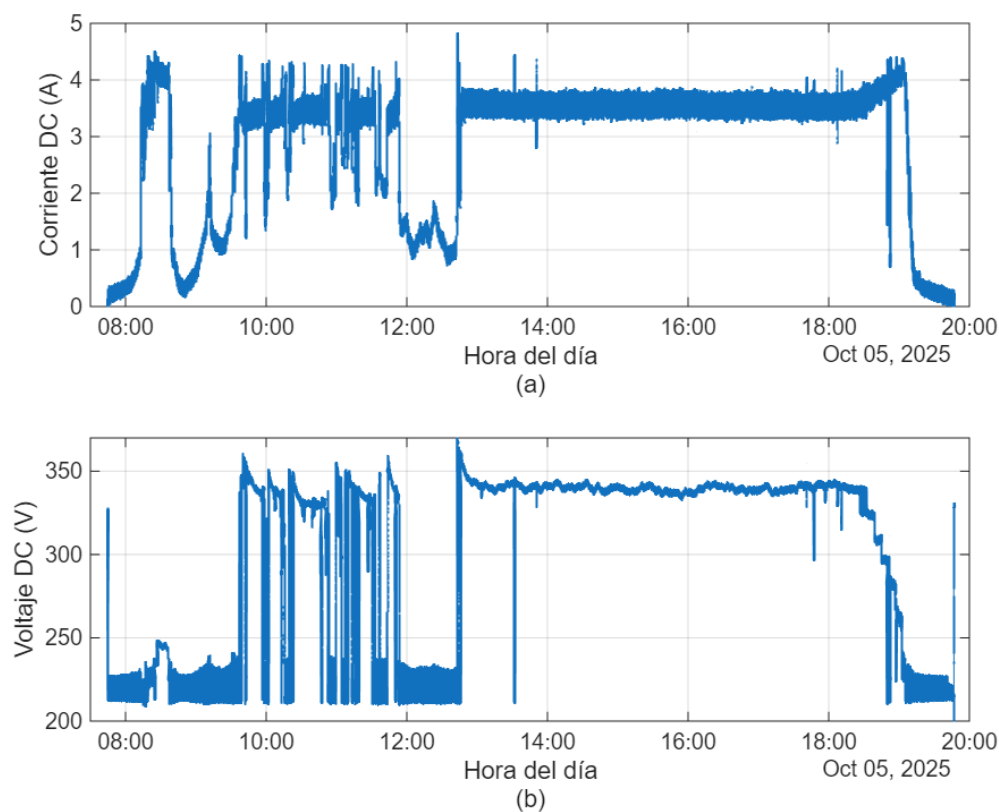


Fig. 5.30. (a) Corriente DC y (b) Voltaje DC.

En la Fig. 5.31 se muestra la corriente de fase A y el voltaje de fase AB del motor de inducción. La corriente (Fig. 5.31a) en un periodo de estabilidad antes de abrir la llave de paso, presenta una corriente de 2.7 [A]. Luego, desde las 12:47 hasta las 14:43 horas, se registró un promedio de 2,8 [A].

El voltaje de fase AB (Fig. 31b) en su periodo de mayor estabilidad, presenta un peak de 339 [V].

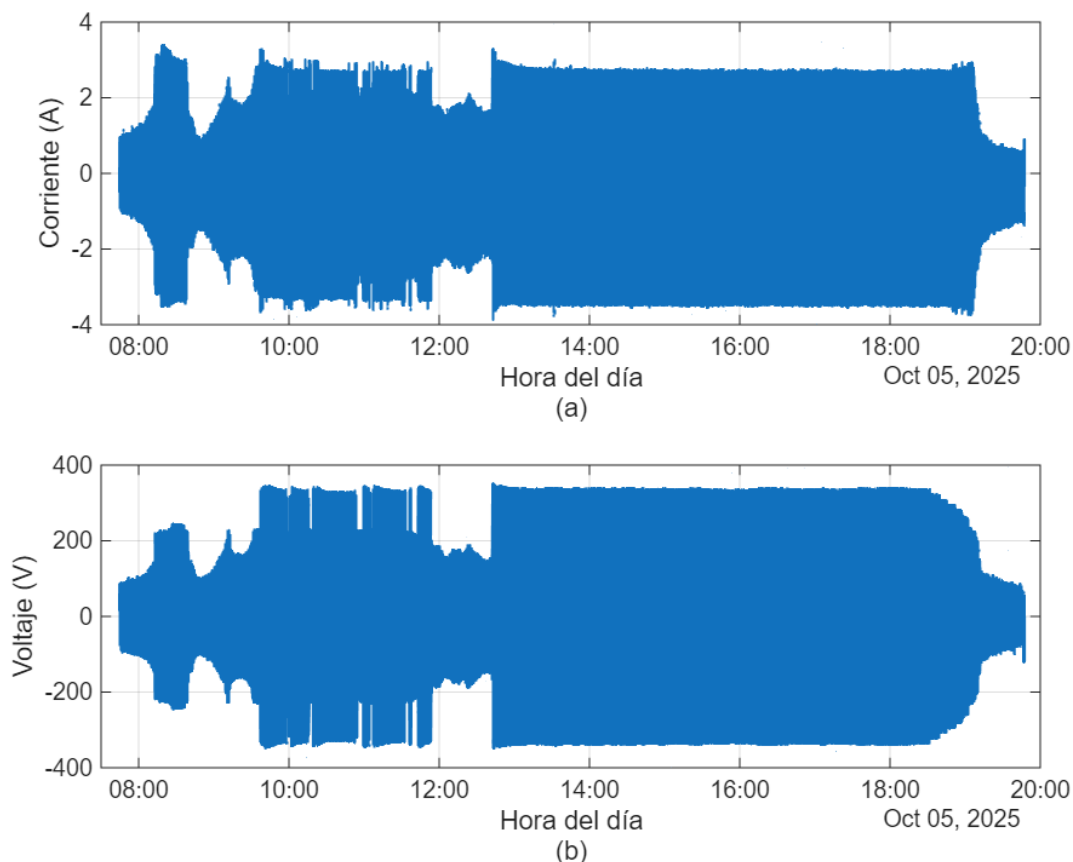


Fig. 5.31. (a) Corriente de fase y (b) Voltaje de fase.

En la Fig. 5.32 se muestra el caudal [L/min] y presión [bar] presentes en el sistema de bombeo. El caudal (Fig. 5.32a) mantiene un promedio de 73,9 [L/min] en su periodo de mayor estabilidad, antes de abrir la llave de paso. Luego, se obtuvo un promedio de 87,3 [L/min] entre las 12:47 y 14:43 horas.

La presión (Fig. 5.32b) presenta un promedio de 0,56 [bar], durante un periodo de estabilidad antes de la apertura de la llave de paso. Después, desde las 12:47 hasta las 14:43 horas, se obtuvo un valor promedio de 0,01[bar].

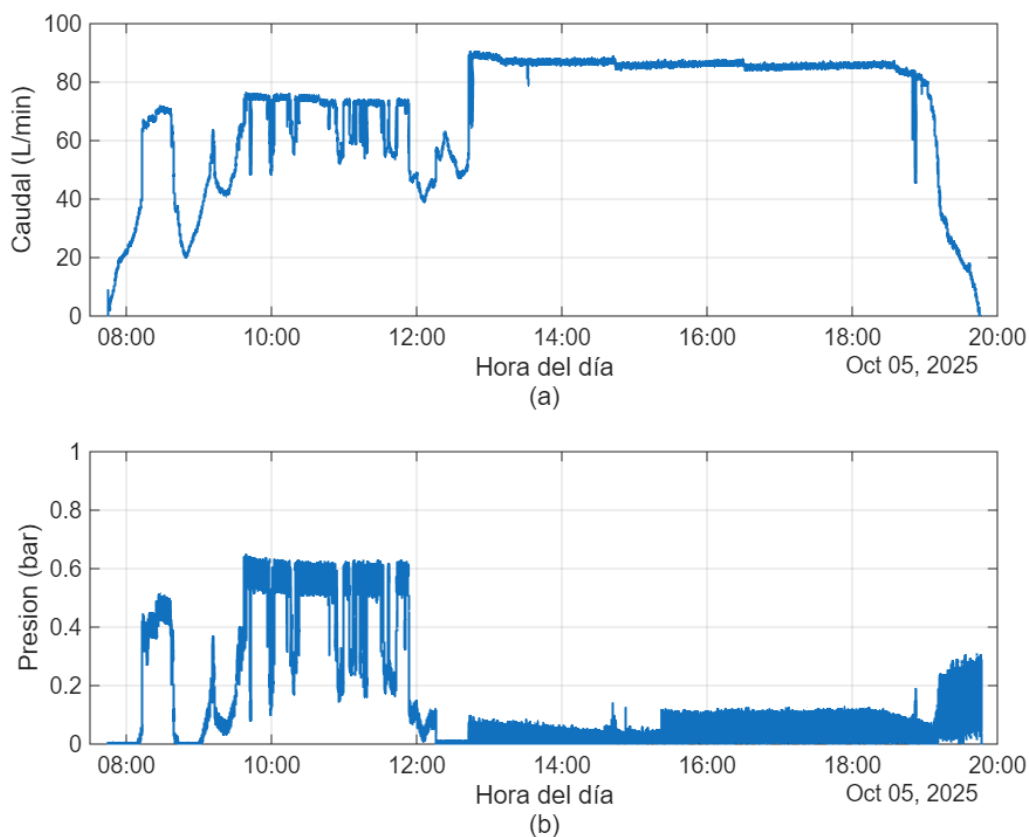


Fig. 5.32. (a) Caudal y (b) Presión.

La Fig. 5.33 muestra la velocidad y torque estimado de la bomba de agua. La velocidad (Fig. 5.33a) presenta un valor promedio de 2869 [rpm], durante un periodo de estabilidad. Luego, entre las 12:47 y 14:43 horas, se obtuvo un promedio de 2860 [rpm].

El torque (Fig. 5.33b) en un tramo de estabilidad, antes de la apertura de la llave de paso, presenta un promedio de 3,1 [Nm]. Luego, desde las 12:47 hasta las 14:43 horas, presenta un valor promedio de 3,3 [Nm].

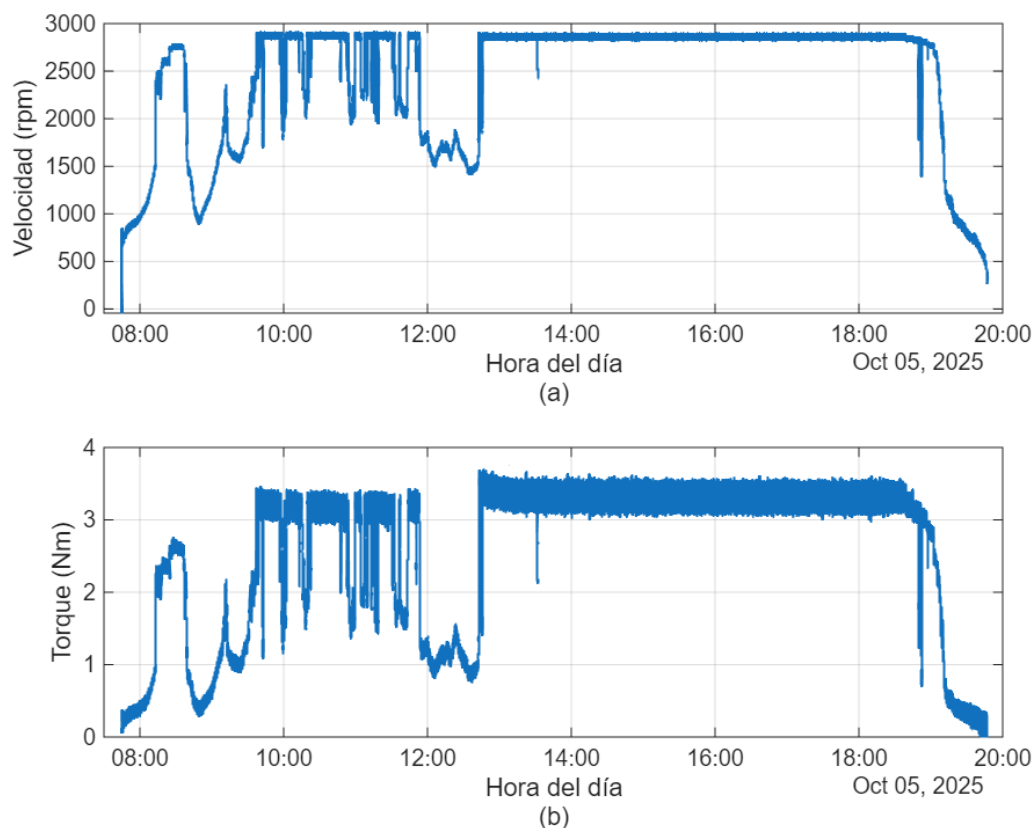


Fig. 5.33. (a) Velocidad y (b) Torque.

La Fig. 5.34 muestra la potencia DC y de entrada al motor. La potencia DC (Fig. 5.34a) presenta un promedio de 1149 [W], durante un periodo de estabilidad, antes de la apertura de la llave. Mas tarde, se obtuvo un valor promedio de 1218 [W] entre las 12:47 y 14:43 horas.

La potencia de entrada al motor (Fig. 5.34b) en el periodo de estabilidad, presenta un valor promedio de 1097 [W]. Luego, se registra un promedio de 1162 [W] en el rango de las 12:47 y 14:43 horas.

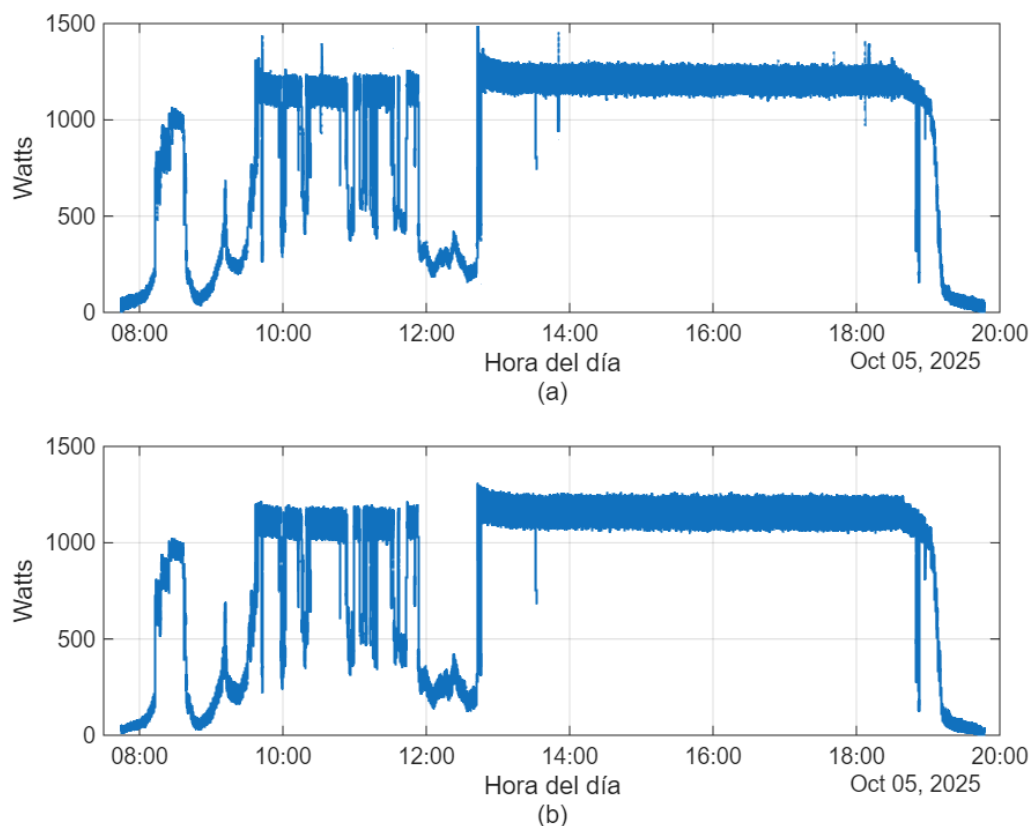


Fig. 5.34. (a) Potencia DC y (b) Potencia de salida inductor.

La Fig. 5.35 muestra la potencia convertida e hidráulica. La potencia convertida (Fig. 5.35a) presenta un promedio de 949 [W], durante un periodo de estabilidad, antes de la apertura de la llave. Mas tarde, se obtuvo un valor promedio de 998 [W] entre las 12:47 y 14:43 horas.

La potencia hidráulica (Fig. 5.35b) en el periodo de estabilidad, presenta un valor promedio de 69,4 [W]. Luego, se registra un promedio de 1,5 [W] en el rango de las 12:47 y 14:43 horas.

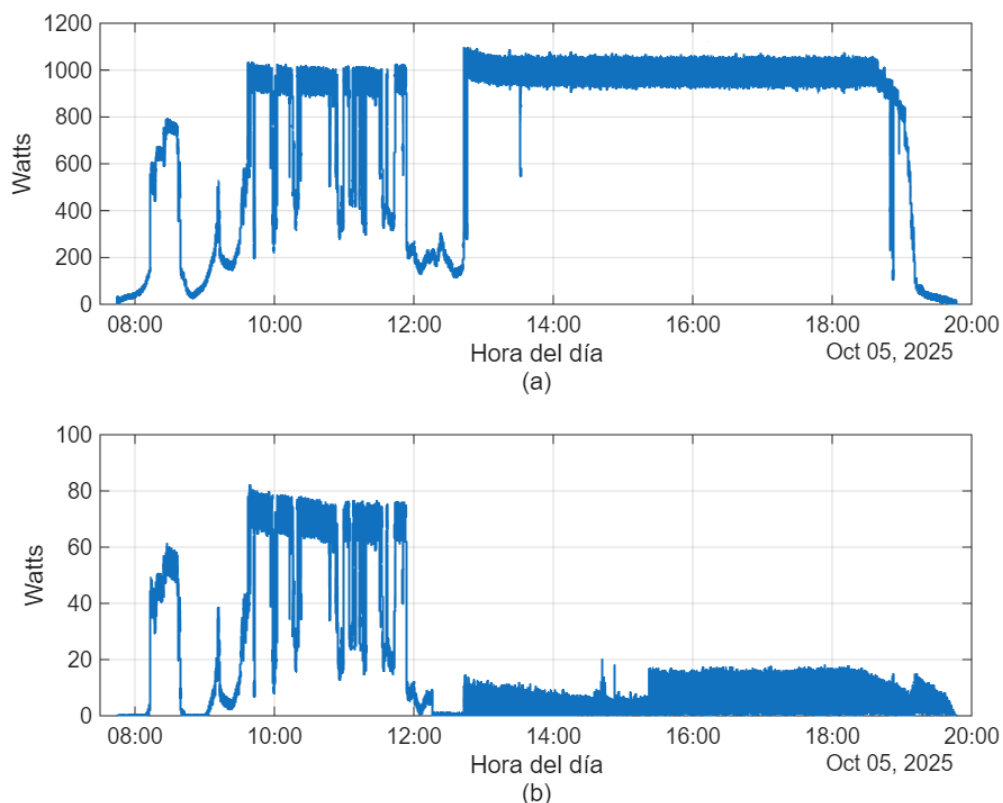


Fig. 5.35. (a) Potencia convertida y (b) Potencia hidráulica.

La Fig. 5.36 muestra la eficiencia: total de sistema, del inversor, del motor e hidráulica. La eficiencia total del sistema (Fig. 5.36a) en el primer rango de estabilidad, presenta un promedio del 6%. Luego, en el segundo rango de estabilidad, se obtuvo una eficiencia promedio de 0,12%.

La eficiencia del inversor (Fig. 5.36b) en el primer rango de estabilidad, presenta un promedio del 95,4%. Luego, en el segundo rango de estabilidad, se obtuvo una eficiencia promedio 95,4%.

La eficiencia del motor (Fig. 5.36c) en el primer rango de estabilidad, presenta un promedio del 87,1%. Luego, en el segundo rango de estabilidad, se obtuvo una eficiencia promedio 86,4%.

La eficiencia hidráulica (Fig. 5.36d) en el primer rango de estabilidad, presenta un promedio del 7,3%. Luego, en el segundo rango de estabilidad, se obtuvo una eficiencia promedio 0,15%.

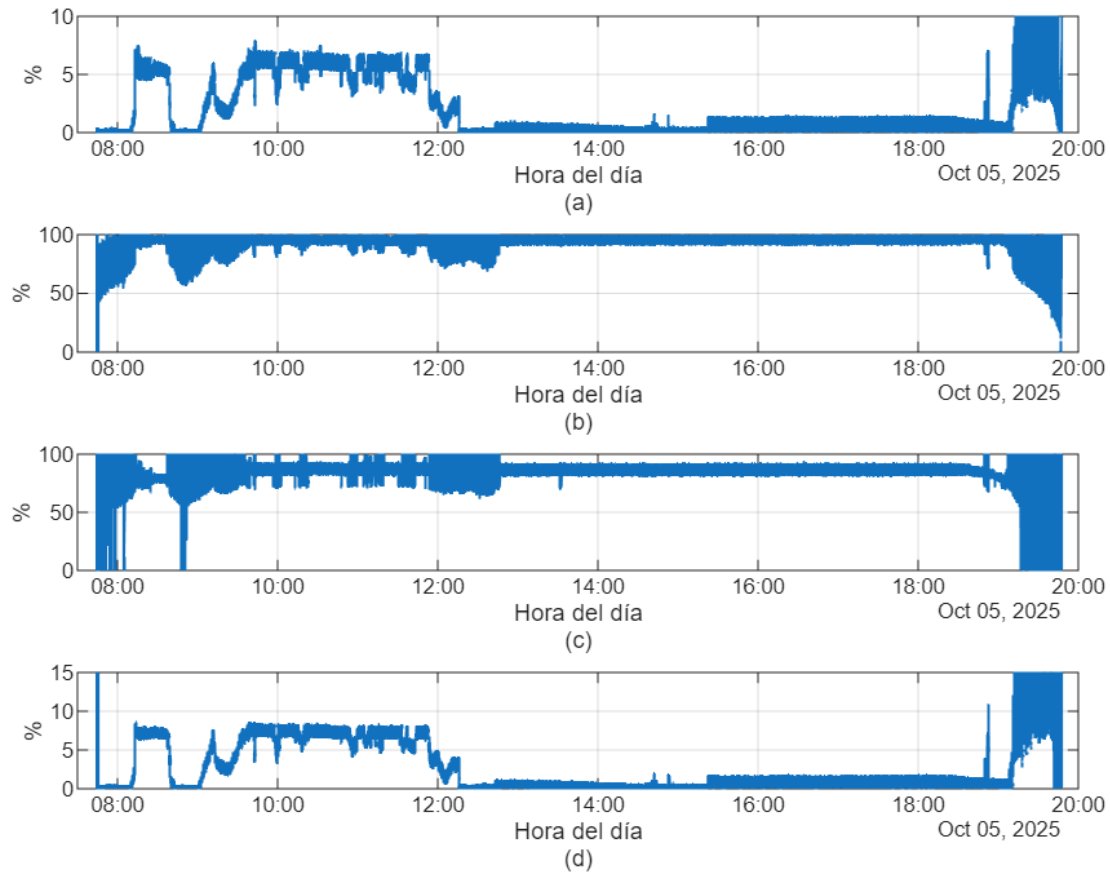


Fig. 5.36. Eficiencia: (a) Global, (b) Inversor, (c) Motor e (d) Hidráulica.

5.4.2 Pruebas SBFV con sistema de seguimiento solar con un eje inclinado

La Fig. 5.37 muestra la irradiancia medida el 23 de junio. Para el análisis, se promedió la irradiancia únicamente en los tramos estables del SBFV (estabilidad eléctrica e hidráulica). Entre el rango de las 9:17 y 12:15 horas, se promedió $875,65 \text{ [W/m}^2\text{]}$ con el sensor en el seguidor y $533,62 \text{ [W/m}^2\text{]}$ con el sensor fijo. En el tramo de las 12:15 y 14:35 horas, se registró $928,85 \text{ [W/m}^2\text{]}$ y $712,15 \text{ [W/m}^2\text{]}$ respectivamente.

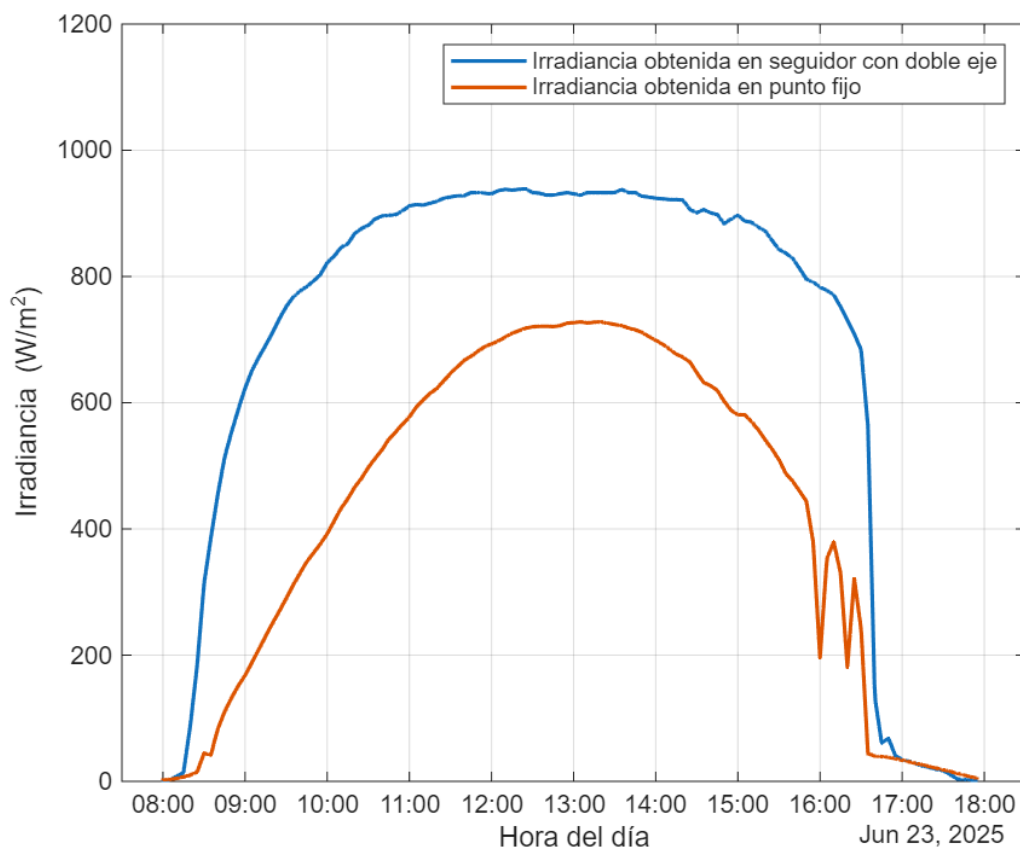


Fig. 5.37. Irradiancia 23 de junio.

En la Fig. 5.38 se muestra la corriente y voltaje DC. La corriente (Fig. 5.38a) se estabiliza a partir de las 9:17 horas y registra un promedio de 3,19 [A] hasta las 12:15 horas. Luego, entre las 12:15 y 14:26 horas se obtuvo un promedio de 3,39 [A].

El voltaje DC (Fig. 5.38b) presenta un promedio de 351,5 [V] durante la mayor parte de día y comienza a disminuir cerca de las 17:00 horas.

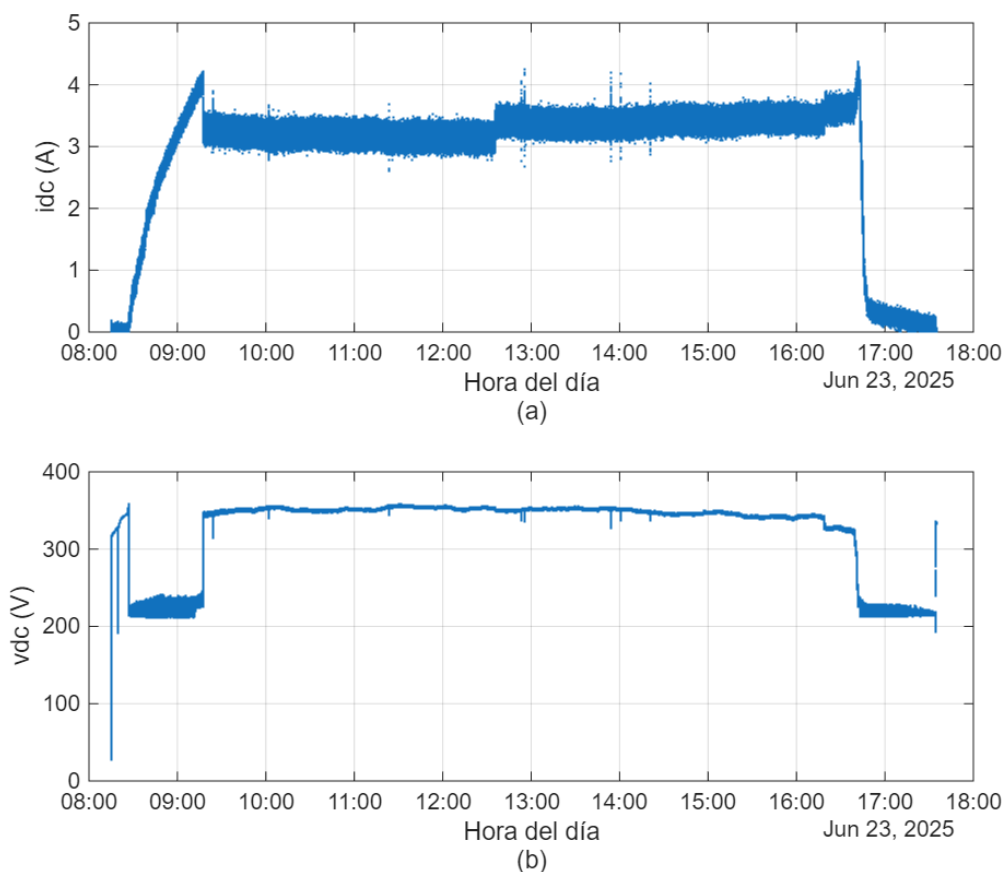


Fig. 5.38. (a) Corriente DC y (b) Voltaje DC.

En la Fig. 5.39 se muestra la corriente de fase A y el voltaje de fase AB del motor de inducción. La corriente (Fig. 5.39a) se estabiliza desde las 9:17 hasta las 12:15 horas, donde se obtuvo un promedio de 2,9 [A]. Luego, desde las 12:15 hasta las 14:26 horas, se registró un promedio de 3 [A].

El voltaje de fase AB (Fig. 5.39b), presenta un valor peak de 340 [V] durante el periodo de mayor estabilidad.

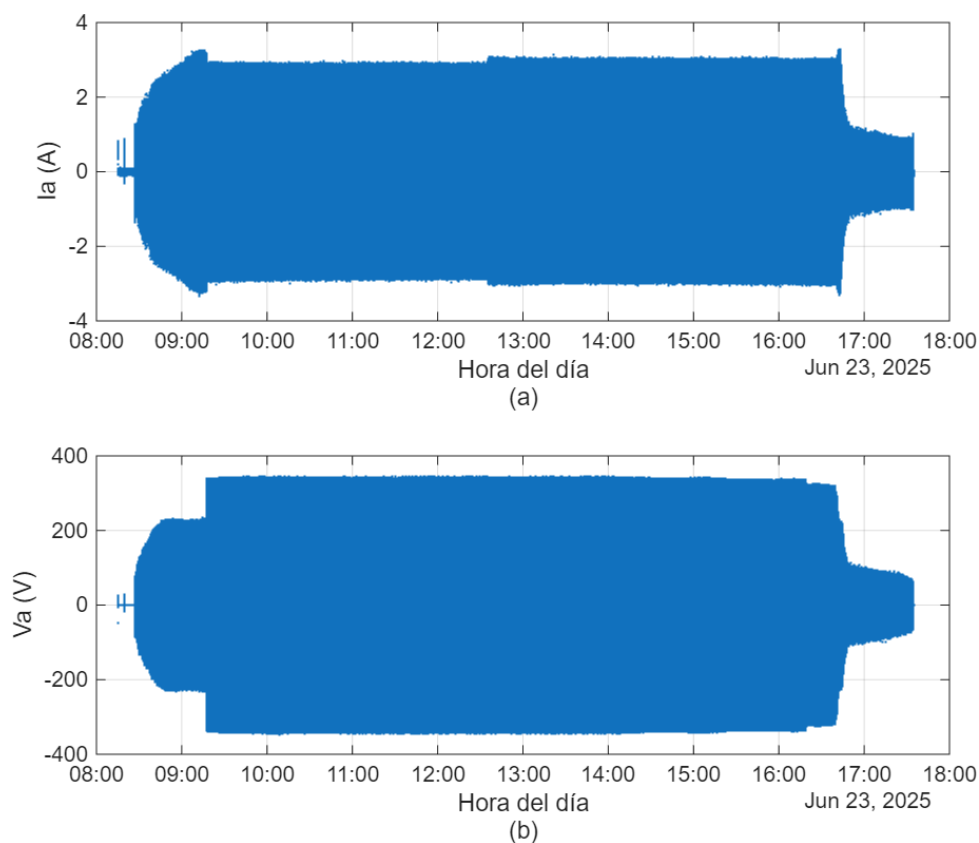


Fig. 5.39. (a) Corriente de fase y (b) Voltaje de fase.

En la Fig. 5.40 se muestran las variables de caudal [L/min] y presión [bar] presentes en el sistema de bombeo. El caudal (Fig. 5.40a) se estabiliza a las 9:17 horas y mantiene un promedio de 73,9 [L/min] hasta las 12:15 horas. Luego, al abrir la llave de paso, se obtuvo un promedio de 88,3[L/min] hasta las 14:35 horas.

La presión (Fig. 5.40b) se estabiliza desde 9:17 hasta las 12:15 horas, promediando un valor de 0,63 [bar]. Luego, desde las 12:15 hasta las 14:26 horas, se obtuvo un valor promedio de 0,013[bar].

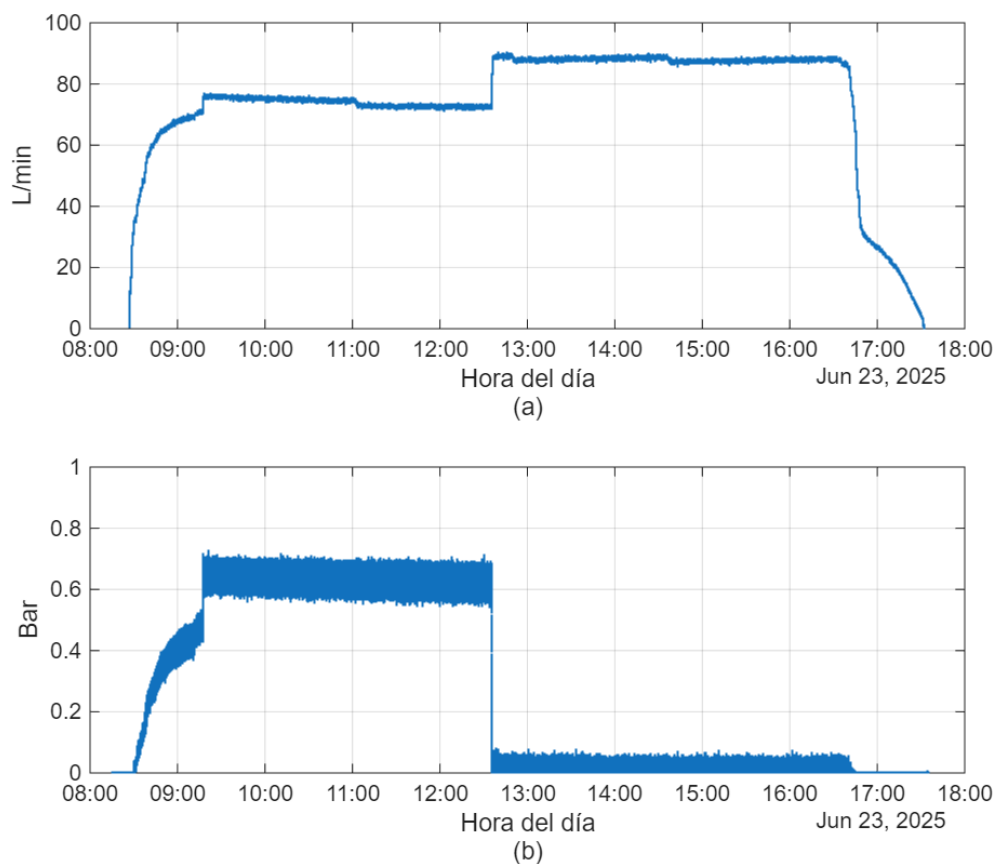


Fig. 5.40. (a) Caudal y (b) Presión.

La Fig. 5.41 muestra la velocidad y torque estimado de la bomba de agua. La velocidad (Fig. 5.41a) se estabiliza a las 9:17 horas y mantiene un valor promedio de 2879 [rpm] hasta las 12:15 horas. Luego al abrir la llave de paso, presenta un valor promedio de 2867 [rpm] hasta las 14:26 horas.

El torque (Fig. 5.41b) se mantiene estable desde las 9:37 hasta las 12:15 horas, con un valor promedio de 3,05 [Nm]. Luego, desde las 12:15 hasta las 14:26 horas, presenta un valor promedio de 3,2 [Nm].

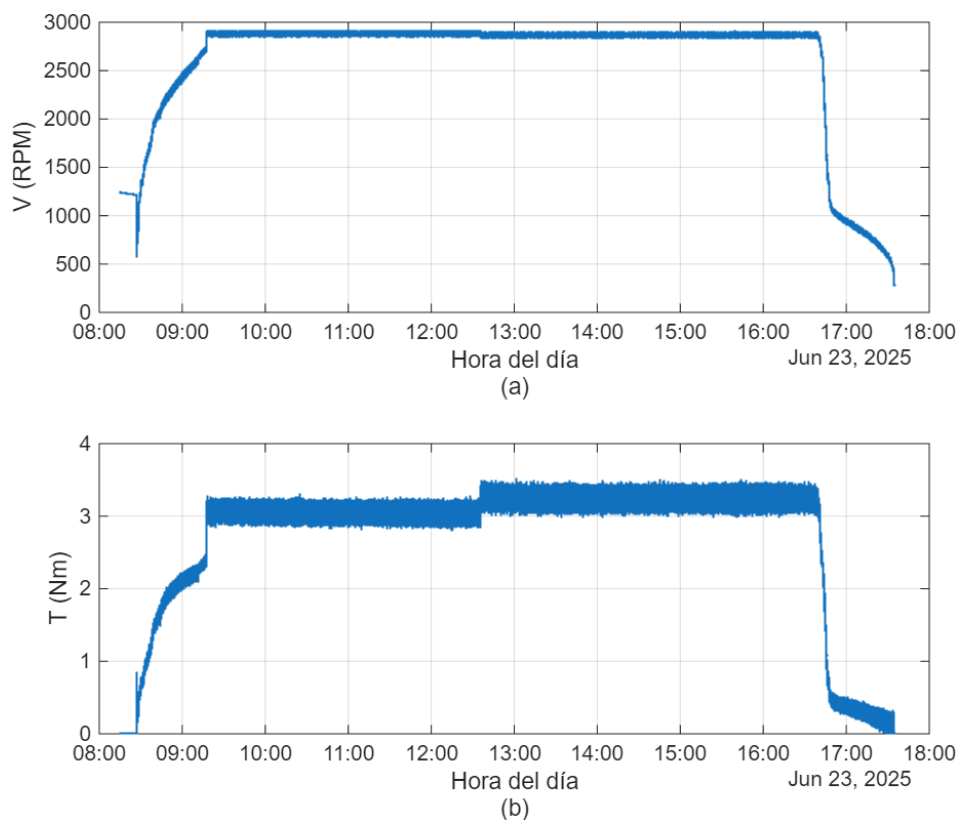


Fig. 5.41. (a) Velocidad y (b) Torque.

La Fig. 5.42 muestra la potencia DC y de entrada al motor. La potencia DC (Fig. 5.42a) se estabiliza a las 9:17 horas y alcanza un valor promedio de 1122 [W] hasta las 12:15 horas. Luego, al abrir la llave de paso, se obtuvo un valor promedio de 1187[W] hasta las 14:26 horas.

La potencia de entrada al motor (Fig. 5.42b) se estabiliza desde las 9:17 hasta las 12:15 horas, presentando un promedio de 1055 [W]. Después, al abrir la llave de paso, se registra un promedio de 1128 [W] hasta las 14:26 horas.

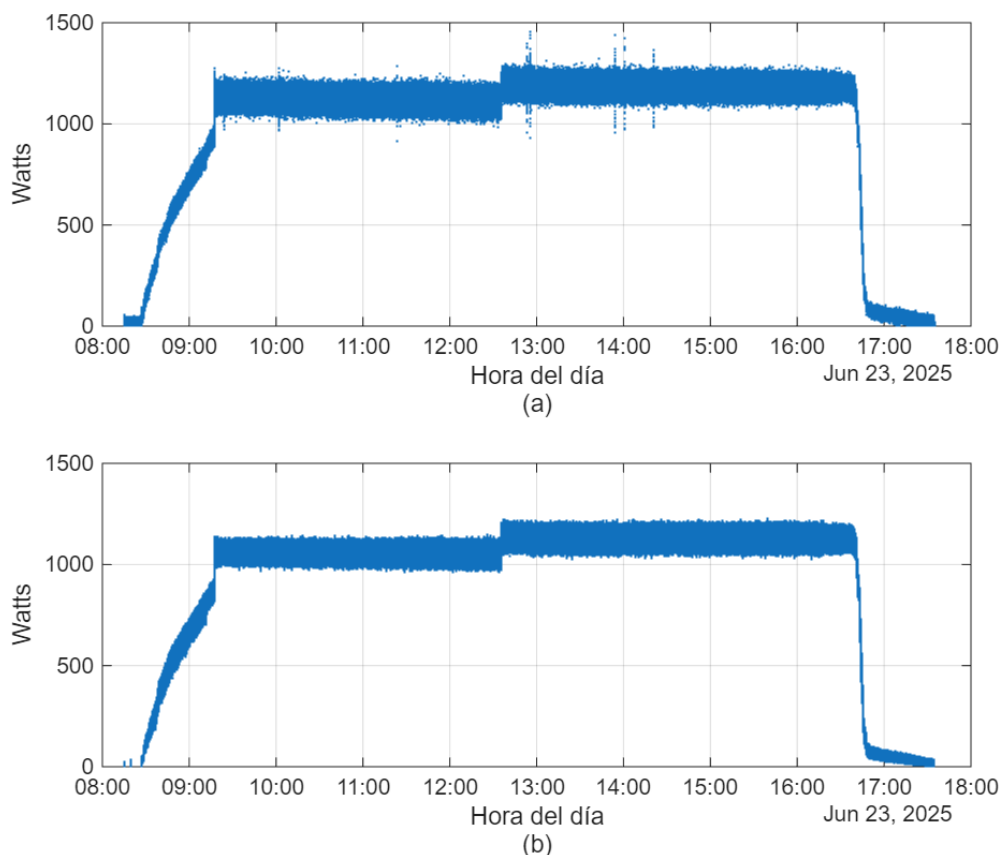


Fig. 5.42. (a) Potencia DC y (b) Potencia salida de inversor.

La Fig. 5.43 muestra la potencia convertida e hidráulica. La potencia convertida (Fig. 5.43a) se estabiliza a las 9:17 horas y presenta un promedio de 919 [W] hasta las 12:15 horas. Luego al abrir la llave de paso, promedia 974 [W] hasta las 14:26 horas.

La potencia hidráulica (Fig. 5.43b) se mantiene estable desde las 9:17 hasta las 12:15 horas, promediando 78 [W]. luego, al aumentar el caudal, se registró un promedio de 1,9 [W] hasta las 14:26 horas.

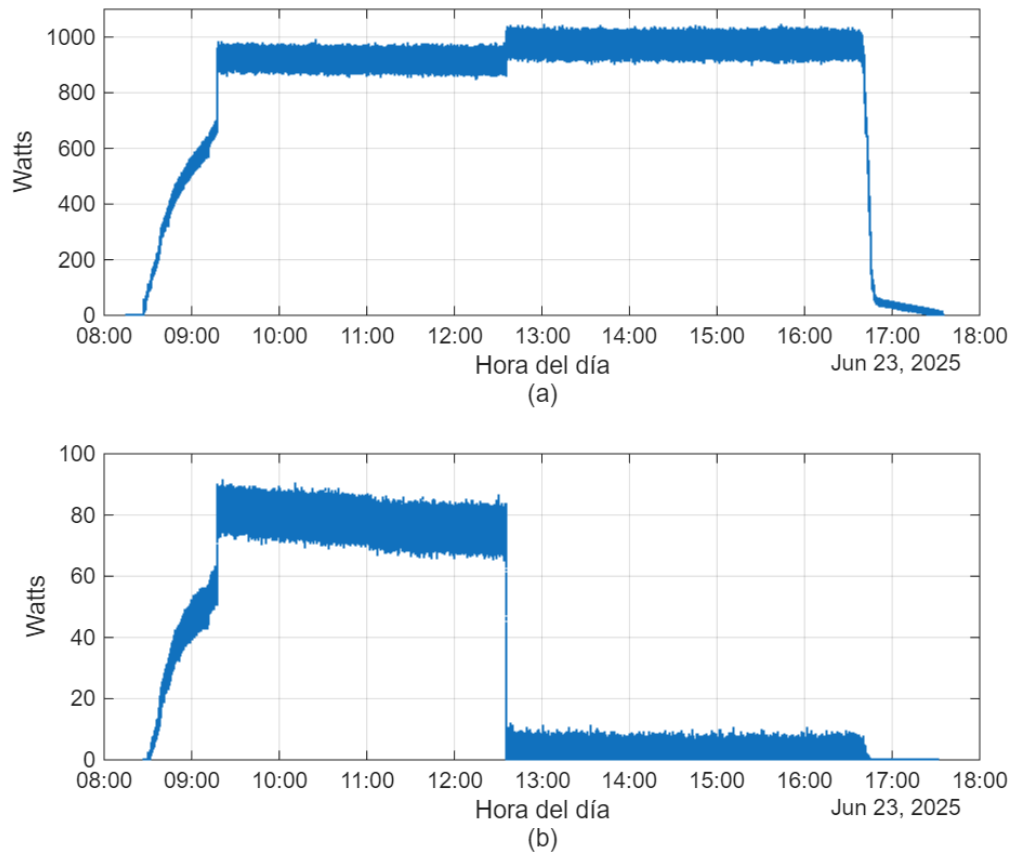


Fig. 5.43. (a) Potencia convertida y (b) Potencia hidráulica.

La Fig. 5.44 muestra la eficiencia: total de sistema, del inversor, del motor e hidráulica. Para la eficiencia total del sistema (Fig. 5.44a) en el rango de las 9:17 hasta las 12:15 horas, se presenta un promedio del 6,9%. Luego, al aumentar el caudal se obtuvo una eficiencia promedio del 0,16%.

La eficiencia del inversor (Fig. 5.44b), desde las 9:17 hasta las 12:15 horas presenta un promedio del 94%. Después, al abrir la llave de paso, se obtuvo un promedio del 95% hasta las 14:26 horas.

La eficiencia del motor (Fig. 5.44c) entre las 9:17 y las 12:15 horas, presento un promedio del 87,5%. Luego, al aumentar el caudal se obtuvo una eficiencia promedio del 86,8% hasta las 14:26 horas.

La eficiencia hidráulica (Fig. 5.44d) muestra un promedio del 8,4% desde las 9:17 hasta las 12:15 horas. Después, al aumentar el caudal se obtuvo un promedio del 0.19%.

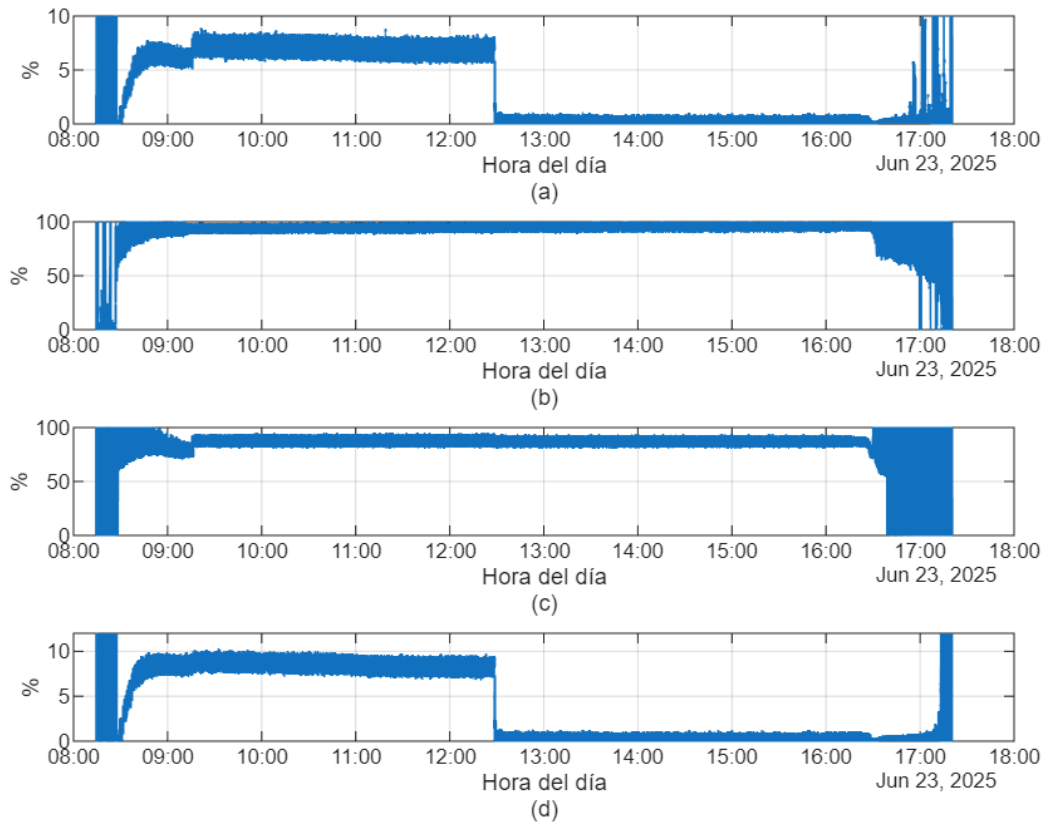


Fig. 5.44. Eficiencia: (a) Global, (b) Inversor, (c) Motor e (d) Hidráulica.

5.4.3 Pruebas SBFV con sistema de seguimiento solar con doble eje

La Fig. 5.45 muestra la irradiancia medida el 30 de septiembre. Para el análisis, se promedió la irradiancia únicamente en los tramos estables del SBFV (estabilidad eléctrica e hidráulica). Entre el rango de las 8:12 y 12:15 horas, se promedió $911,71 \text{ [W/m}^2\text{]}$ con el sensor en el seguidor de doble eje y en el tramo de las 12:15 y 14:44 horas, se registró $1027 \text{ [W/m}^2\text{]}$ respectivamente.

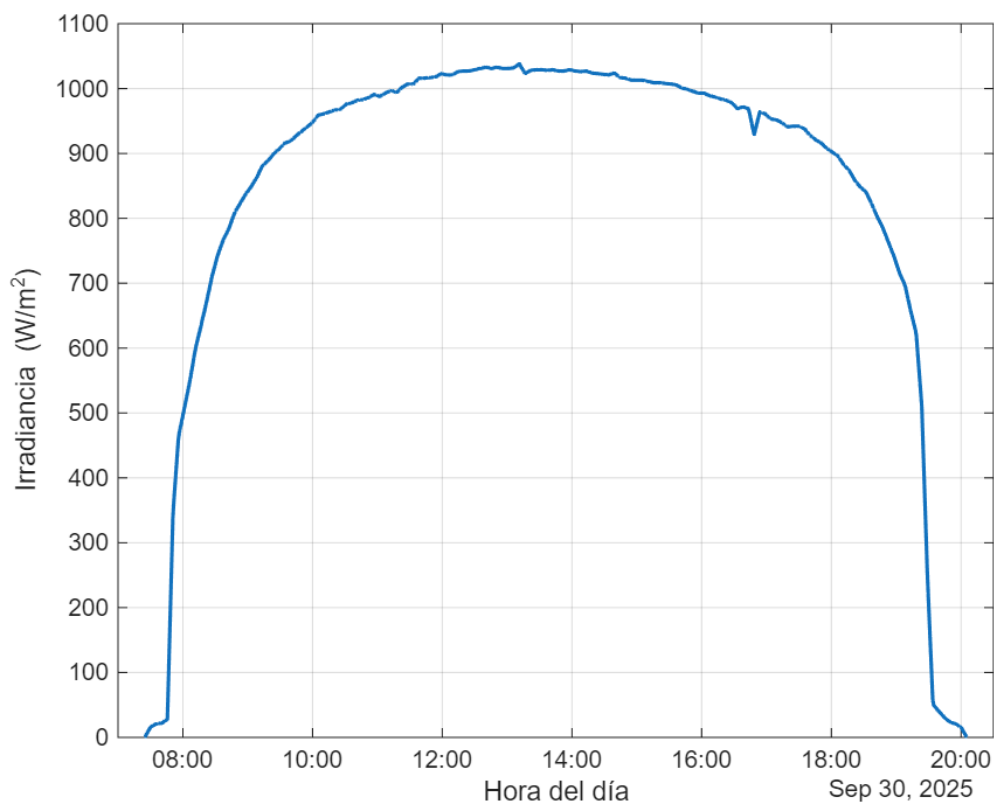


Fig. 5.45. Irradiancia 30 de septiembre.

En la Fig. 5.46 se muestra la corriente y voltaje DC. La corriente (Fig. 5.46a) se estabiliza a partir de las 8:12 horas y registra un promedio de 3,25 [A] hasta las 12:15 horas. Luego, entre las 12:15 y 14:44 horas se obtuvo un promedio de 3,45 [A].

El voltaje DC (Fig. 5.46b) presenta un promedio de 350 [V] durante la mayor parte del día y comienza a decaer, pasadas las 19:00 horas.

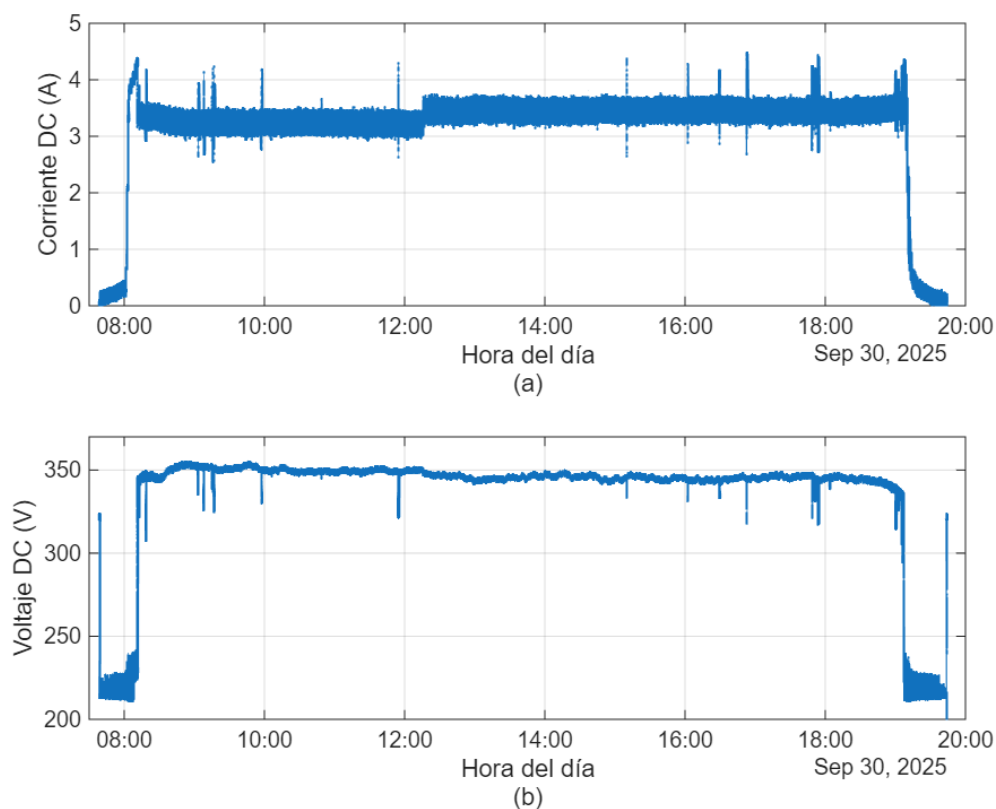


Fig. 5.46. (a) Corriente DC y (b) Voltaje DC.

En la Fig. 5.47 se muestra la corriente de fase A y el voltaje de fase AB del motor de inducción. La corriente (Fig. 5.47a) se estabiliza desde las 8:12 hasta las 12:15 horas, donde se obtuvo un promedio de 2,9 [A]. Luego, desde las 12:15 hasta las 14:44 horas, se registró un promedio de 3 [A].

El voltaje de fase AB (Fig. 5.47b) presenta un valor peak de 341 [V] durante el tramo de mayor estabilidad.

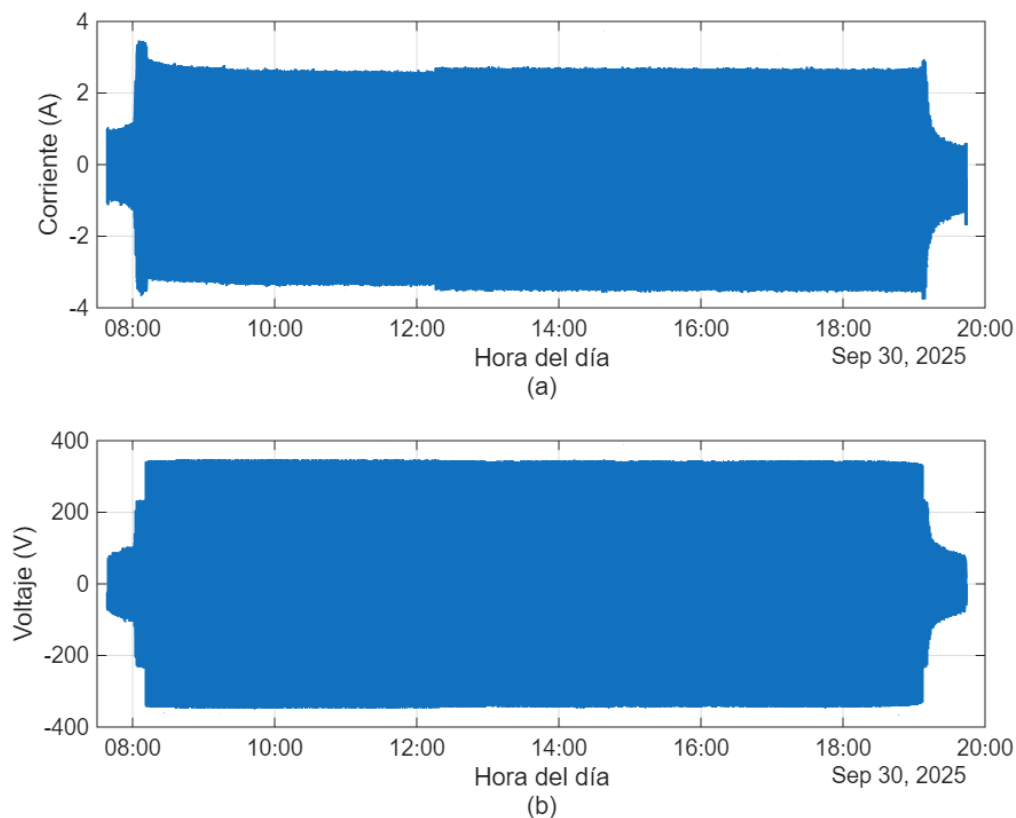


Fig. 5.47. (a) Corriente de fase y (b) Voltaje de fase.

En la Fig. 5.48 se muestra el caudal [L/min] y presión [bar] presentes en el sistema de bombeo. El caudal (Fig. 5.48a) se estabiliza a las 8:12 horas y mantiene un promedio de 69,5 [L/min] hasta las 12:15 horas. Luego, al abrir la llave de paso, se obtuvo un promedio de 85,6 [L/min] hasta las 14:44 horas.

La presión (Fig. 5.48b) se estabiliza desde 8:12 hasta las 12:15 horas, promediando un valor de 0,566 [bar]. Luego, desde las 12:15 hasta las 14:44 horas, se obtuvo un valor promedio de 0,0087[bar].

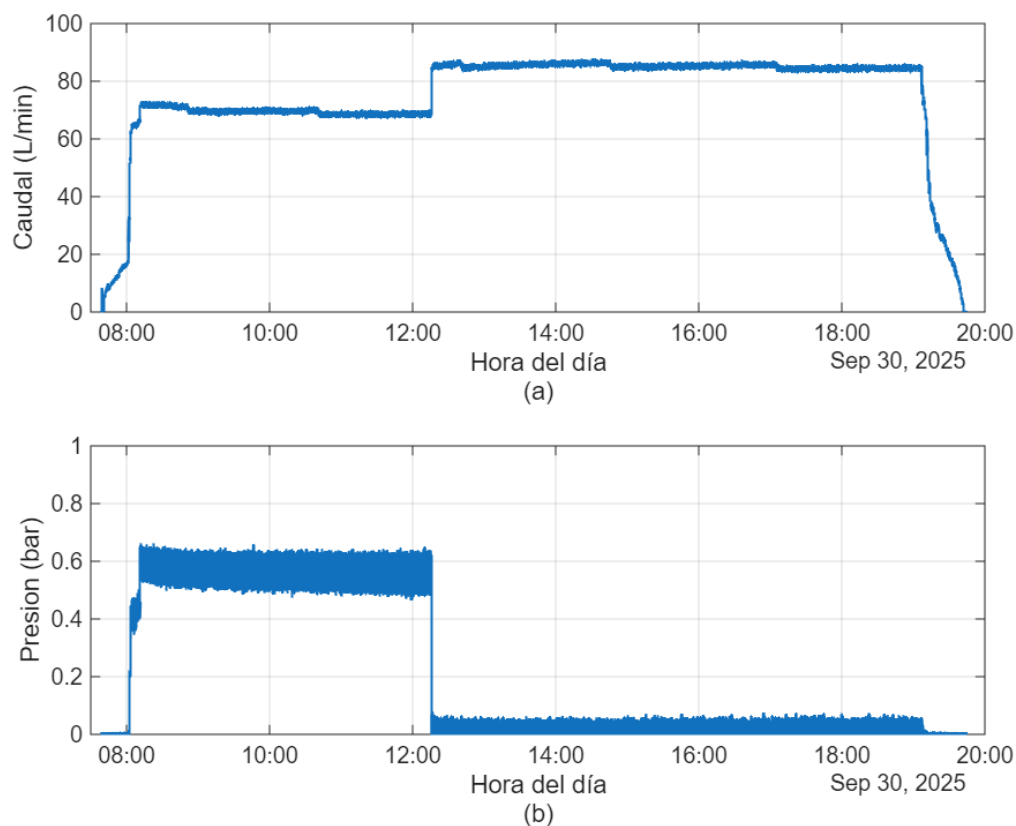


Fig. 5.48. (a) Caudal y (b) Presión.

La Fig. 5.49 muestra la velocidad y torque estimado de la bomba de agua. La velocidad (Fig. 5.49a) se estabiliza a las 8:12 horas y mantiene un valor promedio de 2873 [rpm] hasta las 12:15 horas. Luego al abrir la llave de paso, presenta un valor promedio de 2862 [rpm] hasta las 14:44 horas.

El torque (Fig. 5.49b) se mantiene estable desde las 8:12 hasta las 12:15 horas, con un valor promedio de 3,1 [Nm]. Luego, desde las 12:15 hasta las 14:44 horas, presenta un valor promedio de 3,3 [Nm].

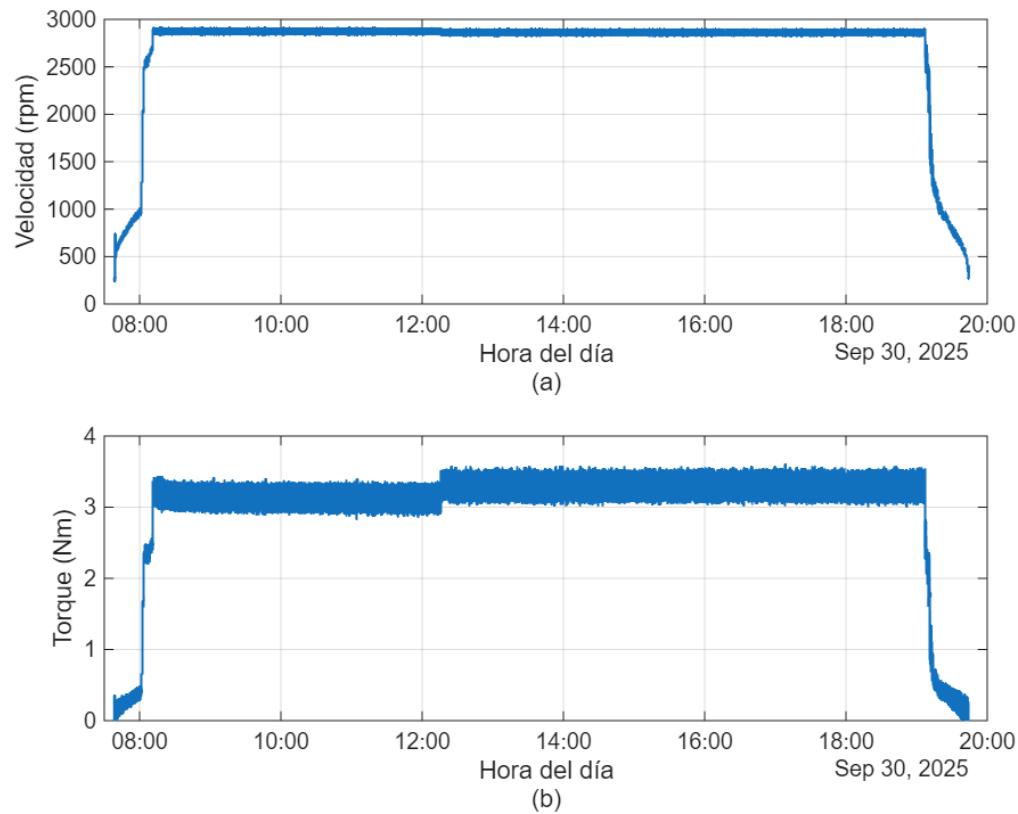


Fig. 5.49. (a) Velocidad y (b) Torque.

La Fig. 5.50 muestra la potencia DC y de salida del inversor. La potencia DC (Fig. 5.50a) se estabiliza a las 8:12 horas y alcanza un valor promedio de 1139 [W] hasta las 12:15 horas. Luego, al abrir la llave de paso, se obtuvo un valor promedio de 1196 [W] hasta las 14:44 horas.

La potencia de salida (Fig. 5.50b) se estabiliza desde las 8:12, hasta las 12:15 horas, presentando un promedio de 1088 [W]. Después, al abrir la llave de paso, se registra un promedio de 1148 [W] hasta las 14:44 horas.

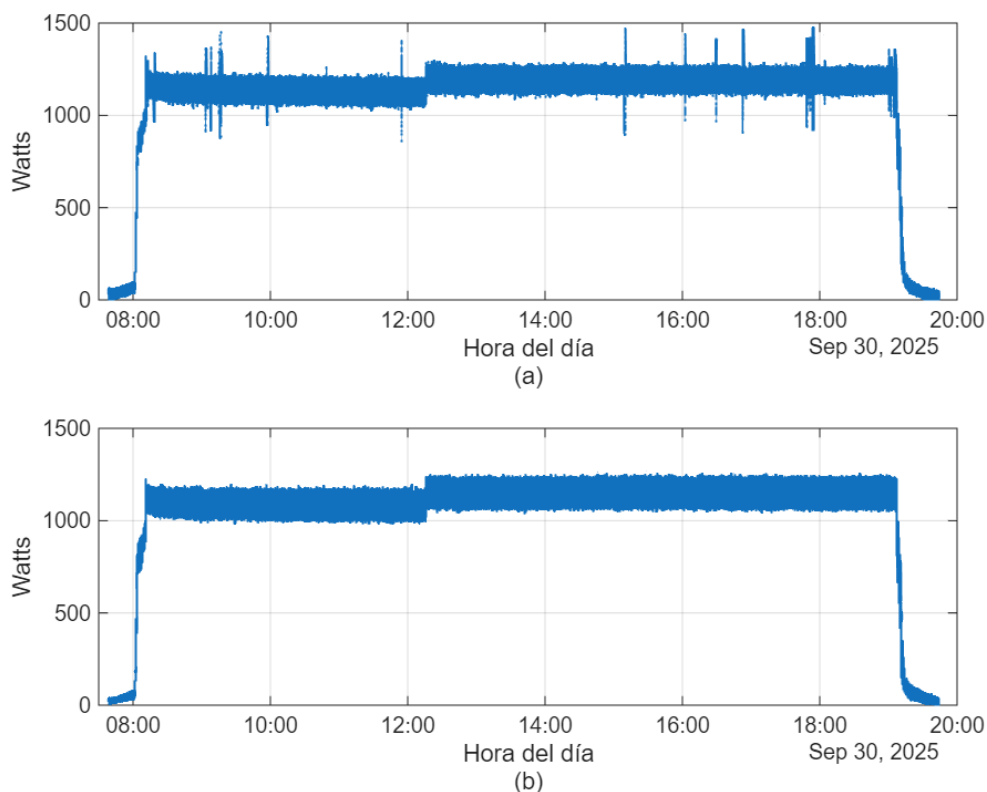


Fig. 5.50. (a) Potencia DC y (b) Potencia de salida inductor.

La Fig. 5.51 muestra la potencia convertida e hidráulica. La potencia convertida (Fig. 5.51a) se estabiliza a las 8:12 horas y presenta un promedio de 943 [W] hasta las 12:15 horas. Luego, al abrir la llave de paso, promedia 987 [W] hasta las 14:44 horas.

La potencia hidráulica (Fig. 5.51b) se mantiene estable desde las 8:12 hasta las 12:15 horas, promediando 65,6 [W]. Luego, al aumentar el caudal, se registró un promedio de 1,2 [W] hasta las 14:44 horas.

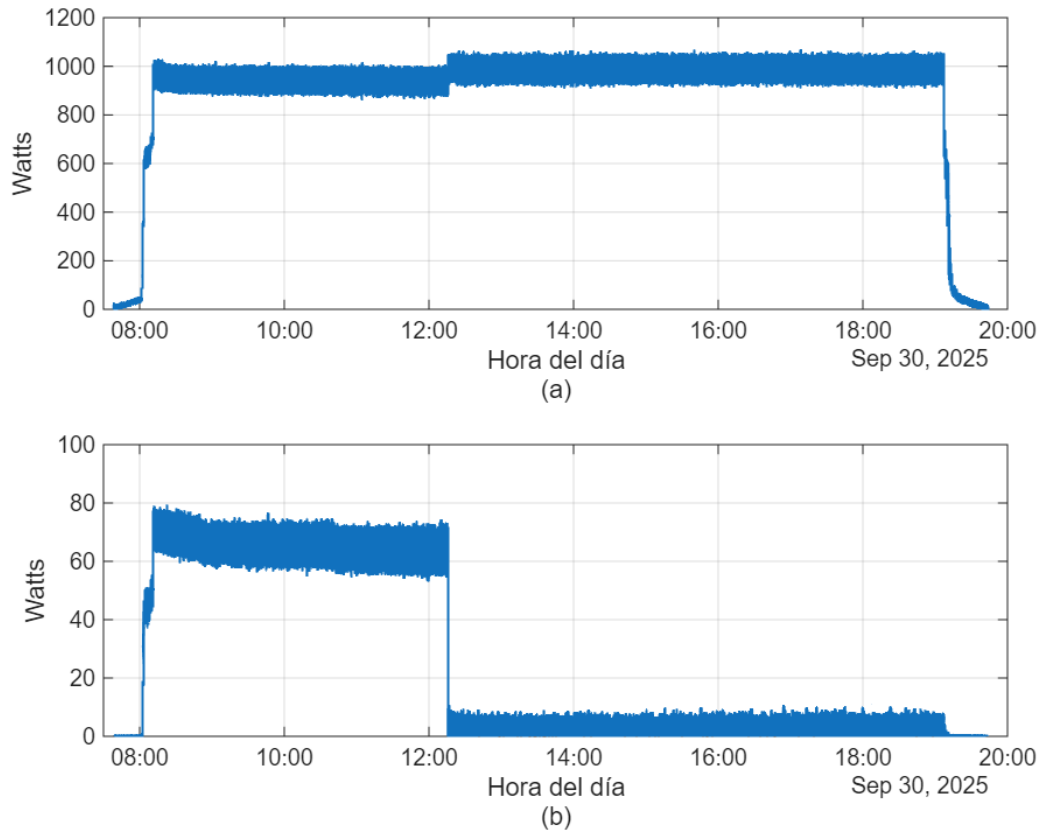


Fig. 5.51. (a) Potencia convertida y (b) Potencia hidráulica.

La Fig. 5.52 muestra la eficiencia: total de sistema, del inversor, del motor e hidráulica. Para la eficiencia total del sistema (Fig. 5.52a) en el rango de las 8:12 hasta las 12:15 horas, se presenta un promedio del 5.76%. Luego, al aumentar el caudal se obtuvo una eficiencia promedio del 0,1%.

La eficiencia del inversor (Fig. 5.52b), desde las 8:12 hasta las 12:15 horas, presenta un promedio del 95,5%. Después, al abrir la llave de paso, se obtuvo un promedio del 96% hasta las 14:44 horas.

La eficiencia del motor (Fig. 5.52c) entre las 8:12 y las 12:15 horas, presento un promedio del 87,3%. Luego, al aumentar el caudal se obtuvo una eficiencia promedio del 86,6% hasta las 14:44 horas.

La eficiencia hidráulica (Fig. 5.52d) muestra un promedio del 6,9% desde las 8:12 hasta las 12:15 horas. Después, al aumentar el caudal se obtuvo un promedio del 0.1%.

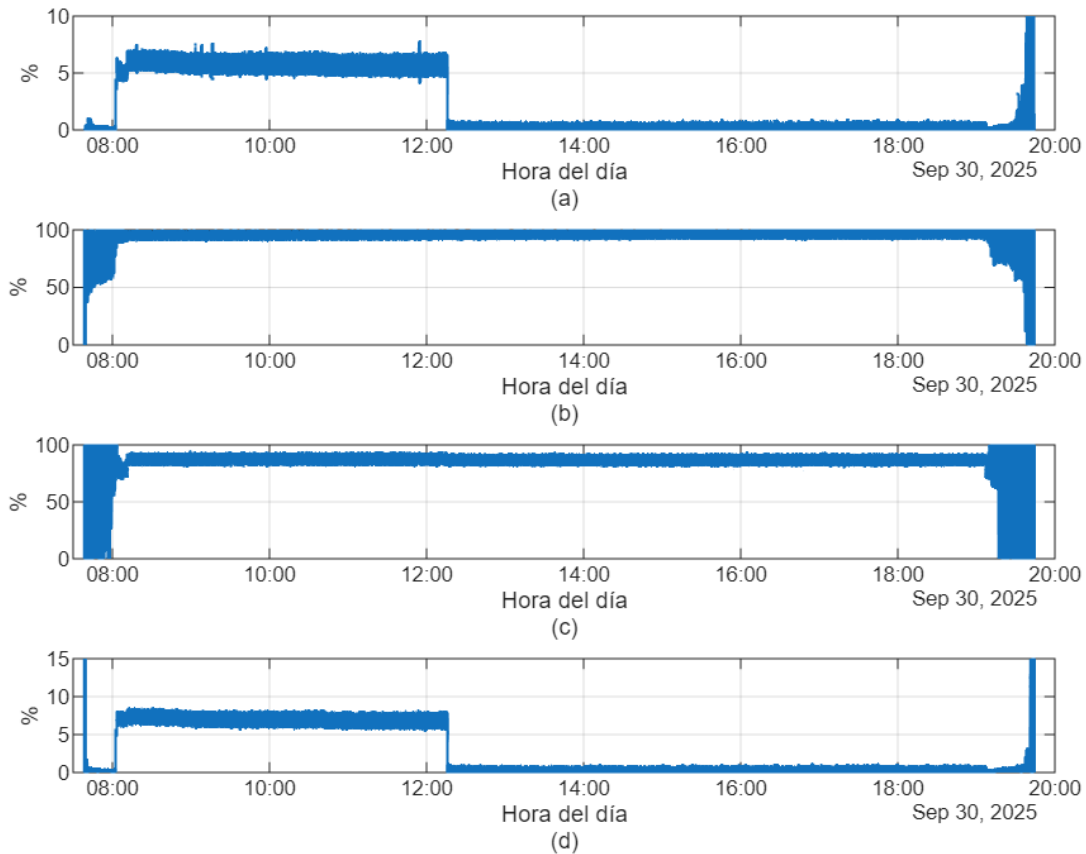


Fig. 5.52. Eficiencia: (a) Global, (b) Inversor, (c) Motor e (d) Hidráulica.

La Tabla 5.3 presenta los datos obtenidos en tramos de operación estable y de mayor irradiancia, para los distintos sistemas de seguimiento solar con el motor en conexión delta. En la tabla, los valores de la izquierda de la división (/) representan al segmento de la mañana y el otro lado, el segmento de la tarde. Antes de abrir la llave de paso, el sistema de un eje y un eje inclinado, presentan el mismo caudal y el seguidor de doble eje muestra un caudal menor. Después, con la apertura de llave de paso, el eje inclinado registro un caudal superior de 3,15% al de doble eje y un 1,15% superior al de un eje. También, con un eje inclinado, en la mañana, se presenta una mayor eficiencia global en el sistema, superando en un 15% y 19,79% a los seguidores en un eje y doble, respectivamente. Para todos los seguidores solares, en la tarde, se presenta una nula eficiencia global, lo que indica una mala conversión del energía en el sistema, debido a la casi inexistente presión. Los tres sistemas de seguimiento solar, presentan rendimientos eléctricos e hidráulicos similares con diferencias menores entre ellos. Esto ocurre, debido al sobredimensionamiento del arreglo fotovoltaico en relación con los requerimientos eléctricos de la bomba de agua conectada en delta.

Tabla 5.3. Promedio de parámetros obtenidos por los sistemas de seguimiento solar en conexión delta.

Parámetros	Un eje (05/10)	Un eje inclinado (23/06)	Dos ejes (30/09)
Irradiancia (seguidor) [W/m ²]	986,67/1048	857,65/928,85	911,71/1027
Irradiancia (fijo) [W/m ²]	696,17/1044	533,62/712,15	549,69/1003
Corriente DC [A]	3,47/3,57	3,19/3,39	3,25/3,45
Voltaje DC [V]	341	351,5	350
Corriente de fase [A]	3,1/3,2	2,9/3	3/3,1
Voltaje de fase [A]	349	340	344
Caudal [l/min]	73,9/87,3	73,9/88,3	69,5/85,6
Presión [Bar]	0,56/0,01	0,63/0,013	0,56/0,0087
Velocidad [rpm]	2869/2860	2879/2867	2873/2862
Torque [Nm]	3,1/3,3	3,05/3,2	3,13/3,39
Potencia DC [W]	1149/1218	1122/1187	1139/1196
Potencia entrada al motor [W]	1097/1162	1055/1128	1088/1148
Potencia convertida [W]	949/998	919/974	943/987
Potencia hidráulica [W]	69,4/1,5	78/1,9	65,6/1,2
Eficiencia global [%]	6/0,12	6,9/0,16	5,76/0,1
Eficiencia inversor [%]	95,4/95,4	94/95	95,5/96
Eficiencia motor [%]	86,4/87,1	87,5/86,8	87,3/86,6
Eficiencia hidráulica [%]	7,3/0,15	8,4/0,19	6,9/0,1

La tabla 5.4 muestra las horas de operación de los sistemas de seguimiento solar. El seguidor de doble eje, obtiene un pequeño aumento en su tiempo de operación en comparación al seguidor de un eje. Sin embargo, esto no aporta un cambio significativo en las pruebas realizadas con la bomba de agua.

Tabla 5.4. Horas de operación de sistemas de seguimiento solar en delta.

Sistema de seguimiento solar	Horas de operación (mañana)	Horas de operación (tarde)	Horas de operación total	Fecha
Un eje delta	4,5	7,53	12,03	05/10
Un eje inclinado delta	4	5,08	9,08	23/06
Dos ejes delta	4,6	7,48	12,08	30/09

5.5. Análisis de resultados

En esta sección, se realizará un análisis del rendimiento de los diferentes sistemas de seguimiento solar. El análisis de los resultados obtenidos se dividirá en dos partes, el primero será el segmento de la mañana, en el que la llave de paso se encuentra configurada con unos giros de cerrado. El segundo, es el segmento de la tarde, donde la llave de paso se presenta totalmente abierta.

5.5.1 Análisis volumen de agua acumulado

La Fig. 5.53 muestra el volumen acumulado por los distintos sistemas de seguimiento solar y configuración del motor (estrella o delta). En la mañana, el seguimiento de dos ejes registro el mayor volumen de agua tanto en delta como en estrella. En el segmento de la tarde, el mayor volumen acumulado, correspondió al de dos eje en delta, mientras que en estrella destaco el seguimiento en un eje inclinado. Cabe recalcar, que, debido al cambio de hora, la prueba realizada el 29/09 dispuso de una hora adicional de operación en la tarde respecto de las demás pruebas en conexión estrella. El sistema de doble eje permite mover un mayor caudal tanto en la mañana como en la tarde (salvo la excepción del 29/09), ya que permite captar la irradiancia más temprano y más tarde, extendiendo el tiempo de operación estable de los parámetros, como se aprecia en las figuras del Capítulo 5.

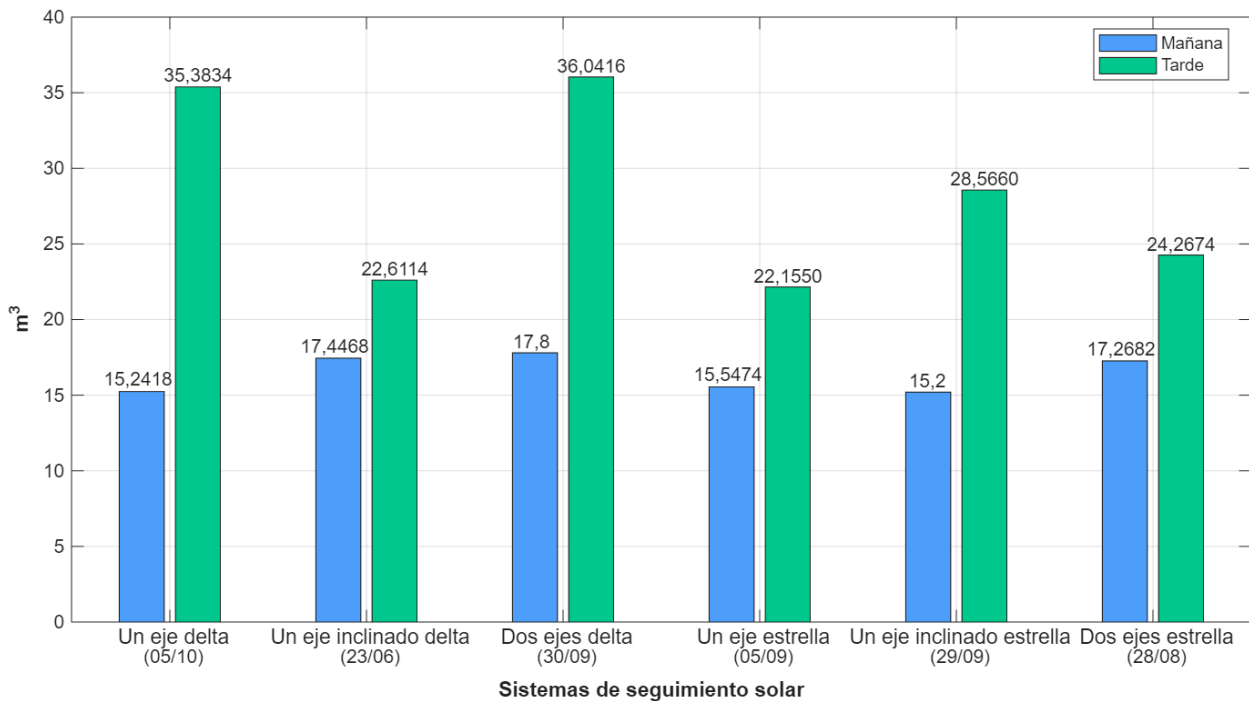


Fig. 5.53. Volumen de agua acumulado.

5.5.2 Análisis volumen de agua acumulado normalizado

La Fig. 5.54 muestra el volumen de agua acumulado normalizado por las horas de operación de los sistemas de seguimiento solar. Esto permite determinar un promedio de volumen acumulado de agua por cada hora de operación. En conexión estrella, los tres sistemas presentan un rendimiento similar, aumentando más su valor el seguidor de doble eje. En el segmento de la mañana, presenta valores un 14,04% y 19,16% mayores a los registrados por los seguidores de un eje inclinado y un eje, respectivamente. Para el segmento de la tarde, obtiene valores un 7,64% y 14,16% superiores respecto a los mismos seguidores.

En conexión delta, el seguidor de un eje inclinado en el segmento de la mañana presenta un valor 12,98% mayor que el doble eje y un 28,75% superior al de un eje (existe una mayor diferencia debido a periodos de nubosidad para este seguidor). En el segmento de la tarde, el seguidor de doble eje, obtiene valores un 8,28% y 2,53% mayores que los seguidores de un eje inclinado y un eje, respectivamente.

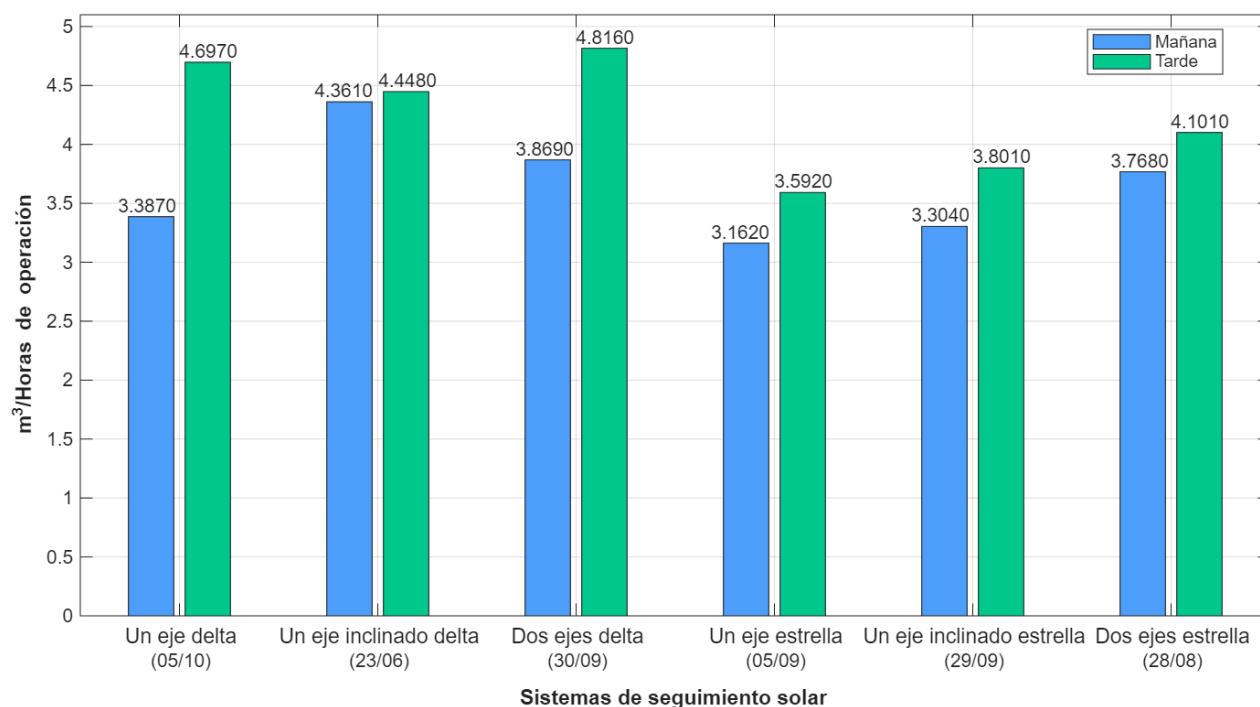


Fig. 5.54. Volumen de agua acumulado normalizado por horas de operación.

5.5.3 Análisis energía DC normalizada

La Fig. 5.55 muestra la energía DC generada por los paneles solares normalizada por las horas de operación de los sistemas de seguimiento solar. Esto permite determinar un promedio de energía

DC por hora de operación y así evaluar de manera justa los sistemas. En estrella, el seguidor de doble eje presenta una mayor producción de energía por hora de operación en comparación con los demás seguidores. En el segmento de la mañana presenta valores un 14,28% y 26,15% superiores a los obtenidos por los seguidores de un eje inclinado y un eje, respectivamente. En el segmento de la tarde, es un 9,98% y 32,33% mayor en comparación a los demás seguidores. En este segmento, el seguidor de un eje, se vio afectado por la nubosidad, aumento su diferencia con el de doble eje.

En conexión delta, nuevamente el seguidor de doble eje presenta valores ligeramente superiores con respecto a los demás sistemas de seguimiento. En el segmento de la mañana presenta un valor 0,406% mayor que el de un eje inclinado y un 52,64% superior al de un eje. El seguidor de un eje en este segmento presento periodos de nubosidad, lo que se ve reflejado en su mayor diferencia de producción respecto al seguidor de dos ejes. En el segmento de la tarde, el seguidor de dos ejes registra valores un 15,08% y 5,8% mayores que los de un eje inclinado y un eje, respectivamente.

Aunque el sistema de seguimiento de doble eje alcanza una producción mayor en ambas conexiones, la diferencia respecto a los otros seguidores se mantiene acotada. Asimismo, los seguidores presentan rendimiento similares, y solo se observó una mayor diferencia cuando un seguidor se vio afectado por la nubosidad.

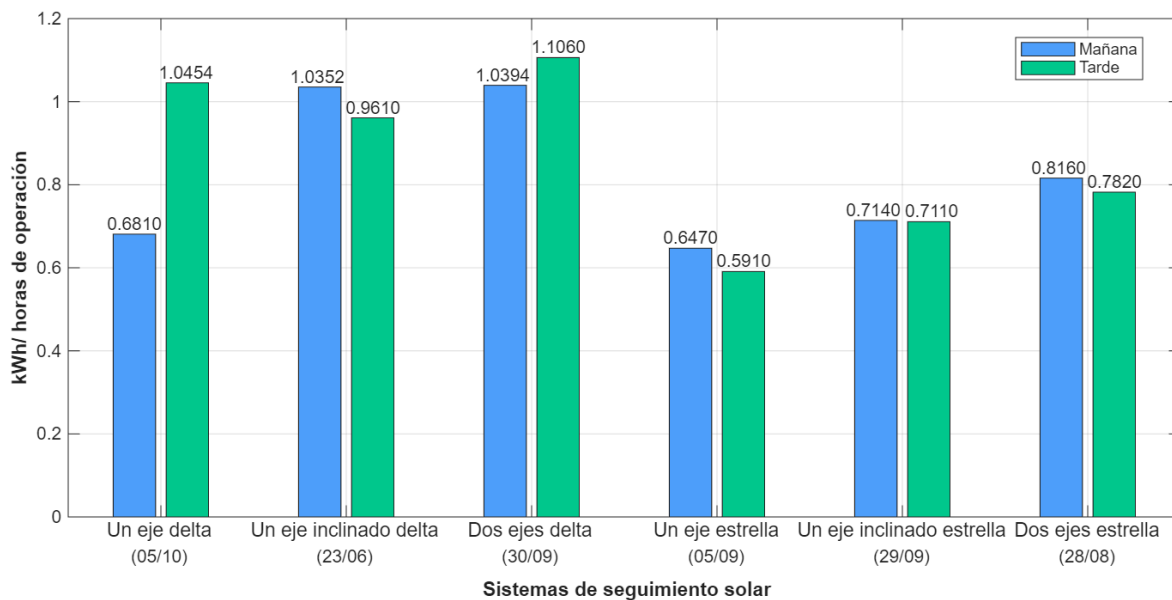


Fig. 5.55. Energía DC normalizado por horas de operación.

5.5.4 Análisis volumen de agua acumulada por energía DC

La Fig. 5.56 muestra la relación m^3/kWh normalizada por las horas de operación, es decir, el volumen promedio de agua por un kWh en cada hora. En conexión estrella en el segmento de la mañana, los seguidores presentan un rendimiento bastante parecido, siendo el de doble eje un 0,10% y 1,21% mayor que los de un eje inclinado y un eje, respectivamente. En el segmento de la tarde, el seguidor de un eje presenta un valor más alto que los demás, pero esto se produce debido a la nubosidad presente en ese periodo, afectando la evaluación de este parámetro.

En conexión delta, en el segmento de la mañana, el seguidor de un eje presenta un valor más alto a comparación de los otros seguidores. Esto se genera nuevamente gracias a presencia de nubosidad, indicando que las disminuciones de la energía DC no es proporcional a la caída del volumen de agua, aumentando el valor del parámetro. En el segmento de la tarde, el seguidor de un eje inclinado presenta valores un 52,59% y 56,53% superiores que los seguidores de un eje y doble eje, respectivamente.

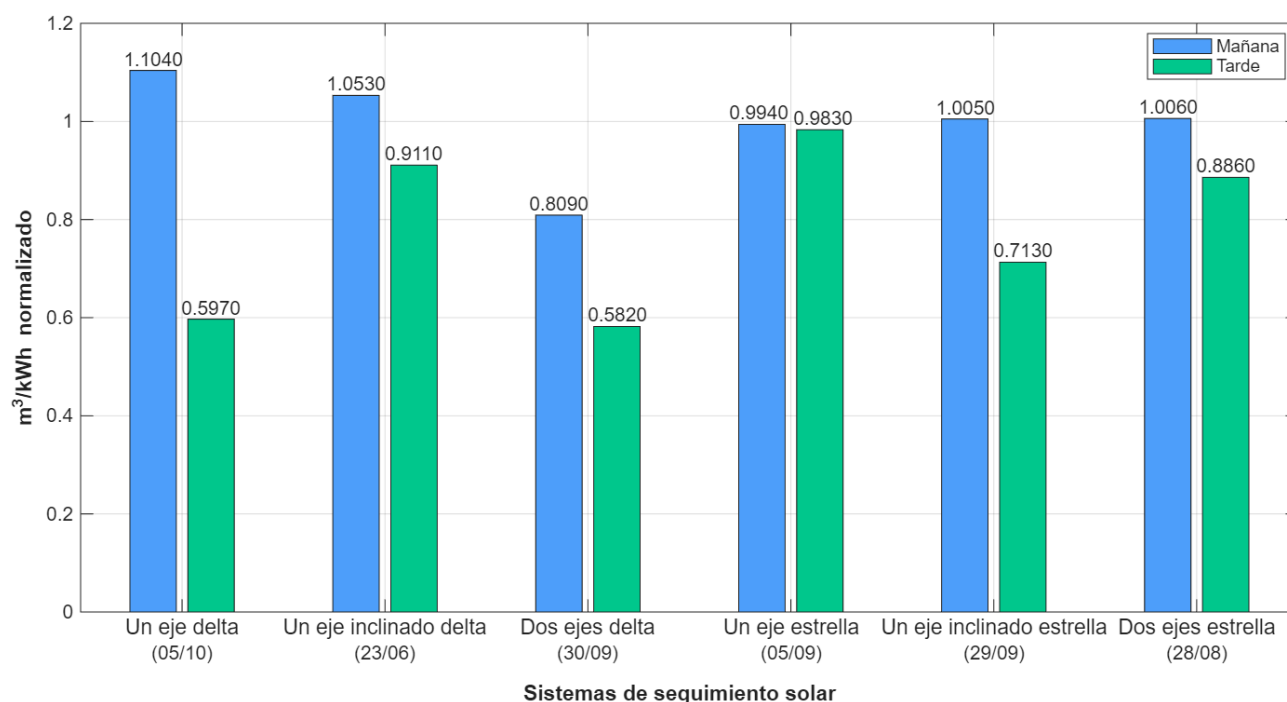


Fig. 5.56. m^3/kWh normalizado por horas de operación.

También, las tablas 5.1 y 5.3 muestran que, durante tramos de estabilidad y mayor irradiancia, en conexión delta, se alcanzan valores nominales de la bomba de agua que, en conexión estrella no se

obtienen. En conexión delta, el seguidor de un eje inclinado fue el que tuvo un mejor desempeño y en estrella, fue el de doble eje. El eje inclinado supero al de doble eje en:

- Caudal un 18,1% y 19, 6% mayor en los segmentos de mañana y tarde, respectivamente.
- Velocidad un 7,7% y 8,4% mayor en los segmentos de mañana y tarde, respectivamente.
- Torque un 48,1% y 52,4% mayor en los segmentos de mañana y tarde, respectivamente.
- Eficiencia global un 61,2% y 290,2% mayor en los segmentos de mañana y tarde, respectivamente. Cabe destacar que, los valores de eficiencia global en la tarde, son prácticamente nulos para todos los seguidores, por lo tanto, ese gran aumento, no es importante.

Por lo tanto, la conexión delta presenta un mejor rendimiento, bajo el arreglo de paneles solares presentes en este sistema.

Capítulo 6. Detección de cavitación mediante análisis de corriente de estator

6.1. Introducción

Algunos resultados del capítulo 5, indican que el sistema de bombeo está operando con un bajo rendimiento, lo que se ve reflejado en valores reducidos de presión, potencia hidráulica y eficiencia. Esto ocurre, debido a que la bomba opera fuera de su curva de operación, lo que provocaría cavitación, disminuyendo aún más el rendimiento en el sistema.

La cavitación es un fenómeno negativo que puede ocurrir en las bombas de agua, debido a que produce daños internos y pérdida de eficiencia en el equipo. Por lo tanto, es importante monitorear continuamente el funcionamiento de una bomba de agua. Una alternativa para ello es realizar un análisis de la corriente de estator o Motor Current Signature Analysis (MCSA). Este procedimiento, consiste en estudiar el comportamiento del espectro de frecuencia de la corriente. Esto, representa un método sencillo y económico en comparación a otras opciones para el diagnóstico de estos equipos. En el dominio de la frecuencia, la cavitación suele mostrarse como un ruido en rangos de Khz bajos, aparición de bandas laterales alrededor de la fundamental y otros armónicos [20].

Para evaluar este fenómeno, se realizaron pruebas con el sistema de bombeo conectado a la red eléctrica. Estas, consistían en operar el sistema bajo diferentes condiciones impuestas por una llave de paso, ubicada en las tuberías. La llave de paso comienza con 5 vueltas de cerrado y se va abriendo progresivamente hasta quedar totalmente abierta (al abrir la llave de paso, la presión en las tuberías va disminuyendo). Con la llave de paso totalmente abierta, la presión en las tuberías es prácticamente cero, momento en el que el sistema presenta un bajo rendimiento, lo que podría indicar cavitación. Se evaluó este fenómeno con el motor de inducción conectado en estrella y delta.

6.2. Motor Current Signature Analysis

Es un método de diagnóstico no intrusivo utilizado para detectar fallas en motores eléctricos, principalmente en motores de inducción. Este, analiza la forma de onda de la corriente de fase del estator, mediante una Transformada de Fourier (FFT), para identificar características espectrales como la aparición o desplazamientos de armónicos en el espectro de frecuencia, lo que indicaría fallas o condiciones anormales [21]. En una operación real de la bomba de agua, el espectro mostrará la

frecuencia fundamental, frecuencia rotacional del eje y frecuencia de paso de las palas, por lo tanto, ante un cambio en la carga, algunas de estas frecuencias se verán afectadas [20].

La implementación de este método en diversas investigaciones, ha conducido a diferentes características en el espectro ante signos de cavitación. Un estudio abordó los síntomas de cavitación mediante el análisis entre los armónicos de orden 12 y 25. La evaluación se realiza sobre armónicos de orden mayor a 11, debido a que el espectro, es sensible a la presencia de armónicos suministrados por la fuente, como ocurre con la utilización de variadores de frecuencia [22]. Otra investigación, menciona el desplazamiento de bandas laterales alrededor de la frecuencia fundamental como señal de evolución de la cavitación [20]. En [23] se menciona la aparición de armónicos debido a la modulación de la corriente, que podrían aparecer en la posición descrita a través la ecuación 6.1.

$$f_s = |f_1 \pm Nf_r| \quad (6.1)$$

Donde:

f_s : Frecuencia armónicos por modulación.

f_1 : Frecuencia fundamental.

f_r : Frecuencia rotacional del eje.

N : Número entero.

La frecuencia rotacional del eje queda determinada por la ecuación 6.2 [19].

$$f_r = \frac{P \cdot n_m}{120} \quad (6.2)$$

Siendo: P equivalente a número de polos y n_m es velocidad mecánica.

6.3. Pruebas experimentales con apertura progresiva de llave de paso motor conexión estrella

La Fig. 6.1 muestra una parte del espectro de corriente en baja frecuencia con 5 vueltas de cerrado de la llave de paso, donde es posible identificar diferentes frecuencias y armónicos relacionados con el funcionamiento de la bomba. Se observa la frecuencia fundamental (f_1) de la corriente, frecuencia rotacional del eje (f_r), relacionada con la velocidad mecánica del eje y armónicos.

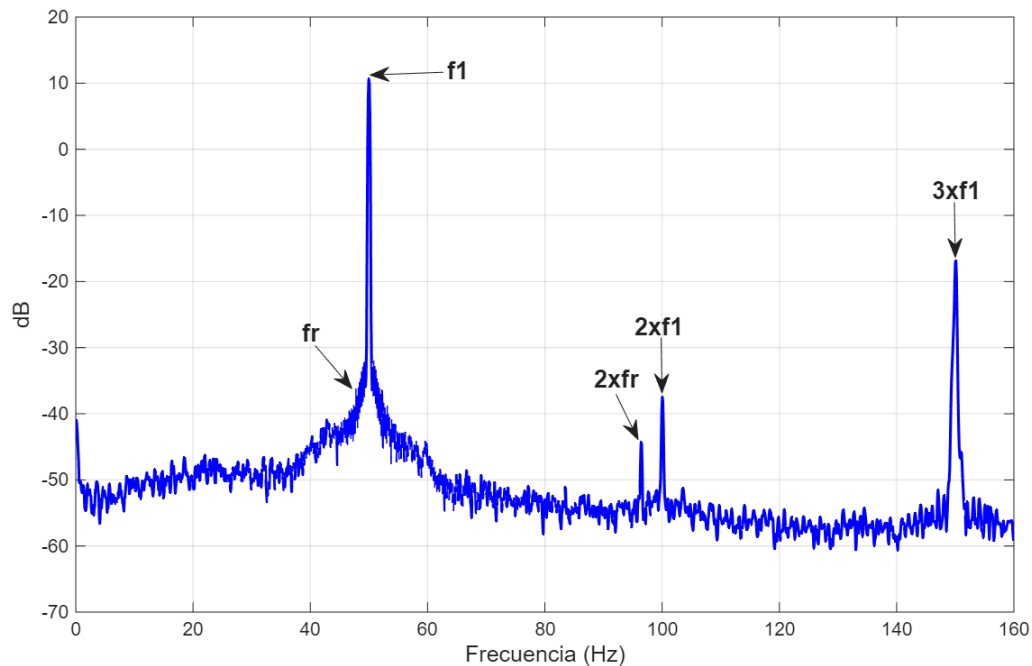


Fig. 6.1. Espectro de frecuencia de corriente en baja frecuencia.

La Fig. 6.2 muestra el espectro de frecuencia de la corriente con una configuración de 5 vueltas de cerrado de la llave de paso. Se observan únicamente armónicos múltiples de la frecuencia fundamental y múltiplos de la frecuencia rotacional del eje, por lo tanto, no presenta anomalías. La frecuencia rotacional del eje nominal es 46,67 [Hz]. En este estado, se obtuvo un caudal de 35,02 [L/min] y una presión de 14,68 [mca] indicando un funcionamiento cercano a su curva de operación de la bomba. Además, alcanzo una potencia del motor de 917,015 [W], potencia hidráulica 84,23 [W] y una eficiencia global del 9,18%.

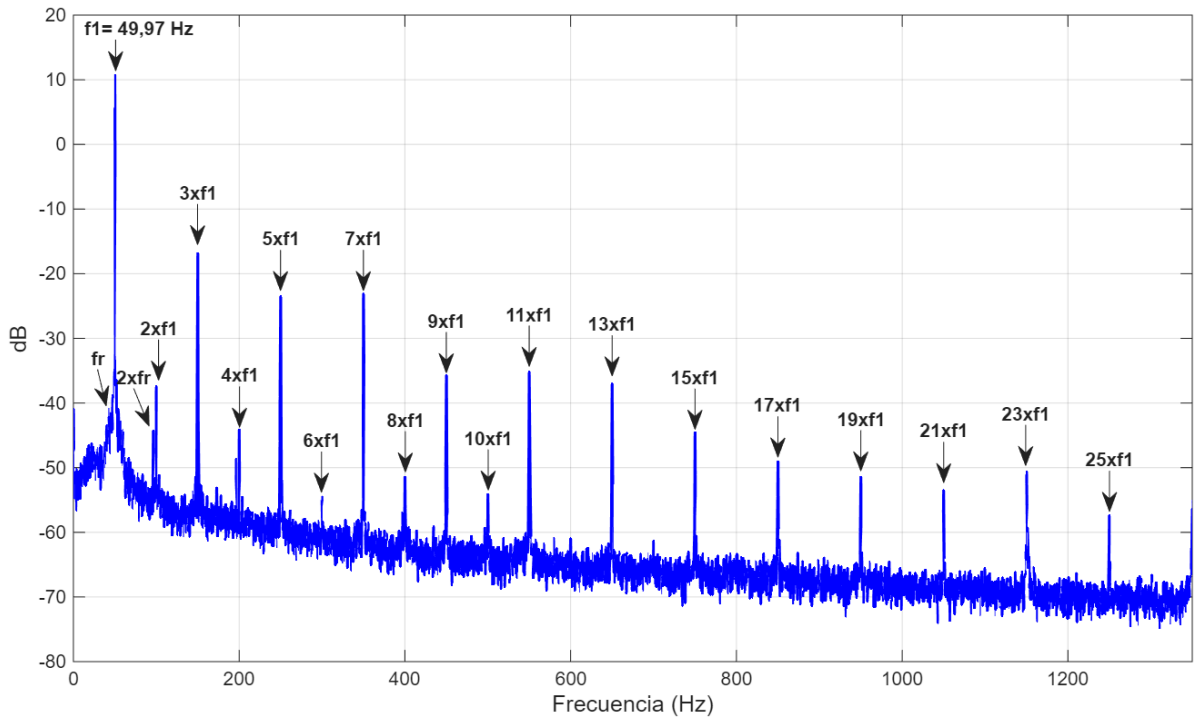


Fig. 6.2. Espectro de frecuencia corriente de fase con 5 vueltas de cerrado de llave de paso.

En la Fig. 6.3 se muestra el espectro de frecuencia de la corriente de fase con 4 vueltas de cerrado de la llave de paso. Se observa la aparición de dos componentes de frecuencia que no son múltiplos de la frecuencia fundamental, uno en 1101,88 [Hz] y el otro en 1301,96 [Hz], mientras que los armónicos mantienen su posición. Para esta condición, se presenta un caudal de 83,66 [L/min] y una presión de 1,73 [mca] lo que aleja el funcionamiento de la bomba, de su curva de operación. También, presento una potencia del motor de 1144,9 [W], potencia hidráulica de 24,38 [W] y una eficiencia global del 2,13%.

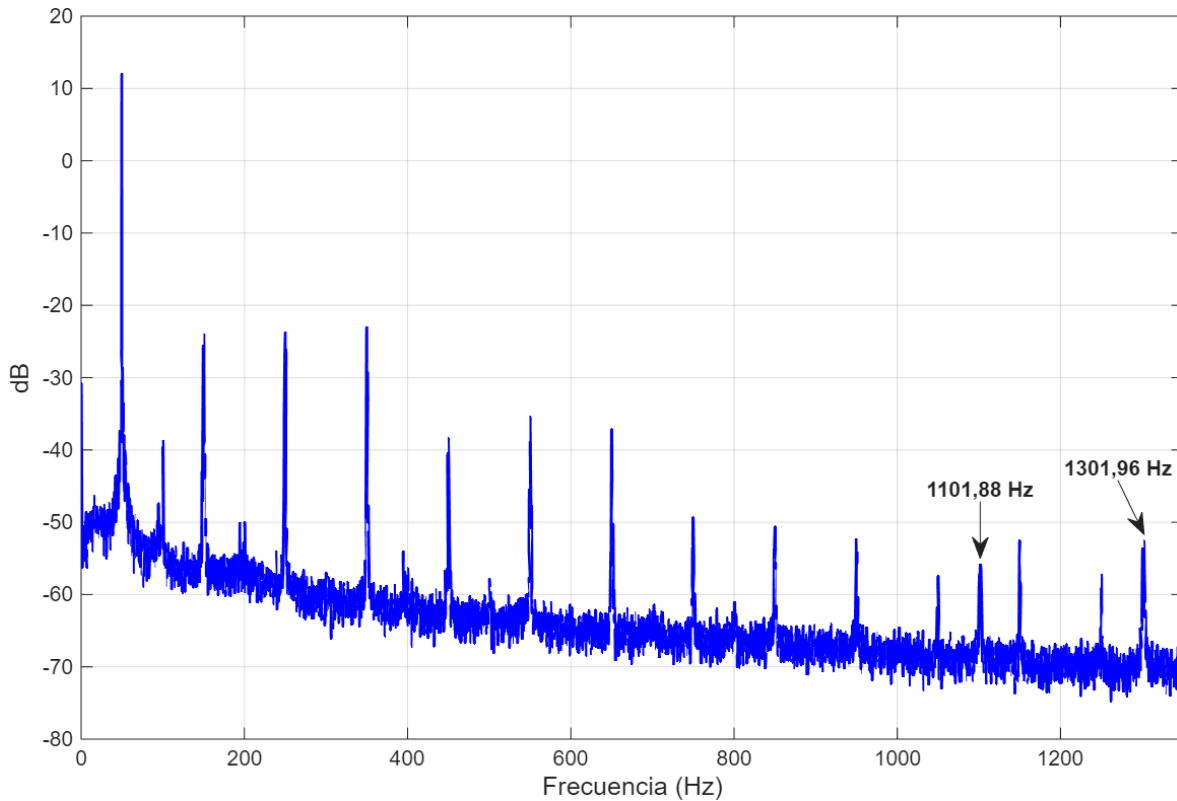


Fig. 6.3. Espectro de frecuencia corriente de fase con 4 vueltas de cerrado de llave de paso.

En la Fig. 6.4 se muestra el espectro de frecuencia con 3 vueltas de cerrado. Para esta configuración, se observó que los componentes de frecuencia que aparecieron, se desplazaron, ubicándose en 1086,81 [Hz] y 1286,03 [Hz] respectivamente. Cabe recalcar que los demás armónicos múltiplos de la frecuencia fundamental no se desplazaron. También, se presentó un caudal de 87,98 [L/min], una presión de 0,094 [mca], potencia del motor de 1143,5 [W], potencia hidráulica 1,37 [W] y una eficiencia global del 0,12%.

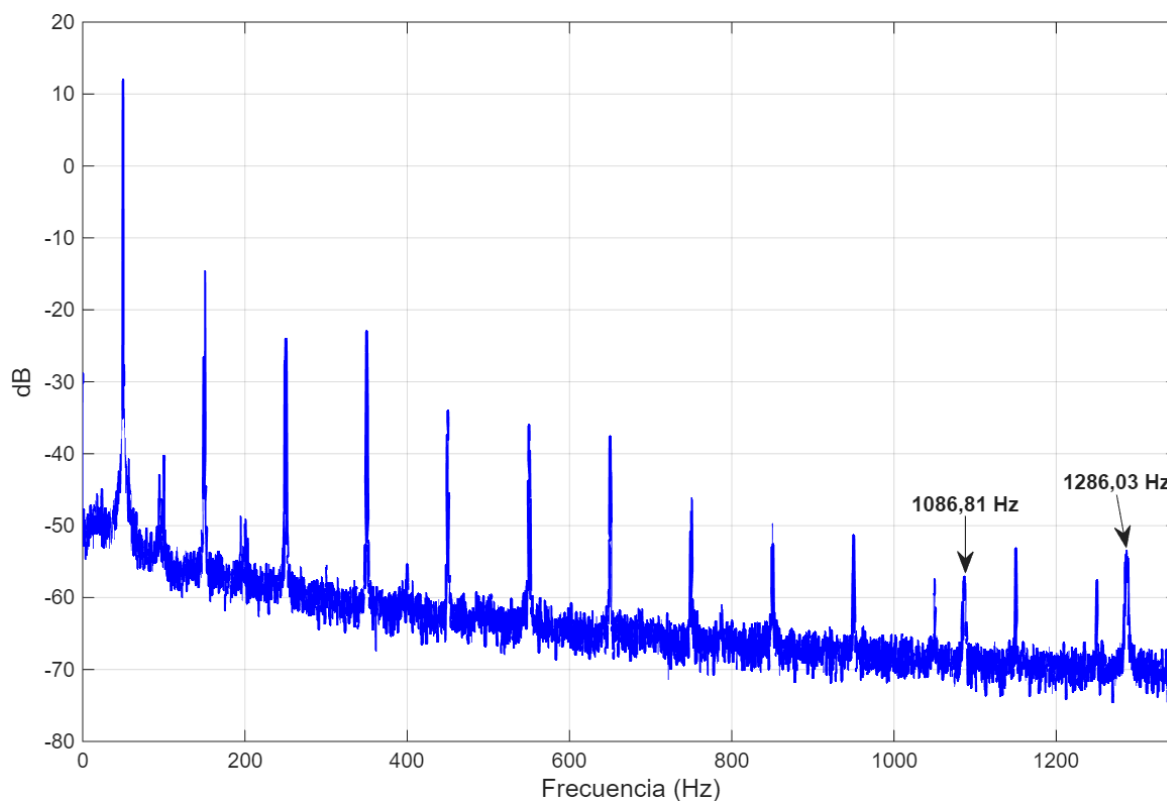


Fig. 6.4. Espectro de frecuencia corriente de fase con 3 vueltas de cerrado de llave de paso.

La Fig. 6.5 muestra el espectro de frecuencia con 2 vueltas de cerrado de la llave de paso en el sistema de bombeo. Los componentes de frecuencia que no son múltiplos de la frecuencia fundamental, se siguen desplazando, llegando a 1082,61 [Hz] y 1282,69 [Hz] cada uno. Los demás armónicos mantienen su posición. En esta condición de operación, se presentó un caudal de 88,72 [L/min], una presión de 0,032 [mca], potencia del motor de 1144,8 [W], potencia hidráulica 0,47[W] y una eficiencia global del 0,041%.

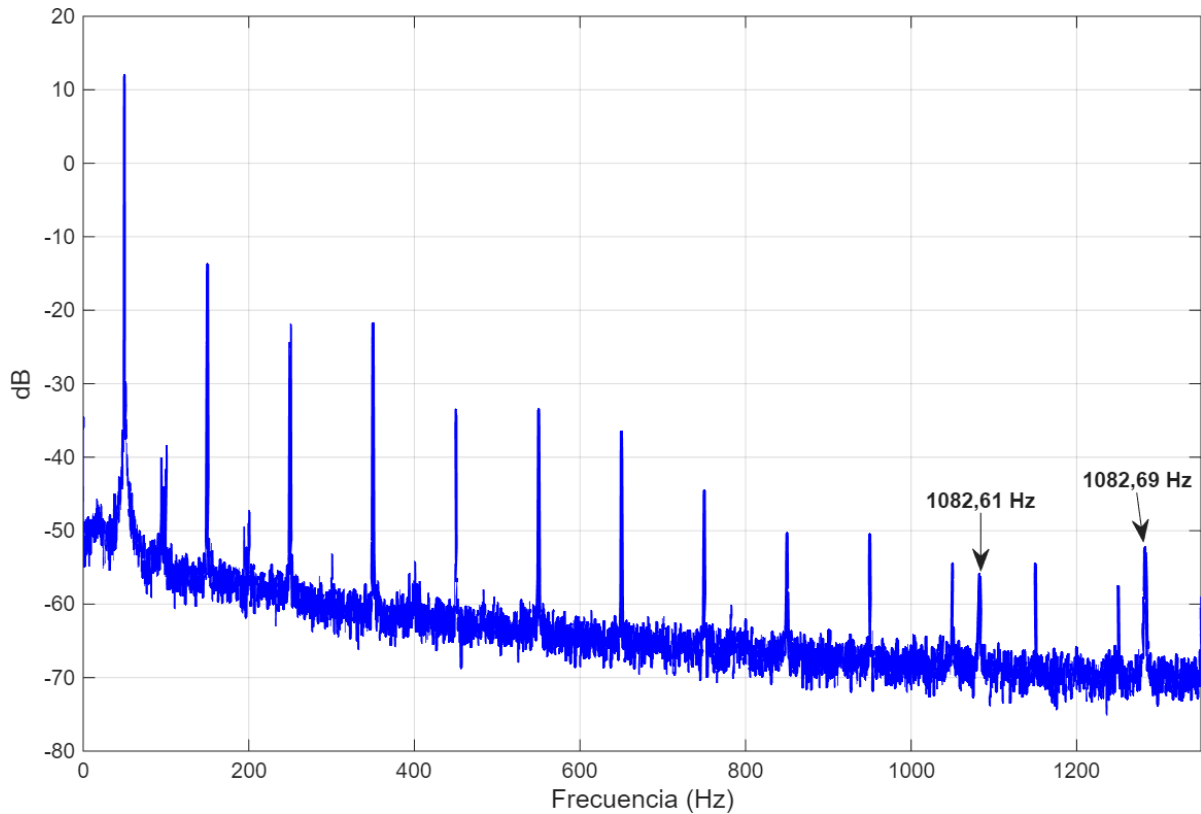


Fig. 6.5. Espectro de frecuencia corriente de fase con 2 vueltas de cerrado de llave de paso.

La Fig. 6.6 muestra el espectro de frecuencia con 1 vuelta de cerrado de la llave de paso. Se observa que los componentes de frecuencia no armónicos, nuevamente, se desplazan bajo esta nueva configuración, llegando a 1078,51 [Hz] y 1278,5 [Hz] respectivamente. Los armónicos, continúan en su posición inicial. También, se obtuvo un caudal de 89,41 [L/min], una presión de 0,028 [mca], potencia del motor de 1143,9 [W], potencia hidráulica 0,42 [W] y una eficiencia global del 0,037%.

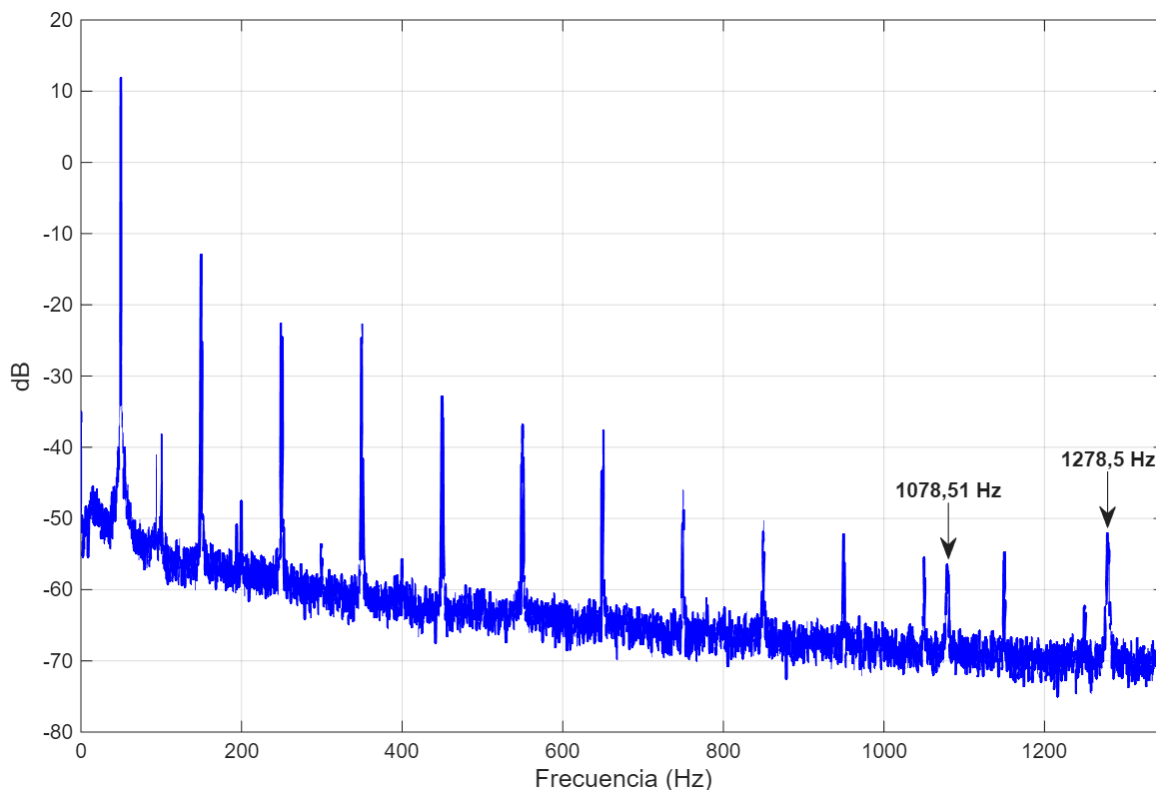


Fig. 6.6. Espectro de frecuencia corriente de fase con 1 vuelta de cerrado de llave de paso.

En la Fig. 6.7 se muestra el espectro de frecuencia de la corriente con la llave de paso totalmente abierta. Los dos componentes de frecuencia no armónicos, nuevamente, sufrieron un desplazamiento, ubicándose en 1076,89 [Hz] y 1276,97 [Hz]. Los armónicos, continúan sin desplazarse. Bajo esta configuración, se obtuvieron 89,53 [L/min] y 0,028 [mca], potencia del motor de 1141,7 [W], potencia hidráulica 0,41 [W] y una eficiencia global del 0,036%.

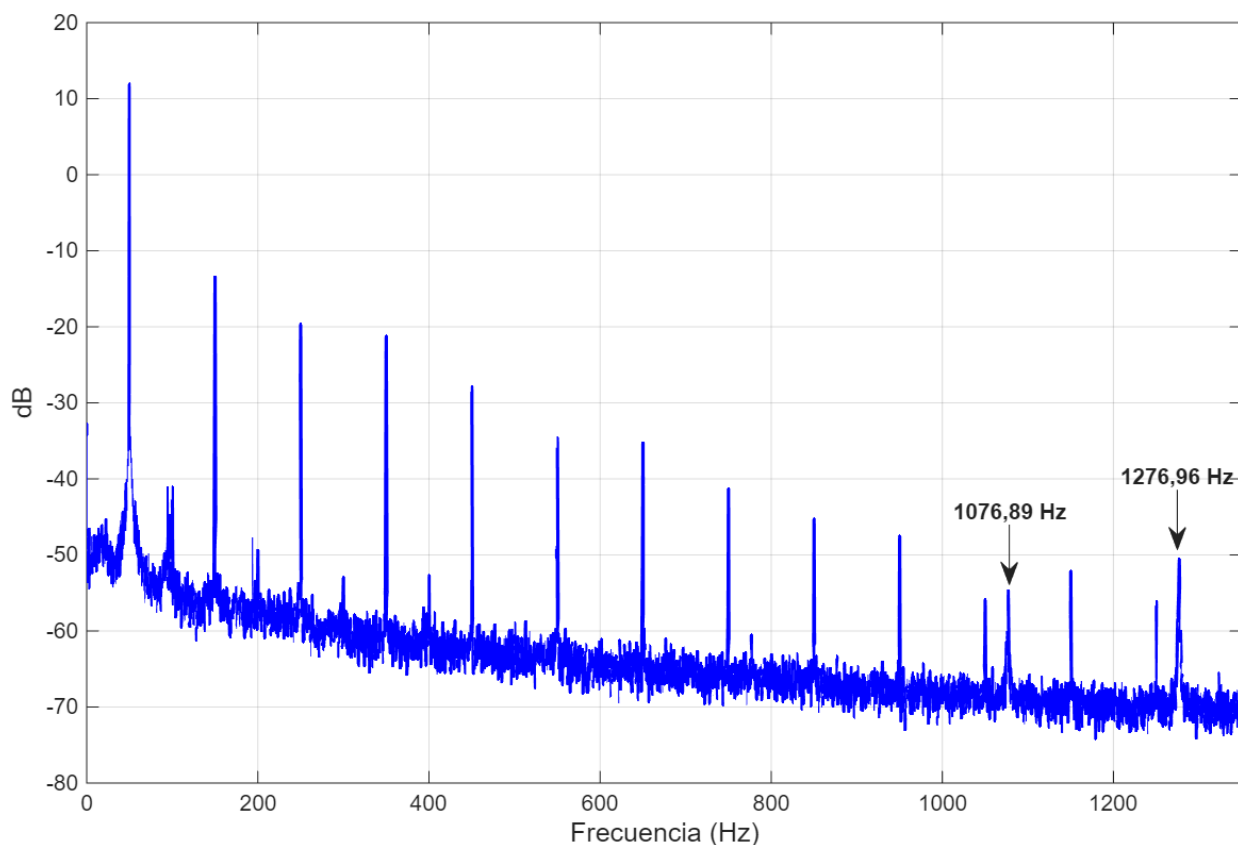


Fig. 6.7. Espectro de frecuencia corriente de fase con 0 vueltas de cerrado de llave de paso.

La tabla 6.1 muestra un resumen de los datos obtenidos bajo las diferentes condiciones impuestas por la llave de paso. Con la apertura progresiva, la bomba de agua se aleja de su curva operación, disminuyendo drásticamente la eficiencia global, lo que indica un mal funcionamiento del sistema. También, a medida que va empeorando el rendimiento, coincide con la aparición y desplazamiento de los componentes de frecuencia no armónicos.

Tabla 6.1. Parámetros del sistema bajo diferentes configuraciones de la llave de paso en conexión estrella.

Numero de vueltas llave de paso	Caudal (L/min)	Presión (mca)	Componente de frecuencia 1 (Hz)	Componente de frecuencia 2 (Hz)	Potencia motor (W)	Potencia hidráulica (W)	Eficiencia global (%)
5	35,02	14,68	-	-	917,015	84,23	9,18
4	83,66	1,73	1101,68	1301,96	1144,9	24,38	2,13
3	87,98	0,094	1086,81	1286,03	1143,5	1,37	0,12
2	88,72	0,032	1082,61	1282,69	1144,8	0,47	0,041
1	89,41	0,028	1078,51	1278,5	1143,9	0,42	0,037
0	89,53	0,028	1076,49	1276,97	1141,7	0,41	0,036

La tabla 6.2 presenta los datos obtenidos en conexión delta. En el Anexo A, se encuentran los espectros de frecuencia obtenidos, bajo las diferentes configuraciones de la llave de paso. Al igual que en conexión estrella, en esta condición, la bomba de agua se va alejando de su curva de operación, provocando pérdida de eficiencia y aparición de estos dos componente de frecuencia no armónicos.

Tabla 6.2. Parámetros del sistema bajo diferentes configuraciones de la llave de paso en conexión delta.

Numero de vueltas llave de paso	Caudal (L/min)	Presión (Bar)	Componente de frecuencia 1 (Hz)	Componente de frecuencia 2 (Hz)	Potencia motor (W)	Potencia hidráulica (W)	Eficiencia global (%)
5	32,29	14,58	-	-	874,45	77	8,81
4	84,84	1,83	1012,99	1113,03	1148,4	25,15	2,19
3	88,0025	0,11	998,402	1098,84	1150,8	1,57	0,14
2	88,65	0,034	991,058	1091,00	1146,4	0,51	0,044
1	88,93	0,028	985,909	1085,38	1139,6	0,41	0,036
0	89,05	0,027	982,285	1082,32	1136,1	0,40	0,035

6.4. Análisis de resultados

En esta sección, se analizarán los diferentes espectros de frecuencia, específicamente los componentes de frecuencia no armónicos que surgieron y se desplazaron durante la apertura progresiva de la llave de paso. También, se evaluarán los demás parámetros obtenidos, con el fin de establecer posibles relaciones con dichos armónicos.

Con 5 vueltas de cerrado de la llave de paso, el espectro de frecuencia (Fig. 6.1) muestra armónicos múltiplos de la frecuencia fundamental y múltiplos de la frecuencia rotacional del eje, por lo tanto, sin anomalías, lo que coincide con el funcionamiento de la bomba, cerca de curva de operación.

Con 4 vueltas de cerrado, el espectro de frecuencia (Fig. 6.2) muestra la aparición de dos componentes de frecuencia no armónicos, ubicados en 1101,88 [Hz] y 1301,96 [Hz]. Estos, se encuentran cercanos a los armónicos 23 y 27 de la frecuencia fundamental, que corresponden a 1149,37 [Hz] y 1349,26 [Hz]. Tomando como base la ecuación 6.1 y utilizando la ecuación 6.3.

$$f_r N = |f_s \pm n f_1| \quad (6.3)$$

Se reemplaza, $f_s = 1101,88$ [Hz], n_{f1} por $1149,37$ [Hz] y N por 1. Da como resultado un f_r igual a $47,49$ [Hz], lo que se aproxima al f_r nominal que es $46,67$ [Hz]. Luego, reemplazando para el segundo armónico aparecido ($1301,96$ [Hz]), el valor de f_r es $47,3$ [Hz], nuevamente cercano al nominal.

En la tabla 6.3 se muestra el f_r calculado para los demás casos. Los datos muestran que, con la apertura progresiva de la llave de paso, f_r aumenta su valor, alejándose del valor nominal. Este aumento se relaciona con el incremento del caudal, la disminución de la presión y una baja eficiencia en el sistema, como se muestra en la Fig. 6.8. Estos cambios de apertura de la llave (disminución de presión y aumento de caudal), provocan una variación en la carga hidráulica, produciendo cambios en el torque, lo que genera una modulación de la corriente a través de la frecuencia f_r y origina los armónicos observados en los espectros de frecuencia. La aparición y desplazamiento de los componentes de frecuencia no armónicos (debido al aumento de f_r) podrían indicar la existencia y evolución de la cavitación en el sistema. Además, el valor de f_r calculado, es practicante igual, respecto a los armónicos 23 y 27, lo que indica que esa frecuencia está involucrada en la modulación de la corriente y aparición de los componentes de frecuencia o bandas laterales. También, los demás armónicos múltiplos de la frecuencia fundamental, no se desplazan ante la apertura progresiva de la llave de paso, solo se mueven, los que tienen relación con f_r . Sin embargo, el aumento de f_r con respecto a la disminución de presión y aumento de caudal en el sistema, debe interpretarse con cautela, ya que podría corresponder a otros efectos del sistema. Por lo tanto, se requiere un análisis más detallado para confirmar su relación directa con la cavitación.

Tabla 6.3. f_r calculado en conexión estrella.

Numero de vueltas llave de paso	f_r calculado respecto armónico 23 (Hz)	f_r calculado respecto armónico 27 (Hz)
5	-	-
4	47,49	47,3
3	62,56	63,23
2	66,76	66,57
1	70,86	70,76
0	72,48	72,29

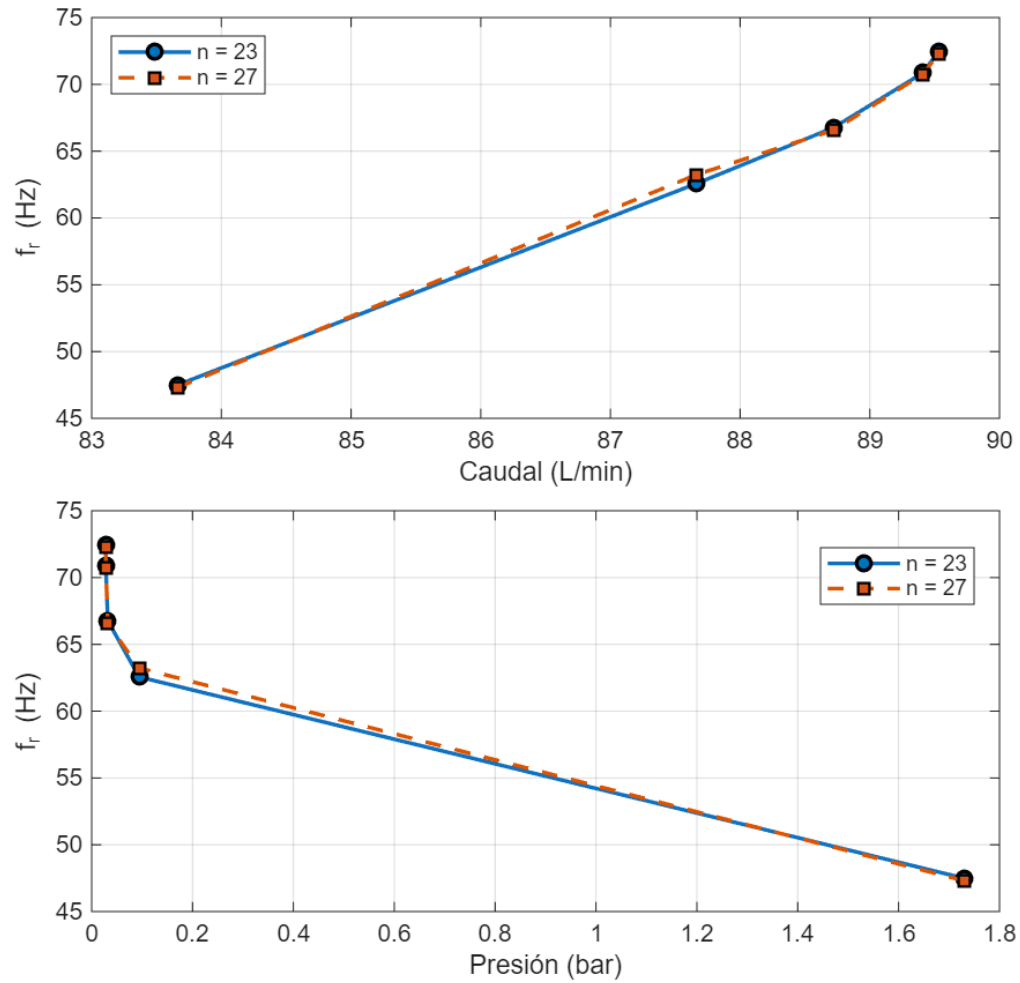


Fig. 6.8. (a) f_r vs caudal y (b) f_r vs presión conexión estrella.

La tabla 6.4 muestra los f_r obtenidos en conexión delta, en esta configuración los componentes de frecuencia no armónicos surgieron cerca de los armónicos de orden 21 y 23. Al igual que en la conexión estrella, el aumento de f_r coincide con el aumento del caudal y la disminución de la presión, como se muestra en la Fig. 6.9. En esta ocasión f_r calculado con 4 vueltas de cerrado, comienza por debajo de f_r nominal, pero a medida que se abre la llave de paso, su valor comienza a incrementar.

Tabla 6.4. Fr calculado en conexión delta.

Numero de vueltas llave de paso	Fr calculado respecto armónico 21 (Hz)	Fr calculado respecto armónico 23 (Hz)
5	-	-
4	36,44	36,43
3	50,53	51,018
2	58,37	58,36
1	63,99	63,51
0	67,05	67,13

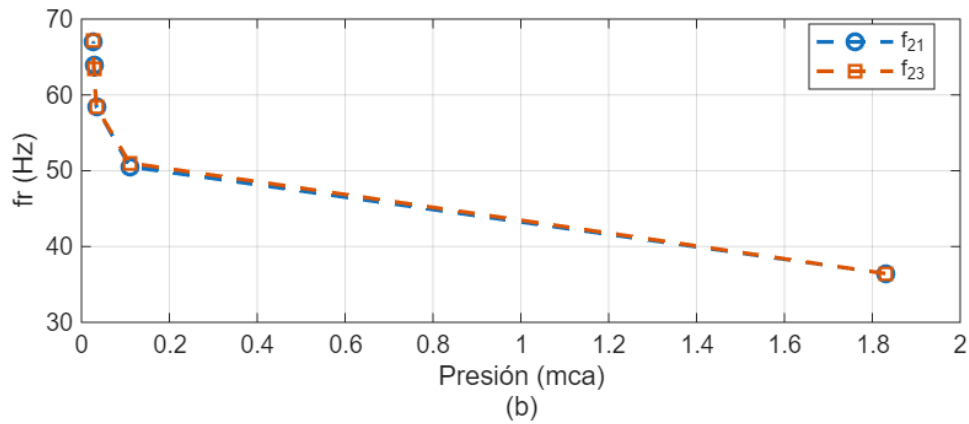
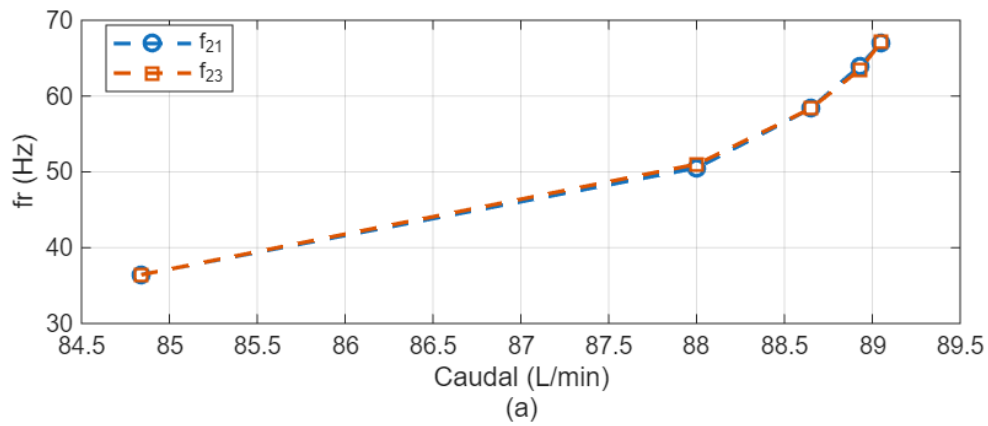


Fig. 6.9. (a) fr vs caudal y (b) fr vs presión conexión delta.

Por lo tanto, los resultados obtenidos en conexión estrella y delta muestran que la aparición de componentes de frecuencia (o bandas laterales) alrededor de armónicos múltiplos de frecuencia fundamental, ante la apertura progresiva de la llave, indicarían una posible señal de la presencia y aumento de cavitación en el sistema. Esto se debe a que la aparición de estos armónicos coincide con

la descripción de la ecuación 6.1, sin embargo, el incremento progresivo de f_r debe considerarse solo como una posible explicación al desplazamiento observado de los componentes de frecuencia, requiriendo un análisis más profundo para su confirmación, debido a que los diferentes textos estudiados no ratifican completamente el comportamiento de f_r . También, la relación de f_r con el aumento del caudal y disminución de la presión, podría dar pie a una investigación para estimar el caudal, ya que como se observa en las Fig. 6.8 y 6.9 en algunos puntos se traza un línea recta entre f_r , el caudal y presión.

Considerando lo anterior, los resultados indican que el aumento del caudal y la disminución de la presión, provocan que la bomba de agua opere demasiado a la derecha de su curva de operación, generando cavitación. Este fenómeno negativo, provoca un cambio en la carga, produciendo una variación en el torque. Estas fluctuaciones, modulan la corriente, causando la aparición de estos componentes de frecuencia no armónicos.

Capítulo 7. Conclusión

7.1. Sumario

Este trabajo evaluó un sistema de bombeo fotovoltaico alimentado por diferentes sistemas de seguimiento solar, específicamente un eje, un eje inclinado y dos ejes. Para ello, se realizó una revisión bibliográfica, con el fin de identificar los parámetros correctos para evaluar el SBFV. También, en esta revisión, se logró identificar las principales aplicaciones e impactos sociales, económicos y medioambientales en la actualidad.

Se explicaron los principales componentes del SBFV, el que está conformado por un arreglo de paneles fotovoltaicos monocristalinos, conectados en serie que, operan con seguimiento en un eje, un eje con inclinación de 20° y dos ejes. Estos, llegan a un inversor, que convierte la energía DC a AC, para alimentar a la bomba de agua. Además, se explicó el fenómeno de cavitación que se produce en estos equipos.

Para el registro de variables en el sistema de bombeo, se utilizaron sondas de corriente y voltaje. También, se ocuparon dos sensores de presión y uno de caudal. Estos equipos, se conectaron de forma analógica a los canales de la Dspace MicrolabBox. Este dispositivo, transmite los datos obtenidos a un computador para su adquisición y procesamiento, mediante ControlDesk y Matlab. A partir de estas mediciones, se estimaron la velocidad y el torque del motor utilizando el modelo BEMF-MRAS y un modelo híbrido del flujo de rotor. Después, se realizaron pruebas preliminares para observar el correcto funcionamiento de las sondas, sensores y estimaciones. Además, se aplicaron distintos filtro pasa bajo para eliminar el ruido, en las señales eléctricas obtenidas.

Luego, se realizaron las pruebas experimentales para la evaluación del SBFV. Estas, consintieron en seis pruebas de día completo: tres con los sistemas de seguimiento solar conectados en estrella y tres en delta. Además, se evaluó el fenómeno de cavitación presente en el sistema de bombeo, mediante el análisis de corriente del estator.

7.2. Conclusiones

De los resultados obtenidos en el capítulo 5, se puede concluir que:

- El sistema de seguimiento solar de doble eje, tanto conexión delta como en estrella presenta un promedio de volumen de agua acumulado por hora de operación levemente mayor que los demás, aunque en general los tres sistemas presentan rendimientos similares. En estrella, en el segmento de la mañana obtiene valores un 14,04% y 19,16% superiores al del seguidor de un eje inclinado y un eje, respectivamente. En el periodo de tarde, muestra valores un 7,64% y 14,16% mayores con respecto a los mismos seguidores. En delta, en la mañana presenta valores un 12,98% y 28,75% superiores que los demás seguidores. En el segmento de la tarde, obtuvo valores un 8,28% y 2,53% mayores. También, en conexión delta se obtiene un promedio de volumen de agua acumulado mayor que en conexión estrella. Esto ocurre ya que, en delta, el dimensionamiento de los paneles solares, permite a la bomba de agua operar en sus valores nominales que son 230 [V] y 3,46 [A], caso que en estrella no se cumple.
- El sistema de doble eje, tanto en conexión delta como en estrella, muestra un mayor promedio de producción de energía DC por hora de operación que los demás seguidores. Esto se debe principalmente a su mayor facilidad para captar irradiancia durante todo el día y producir más energía. En conexión estrella, en el segmento de la mañana, obtuvo valores un 14,28% y 26,15% superiores a los registrados por el seguidor de un eje inclinado y un eje, respectivamente. En la tarde, presenta valores un 9,98% y 32,33% con respecto a los mismos seguidores. En conexión delta, en el segmento de la mañana registro valores un 0,406% superior al eje inclinado y un 52,64% al de un eje (aumento debido a nubosidad presente para el seguidor de un eje). En la tarde, muestra valores un 15,08% y 5,8% mayores a comparación de los mismos seguidores. Aun así, en configuración delta y estrella, los tres sistemas presentan valores similares. Esto sugiere que, si bien el seguimiento en doble eje entrega un mayor beneficio en la captación energética, el dimensionamiento del arreglo fotovoltaico y las condiciones de operación de la bomba limitan las diferencias en el rendimiento, manteniendo un comportamiento equilibrado entre las distintas configuraciones.
- La configuración delta, utilizada en los distintos sistemas de seguimiento solar, presenta mayores y mejores parámetros de caudal, voltaje, corriente, velocidad del motor, torque, potencia y eficiencia, que en conexión estrella. Esto ocurre, ya que el string de paneles solares, presenta el voltaje suficiente para que el motor en conexión delta, opere con valores nominales (230 [V] y 3,46 [A])

- Los datos obtenidos en las tablas 5.1 y 5.3 muestran rendimientos hidráulicos y eléctricos similares para los tres sistemas de seguimiento solar. Esto ocurre debido a las limitaciones que presentan tanto el dimensionamiento de los paneles solares y los parámetros de la bomba de agua. En conexión delta, los tres sistemas cumplen para alimentar con los valores nominales a la bomba, lo que provoca que el sistema de doble eje, que en teoría debería mostrar una diferencia en su desempeño, presente valores de operación similares a los demás.
- En conexión estrella, el doble eje, es el que tuvo un mayor rendimiento en tramos de estabilidad y mayor irradiancia. En el segmento de la mañana, en comparación a los sistemas en un eje y un eje inclinado, obtuvo un caudal superior en 3,18% y 4,86% , respectivamente, y una eficiencia global mayor en 4,39% y 7%. En el segmento de la tarde, presento un caudal superior en 1,77% y 2,93%, respectivamente, una eficiencia global mayor en 7,89% y 10,81%. Es importante destacar que la eficiencia global para todos los seguidores en el segmento de la tarde, es prácticamente cero, por lo que esta diferencia no es significativa.
- En conexión delta, el eje inclinado, es el que tuvo un mayor rendimiento en tramos de estabilidad y mayor irradiancia. En el segmento de la mañana, obtuvo el mismo caudal que de un eje, pero respecto al de doble eje, lo supero en un 6,33%. También, obtuvo una eficiencia global mayor en 15% y 19,79%, respectivamente. Para la tarde, obtuvo un caudal superior en 1,15% al de un eje y un 3,15% al de doble eje. Además, presento una eficiencia global mayor en 33,33% y 60%. También, conviene señalar que la eficiencia global para todos los seguidores en el segmento de la tarde, es prácticamente cero, por lo que esta diferencia no es significativa. Igualmente, es de considerar la falta de medición de la irradiancia incidente sobre el seguidor de un eje inclinado para realizar una comparación totalmente justa con los demás seguidores.
- Por lo tanto, los diferentes resultados y análisis realizados muestran que los tres sistemas de seguimiento solar evaluados en el sistema de bombeo instalado en la UCSC presentan rendimientos eléctricos e hidráulicos similares, sin diferencias significativas entre ellos. Esto indica que la irradiancia solar adicional que puede captar el seguidor de doble eje, no se ve reflejado en una mejora significativa de rendimiento, debido a las limitaciones impuestas por el sistema de bombeo. En consecuencia, es importante realizar un buen dimensionamiento

previo, ya que la elección e inversión de un sistema de seguimiento solar más avanzado no sería justificable, si se obtiene un rendimiento similar con respecto a otros sistemas más simples.

De los resultados obtenidos el capítulo 6, se puede concluir que:

- Con 5 vueltas de cerrado de la llave de paso, tanto en delta como en estrella, el sistema opera cercana a su curva de operación, por lo que, presenta un espectro de frecuencia de la corriente sin anomalías. Luego, a partir de las 4 vueltas de cerrado, se presenta un aumento de caudal, una disminución en la presión y pérdida de eficiencia, provocando que la bomba de agua, opere demasiado a la derecha de su curva de operación. Ante esto, surgen los componentes de frecuencia no armónicos (o bandas laterales), lo que mostraría claros síntomas de cavitación. Estos componentes de frecuencia, aparecen y se desplazan a medida que aumenta el caudal y disminuye la presión, indicando una relación entre su movimiento y el aumento de la cavitación.
- La frecuencia rotacional del eje, muestra señales de ser responsable del desplazamiento de los armónicos, ya que esta aumenta con el incremento del caudal y la disminución de la presión. También, otra señal de esto, es que los armónicos de la frecuencia fundamental no se desplazan con la apertura progresiva de la llave de paso. Sin embargo, esto es solo una posibilidad, debido a que los diferentes textos analizados no confirman este comportamiento de fr.
- Por lo tanto, los resultados del análisis de corriente de estator, indicarían cavitación en el SBFV a partir de las 4 vueltas de cerrado de llave de paso, donde empieza a disminuir la presión y aumentar el caudal. Aun así, no se puede asegurar completamente el fenómeno de cavitación, debido a la falta de confirmación del comportamiento de fr y alguna comprobación adicional, mediante el análisis de vibraciones o ruidos del motor.

7.3. Trabajos futuros

- Realizar pruebas en la estación de verano.
- Implementar un algoritmo para estimar el caudal, solo con la medición de variables eléctricas.

- Mejora de diseño del sistema de bombeo para obtener una mayor presión en las tuberías de impulsión.

Bibliografía

- [1] Redaction National Geographic, La energía solar y su potencial para reducir el calentamiento global. 2022. www.nationalgeographicla.com/medio-ambiente/2022/04/la-energia-solar-y-su-potencial-para-ayudar-a-reducir-el-calentamiento-global.
- [2] Gevorkov, L.; Dominguez-Garcia, J.L. Romero, L.T. Review on Solar-Photovoltaic Powered Pumping Systems. *Energies* 2023, 16, 94.
- [3] Vijayan Sumathia, R. Jayapragasha , Abhinav Bakshib , Praveen Kumar Akella. Solar tracking methods to maximize PV system output – A review of the methods adopted in recent decade. 2017.
- [4] Flörke, M.; Schneider, C.; McDonald, R.I. Water competition between cities and agriculture driven by climate change and urban growth. *Nat. Sustain.* 2018, 1, 51–58.
- [5] Guno, C.S.; Agaton, C.B. Socio-Economic and Environmental Analyses of Solar Irrigation Systems for Sustainable Agricultural Production. *Sustainability* 2022, 14, 6834.
- [6] Demirdelen, T.; Alıcı, H.; Esenboğa, B.; Güldürek, M. Performance and Economic Analysis of Designed Different Solar Tracking Systems for Mediterranean Climate. *Energies* 2023, 16, 4197.
- [7] Bione J, Vilela OC, Fraidenraich N. Comparison of the performance of PV water pumping systems driven by fixed, tracking and V-trough generators. *Sol Energy* 2004;76:703–11.
- [8] Gutierrez J, Merino G, Lara D, Salazar L. Hydraulic assessment of a photovoltaic system driving a conventional AC surface electric pump. Department of Mechanization and Energy, Faculty of Agricultural Engineering, Universidad de Concepcion, Chile. 2021.
- [9] Odeh. A, Yohanis. Y.G, Norton. B. Influence of pumping head, insolation and PV array size on PV water pumping system performance. P.O. Box 1236 Swieleh, Amman 11910, Jordan, 2005.
- [10] F. Rebolledo, P. Mendoza-Araya, G. Ramirez, G. Carvajal. Performance evaluation of different solar modules and mounting structures on an on-grid photovoltaic system in south-central Chile. *Energy for Sustainable Development*. 2022.
- [11] Videla Soto A. A. Análisis desempeño de sistema de bombeo fotovoltaico. Tesis para optar al

- título de Ingeniero Civil Eléctrico. Universidad Católica de la Santísima Concepción. 2023.
- [12] Vas P. Sensorless Vector and Direct Torque Control. Oxford science publications. 1998.
 - [13] Rodriguez Varela Gomez J. Análisis teórico y experimental de cavitación en bombas centrífugas. Departamento de Energía. Universidad de Oviedo. 2018.
 - [14] Yin L, Xiong Z, Hui S, Shouqi Y and Jianping Y. Research on the induction motor current signature for centrifugal pump at cavitation condition. 2015.
 - [15] Pentax wáter pumps. CM. <https://www.pentax-pumps.it/pentax/es/product/cm/>.
 - [16] ¿Que es la cavitación por succión? www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-cavitacion-por-succion-definicion/.
 - [17] Cavitación en el bombeo de fluidos. 54 2009. www.interempresas.net/Componentes_Mecanicos/Articulos/34521-Cavitacion-en-el-bombeo-de-fluidos.html.
 - [18] ¿Que es la cavitación por descarga? www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-cavitacion-de-descarga-definicion/.
 - [19] Products HOBO. www.onsetcomp.com/products/sensors/s-lib-m003.
 - [20] Salem A Alhashmi. Detection and diagnosis of cavitation in centrifugal pumps. University of Manchester. 2005.
 - [21] Howard W Penrose. Electrical Signature Analysis of Electric Motor Driven Pumps.
 - [22] Machado G, Albanez E, Rengifo J y Bueno A. Diagnóstico de cavitación en bombas centrífugas mediante técnicas espectrales no invasivas. Departamento de Conversión y Transporte de Energía, Universidad Simón Bolívar. 2016.
 - [23] Yuejiang Han, Jiamin Zou, Alexandre Presas, Yin Luo and Jianping Yuan. Off-Design Operation and Cavitation Detection in Centrifugal Pumps Using Vibration and Motor Stator Current Analyses. Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

Anexo A. Espectros de frecuencia en conexión delta

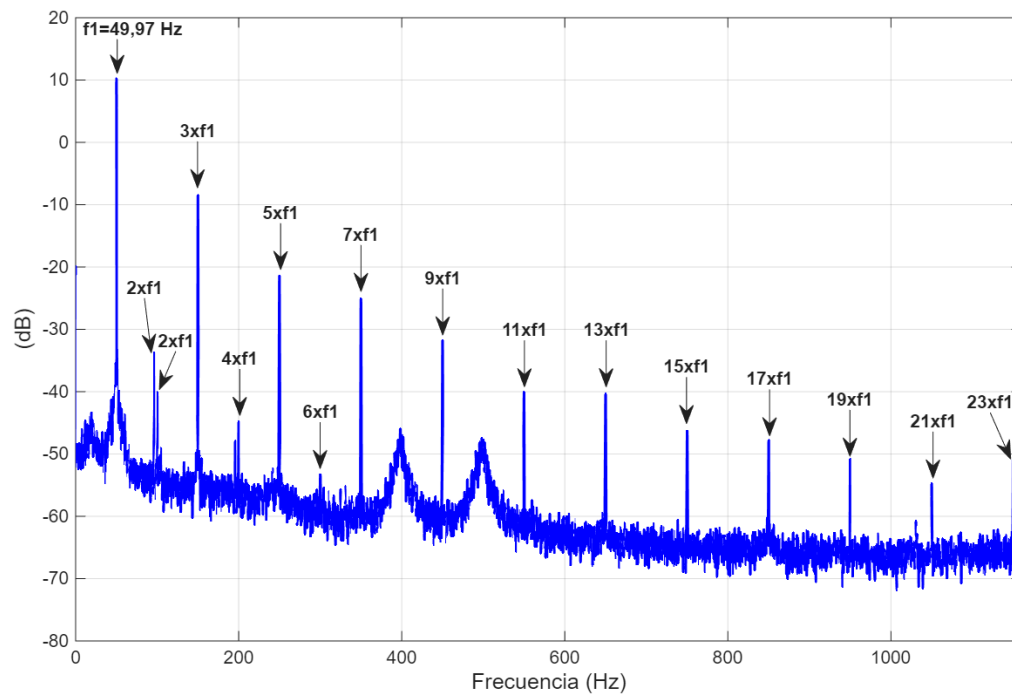


Fig. A. 1. Espectro de frecuencia corriente de fase con 5 vueltas de cerrado de llave de paso.

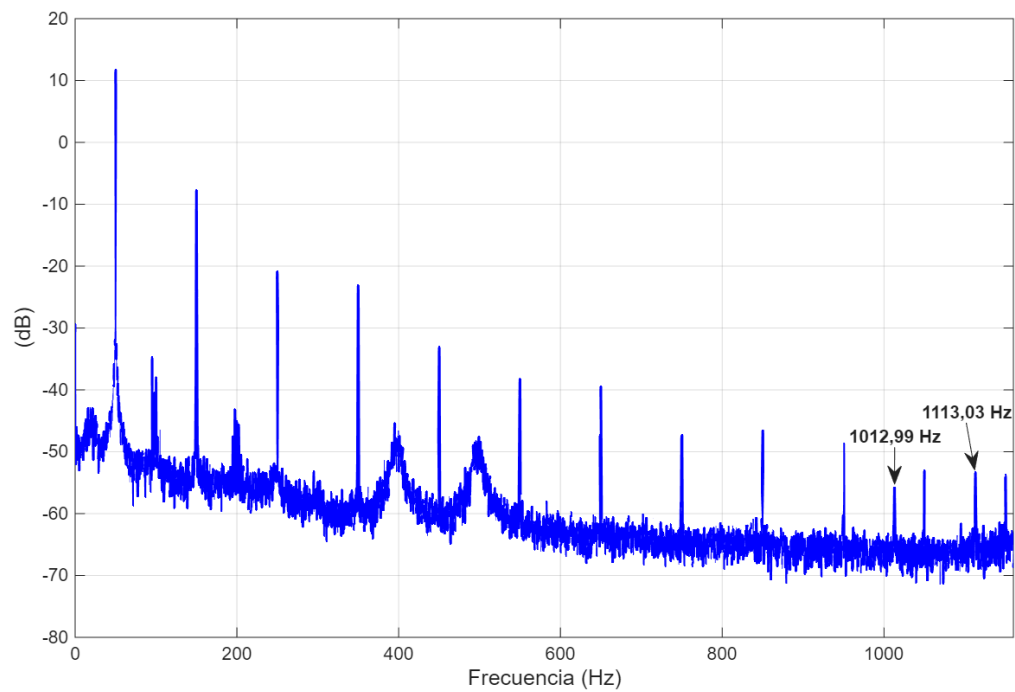


Fig. A. 2. Espectro de frecuencia corriente de fase con 4 vueltas de cerrado de llave de paso.

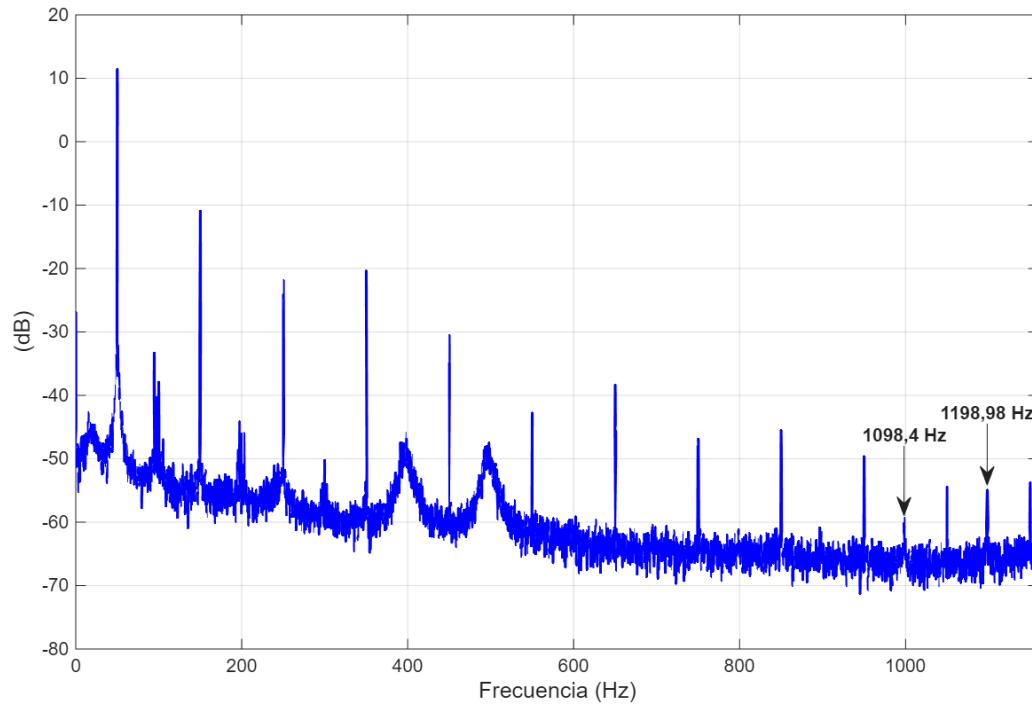


Fig. A. 3. Espectro de frecuencia corriente de fase con 3 vueltas de cerrado de llave de paso.

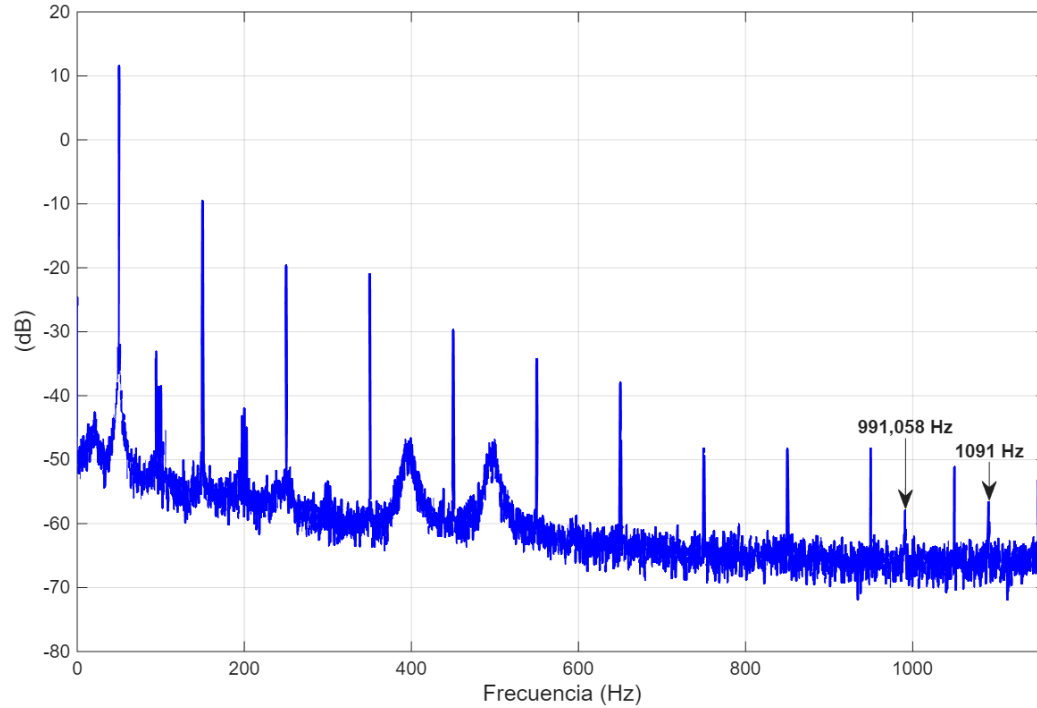


Fig. A. 4. Espectro de frecuencia corriente de fase con 2 vueltas de cerrado de llave de paso.

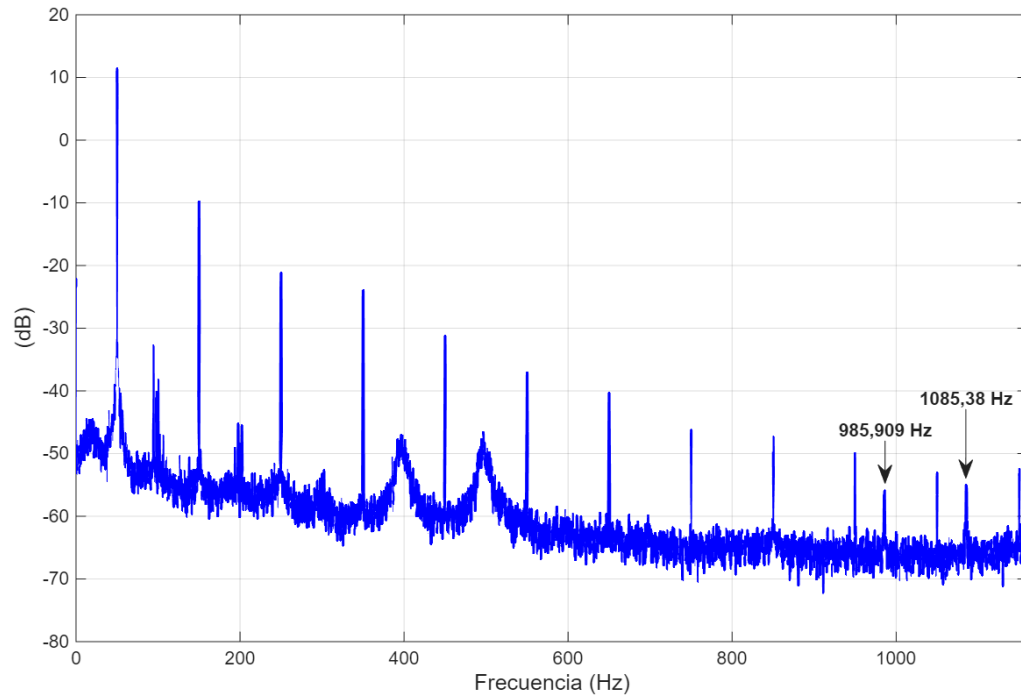


Fig. A. 5. Espectro de frecuencia corriente de fase con 1 vuelta de cerrado de llave de paso.

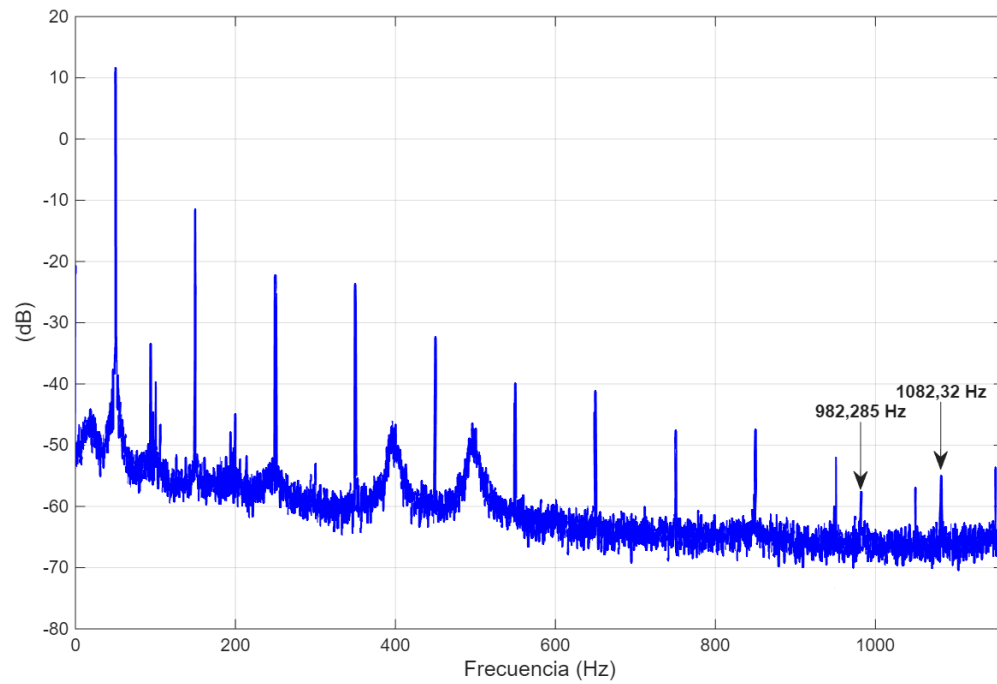


Fig. A. 6. Espectro de frecuencia corriente de fase con 0 vueltas de cerrado de llave de paso.