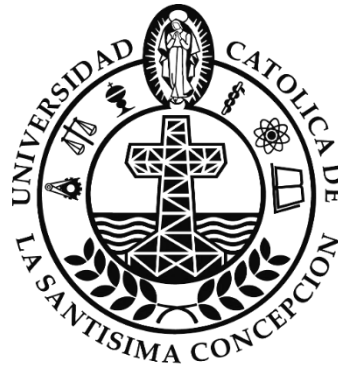


UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA



UCSC

Análisis de Desempeño de Sistema de Bombeo Fotovoltaico

Ariel Alejandro Videla Soto

Informe de Habilitación Profesional para optar al título de:

Ingeniero Civil Eléctrico

Profesor Patrocinante:

Dr. Guillermo E. Ramírez A.

Profesores Guía:

Dr. Aníbal S. Morales M.

Dr. Samuel A. Vergara R.

Concepción, julio de 2023

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

Profesor Patrocinante:
Dr. Guillermo E. Ramírez A

Análisis de Desempeño de Sistema de Bombeo Fotovoltaico

Ariel Alejandro Videla Soto

Informe de Habilitación
Profesional para optar al
Título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Concepción, julio de 2023

Resumen

Los sistemas de bombeo fotovoltaico a medida que han pasado los años se han vuelto más competitivos y una real alternativa para el riego y el abastecimiento en lugares remotos donde acceder a una red de distribución eléctrica es difícil. Adicionalmente la creciente alza de los combustibles fósiles durante la última década ha obligado a buscar alternativas a sistemas de bombeo basados en combustión.

Este trabajo de habilitación profesional tiene por objetivo implementar un sistema de bombeo fotovoltaico acoplando un sistema de registro y monitoreo de variables de interés, para lo cual se utilizará un set de sensores compuesto por dos sensores de presión para medir la presión de succión e impulsión del agua del sistema, como además de un flujómetro para medir el caudal de agua transportado por el sistema.

El trabajo también considera la implementación de observadores para estimar la velocidad y el torque eléctrico del motor de la bomba de agua, basados en fundamentos teóricos encontrados, los cuales fueron corroborados a partir de pruebas experimentales.

Una vez que es calibrado el sistema de registro y monitoreo, se procedió a realizar pruebas que consideran registros de días completos de operación que se utilizaron para evaluar el desempeño del sistema de bombeo fotovoltaico. Para estos estudios, se realizaron evaluaciones donde los terminales del motor se conectan en estrella y delta, y se consideran distintas cantidades de módulos fotovoltaicos para energizar el sistema de bombeo.

Los resultados indican que el rendimiento del SBFV se ve afectado por la configuración de conexión (estrella o delta) y la cantidad de paneles fotovoltaicos utilizados. La configuración delta muestra un mejor desempeño en cuanto a caudal, velocidad, torque del motor como también en la potencia mecánica y hidráulica, mientras que un mayor número de paneles fotovoltaicos mejora el rendimiento en las variables mencionadas anteriormente en ambas configuraciones. Estos hallazgos son importantes para optimizar el diseño y funcionamiento de los sistemas de bombeo fotovoltaico y lograr un mejor aprovechamiento de la energía solar.

Agradecimientos

Quisiera comenzar agradeciendo y dedicando este trabajo a mi familia, en especial a mi madre Elena Videla la cual siempre me ha apoyado incondicionalmente, a mi Tía Nadia Videla y Tío Oscar Videla los cuales me prestaron siempre su ayuda para llegar a la etapa en la cual me encuentro.

También, debo agradecer a mis amigos y compañeros de carrera como Rubén Padilla, Felipe Fierro, Daniel Nusdel, entre otros. Con los cuales pase tiempos alegres y tiempos de estudios.

Debo extender este agradecimiento a los encargados del laboratorio como Carlos Jaramillo, Gabriel Bout y Alfredo Morales los cuales siempre me prestaron su ayuda cuando la necesita para realizar este trabajo.

además, debo agradecer a mi profesor guía, el Dr. Guillermo Ramírez el cual con su paciencia, conocimiento y experiencia me guio en este proceso para lograr el termino de este trabajo.

Finalmente, agradecer a los docentes del departamento de ingeniería eléctrica por los conocimientos que me entregaron a lo largo de la carrera, sus enseñanzas me llevaron a ser un gran profesional como lo son ellos.

Tabla de contenido

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	COMPONENTES DE UN SBFV	2
1.1.1	<i>Sistema Fotovoltaico</i>	2
1.1.2.	<i>Sistema de Control de potencia</i>	2
1.1.3	<i>Sistema Electromecánico.....</i>	3
1.2	TRABAJOS PREVIOS	3
1.2.1	<i>Información de Contexto</i>	4
1.2.2	<i>Modelos Dinámicos del motor de inducción y estimadores.....</i>	6
1.2.3	<i>Discusión</i>	8
1.3	OBJETIVOS	8
1.3.1	<i>Objetivo General</i>	8
1.3.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	8
1.4	ALCANCES Y LIMITACIONES	9
1.5	TEMARIO Y METODOLOGÍA	9
2.	SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO	11
2.1	INTRODUCCIÓN	11
2.2	SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	12
2.3	SISTEMA DE CONTROL DE POTENCIA	15
2.4	SISTEMA ELECTROMECAÁNICO	16
3.	SISTEMA DE REGISTRO Y MONITOREO DEL SBFV	19
3.1	INTRODUCCIÓN	19
3.2	ESQUEMA GENERAL	19
3.3	DISPOSITIVO DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS	20
3.4	SENSORES DE PRESIÓN Y CAUDAL	21
3.4.1	<i>Sensores de Presión.....</i>	21
3.4.2	<i>Sensor de Caudal.....</i>	25
3.5	VARIABLES DE INTERÉS ESTIMADAS	27
3.5.1	<i>Modelo Dinámico del Motor de inducción jaula de ardilla</i>	27
3.5.2	<i>Transformaciones a ejes de coordenadas bifásicos.....</i>	28
3.5.3	<i>Observador de flujo</i>	29
3.5.4	<i>Observador de Velocidad</i>	33
3.5.5	<i>Estimador de Torque</i>	36
3.6	IMPLEMENTACIÓN DE OBSERVADORES Y ESTIMADORES.	37
3.6.1	<i>Sensores de voltaje y corriente</i>	37
3.6.2	<i>Parámetros motor y acondicionamiento de señales</i>	38

3.6.3	<i>Evaluación de Observador BEMF-MRAS</i>	39
3.6.4	<i>Evaluación de Estimador de Torque</i>	40
3.7	POTENCIAS DEL SBFV	41
3.7.1	<i>Potencia eléctrica de entrada</i>	41
3.7.2	<i>Potencia mecánica</i>	42
3.7.3	<i>Potencia hidráulica</i>	42
3.8	DISCUSIÓN	42
4.	RESULTADOS EXPERIMENTALES	44
4.1	INTRODUCCIÓN	44
4.2	MONTAJE EXPERIMENTAL	44
4.3	SELECCIÓN TIEMPO DE MUESTREO	45
4.4	EVALUACIÓN DE SBFV - DÍA COMPLETO DE OPERACIÓN	54
4.4.1	<i>SBFV configurado en estrella con 10 paneles solares</i>	54
4.4.2	<i>SBFV configurado en delta con 10 paneles solares.</i>	64
4.4.3	<i>SBFV configurado en estrella con 7 paneles solares.</i>	74
4.4.4	<i>SBFV configurado en delta con 7 paneles solares.</i>	83
4.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS	92
5.	CONCLUSIONES	99
5.1	SUMARIO	99
5.2	CONCLUSIONES	100
5.3	TRABAJO FUTURO	102
	BIBLIOGRAFÍA	103
	ANEXO A. CONFIGURACIÓN DE SENSOR DE CAUDAL	104
	ANEXO B. MODELOS DE ESTIMACIÓN (SIMULINK)	110
	ANEXO C. IRRADIANCIA DE LOS DÍAS DE PRUEBA	113
	ANEXO D. VOLTAJES Y CORRIENTES (COMPLETOS)	116

Lista de tablas

Tabla 2-1. FICHA TÉCNICA DE PANEL SOLAR JINKO JKM270PP-60.	13
Tabla 2-2. PARÁMETROS DE LA BOMBA DE AGUA PENTAX CMT 100/00.	17
Tabla 3-1. ESPECIFICACIONES DSPACE MICROLABBOX 1202.	21
Tabla 3-2. PARÁMETROS DEL SENSOR WIKA MODELO A-10.	22
Tabla 3-3. PARÁMETROS DEL SENSOR IFM SA5000.	25
Tabla 3-4. RANGOS DE TENSIÓN CC Y CA.	38
Tabla 3-5. PARÁMETROS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN DE LA BOMBA DE AGUA	38
Tabla 4-1. RESULTADOS DE PRIMERA PRUEBA PRELIMINAR.	45
Tabla 4-2. VALOR MÁXIMO ALCANZADO POR LAS VARIABLES DE INTERÉS (ESTRELLA-10 PANELES). .	64
Tabla 4-3. VALOR MÁXIMO ALCANZADO POR LAS VARIABLES DE INTERÉS (DELTA-10 PANELES).....	73
Tabla 4-4. VALOR MÁXIMO ALCANZADO POR LAS VARIABLES DE INTERÉS (ESTRELLA-7 PANELES). ...	82
Tabla 4-5. VALOR MÁXIMO ALCANZADO POR LAS VARIABLES DE INTERÉS (DELTA-7 PANELES).....	91
Tabla 4-6. PORCENTAJES CON RESPECTO A SU VALOR NOMINAL (SBFV CONFIG. ESTRELLA CON 10 PANELES).....	92
Tabla 4-7. PORCENTAJES CON RESPECTO A SU VALOR NOMINAL (SBFV CONFIG. DELTA CON 10 PANELES).	93
Tabla 4-8. PORCENTAJES CON RESPECTO A SU VALOR NOMINAL (SBFV CONFIG. ESTRELLA CON 7 PANELES).....	93
Tabla 4-9. PORCENTAJES CON RESPECTO A SU VALOR NOMINAL (SBFV CONFIG. DELTA CON 7 PANELES).	94
Tabla A-1. VALORES DE LA PRUEBA REALIZADA	108

Lista de figuras

Fig. 1-1. Esquema estructural de un SBFV.....	2
Fig. 2-1. Set up montado en el Laboratorio de la UCSC (1. Sensor de caudal; 2. Sensor de Presión de impulsión de agua; 3. Sensor de Presión de succión de agua; 4.Bomba de agua trifásica; 5. Estanque de agua).	12
Fig. 2-2. Paneles solares policristalinos (JINKO JKM270PP-60) utilizados en el proyecto.....	13
Fig. 2-3. Curvas I-V y P-V del panel JINKO JKM270PP-60 utilizado en el proyecto. Fuente: www.jinkosolar.com	14
Fig. 2-4. Sistema de control de potencia utilizado en el proyecto (Izquierda: inversor; Derecha: Diferencial que actúa como interruptor).	16
Fig. 2-5. Bomba de agua (PENTAX CMT 100/00 trifásica). Fuente: www.pentax-pumps.it	16
Fig. 2-6. Tipos de conexiones de la bomba PENTAX CMT 100/00. Fuente: www.pentax-pumps.it	17
Fig. 2-7. Curva de eficiencia altura-caudal de la bomba de agua PENTAX CMT 100/00. Fuente: www.pentax-pumps.it	18
Fig. 3-1. Diagrama general del sistema de registro y monitoreo de variables.	20
Fig. 3-2. Dspace MicroLabBox 1202.....	20
Fig. 3-3. Sensor de Presión WIKA modelo A-10.	22
Fig. 3-4. Sensor de Presión WIKA modelo A-10 instalado en el SBFV.	23
Fig. 3-5. Prueba del Sensor de presión de succión.....	24
Fig. 3-6. Prueba del Sensor de presión de impulsión.....	24
Fig. 3-7. Medidor de sensor IFM SA5000.	25
Fig. 3-8. Modulo convertidor de señales 4 a 20 mA a voltaje.	25
Fig. 3-9. Posición de acoplamiento del Sensor IFM SA5000.	26
Fig. 3-10. Sensor IFM SA5000 acoplado al SBFV.....	26
Fig. 3-11. Prueba de sensor de caudal IFM SA5000.....	27
Fig. 3-12. Diagrama del modelo de voltaje.....	30
Fig. 3-13. Diagrama del modelo de corriente.....	31
Fig. 3-14. Diagrama del modelo de híbrido.	32
Fig. 3-15. Diagrama del MRAS para la estimación de velocidad.....	33
Fig. 3-16. Diagrama del estimador de velocidad BEMF-MRAS.....	35

Fig. 3-17. Diagrama para la estimación del Torque Eléctrico.	37
Fig. 3-18. Sonda de voltaje Pintek DP-25.	37
Fig. 3-19. Sonda de corriente Fluke i30s.	37
Fig. 3-20. Diagrama de acondicionamiento de señales de voltaje y corriente.	39
Fig. 3-21. Observador de Velocidad con y sin filtro de 5Hz.	40
Fig. 3-22. Estimador de torque con y sin filtro de 5Hz.	41
Fig. 4-1. Montaje experimental.	45
Fig. 4-2. Voltajes de línea-neutro obtenidas en la segunda prueba preliminar.	46
Fig. 4-3. Corrientes de línea obtenidas en la segunda prueba preliminar.	47
Fig. 4-4. Voltaje y Corrientes de línea obtenidas en la segunda prueba preliminar (Zoom).	47
Fig. 4-5. Voltajes con y sin filtro de Hampel.	48
Fig. 4-6. Corriente con y sin filtro de Hampel.	49
Fig. 4-7. Voltajes con y sin filtro de Hampel (Zoom).	49
Fig. 4-8. Corriente con y sin filtro de Hampel.	50
Fig. 4-9. Velocidad y torque eléctrico estimados en la segunda prueba preliminar.	51
Fig. 4-10. Presiones y caudal obtenidos en la segunda prueba preliminar.	51
Fig. 4-11. Comparación de filtros en la potencia de entrada de la bomba hidráulica.	52
Fig. 4-12. Potencia mecánica sin y con filtro de mediana.	53
Fig. 4-13. Potencia Hidráulica del SBFV sin y con filtro de mediana.	53
Fig. 4-14. Irradiancia, Voltaje y Corriente de línea de la fase A en tramo 1 de tiempo.	54
Fig. 4-15. Presiones y Caudal del SBFV en tramo 1.	55
Fig. 4-16. Velocidad y Torque estimados de la bomba de agua en tramo 1 de tiempo.	56
Fig. 4-17. Potencia de entrada, mecánica e hidráulica del SBFV en el tramo 1 de tiempo.	57
Fig. 4-18. Irradiancia, Voltaje y Corriente de línea de la fase A en tramo 2 de tiempo.	58
Fig. 4-19. Presiones y Caudal del SBFV en tramo 2 de tiempo.	59
Fig. 4-20. Velocidad y Torque estimados de la bomba de agua en tramo 2 de tiempo.	59
Fig. 4-21. Potencia de entrada, mecánica e hidráulica del SBFV en el tramo 2 de tiempo.	60
Fig. 4-22. Irradiancia, Voltaje y Corriente de línea de la fase A en tramo 3 de tiempo.	61
Fig. 4-23. Presiones y Caudal del SBFV en tramo 3 de tiempo.	62
Fig. 4-24. Velocidad y Torque estimados de la bomba de agua en tramo 3 de tiempo.	62
Fig. 4-25. Potencia de entrada, mecánica e hidráulica del SBFV en el tramo 3 de tiempo.	63
Fig. 4-26. Irradiancia, Voltaje y Corriente de fase (a-b) en tramo 1 de tiempo.	65

Fig. 4-27. Presiones y Caudal del SBFV en tramo 1 de tiempo.....	66
Fig. 4-28. Velocidad y Torque estimados de la bomba de agua en tramo 1 de tiempo.	66
Fig. 4-29. Potencia de entrada, mecánica e hidráulica del SBFV en el tramo 1 de tiempo.	67
Fig. 4-30. Irradiancia, Voltaje y Corriente de fase (a-b) en tramo 2 de tiempo.	68
Fig. 4-31. Presiones y Caudal del SBFV en tramo 2 de tiempo.....	69
Fig. 4-32. Velocidad y Torque estimados de la bomba de agua en tramo 2 de tiempo.	69
Fig. 4-33. Potencia de entrada, mecánica e hidráulica del SBFV en el tramo 2 de tiempo.	70
Fig. 4-34. Irradiancia, Voltaje y Corriente de fase (a-b) en tramo 3 de tiempo.	71
Fig. 4-35. Presiones y Caudal del SBFV en tramo 3 de tiempo.....	72
Fig. 4-36. Velocidad y Torque estimados de la bomba de agua en tramo 3 de tiempo.	72
Fig. 4-37. Potencia de entrada, mecánica e hidráulica del SBFV en el tramo 3 de tiempo.	73
Fig. 4-38. Irradiancia, Voltaje y Corriente de línea de la fase A en tramo 1 de tiempo.	74
Fig. 4-39. Presiones y Caudal del SBFV en tramo 1 de tiempo.....	75
Fig. 4-40. Velocidad y Torque estimados de la bomba de agua en tramo 1 de tiempo.	76
Fig. 4-41. Potencia de entrada, mecánica e hidráulica del SBFV en el tramo 1 de tiempo.	76
Fig. 4-42. Irradiancia, Voltaje y Corriente de línea de la fase A en tramo 2 de tiempo.	77
Fig. 4-43. Presiones y Caudal del SBFV en tramo 2 de tiempo.....	78
Fig. 4-44. Velocidad y Torque estimados de la bomba de agua en tramo 2 de tiempo.	78
Fig. 4-45. Potencia de entrada, mecánica e hidráulica del SBFV en el tramo 2 de tiempo.	79
Fig. 4-46. Irradiancia, Voltaje y Corriente de línea de la fase A en tramo 3 de tiempo.	80
Fig. 4-47. Presiones y Caudal del SBFV en tramo 3 de tiempo.....	81
Fig. 4-48. Velocidad y Torque estimados de la bomba de agua en tramo 3 de tiempo.	81
Fig. 4-49. Potencia de entrada, mecánica e hidráulica del SBFV en el tramo 3 de tiempo.	82
Fig. 4-50. Irradiancia, Voltaje y Corriente de fase (a-b) en tramo 1 de tiempo.	83
Fig. 4-51. Presiones y Caudal del SBFV en tramo 1 de tiempo.....	84
Fig. 4-52. Velocidad y Torque estimados de la bomba de agua en tramo 1 de tiempo.	85
Fig. 4-53. Potencia de entrada, mecánica e hidráulica del SBFV en el tramo 1 de tiempo.	85
Fig. 4-54. Irradiancia, Voltaje y Corriente de fase (a-b) en tramo 2 de tiempo.	86
Fig. 4-55. Presiones y Caudal del SBFV en tramo 2 de tiempo.....	87
Fig. 4-56. Velocidad y Torque estimados de la bomba de agua en tramo 2 de tiempo.	87
Fig. 4-57. Potencia de entrada, mecánica e hidráulica del SBFV en el tramo 2 de tiempo.	88
Fig. 4-58. Irradiancia, Voltaje y Corriente de fase (a-b) en tramo 3 de tiempo.	89

Fig. 4-59. Presiones y Caudal del SBFV en tramo 3 de tiempo.....	90
Fig. 4-60. Velocidad y Torque estimados de la bomba de agua en tramo 2 de tiempo.	90
Fig. 4-61. Potencia de entrada, mecánica e hidráulica del SBFV en el tramo 2 de tiempo.	91
Fig. 4-62. Eficiencias de las pruebas de día completo de operación del SBFV.....	97
Fig. A-1. Sistema de llenado automatizado que se encuentra en el laboratorio de UCSC.	104
Fig. A-2. Sistema de control para el llenado automatizado que se encuentra en el laboratorio de la UCSC.	105
Fig. A-3. Sensor de caudal magnético Yokogawa ADMAG modelo AXF025G.	105
Fig. A-4. Acoplamiento del sensor de caudal IFM SA5000 al sistema.	106
Fig. A-5. Gráfico comparativo entre el caudal obtenido por el sensor Yokogawa y el IFM (configurado con un diámetro 25mm).	107
Fig. A-6. Gráfico comparativo entre el caudal obtenido por el sensor Yokogawa y el IFM (configurado con un diámetro 26mm).	107
Fig. B-1. Transformación de coordenadas abc a qd0.	110
Fig. B-2. Modelo híbrido implementado en Simulink.	111
Fig. B-3. BEMF-MRAS implementado en Simulink.....	112
Fig. C-1. Irradiancia del día 17 de enero del 2023.....	113
Fig. C-2. Irradiancia del día 24 de enero del 2023.....	114
Fig. C-3. Irradiancia del día 23 de marzo del 2023.....	114
Fig. C-4. Irradiancia del día 24 de marzo del 2023.....	115
Fig. D-1. Voltajes de línea – neutro de la prueba del día 17 de enero, 2023.	116
Fig. D-2. Corrientes de línea de la prueba del día 17 de enero, 2023.	117
Fig. D-3. Voltajes de fase de la prueba del día 24 de enero, 2023.....	117
Fig. D-4. Corrientes de fase de la prueba del día 24 de enero, 2023.	118
Fig. D-5. Voltajes de línea – neutro de la prueba del día 23 de marzo, 2023.	118
Fig. D-6. Corrientes de línea de la prueba del día 23 de marzo, 2023.	119
Fig. D-7. Voltajes de fase de la prueba del día 24 de marzo, 2023.....	119
Fig. D-8. Corrientes de fase de la prueba del día 24 de marzo, 2023.	120

Nomenclatura

$i_{ds}^s; i_{qs}^s$	: corrientes de estator en ejes qd en el marco de referencia estacionario.
$i_{dr}^s; i_{qr}^s$	: corrientes de rotor en ejes qd en el marco de referencia estacionario.
$v_{ds}; v_{qs}$	: voltaje de estator en eje qd en el marco de referencia estacionario.
L_s	: inductancia de estator.
L_r	: inductancia de rotor.
L_m	: inductancia de magnetización.
R_s	: resistencia de estator.
T_r	: constante de tiempo rotor.
T_s	: constante de tiempo estator.
ω_r	: velocidad actual del rotor.
$\hat{\omega}_r$	: velocidad estimada del rotor.
$\lambda_{ds}^s; \lambda_{qs}^s$	: enlace de flujo del estator en el marco de referencia estacionaria.
$\lambda_{dr}^s; \lambda_{qr}^s$	: enlace de flujo del rotor en el marco de referencia estacionaria.
σ	: reactancia de fuga total.
T_e	: torque eléctrico
$e_{md}; e_{mq}$	: fuerza contraelectromotriz inducida actual.
$\hat{e}_{md}; \hat{e}_{mq}$	: fuerza contraelectromotriz inducida estimada.

Abreviaciones

SBFV	: Sistema de bombeo fotovoltaico
MPPT	: Seguimiento del punto de máxima potencia (Maximum power point tracking)
CC	: Corriente Continua
CA	: Corriente Alterna
M.I.	: Motor de inducción
MRAS	: Model Reference Adaptive System
ISFOC	: Indirect Stator Flux Oriented Controlled
VDF	: Variador de Frecuencia
UCSC	: Universidad Católica de la Santísima Concepción
MIJA	: Motor de inducción Jaula de Ardilla

1. Introducción

Los sistemas de bombeo fotovoltaicos (SBFV) son una buena alternativa a sistemas de bombeos tradicionales que son alimentados ya sea por la red eléctrica o por combustibles fósiles como el Diesel. Los SBFV unen diversas áreas de la ingeniería como la ingeniería eléctrica, mecánica, electrónica, entre otras. Al ser su naturaleza tan multidisciplinaria la hace un tema interesante de investigación y desarrollo para poder realizar sistemas más eficientes y menos costosos para satisfacer la demanda de agua para consumo doméstico, ganadero o de riego [1].

Actualmente el uso de energías generadas por combustibles fósiles ha causado problemas ambientales graves como las lluvias acidas y el calentamiento global. La temperatura promedio global en el 2021 es 1° Celsius superior con respecto al año 1901, lo cual es bastante significativo si tomamos en cuenta la enorme capacidad calórica de los océanos [2].

Los módulos fotovoltaicos convierten la irradiancia solar en energía eléctrica y son claves para superar la crisis ambiental presentada en el anterior párrafo, Al combinar esta forma de generación energética con sistemas de bombeo de agua sustentable, considerando que el agua es un recurso clave para el ser humano y la industria agrícola.

El presente trabajo consiste en montar un SBFV usando la red fotovoltaica instalada en la Universidad Católica de la Santísima Concepción. para evaluar el desempeño del sistema frente a la bomba de agua configurada con conexión delta y estrella, además de diferentes cantidades de módulos fotovoltaicos para energizar el SBFV.

1.1 Componentes de un SBFV

El esquema estructural de los SBFV se muestra en la Fig. 1-1, la cual cuenta con tres sistemas principales el fotovoltaico, control de potencia y electromecánico que contiene el motor y la bomba de agua.

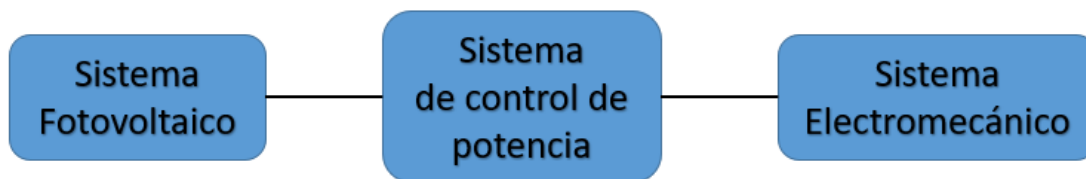


Fig. 1-1. Esquema estructural de un SBFV.

1.1.1 Sistema Fotovoltaico

El sistema fotovoltaico se compone por un número de string y paneles fotovoltaicos, siendo un string un conjunto de paneles fotovoltaicos conectados en serie que pueden a su vez ser conectados en paralelos para formar un sistema de mayor potencia. El número de paneles en un string dependerá de la tensión deseada para hacer funcionar el SBFV. Estos paneles solares van montados en una estructura que puede ser fija o con seguimiento solar ya sea de un eje o dos ejes, lo cual permitirá un mayor rendimiento del sistema fotovoltaico.

1.1.2. Sistema de Control de potencia

En general, el sistema de control de potencia se compone de un inversor, controlador de carga y una unidad de almacenamiento de energía (si se requiere que el sistema funcione en momentos de baja radiación solar), etc. Este tipo de sistema también cuenta con un algoritmo MPPT (Maximum power point tracking) el cual ayuda a maximizar la eficiencia y la producción de energía.

El objetivo del algoritmo MPPT es hacer coincidir la impedancia de carga del panel solar con la impedancia de carga del sistema, lo que permite que el panel solar opere en su punto de máxima potencia, esto se logra ya que el algoritmo rastrea continuamente la tensión y corriente del panel solar y ajusta la impedancia de carga del sistema para maximizar la producción de energía. Esto significa que, incluso en condiciones de poca luz solar, el algoritmo MPPT puede hacer ajustes precisos y permitir que el panel solar opere de manera óptima.

El componente principal de este sistema es el inversor el cual transforma la corriente continua generada por los paneles en corriente alternas para permitir el uso de esta energía en los componentes que funcionan con CA como lo es la bomba de agua utilizada en este trabajo.

El sistema puede contar con un sistema de almacenamiento de energía pero para el trabajo realizado no se utilizó ningún almacenamiento, esto se vera mas a fondo en el capítulo 2 del informe.

1.1.3 Sistema Electromecánico

El sistema electromecánico del SBFV está compuesto por el motor y la bomba. El motor recibe la energía eléctrica y la transforma en energía mecánica, mientras que la bomba recibe esta energía mecánica y la transforma en energía hidráulica. En el mercado actual existen diferentes tipos de bombas y se clasifican según su tipo de alimentación y su tipo de uso. Para los SBFV principalmente se usan 3 tipos de bombas las cuales son sumergibles, centrifugas y de desplazamiento positivo. Estas se seleccionan según el flujo de agua requerido, la altura, entre otras condiciones.

Las bombas sumergibles pueden elevar el agua hasta 40 metros y ofrecen un alto flujo, además de no sufrir problemas de cavitación que consiste en la formación de burbujas en las zonas de baja presión. Al estar sumergidas este tipo de bombas tienen una vida útil menor que las otras, también su mantención es difícil porque se dificulta el acceso a esta. Las bombas centrifugas funcionan en condiciones de baja altura (inferiores a 100 metros), pero entrega un flujo elevado, su potencia de aspiración también es baja por lo cual se necesita cebado y pueden sufrir de cavitación. Finalmente tenemos las bombas de desplazamiento positivo las cuales se usan cuando la altura dinámica total es elevada, ya que tienen una potencia de succión elevada, pero entregan bajo nivel de flujo de agua. Resumiendo, en los SBFV la potencia y tipo de bomba se selecciona dependiendo de la altura a la que se desea llevar el agua y el flujo requerido.

1.2 Trabajos Previos

La revisión bibliográfica se clasificará en dos ítems, el primero es la información que da contexto del trabajo como donde pueden ser aplicados los SBFV y los factores a tomar en cuenta. El segundo ítem son los Modelos Dinámicos del motor de inducción y estimadores de variables como la velocidad mecánica y el torque eléctrico. En el ítem de información de contexto nos ayudara a ver los estudios que se realizaron sobre las problemáticas y contexto actuales a nivel nacional e internacional sobre asuntos como el calentamiento global y la agricultura que son los dos puntos más importantes donde un SBFV puede ayudar. El segundo ítem es importante ya que para poder estimar la velocidad y torque de un M.I. hay que comprender las variables que forman parte en el proceso de funcionamiento del motor como por ejemplo los voltajes, las corrientes, los flujos, etc.

1.2.1 Información de Contexto

♣ Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, "Agricultura Chilena: Reflexiones y Desafíos al 2030", ODEPA, Santiago, 2017, [3].

Este análisis nos sirve para ponernos en contexto a nivel país sobre la agricultura, el cual es uno de los principales puntos donde puede ayudar los SBFV. El informe proporciona detalles sobre la situación actual de la agricultura en Chile, examinando su perspectiva económica y social, así como su proyección para el año 2030. El documento también plantea los desafíos y las políticas necesarias para duplicar las exportaciones de alimentos y productos forestales para ese año en particular.

♣ Foster R, Cota A. Solar water pumping advances and comparative economics. Energy Procedia 2014, [4].

Documento el cual habla sobre los avances de los SBFV y hace comparativa económica con un sistema de bombeo alimentado a través de combustibles fósiles, donde el costo de los SBFV se han reducido 2/3 mientras que los precios de los combustibles han aumentado más del 250% desde los años 2000 hasta la fecha donde se escribió el documento mencionado, además se presenta un caso de estudio de un sistema de estación Torres en Sonora, México el cual tiene más de 20 años de funcionamiento, por lo que el documento llega a la conclusión de que los SBFV son fiables y asequibles para aumentar la productividad agrícola y que puede ser comercializados para ayudar en la agricultura en países menos desarrollados.

♣ Haidar Islam. Performance Evaluation of Maximum Power Point Tracking Approaches and Photovoltaic Systems. Energy 10.3390/en11020365, [5].

En este artículo se habla de los sistemas fotovoltaicos y además se compara los atributos de diferentes tipos de algoritmos MPPT como por ejemplo el de conductancia incremental, técnica de perturbación y observación, entre otros. Estos se realicen en condiciones normales y de sombreado parcial en los paneles solares, también se realiza una evaluación del rendimiento, se analizan las tecnologías de módulos fotovoltaicos adecuados, los efectos atmosféricos en los paneles fotovoltaicos,

la complejidad del diseño y el número de módulos FV. Es importante saber sobre los temas tratados en el documento ya mencionado debido a que afectan al rendimiento en un SBFV.

♣ Gouws R, Lukhwareni T. Factors influencing the performance and efficiency of solar water pumping systems: a review. *International Journal of Physical Sciences* 2012, [6].

En el artículo se analizan los factores que influyen en la eficiencia y rendimiento en los SBFV tales como las condiciones ambientales donde incluyen la irradiación solar, los datos meteorológicos, la masa del aire y la radiación indirecta la cual es la radiación reflejada por la superficie de la tierra. Otro de los factores que se estudia son los paneles solares como el material por el cual está construido ya sea en este caso policristalino o monocristalino, también el ángulo de inclinación y Acimut de los paneles los cuales en el estudio se enfoca mayormente en Sudáfrica y además las características de las celdas fotovoltaica observando las curvas de corriente – voltaje (I-V) y potencia – voltaje (P-V). Finalmente, los otros factores influyentes que se analizan en el documento son controladores (MPPT, controladores de carga y otros controladores), convertidores e inversores (tales como convertidores DC-DC Buck/Boost e inversores DC-AC) y bombas/motores (Bombas Borehole de DC y las que nos importan para el trabajado realizado, ya que es la que se utilizará en el proyecto que son las bombas AC).

♣ Chandel SS, Naik MN, Chandel R. Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2015, [7].

En este documento se centra en una revisión bibliográfica exhaustiva de la tecnología de los SBFV para el riego y el abastecimiento de agua en lugares remoto, hace un estudio en cuando al rendimiento de los sistemas como también la viabilidad económica de estos en los escenarios planteados anteriormente. Al final el texto llega a la conclusión de que los SBFV son una alternativa confiable y viables económicamente para el riego al compararlo con los sistemas alimentados con combustible fósiles, son además viables para el abastecimiento en zonas rurales remotas, pero no está muy popularizado y que hay que prestar especial atención en los lugares donde no hay red eléctrica, donde estos sistemas pueden brillar aún más.

♣ Morales Silva A. A. (2019), Estimación de Torque y Velocidad para Monitoreo de Condiciones en Bombas Alimentadas con Variadores de Frecuencia Solares. [Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil Eléctrico]. Universidad Católica de la Santísima Concepción, [8].

Este documento abarca la base para la puesta en marcha del SBFV montado en el laboratorio de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, el cual es el ocupado para la realización del presente informe de tesis. En el documento consta de una evaluación experimental para la estimación de torque y velocidad donde se utiliza un motor de inducción (Motor Marelli Motori MAQ 132 SB2) el cual representa a una bomba trifásica en un sistema de bombeo, este motor es alimentado y controlado a través de un variador de frecuencia trifásico (Parker AC690+) el cual ayudara a hacer pruebas en el motor en diferentes velocidades. Para obtener las variables eléctricas como corriente y voltaje utiliza sondas conectada a MicroLabBox DS1202 el cual es un dispositivo que ayuda a procesar señales en tiempo real, una vez obtenidas los voltajes y corrientes usa observadores para poder estimar el torque y la velocidad, para obtener la estimación de torque se utilizó un observador de estimación de flujo mediante el modelo híbrido y la estimación de velocidad se utilizó un observador MRAS con corrección de efecto deriva.

1.2.2 Modelos Dinámicos del motor de inducción y estimadores.

♣ Vas, P. (1998). Sensorless Vector and Direct Torque Control, Oxford University Press, [9].

En este libro se analizan los accionamientos que se controlan mediante control vectorial sin sensores y los motores con control directo de torque. En particular, se enfoca en el motor de inducción y describe modelos de estimación de velocidad y torque. El análisis se basa en una detallada teoría de vectores espaciales, utilizando enfoques matemáticos y físicos siempre que sea posible.

La obra presenta más de veinte unidades vectoriales, junto con cinco tipos de accionamientos vectoriales basados en MRAS y once tipos de accionamientos controlados mediante control directo de torque (DTC). Entre los modelos de estimación de flujo (corriente, voltaje e híbridos) utilizados en este trabajo, se destacan los modelos clásicos.

En resumen, el libro proporciona una revisión exhaustiva de la teoría y práctica de los accionamientos controlados por vectores sin sensores y motores controlados por torque directo, específicamente enfocados en el motor de inducción. También ofrece una amplia gama de modelos de estimación de velocidad y torque, que utilizan diversos enfoques matemáticos y físicos.

♣ Agrebi Zorgani, Y., Koubaa, Y. & Boussak, M. (2010). Simultaneous Estimation of Speed and Rotor Resistance in Sensorless ISFOC Induction Motor Drive Based on MRAS Scheme. The XIX International Conference on Electrical Machine – ICEM 2010, [10].

En el estudio se propone un enfoque para estimar la velocidad y resistencia del rotor en un accionamiento de motor de inducción convencional, controlado por ISFOC. Se ha desarrollado un algoritmo de adaptación utilizando el esquema del sistema MRAS, que se basa en modelos de referencia y ajustables. Estos modelos se han creado en el marco de referencia del estator estacionario, y se utiliza el MRAS para calcular tanto la velocidad del rotor como la resistencia del rotor a partir de mediciones de voltaje y corriente en los terminales. Se han realizado simulaciones que demuestran la precisión del método de estimación de velocidad y resistencia del rotor para una velocidad de referencia del accionamiento del motor de inducción con un torque a carga nominal.

♣ Haron, A. R. & Idris, N. R. N. (2006). Simulation of MRAS-based Speed Sensorless Estimation of Induction Motor Drives using MATLAB/SIMULINK. IEE International Power and Energy Conference, 411-415, [11].

El documento se enfoca en el uso del sistema adaptativo de referencia de modelo (MRAS) para la estimación de la velocidad del rotor. Se utilizan dos modelos diferentes (el modelo de referencia y el modelo ajustable) para comparar y obtener un vector de error que se utiliza como retroalimentación para la estimación de la velocidad del rotor. También se compara el rendimiento de dos esquemas MRAS diferentes, el MRAS de flujo de rotor y el MRAS basado en back e.m.f. para la estimación de la velocidad del rotor. Ambos esquemas utilizan ecuaciones del estator y del rotor como modelos de referencia y ajustables, respectivamente. El error se ajusta mediante un controlador PI, proporcionando la velocidad estimada.

Para probar los estimadores, se realizó una simulación en MATLAB/Simulink, utilizando una máquina de inducción de control directo de torque. Como resultado, se concluye que el BEMF-MRAS es un estimador versátil con una buena capacidad de seguimiento y una excelente insensibilidad a las variaciones de los parámetros.

- ♣ Bose, B. K. (2002). Modern Power Electronics and AC Drivers, Prentice Hall, [12].

En este libro, el autor aborda diversos temas relacionados con la electrónica de potencia, y uno de los temas de mayor interés es la estimación de parámetros eléctricos para motores de inducción. Para ello, se utilizan los modelos dinámicos del motor de inducción jaula de ardilla y los estimadores de flujo, torque y velocidad como referencia.

1.2.3 Discusión

En la revisión bibliográfica realizada se dividió en dos ítems en el cual el primer apartado 1.2.1 del capítulo ayuda a poner en contexto en donde el tema puede ser utilizado como lo es la agricultura y el abastecimiento de agua en áreas remotas, como también nos pone en contexto en la fiabilidad económica y los factores que influyen para lograr un mejor rendimiento en los SBFV.

En el apartado 1.2.2 se hace revisión de los documentos centrados en los métodos de estimación de variables de un motor de inducción, como la estimación de flujo por medio de modelos de estimación de voltaje, corriente e híbrido (con los cuales se estima el torque) y también la estimación de la velocidad por la técnica MRAS donde uno de los artículos se centra en poner en práctica este método para ver la confiabilidad de este.

1.3 Objetivos

A continuación, se mencionarán los objetivos generales y específicos que se abordan en este proyecto de habilitación profesional.

1.3.1 Objetivo General

Evaluar el rendimiento de un sistema de bombeo fotovoltaico con énfasis en la medición y estimación de las variables electromecánicas del motor de la bomba, bajo distintas condiciones de operación

1.3.2 Objetivos Específicos

- Evaluar observadores de estimación de velocidad para los motores de inducción utilizando BEMF-MRAS.
- Puesta en marcha de sistema de bombeo fotovoltaico con sistema de monitoreo y registro de datos.

- Analizar pruebas de días completos de operación del SBFV con la bomba conectada en delta y en estrella.
- Analizar y estimar las variables del SBFV, tales como torque eléctrico, velocidad, caudal, considerando distintas potencias de paneles FV.

1.4 Alcances y Limitaciones

Este Trabajo de habilitación profesional se centra en el montaje de un sistema de bombeo fotovoltaico que incluye un sistema de monitoreo y registros de variables utilizando sensores disponibles como lo son el sensor de caudal y los sensores de presión, para procesar las señales obtenidas por los sensores se utilizó la Dspace MicroLabBox 1202. También se realiza la estimación del torque eléctrico y la velocidad del motor utilizando algoritmos de estimación como el MRAS. Para el funcionamiento de estos algoritmos es necesario obtener el voltaje y corriente de estator del motor que se encuentra en la bomba de agua por medio de sondas de voltaje y corriente. Además, el trabajo no contará con un sistema de almacenamiento de energía y en las pruebas del SBFV solo se utilizará una bomba de agua del tipo centrifuga marca Pentax CMT 100/00, un inversor de marca ABB y módulos fotovoltaicos Jinko jkm270pp-60 los cuales se encuentran disponibles en la UCSC.

1.5 Temario y Metodología

En el primer capítulo de este trabajo, se introduce el proyecto de habilitación profesional planteando con los objetivos a cumplir además de sus alcances y limitaciones. Además, se presenta una revisión bibliográfica la cual es la principal fuente teórica para entender el contexto y poder afrontar el trabajo del proyecto. Esta revisión bibliográfica abarca documentos, trabajos y libros sobre agricultura nivel país, viabilidad de los SBFV y observadores de estimación de flujo, torque eléctrico y velocidad en un motor de inducción.

En el capítulo 2, se describe cada parte del sistema de bombeo fotovoltaico que fue montado para realizar este trabajo. Este SBFV se compone de un sistema fotovoltaico, un sistema de control de potencia y una bomba de agua (motor de inducción trifásico).

En el capítulo 3, se define las variables que serán registradas en el sistema de registro y monitoreo, además se realiza una descripción del funcionamiento de los diferentes sensores con los cuales estaremos obteniendo estas variables. Además, se realiza una descripción de los modelos de estimación de torque eléctrico y velocidad (Modelo de voltaje, Modelo de corriente, Modelo Híbrido, MRAS y BEMF-MRAS).

En el cuarto capítulo se exponen los resultados experimentales realizados en las pruebas de día completo de funcionamiento del SBFV con la bomba de agua configurada en delta y en estrella. Y finalmente en el capítulo 5 se plantean las conclusiones, donde se realizaron observaciones y comparaciones de los resultados experimentales obtenidos en el capítulo anterior.

Las actividades que conforman la metodología del trabajo realizado se resumen de la siguiente manera:

La revisión bibliográfica nos entrega el contexto del proyecto y así plantear los objetivos, alcances y limitaciones del trabajo, luego de realizar la búsqueda y revisión de documentos relacionados a situación hídrica, energías renovables, bombas de agua, métodos de estimación de torque y velocidad, Se procedió a describir los que tengan una mayor relevancia para el proyecto.

Una vez terminada la revisión bibliográfica se elabora el montaje del SBFV además del sistema de monitoreo y adquisición de datos, para esto se procedió a configurar los distintos sensores utilizados. También se realizó el marco teórico donde se da a conocer las diferentes piezas que componen el SBFV, las ecuaciones que conforman el modelo dinámico de la máquina de inducción se dan a conocer la transformación a ejes de coordenadas bifásicas, se presentan los modelos de estimación de torque y velocidad.

Luego se procedió a realizar pruebas cortas para poder cerciorarse del correcto funcionamiento de los modelos de estimación y poder configurar el acondicionamiento y filtrados de señales, una vez elegido los filtros, se realizaron las pruebas de día completo de operación y analizando los resultados obtenidos por estas pruebas. En base al trabajo realizado y los resultados del proyecto, se definen posibles actividades futuras que se pueden realizar a partir de la conclusión del trabajo.

2. Sistema de Bombeo Fotovoltaico

2.1 Introducción

Los sistemas de bombeo fotovoltaicos son una tecnología innovadora y sostenible que se utiliza para obtener agua en lugares donde el suministro eléctrico es limitado o inexistente. Este tipo de sistema puede ser utilizado para una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo el riego agrícola, el suministro de agua potable en zonas remotas, el llenado de piscinas, entre otras.

El sistema de bombeo fotovoltaico está compuesto por tres partes principales: el sistema fotovoltaico, el sistema de control de potencia y el sistema electromecánico. El sistema fotovoltaico se encarga de captar la energía del sol y convertirla en electricidad a través de paneles solares. El sistema de control de potencia se encarga de la conversión de CC a CA realizada por el inversor y que se utiliza para alimentar la bomba de agua. Por último, el sistema electromecánico se encarga de impulsar el agua desde el pozo o fuente de agua hacia su destino final.

Estos sistemas de bombeo fotovoltaicos ofrecen numerosas ventajas, como la reducción del costo operativo y la eliminación de la dependencia de combustibles fósiles. Además, son una solución sostenible y respetuosa con el medio ambiente, ya que no emiten gases de efecto invernadero.

Para este proyecto de habilitación profesional se montó un sistema de bombeo fotovoltaico como se muestra en la figura 2-1. En la figura 2-1 el dispositivo designado con el número 1 es el sensor de caudal marca IFM, el número 2 es el sensor de presión de impulsión encargado de medir la presión del agua de salida de la bomba de agua, el número 3 es el sensor de presión de succión encargado de medir la presión de agua de la entrada de la bomba de agua, el número 4 es la bomba de agua centrífuga marca Pentax y el número 5 es el estanque de agua.

En este capítulo se abordan los elementos que componen cada subsistema (sistema fotovoltaico, sistema de control de potencia y sistema electromecánico) que forman parte del SBFV montado.



Fig. 2-1. Set up montado en el Laboratorio de la UCSC (1. Sensor de caudal; 2. Sensor de Presión de impulsión de agua; 3. Sensor de Presión de succión de agua; 4. Bomba de agua trifásica; 5. Estanque de agua).

2.2 Sistema Fotovoltaico

El sistema Fotovoltaico utilizado en las pruebas de este proyecto estará compuesto por dos pruebas de 10 paneles solares en serie y después se reducirá a 7 paneles en serie de marca Jinko modelo JKM270PP-60 policristalinos los cuales presentan la siguiente ficha técnica que se observan en la tabla 2-1. Estas características son en condiciones controladas de temperatura e irradiación, siendo en un laboratorio a 1000 W/m^2 y a 25°C . En la figura 2-2 se observa los paneles Jinko instalados en la UCSC los cuales será utilizados en el presenta trabajo.



Fig. 2-2. Paneles solares policristalinos (JINKO JKM270PP-60) utilizados en el proyecto.

Tabla 2-1. FICHA TÉCNICA DE PANEL SOLAR JINKO JKM270PP-60.

Características	Valor
Potencia Máxima (Pmax)	270 [W]
Voltaje a Máxima Potencia (Vmp)	31.7 [V]
Corriente a Máxima Potencia (Imp)	8.52 [A]
Voltaje a Circuito Abierto (Voc)	38.8 [V]
Corriente en Cortocircuito (Isc)	9.09 [A]
Temperatura de operación	-40°C ~ +85°C
Peso	19 [Kg]
Dimensiones	1650x992x40 [mm]

Fuente: www.jinkosolar.com

La potencia máxima (Pmax), como indica su nombre es la potencia máxima que puede generar el panel y es la potencia que determina el modelo del panel, además esta potencia se puede calcular al multiplicar Vmp por Imp.

El voltaje de máxima potencia (Vmp) en un panel fotovoltaico es el punto en el cual el panel produce la máxima cantidad de energía eléctrica posible para las condiciones de irradiancias dadas. Es decir, es el punto en la curva de corriente-voltaje (IV) donde la potencia eléctrica es máxima, además el valor de Vmp varía según las condiciones de irradiancia, la temperatura y la carga conectada al panel.

La corriente de máxima potencia (I_{mp}) en un panel fotovoltaico es el valor de corriente eléctrica que produce el panel en el punto donde se obtiene la máxima potencia eléctrica para las condiciones de irradiancia dadas. Es decir, es el punto en la curva de corriente-voltaje (IV) donde la potencia eléctrica es máxima, además el valor de I_{mp} varía según las condiciones de irradiancia, la temperatura y la carga conectada al panel.

El voltaje a circuito abierto (V_{oc}) es el que entrega el panel cuando esta desconectado, es decir, si colocamos un multímetro en los terminales de un panel que se encuentra bajo el sol y desconectado de la instalación, ese sería el voltaje que podremos medir. Este dato es importante porque se tienen que tomar en cuenta para cuando se trabaja con reguladores de carga, inversores, etc.

La corriente de cortocircuito (I_{sc}) es la intensidad que puede producir el panel fotovoltaico cuando está en cortocircuito, es decir, si conectamos la terminal positiva del panel con la negativa y usamos una pinza de medir corriente, podríamos comprobar que el valor concuerda con la de la ficha técnica.

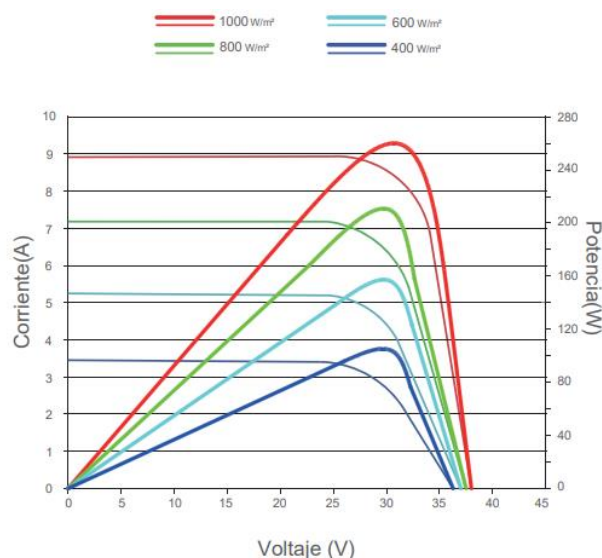


Fig. 2-3. Curvas I-V y P-V del panel JINKO JKM270PP-60 utilizado en el proyecto. Fuente: www.jinkosolar.com.

En la figura 2-3 se muestran las curvas I-V y P-V de los paneles fotovoltaicos utilizados, la curva I-V muestra la relación entre la corriente generada por el panel fotovoltaico y la tensión aplicada a través de sus terminales. Se obtiene al medir la corriente generada por el panel fotovoltaico a diferentes niveles de voltaje aplicado. La curva I-V permite determinar el punto de máxima corriente (I_{sc}), que es la corriente máxima generada por el panel en condiciones de cortocircuito (sin carga), y el punto de máxima potencia (I_{mp}), que es la corriente generada por el panel cuando la carga es

óptima. La curva P-V muestra la relación entre la potencia generada por el panel fotovoltaico y la tensión aplicada a través de sus terminales. Se calcula multiplicando la corriente generada por el panel en cada punto de voltaje por el correspondiente voltaje. La curva P-V también permite determinar el punto de máxima potencia (I_{mp} , V_{mp}), que es el punto en el que el panel fotovoltaico produce la máxima potencia. La temperatura de operación como el nombre indica es el rango de temperatura en el que el panel puede operar sin notar una disminución de eficiencia considerable, las dimensiones de un panel fotovoltaico se refieren al tamaño físico del panel en términos de su longitud, anchura y espesor. Estas dimensiones pueden variar según el fabricante y el modelo del panel.

Como se ha mencionado anteriormente, el sistema fotovoltaico utilizado cuenta con 10 paneles en serie montados en una estructura fija orientada al norte, dada esta conexión obtenemos que el voltaje de máxima potencia del sistema es de 317 [V], la corriente de máxima potencia equivale a 8.52 [A] y la potencia máxima del sistema de 2700 [kWp], después al reducir a 7 paneles solares en serie y se tendrá un voltaje de máxima potencia del sistema de 221.9 [V], corriente de máxima potencia de 8.52[A] y una potencia máxima del sistema de 1890 [kWp].

2.3 Sistema de Control de Potencia

Para SBFV con bombas de agua trifásica como es en el caso de este proyecto, es necesario convertir la energía de corriente continua (CC) generada por los módulos solares a corriente alterna (CA) trifásica, para esto se conecta la salida CC de los módulos solares a un inversor de marca ABB y la salida del inversor alimenta la bomba de agua. El inversor utilizado es un variador de frecuencia ABB modelo ACS355-03E-05A6-4 el cual tiene la opción integrada para poder ser utilizado en los SBFV, dando opciones como la marcha en seco para cuando el caudal es nulo y el mostrar el caudal en la pantalla led que cuenta el inversor.

El inversor utilizado se puede controlar localmente usando el panel de control integrado, donde hay que configurar los parámetros ingresando los datos del sistema fotovoltaico como la potencia máxima, voltaje y corriente a máxima potencia del sistema, además, se debe ingresar los datos de placa del motor y seleccionar el modo de control del motor. El inversor nos da 3 tipos de control de motor los cuales son control vectorial sin sensor, control vectorial con sensor y control escalar, siendo el último el que se utilizará para realizar este trabajo. En la Fig. 2-4 se observa el inversor junto a un diferencial tetrapolar que actúa como interruptor hacia la red eléctrica, esta configuración se utilizó en las pruebas preliminares para probar el correcto funcionamiento de los sensores utilizados en el proyecto.



Fig. 2-4. Sistema de control de potencia utilizado en el proyecto (Izquierda: inversor; Derecha: Diferencial que actúa como interruptor).

2.4 Sistema Electromecánico

El sistema electromecánico de un SBFV es el encargado de transformar la energía eléctrica en energía hidráulica para así poder trasladar el agua, este sistema cuenta con un motor el cual transforma la energía eléctrica en mecánica y la bomba hidráulica transforma la energía mecánica del motor en energía hidráulica, por lo que las bombas de aguas están compuestas por dos partes, el motor y la bomba hidráulica. La bomba de agua utilizada en el SBFV es una bomba centrífuga marca PENTAX modelo CMT 100/00 trifásica como se muestra en la figura 2-5.



Fig. 2-5. Bomba de agua (PENTAX CMT 100/00 trifásica). Fuente: www.pentax-pumps.it.

Este modelo de bomba de agua nos permite utilizarla en configuración delta y estrella, este tipo de conexiones se pueden ver en la figura 2-6.

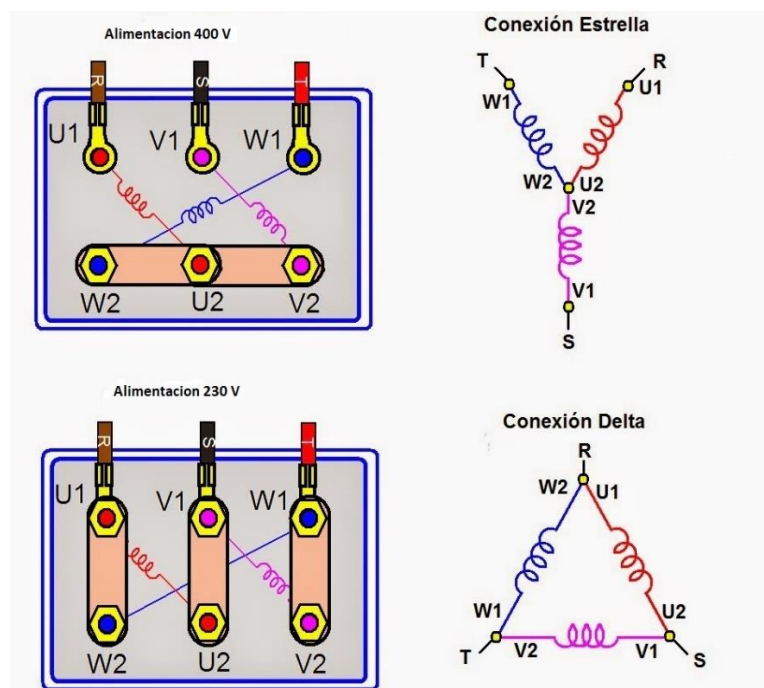


Fig. 2-6. Tipos de conexiones de la bomba PENTAX CMT 100/00. Fuente: www.pentax-pumps.it.

En el inversor marca ABB que se utilizó en el SBFV es necesario ingresarle los datos de placa de la bomba de agua y estos se encuentran expresados en la tabla 2-2, donde se observan los valores nominales de la bomba de agua, como lo son la potencia nominal, voltaje y corriente nominal en ambas configuraciones (delta y estrella), entre otros valores nominales.

Tabla 2-2. PARÁMETROS DE LA BOMBA DE AGUA PENTAX CMT 100/00.

características	Valor (delta / estrella)
Potencia Nominal	0.74 [KW]
Potencia de entrada	1.1 [KW]
Voltaje Nominal	230 / 400 [V]
Corriente Nominal	3.46 / 2 [A]
Frecuencia Nominal	50 [Hz]
Velocidad Nominal	2800 [rpm]
Caudal Máximo	90 [l/min]

El caudal máximo de la bomba varía dependiendo a la altura a la que se eleva el agua, esto se puede apreciar en la figura 2-7 donde a medida que aumenta la altura, el caudal máximo que puede alcanzar la bomba de agua disminuye (la curva del modelo de bomba de agua usada en el trabajo es la que está catalogada como “100”).

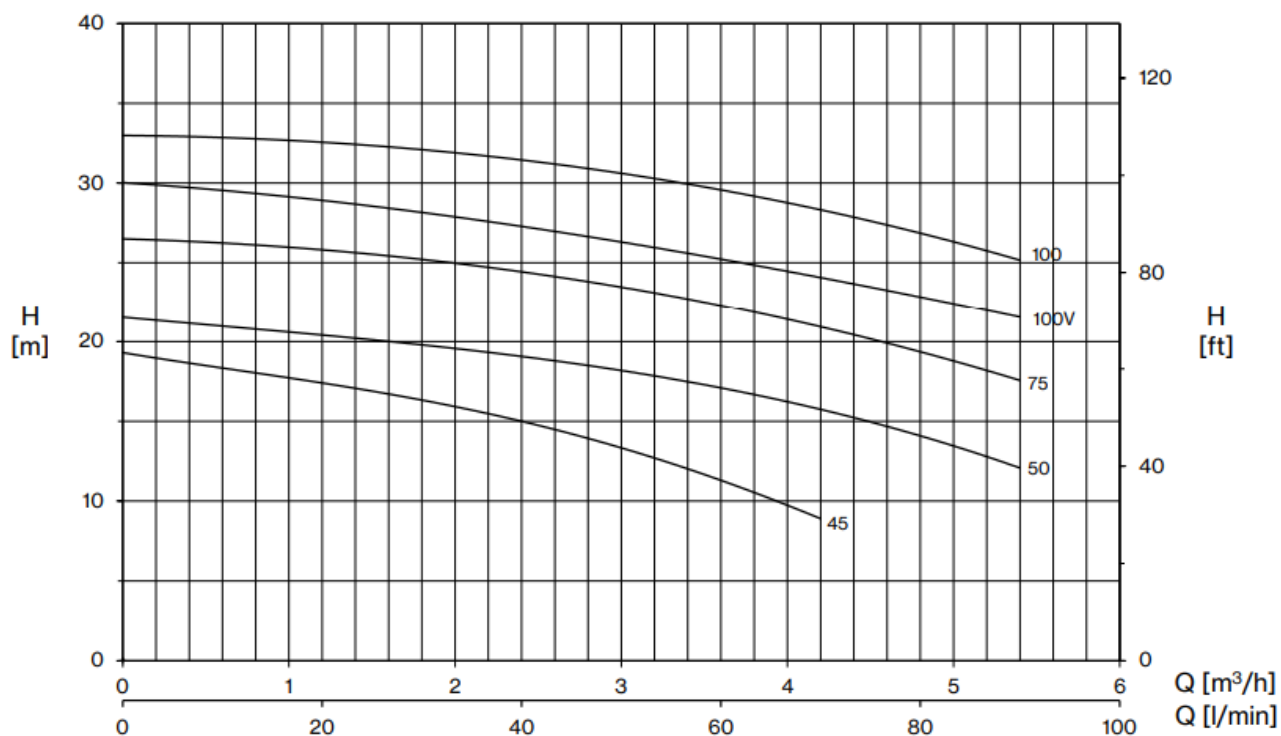


Fig. 2-7. Curva de eficiencia altura-caudal de la bomba de agua PENTAX CMT 100/00. Fuente: www.pentax-pumps.it.

3. Sistema de Registro y Monitoreo del SBFV

3.1 Introducción

En este capítulo se presenta el sistema de registro y monitoreo utilizado en el SBFV, el cual está compuesto por sensores de caudal, presión, entre otros, además, estimadores de torque y velocidad del motor. De esta manera este sistema nos permite la recopilación de datos durante el funcionamiento del SBFV.

Para el registro de datos de las señales de interés como voltaje, corriente, presiones y caudal se utiliza la plataforma Dspace MicroLabBox 1202 en conjunto de software especializados, tales como, el software Controldesk.

3.2 Esquema General

Gracias al sistema de registro y monitoreo, se puede obtener las variables de interés de tal manera de poder observarlas y trabajar con estas. Este monitoreo se realizará con sensores instalados en el SBFV, que capturan las variaciones en las presiones y en el caudal del sistema, además, se mide el voltaje y corriente del motor de la bomba de agua. Estos sensores van al procesador MicroLabBox que permite adquirir y acondicionar estas señales de interés para realizar el procesamiento de los datos para el cálculo de otras variables de interés como lo son la velocidad y torque del motor.

En la figura 3-1 se presenta un esquema general de cómo funciona el sistema de registro y monitoreo de variables de interés, donde gracias a los sensores y la MicroLabBox se obtiene las señales de interés del SBFV. Posteriormente a partir del software Matlab y Simulink se filtran estas señales para poder utilizar los observadores y estimadores para obtener otras variables de interés como el flujo, velocidad y torque. Una vez estimadas estas variables, se pueden mostrar y graficar las variables que se señalan en la interfaz gráfica.

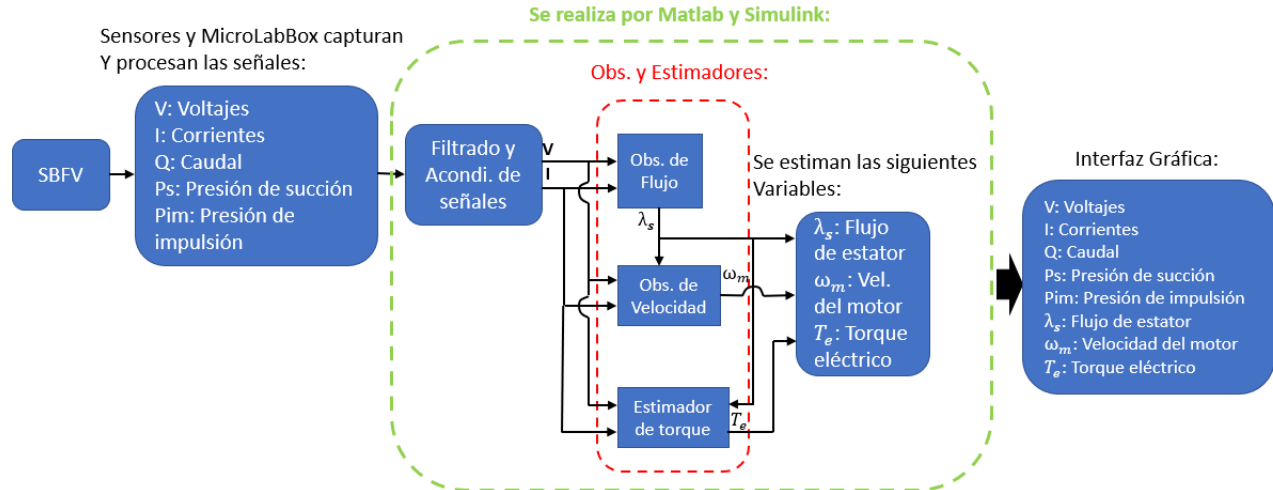


Fig. 3-1. Diagrama general del sistema de registro y monitoreo de variables.

3.3 Dispositivo de adquisición y procesamiento de datos

El dispositivo que se utilizó es la Dspace MicroLabBox 1202 que se muestra en la figura 3-2, el cual permite la adquisición de datos y control en tiempo real en aplicaciones de ingeniería. El dispositivo cuenta con entradas y salidas analógicas y digitales, así como con un procesador integrado para realizar cálculos en tiempo real. La Dspace MicroLabBox 1202 es un sistema de adquisición de datos compacto y versátil que se utiliza ampliamente en aplicaciones de control, simulación y pruebas en una variedad de campos. En la tabla 3-1 se detalla el número de entradas análogas, niveles de voltaje tolerable para la lectura de sensores, parámetros de operación y componentes del procesador MicroLabBox.



Fig. 3-2. Dspace MicroLabBox 1202.

Tabla 3-1. ESPECIFICACIONES DSPACE MICROLABBOX 1202.

Parámetros	Valor
Alimentación	220 [V]
Frecuencia	50 [Hz]
Memoria RAM	1 [Gb]
Procesador	Dual-Core de 2 GHz
I/O digitales	48 canales (2.5/3.3/5) V
Salidas analógicas	16 canales ($\pm 10V$, $\pm 8mA$)
Entradas analógicas	24 canales ($\pm 10V$)

Dentro de los paquetes de software Dspace que son compatibles con el procesador MicroLabBox, se encuentra ControlDesk 6.1, el cual brinda acceso a la aplicación en tiempo real durante el desarrollo del trabajo, así como también el Real-Time Interface (RTI) para Simulink para la integración de modelos. ControlDesk 6.1 ofrece la posibilidad de trabajar online o de guardar los datos para su posterior procesamiento offline. De esta manera, se tiene la flexibilidad de trabajar en tiempo real o procesar los datos en un momento posterior, según sea necesario.

3.4 Sensores de presión y caudal

Los sensores implementados en el sistema ayudan a recopilar datos de la presión de succión e impulsión de la bomba de agua como también el caudal del sistema. Cada sensor será descrito especificando sus parámetros, configuraciones y montaje.

3.4.1 Sensores de Presión

Para realizar la medición de las presiones de impulsión y succión del sistema, se utilizaron dos transmisores de presión de marca WIKA modelo A-10, este es un dispositivo electrónico utilizado en aplicaciones industriales debido a su construcción resistente y duradera para soportar condiciones ambientales difíciles y una variedad de aplicaciones industriales. En la tabla 3-2 se presenta las principales características del sensor WIKA modelo A-10.

Tabla 3-2. PARÁMETROS DEL SENSOR WIKA MODELO A-10.

Parámetros	Valor
Alimentación	14-30 VDC
Señal de salida	0-10 VDC / 4-20mA / 0-5VDC
Rango de medición	0-10 bar
Tiempo de respuesta	<4 ms
Sobrepresión momentánea	20 bar

**Fig. 3-3. Sensor de Presión WIKA modelo A-10.**

Como se observa en la tabla 3-1 el sensor cuenta con 3 señales de salida y uno puede seleccionar la que más acomode, se utilizó la señal de 0-10 VDC ya que se ajusta a los parámetros tolerados en la Dspace MicroLabBox 1202.

Como se aprecia en la figura 2-1 se implementaron 2 sensores de presión, uno para medir la presión de succión de agua que se produce en el sistema y la otra para medir la presión de impulsión del agua en el sistema. Para la implementación de los sensores se utilizó una unión Tee de PVC 32mm, además de un bushing para llegar a la medida de acoplamiento del sensor la cual es 1/4", esto se observa en la figura 3-4.



Fig. 3-4. Sensor de Presión WIKA modelo A-10 instalado en el SBFV.

Se realizó una prueba preliminar a los sensores de presión una vez montados y conectados a la MicroLabBox, donde se utilizó el software ControlDesk 6.1 para guardar y monitorear las señales entregadas por los sensores. La prueba consistió en poner a funcionar el sistema de bombeo de agua, la bomba de agua fue configurada en estrella y VDF (que será nuestro inversor cuando se conecte al sistema fotovoltaico) fue alimentado por la red eléctrica en vez del sistema fotovoltaico, el VDF se configuró con un control escalar y con una frecuencia de 50Hz para trabajar en los valores nominales de la bomba de agua.

En las figuras 3-5 y 3-6 se puede ver las presiones censadas por los sensores contienen ruido de alta frecuencia, por lo cual es necesario aplicar un filtro pasa bajo para disminuir considerablemente el ruido de la señal. Se utilizó un filtro con una frecuencia de corte de 5 Hz y de 50 Hz. Al utilizar el filtro de 50 Hz se observa que la señal se observa una disminución considerable del ruido en la señal, al igual que en el filtro de 5 Hz, pero en este ultimo la disminución es mayor, por lo cual se utilizó para las mediciones finales.

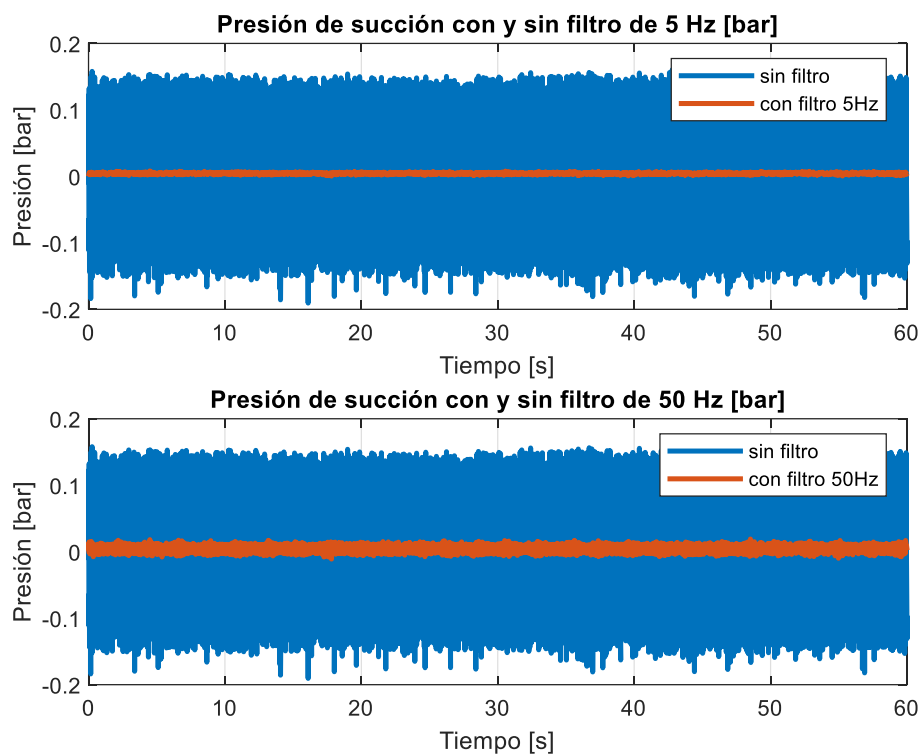


Fig. 3-5. Prueba del Sensor de presión de succión.

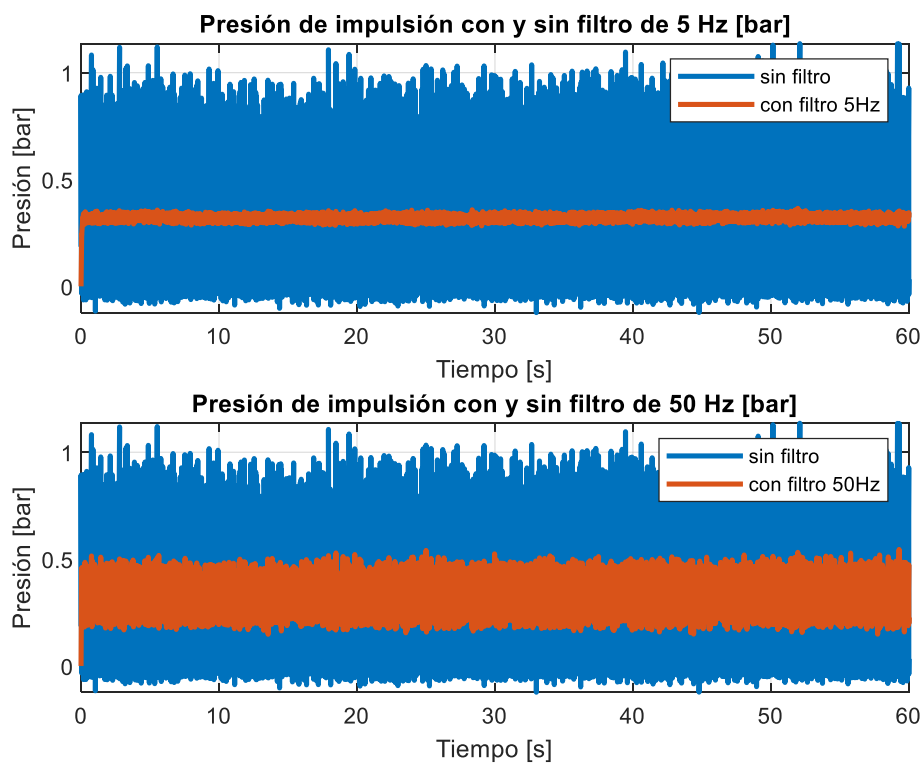


Fig. 3-6. Prueba del Sensor de presión de impulsión.

3.4.2 Sensor de Caudal

En el SBFV se implementó un sensor de caudal para medir el flujo de agua que es bombeado por este. Se utilizó el sensor de caudal de marca IFM modelo SA5000, este dispositivo mide el caudal según el principio de medición calorimétrico. Este dispositivo es utilizado es una solución confiable y precisa para la medición de caudal en tuberías y es adecuado para su uso en una amplia gama de aplicaciones industriales. En la tabla 3-3 se presenta las características del Sensor de caudal.

Tabla 3-3. PARÁMETROS DEL SENSOR IFM SA5000.

Parámetros	Valor
Alimentación	18-30 VDC
Números de salidas digitales	2
Números de salidas análogas	1
Salida análoga	4-20 mA (escalable)
Fluidos	agua; soluciones de glicol; Aire; aceites



Fig. 3-7. Medidor de sensor IFM SA5000.

Como se ve en la tabla 3-3 el dispositivo cuenta con 3 salidas en total, 2 de estas son digitales y una es analógica. Se utilizaron las salidas analógicas para conectarla a la Dspace MicroLabBox 1202 pero nos encontramos con el problema que la Dspace MicroLabBox solo acepta señales de voltaje y no de corriente como las que entrega el sensor, por lo cual se utilizó un módulo convertidor de corriente a voltaje (XY-IT0V) como muestra en la figura 3-8. Este convertidor nos permite transformar la señal de corriente de 4 a 20 mA que cambia a una señal de voltaje de 0 a 10V.



Fig. 3-8. Módulo convertidor de señales 4 a 20 mA a voltaje.

Para acoplar al SBFV el sensor cuenta con ciertas restricciones, como por ejemplo que la punta del sensor se encuentre sumergida en el fluido que en nuestro caso sería agua, además, la punta no debe tocar la pared de la tubería. En el proyecto se acopló el sensor como se muestra en la figura 3-9. El sensor acoplado al SBFV se ve en la figura 3-10 donde el sensor este acoplado hacia abajo para que la punta del sensor toque el agua que será bombeada por el sistema.

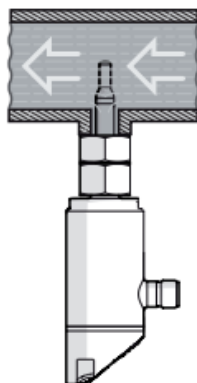


Fig. 3-9. Posición de acoplamiento del Sensor IFM SA5000.



Fig. 3-10. Sensor IFM SA5000 acoplado al SBFV.

Para acoplarlo el dispositivo se usó una unión Tee PVC de 32mm junto a un bushing 3/4" a 1", los cuales fueron adaptados especialmente para este sensor debido a que en el mercado no se encontró piezas para que la punta del sensor quedara correcta, esta adaptación realizada a la unión Tee PVC 32mm provocó que no se pueda configurar el sensor de manera estándar (véase Anexo A. para leer sobre cómo se configuro este sensor).

En la prueba preliminar mencionada anteriormente en los sensores de presión, se aprovechó de probar este sensor donde en la figura 3-11 se ve que la señal de caudal sin filtros viene contaminada con ruido de alta frecuencia por lo que es necesario utilizar un filtro pasa bajo para disminuirlo.

En este caso se compara un filtro con frecuencia de corte de 5 Hz y uno de 50 Hz, en ambos filtros la disminución de ruido es considerable, pero el de 5 Hz será utilizado debido a que la disminución es mayor.

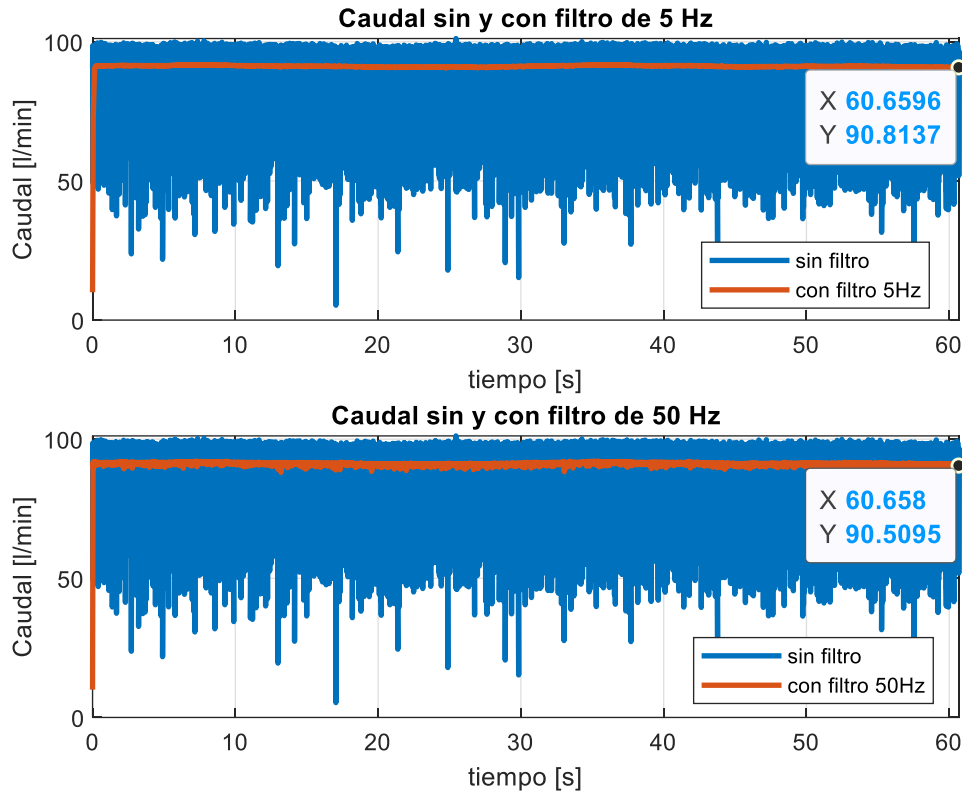


Fig. 3-11. Prueba de sensor de caudal IFM SA5000.

3.5 Variables de Interés Estimadas

Ya que la bomba de agua cuenta con un motor de inducción es posible estimar la velocidad y torque de este motor mediante algoritmos llamados observadores. Para implementar estos algoritmos hay que saber ciertos conceptos claves como lo son el modelo dinámico del motor de inducción jaula de ardilla y la transformación a ejes de coordenadas bifásicas.

3.5.1 Modelo Dinámico del Motor de inducción jaula de ardilla

Cuando los devanados de estator de un MIJA son alimentados por corrientes trifásicas balanceadas, se producen tres componentes de flujo λ_{as} , λ_{bs} y λ_{cs} desfasadas entre sí en $2\pi/3$ radianes mecánicos.

$$\vec{\lambda}_s = \lambda_{as}e^0 + \lambda_{bs}e^{\frac{j2\pi}{3}} + \lambda_{cs}e^{\frac{j4\pi}{3}}, \quad (3-1)$$

Y que la ecuación vectorial del voltaje de estator, referida al estator es:

$$\vec{v}_s = r_s \vec{i}_s + \frac{d\vec{\lambda}_s}{dt}, \quad (3-2)$$

Donde:

$r_s \vec{i}_s$: Caída de tensión en la resistencia de estator.

$\frac{d\vec{\lambda}_s}{dt}$: Voltaje asociado a la variación del flujo del tiempo.

además, la ecuación vectorial del voltaje de rotor, referido a un sistema de coordenadas fijo en este:

$$\vec{v}_r = \vec{0}[v] = r_r \vec{i}_r + \frac{d\vec{\lambda}_r}{dt}, \quad (3-3)$$

Donde:

$r_r \vec{i}_r$: Caída de tensión en la resistencia de rotor.

$\frac{d\vec{\lambda}_r}{dt}$: Voltaje asociado a la variación del flujo del tiempo.

3.5.2 Transformaciones a ejes de coordenadas bifásicos

Se utilizan transformadas para facilitar el trabajo con variables trifásicas, lo que permite una simplificación en el desarrollo matemático de las expresiones de flujo, voltaje y corriente. Esta simplificación se logra mediante un cambio de coordenadas, en el cual se transforman las coordenadas trifásicas a un sistema bifásico, por medio de una operación matricial. Las señales son representadas en dos ejes, uno real y otro imaginario, y a este sistema se le conoce como coordenadas $\alpha\beta$, donde el primer eje se corresponde con la parte real y se encuentra alineado con la fase α , mientras que el segundo eje se asocia con la parte compleja de la señal.

La transformación de abc a $\alpha\beta$ está dada por la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix}, \quad (3-4)$$

Al aplicar la ecuación 3-4 se obtiene una representación bifásica de las señales trifásicas y se encuentran desfasadas en $\pi/2$ radianes. Sin embargos las señales aún continúan siendo sinusoidales, por lo que, si quisiéramos aplicar un controlador proporcional integrador o se tuviera la necesidad de simplificar aún más los cálculos, se realiza un último cambio de coordenadas a un sistema de ejes rotatorios “qd”. Este cambio de coordenadas nos permite transformar matemáticamente el motor de inducción en uno de corriente continua. Por lo que es posible controlar el flujo y torque mediante equivalentes de la corriente de estator y la de rotor, respectivamente.

La Transformación de $\alpha\beta$ a qd está dada por la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} f_q \\ f_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix}, \quad (3-5)$$

Si se reemplaza la ecuación 3-4 en la ecuación 3-5, obtenemos la ecuación de cambio de coordenadas abc a qd:

$$\begin{bmatrix} f_q \\ f_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix}, \quad (3-6)$$

3.5.3 Observador de flujo

Para poder estimar la velocidad y torque del motor de la bomba de agua, debemos primero estimar el flujo. Para esto utilizaremos el modelo híbrido, el cual se obtiene a partir de la combinación de los flujos de rotor en ejes estacionarios “qd” del modelo de voltaje y corriente, por lo cual se detallará primero el modelo de voltaje y corriente.

3.5.3.1 Modelo de Voltaje

Este modelo requiere la medición del voltaje y corriente de estator del motor, el modelo se arma a base de estas ecuaciones para calcular los enlaces de flujos:

$$\lambda_{qr}^s = \frac{L_r}{L_m} (\lambda_{qs}^s - \sigma L_s i_{qs}^s), \quad (3-7)$$

$$\lambda_{dr}^s = \frac{L_r}{L_m} (\lambda_{ds}^s - \sigma L_s i_{ds}^s), \quad (3-8)$$

Donde:

L_s : La inductancia perdida del estator

L_m : La inductancia mutua

L_r : La suma de L_s y L_m

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s}$$

Las ecuaciones 3-7 y 3-8 nos dicen que los flujos del rotor en el eje estacionario qd referidos al estator dependen de los flujos y corrientes de estator en coordenadas dq y parámetros eléctricos del MIJA. Finalmente, en la figura 3.12 se muestra el diagrama del modelo de voltaje, el cual entrega buenas estimaciones ante velocidades altas, también la precisión de la estimación de la variable puede ser reducida debido a la variación de parámetros eléctricos del MIJA como por ejemplo que la temperatura afecte directamente a la resistencia del estator.

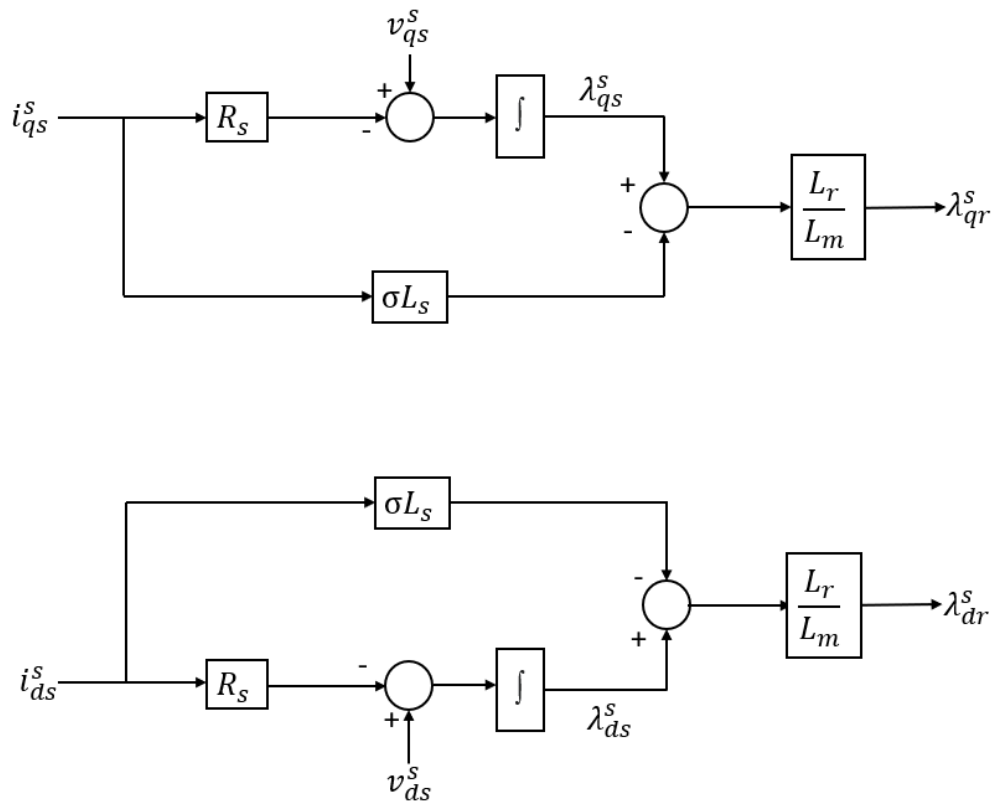


Fig. 3-12. Diagrama del modelo de voltaje.

3.5.3.2 Modelo de corriente

Para este modelo las señales de entrada son la velocidad del motor y la corriente de estator, las ecuaciones del modelo son las siguientes:

$$\frac{d\lambda_{qr}^s}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{qs}^s + \omega_r \lambda_{dr}^s - \frac{1}{T_r} \lambda_{qr}^s, \quad (3-9)$$

$$\frac{d\lambda_{dr}^s}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{ds}^s - \omega_r \lambda_{qr}^s - \frac{1}{T_r} \lambda_{dr}^s, \quad (3-10)$$

Donde :

$T_r = \frac{L_r}{r_r}$: Constante de tiempo del circuito de rotor.

Las ecuaciones 3-9 y 3-10 nos plantea que en este modelo para obtener el flujo del rotor en coordenadas dq, se utilizan las variables de corrientes de estator y la velocidad del motor. En la figura 3-13 se muestra el diagrama del modelo de corriente.

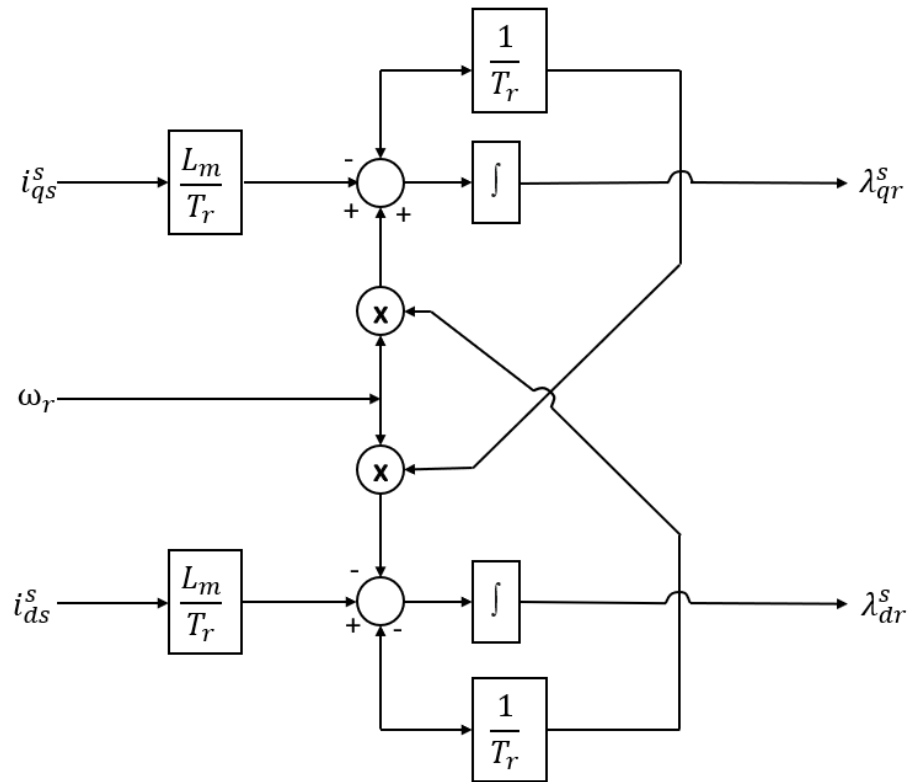


Fig. 3-13. Diagrama del modelo de corriente.

El modelo de corriente entrega buenos resultados a bajas velocidades inclusive a velocidades que tienden a 0 y al igual que en modelo de voltaje su precisión se ve afectada por la variación de los parámetros eléctricos en el MIJA.

3.5.3.3 Modelo Híbrido

Este modelo se obtiene con la combinación de los flujos de rotor en coordenadas dq de los modelos anteriores. Al combinar las ecuaciones 3-7, 3-8, 3-9 y 3-10, se obtiene las siguientes ecuaciones del flujo de rotor

$$[(1 - \sigma)T_s + T_r] \frac{d\lambda_{qr}^s}{dt} = \frac{L_m}{r_s} v_{qs}^s + \omega_r T_r \lambda_{dr}^s - \lambda_{qr}^s - \sigma L_m T_s \frac{di_{qs}^s}{dt}, \quad (3-11)$$

$$[(1 - \sigma)T_s + T_r] \frac{d\lambda_{dr}^s}{dt} = \frac{L_m}{r_s} v_{ds}^s + \omega_r T_r \lambda_{qr}^s - \lambda_{dr}^s - \sigma L_m T_s \frac{di_{ds}^s}{dt}, \quad (3-12)$$

Donde T_s y T_r son las constantes de tiempo del estator y rotor. En la figura 3-14 se muestra el diagrama del modelo híbrido.

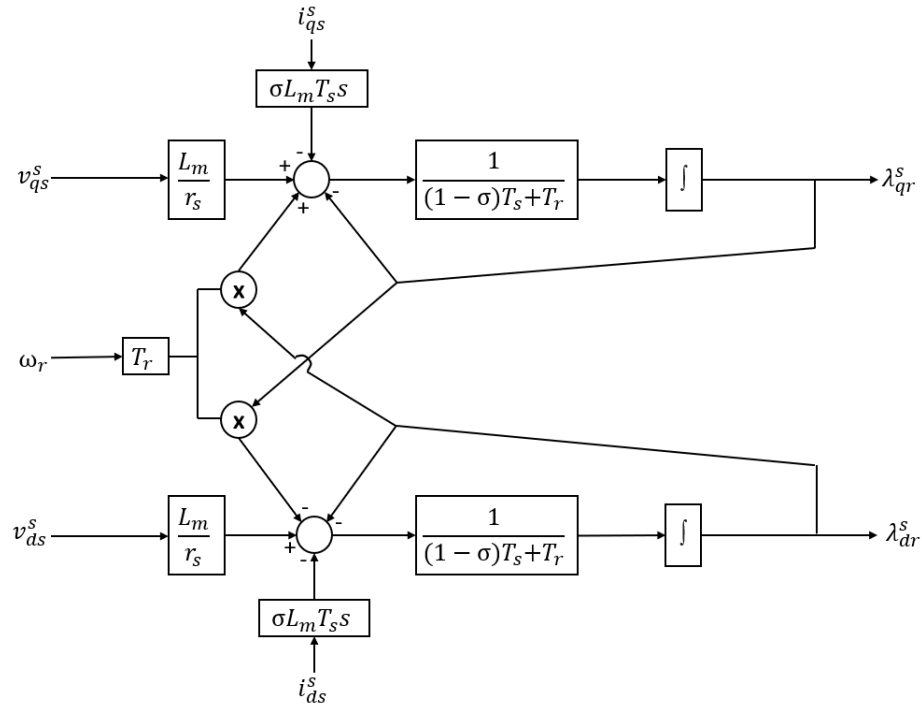


Fig. 3-14. Diagrama del modelo de híbrido.

El modelo híbrido reúne las buenas cualidades de los modelos anteriores, es decir que tiene buen desempeño en velocidades altas como bajas.

3.5.4 Observador de Velocidad

La estimación de velocidad en un MIJA siempre ha sido una variable de interés, por lo que se han hecho estudios para ir mejorando las técnicas de estimación de esta variable sin la necesidad de utilizar un sensor. En esta parte del trabajo se presentan dos métodos, siendo el primero ya estudiado y utilizado en [8], este método es conocido como MRAS. El segundo método será el utilizado en este trabajo de habilitación profesional y es llamado BEMF-MRAS y a diferencia del anterior este presenta una mayor precisión al estimar la velocidad en un amplio rango de velocidad ya que utiliza la señal de BEMF (Fuerza Contraelectromotriz) como entrada en un sistema de control de retroalimentación que ajusta continuamente la velocidad estimada del motor hasta que coincide con la velocidad real.

3.5.4.1 Model Reference Adaptive System

Como el nombre lo indica, este modelo estima la velocidad del MIJA mediante un sistema adaptativo teniendo como referencia otros modelos, donde la salida del sistema de referencia, en este caso el modelo de voltaje es comparada con la salida de un sistema adaptativo como lo es el modelo de corriente, esto se hace hasta que el error entre ambas salidas de los modelos sea nulo. En la figura 3-15 se observa el diagrama de este modelo de estimación de velocidad llamado MRAS.

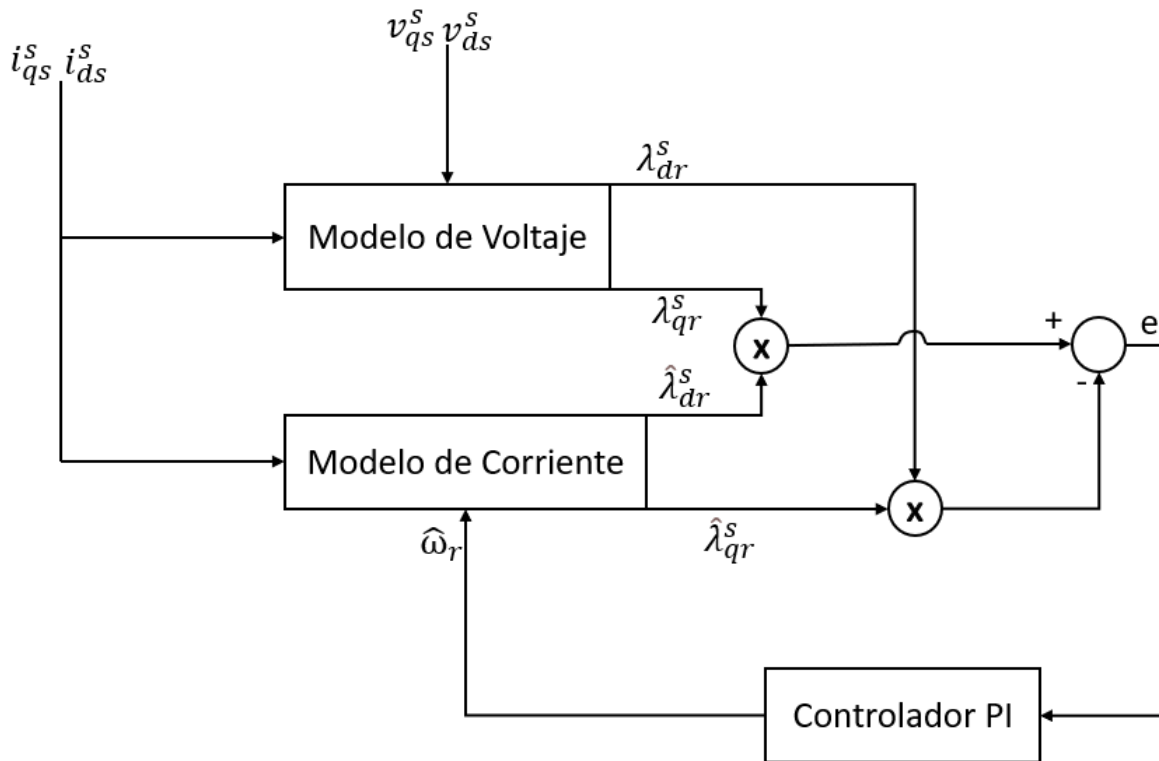


Fig. 3-15. Diagrama del MRAS para la estimación de velocidad.

Este modelo usa un controlador PI para ajustar la velocidad estimada de modo que el error (e) sea nulo. Al diseñar el algoritmo es importante tener en cuenta la estabilidad del sistema y garantizar que la velocidad estimada converja al valor deseado con características dinámicas satisfactorias. Con lo dicho anteriormente, la velocidad estimada por el algoritmo se puede calcular de la siguiente manera:

$$\hat{\omega}_{rk} = e \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right), \quad (3-13)$$

Donde el error (e) equivale:

$$e = \hat{\lambda}_{dr}^s i_{qr}^s - \hat{\lambda}_{qr}^s i_{dr}^s, \quad (3-14)$$

3.5.4.2 *Back e.m.f based MRAS.*

Como el modelo anterior, este observador utiliza las fórmulas del estator y rotor como modelo de referencia y modelo adaptativo, usando la fuerza contraelectromotriz (BEMF). Para lograr entender este estimador de velocidad se debe plantear las ecuaciones de flujo del estator en las coordenadas dq del modelo de voltaje:

$$\lambda_{ds}^s = \int (v_{ds}^s - r_s i_{ds}^s) dt, \quad (3-15)$$

$$\lambda_{qs}^s = \int (v_{qs}^s - r_s i_{qs}^s) dt, \quad (3-16)$$

Las ecuaciones 3-15 y 3-16 se reemplazan en las ecuaciones 3-7 y 3-8, así se logra un nuevo modelo de referencia:

$$e_{md} = \frac{L_m}{L_r} \frac{d\lambda_{ds}^s}{dt} = v_{ds}^s - \left(R_s i_{ds}^s + L_s \frac{di_{ds}^s}{dt} \right), \quad (3-17)$$

$$e_{mq} = \frac{L_m}{L_r} \frac{d\lambda_{qs}^s}{dt} = v_{qs}^s - \left(R_s i_{qs}^s + L_s \frac{di_{qs}^s}{dt} \right), \quad (3-18)$$

Lo siguiente es obtener el modelo adaptativo y para esto utilizaremos las ecuaciones 3-9 y 3-10 pertenecientes al modelo de corriente:

$$\hat{e}_{md} = \frac{L_m}{L_r} \frac{d\lambda_{ds}^s}{dt} = \frac{L_m^2}{L_r} \left(-\hat{\omega}_r i_{mq} - \frac{1}{T_r} i_{md} + \frac{1}{T_r} i_{ds}^s \right), \quad (3-19)$$

$$\hat{e}_{mq} = \frac{L_m}{L_r} \frac{d\lambda_{qs}^s}{dt} = \frac{L_m^2}{L_r} \left(-\hat{\omega}_r i_{md} - \frac{1}{T_r} i_{mq} + \frac{1}{T_r} i_{qs}^s \right), \quad (3-20)$$

Donde:

$$\frac{di_{md}}{dt} = -\hat{\omega}_r i_{mq} - \frac{1}{T_r} i_{md} + \frac{1}{T_r} i_{ds}^s, \quad (3-21)$$

$$\frac{di_{mq}}{dt} = -\hat{\omega}_r i_{md} - \frac{1}{T_r} i_{mq} + \frac{1}{T_r} i_{qs}^s, \quad (3-22)$$

Finalmente, el diagrama del estimador de velocidad BEMF-MRAS se muestra en la figura 3-16.

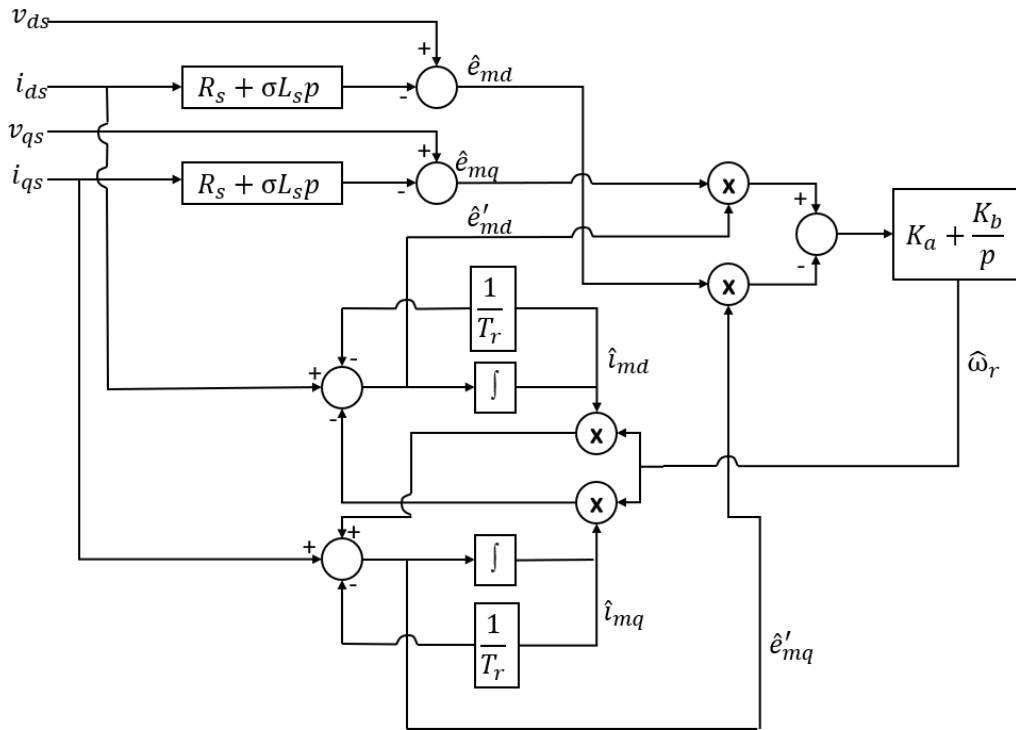


Fig. 3-16. Diagrama del estimador de velocidad BEMF-MRAS.

El diseño del mecanismo adaptativo es la parte más importante del proceso de estimación, debido a que determina si el sistema es estable o no. La ecuación 3-23 representa al diseño del mecanismo adaptativo

$$\hat{\omega}_r = \left(K_p + \frac{K_i}{p} \right) (\hat{e}_m x e_m), \quad (3-23)$$

3.5.4.3 Estimador de Velocidad Mecanica

El modelo BEMF-MRAS nos entrega la estimación de velocidad mecanica en rad/s, para cambiar la unidad de medida a rpm es necesario plantear las ecuaciones 3-24 y 3-25, siendo P el número de polos:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{P}{2J} (T_e - T_L), \quad (3-24)$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L, \quad (3-25)$$

Sustituyendo la ecuación 3-25 en 3-24 se obtiene la velocidad del motor, pero esta continua en rad/s, por lo cual se debe multiplicar por $30/\pi$ para transformar en rpm:

$$N_m = \frac{60\omega_r}{\pi P}, \quad (3-26)$$

3.5.5 Estimador de Torque

El estimador de torque se obtiene a base del estimador de flujo, debido a que el torque se puede obtener con las variables de flujo y corriente de estator en coordenadas dq, esto se ve reflejado en la ecuación 3-27 y en el diagrama de la figura 3-17.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds}^s i_{qs}^s - \lambda_{qs}^s i_{ds}^s), \quad (3-27)$$

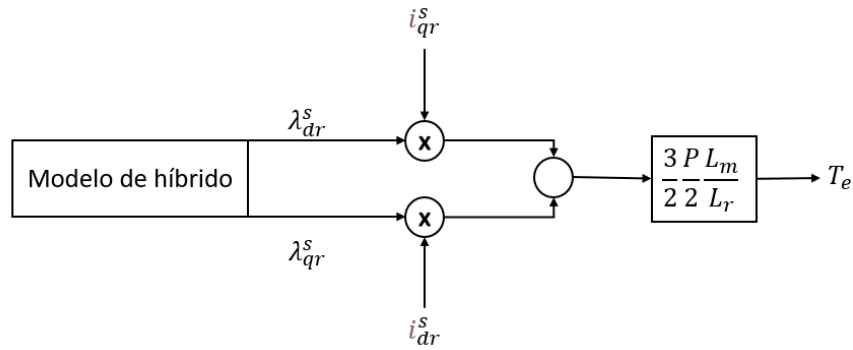


Fig. 3-17. Diagrama para la estimación del Torque Eléctrico.

3.6 Implementación de Observadores y Estimadores.

3.6.1 Sensores de voltaje y corriente

Todos los modelos vistos anteriormente necesitan como entrada los voltajes y las corrientes de estator del motor, para poder obtener estas señales se ocuparon sondas de voltaje de marca Pintek modelo DP-25 y sondas de corriente marca Fluke modelo i30s. Estas sondas se muestran en las figuras 3-18 y 3-19 respectivamente, además, se muestra en la tabla 3-4 los rangos de voltaje permisibles para CC y CA en la sonda Pintek.



Fig. 3-18. Sonda de voltaje Pintek DP-25.



Fig. 3-19. Sonda de corriente Fluke i30s.

Tabla 3-4. RANGOS DE TENSIÓN CC Y CA.

atenuación	Valor Máximo CC	Valor máximo CA
X200	$\pm 700V$	± 500
X50	± 175	± 125
X20	± 70	± 50

3.6.2 Parámetros motor y acondicionamiento de señales

Para poder estimar la velocidad y torque del motor los algoritmos de los observadores necesitan los parámetros del motor los cuales se encuentran en la tabla 3-5, en la tabla se puede observar que hay dos voltajes nominales señalados, esto es debido a que el voltaje de 400 [V] es cuando la bomba está configurada en estrella y el de 230 [V] cuando es delta. Las sondas se conectaron a las entradas analógicas de la Dspace MicroLabBox 1202, de esta manera se procesan y recolectan las señales de voltaje y corriente que son necesarias para hacer uso de los estimadores. Una vez obtenida la señal gracias de la Dspace MicroLabBox y al software ControlDesk estas deberán pasar un proceso de acondicionamiento como se ve en la figura 3-20. El proceso considera la atenuación de 10 veces en la entrada de los canales de la Dspace, la atenuación de 200 veces de la sonda de voltaje y la sonda de corriente posee una atenuación de 100mV/A. Otro acondicionamiento es un filtro pasa bajo de primer orden con frecuencia de corte de 500 Hz debido a que la señal presentara componentes de alta frecuencias debido al inversor, el filtro no introduce de forma considerable desfases ni variaciones en la ganancia de la señal a su frecuencia fundamental de 50 Hz.

Tabla 3-5. PARÁMETROS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN DE LA BOMBA DE AGUA

Parámetros	Magnitud
Potencia nominal	0.74 [kW]
Voltaje nominal	400 [V] / 230 [V]
Nº de polos	2
Velocidad nominal	2800 [rpm]
Frecuencia	50 [Hz]
Resistencia de estator	10.9 [Ω]
Resistencia de rotor	6.24 [Ω]
Inductancia de estator	27.56645 [mH]
Inductancia de rotor	28.80631 [mH]
Inductancia de magnetización	681.01825 [mH]

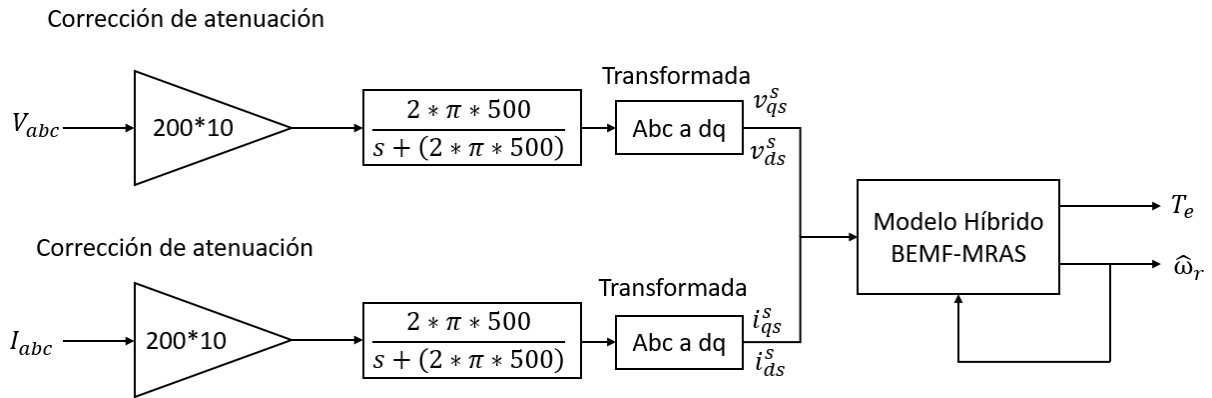


Fig. 3-20. Diagrama de acondicionamiento de señales de voltaje y corriente.

Se realizó una prueba preliminar para ver el correcto funcionamiento de los sensores y observadores. Como se explicó anteriormente se alimentó la bomba de agua con el VDF ABB conectado a la red eléctrica y se configuró con un control escalar a 50 Hz y la bomba configurada en estrella. Se adquirió los datos de la señal gracias al software ControlDesk 6.1 después de manera offline se procesó las señales de voltaje y corriente para realizarlas estimaciones de torque y velocidad. Como se explicó anteriormente se utilizará el modelo híbrido y el BEMF-MRAS para obtener las estimaciones, los modelos utilizados e implementados en simulink se encuentran en el Anexo B.

3.6.3 Evaluación de Observador BEMF-MRAS

Al realizar la prueba preliminar se esperan obtener dos resultados, el primero es el correcto funcionamiento del observador esto significa que el valor de la señal sea igual o cercana a la velocidad nominal del motor de la bomba de agua y lo segundo se espera que el filtro pasa bajo utilizado disminuya considerablemente el ruido de alta frecuencia que va a tener la señal. Al ver la figura 3-21 notamos que la magnitud que alcanza la estimación de velocidad ronda en los 2800 rpm, lo cual concuerda con lo esperado ya que el VDF está haciendo trabajar el motor en sus valores nominales, por lo que se concluye que el observador BEMF-MRAS está funcionando y estimando correctamente la magnitud de velocidad. La segunda observación es que el filtro pasa bajo de primer orden con una frecuencia de corte de 5Hz ha reducido considerablemente el ruido de alta frecuencia que se puede deber a la modulación del VDF, entre otros factores.

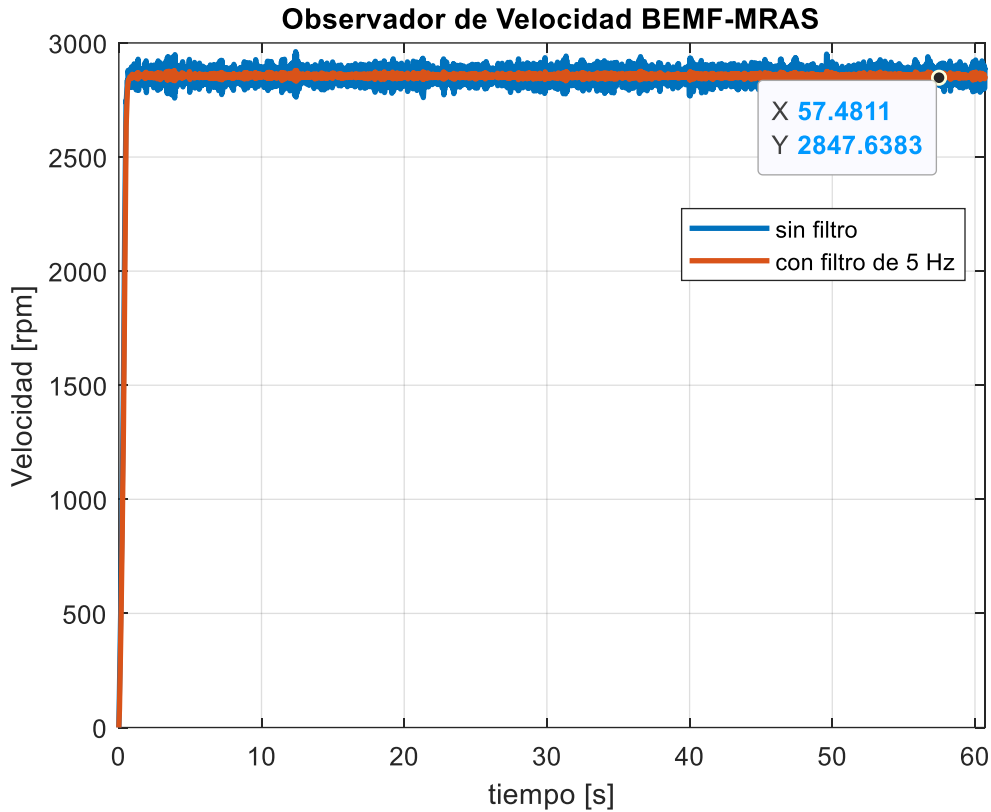


Fig. 3-21. Observador de Velocidad con y sin filtro de 5Hz.

3.6.4 Evaluación de Estimador de Torque

Para poder estimar el torque eléctrico es necesario tener las corrientes y flujo de estator en coordenadas dq. Para obtener la magnitud del flujo se usó un observador de flujo el cual es el modelo híbrido, este observador será evaluado para ver si la magnitud del torque eléctrico estimado tiene coherencia con lo esperado, también al igual que con el estimador de velocidad se observó si el filtro pasa bajo utilizado es capaz de reducir el ruido de alta frecuencia que se espera que tenga la señal estimada sin filtrar. En la figura 3-22 se ve el torque estimado por el algoritmo implementado en Simulink, lo primero que podemos observar es que la magnitud del torque es un poco elevada, pero dentro del rango del esperado por lo que la estimación de magnitud de torque es correcta. Con respecto al filtro pasa bajo de primer orden con frecuencia de corte de 5hz cumple bien su labor de reducir el ruido de alta frecuencia, por lo que este filtro se utilizara para las pruebas de día completo del siguiente capítulo.

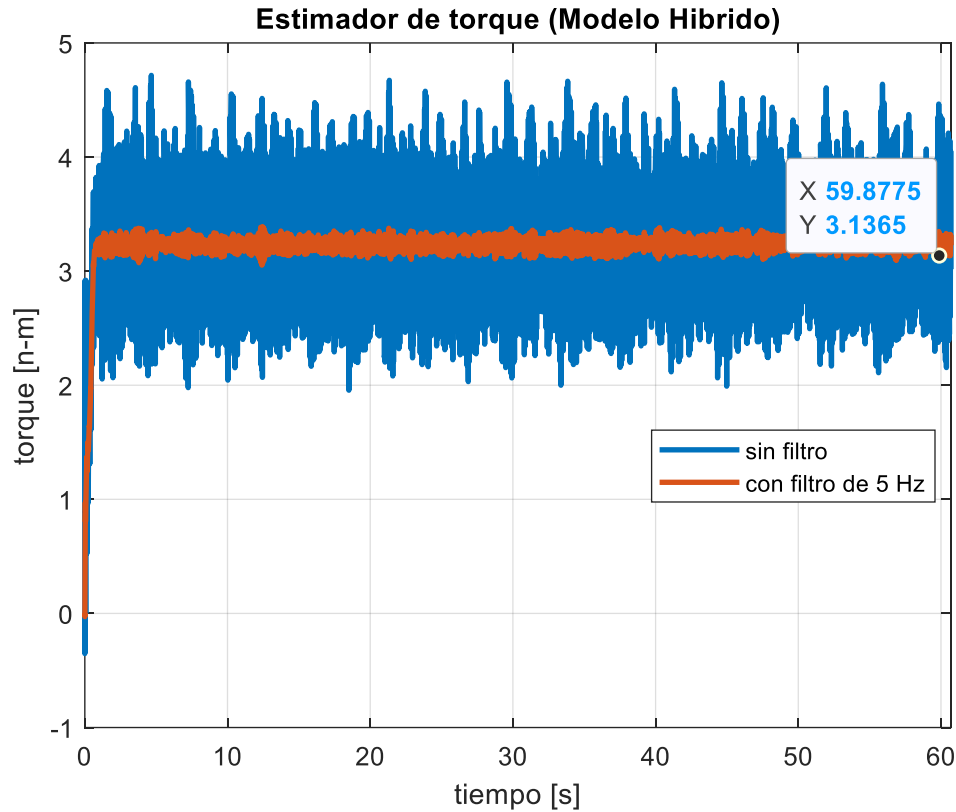


Fig. 3-22. Estimador de torque con y sin filtro de 5Hz.

3.7 Potencias del SBFV

En el trabajo se presentarán y calcularán tres tipos de potencias que están presentes en el SBFV, estas potencias son potencia eléctrica de entrada del motor de la bomba de agua, potencia mecánica y potencia hidráulica.

3.7.1 Potencia eléctrica de entrada

Esta potencia es la potencia generada por el sistema fotovoltaica y suministrada por el inversor hacia la bomba de agua, la cual se calculará con la fórmula de la potencia instantánea que se presenta en la ecuación 3-28:

$$P_e = V_a * I_a + V_b * I_b + V_c * I_c, \quad (3-28)$$

3.7.2 Potencia mecánica

La potencia mecánica del SBFV es la potencia que se mide en el eje del motor de la bomba de agua, esta potencia es distinta a la potencia de entrada ya que esta toma en cuenta las pérdidas que se producen en el cobre del estator, cobre del rotor y en el núcleo. La potencia mecánica se puede calcular de la siguiente manera:

$$P_{mec} = T_{elec} * \omega_m, \quad (3-29)$$

Donde T_{elec} es el torque eléctrico del motor [Nm] y ω_m la velocidad del motor $\left[\frac{rad}{s}\right]$. Las perdidas producidas por fricción y ventilación las omitiremos debido a que son insignificantes.

3.7.3 Potencia hidráulica

La potencia hidráulica es la energía que se utiliza para mover el agua a través del sistema de tuberías y hacer que llegue a su destino. Esta potencia se calcula de la siguiente manera:

$$P_{hidr} = \frac{Q * p_{imp} * 1000}{600}, \quad (3-32)$$

Donde Q es el Caudal $\left[\frac{l}{min}\right]$, p_{imp} es la presión de impulsión de la bomba [bar], 600 es una constante que convierte los litros por minuto y bares en Watt y 1000 es para transformar de kW a W.

3.8 Discusión

En este tercer capítulo del trabajo de habilitación profesional se presentó el sistema de registro y monitoreo que se utilizara en el SBFV para realizar las pruebas de día completo de operación, este capítulo describe los dos tipos de sensores utilizados para monitorear algunas variables de interés como lo son la presión y caudal. Para esto se acoplaron y se configuraron dos sensores de presión y un sensor de caudal, otro tema que se aborda en el capítulo es el filtrado de señales que son obtenidas por los sensores, para comprobar el correcto funcionamiento de los sensores y filtros se realizó una prueba preliminar que ayudo a la selección del filtro.

El capítulo también abarca el tema de los observadores y estimadores de flujo, velocidad y torque. Para esto en el capítulo se realizó un repaso teórico de los observadores, esto ayuda a entender el funcionamiento y como se logró una estimación de ciertas variables sin la necesidad de un sensor.

El observador de velocidad que se utilizó en las pruebas de día completo de operación será el BEMF-MRAS el cual presenta un seguimiento oscilatorio menor que el observador MRAS. Para el estimador de torque se utilizó el modelo híbrido, debido a que este es una combinación entre el modelo de voltaje y el modelo de corriente, por lo cual presenta las buenas cualidades de ambos que es ser preciso en altas y bajas velocidades.

Este capítulo también nos describe las diferentes potencias que están presentes y fueron calculadas en el trabajo, las cuales son la potencia de entrada, la potencia mecánica y la potencia hidráulica.

4. Resultados Experimentales

4.1 Introducción

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos tras la puesta en marcha del SBFV que se ha montado junto al sistema de registro y monitoreo que han sido detallados en el capítulo 2 y 3 de este informe, para así poder realizar las pruebas de días completos de operación del sistema. Se realizó un resumen sobre la distribución en el lugar de trabajo y pruebas preliminares antes de realizar las pruebas de día completo de operación y después de cerciorarse del correcto funcionamiento del SBFV se procedió a realizar las pruebas de día completo de operación del SBFV.

Para las pruebas de día completo de operación se hicieron con la bomba configurada en conexión estrella y delta, una vez obtenidos los resultados de interés de estas dos pruebas gracias al sistema de registro y monitoreo se espera poder ver las diferencias de estas.

4.2 Montaje experimental

El set-up fue instalado en el laboratorio de energías renovables de la UCSC donde se montó una mesa de trabajo en la que se colocó la Dspace MicroLabBox, las sondas de voltaje y corriente, además de una fuente de poder DC la cual es utilizada para alimentar los sensores de presión y de caudal como también el módulo convertidor XY- IT0V. En el lugar de trabajo se encuentra el computador encargado de recibir toda la información de señales por parte de la DSpace gracias al software ControlDesk 6.1. En la figura 4-1 se muestra el lugar de trabajo utilizado para montar el proyecto, en la imagen se observa la fuente de poder DC (1) mencionada anteriormente, la Dspace MicroLabBox 1202 (2), las sondas de voltaje (3), las sondas de corriente (4), el inversor ABB (5) y la pantalla, mouse y teclado utilizado en el pc para poder operar el software ControlDesk (6).

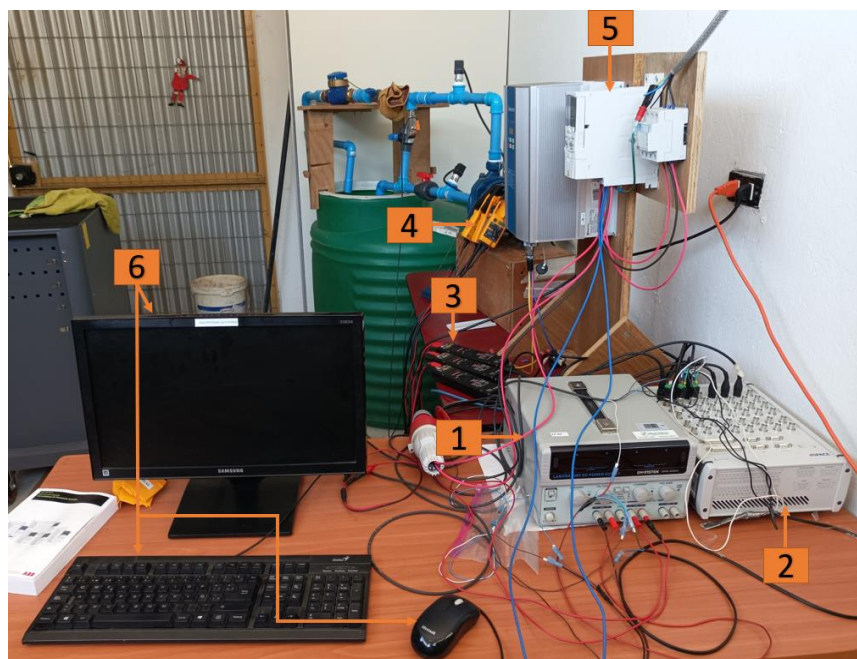


Fig. 4-1. Montaje experimental.

4.3 Selección tiempo de muestreo

Cuando se habla de prueba de día completo de operación del SBFV en este informe se refiere a que se monitoreara el SBFV funcionando desde las 7:30 am hasta las 8:30 pm aproximadamente, por lo que serán 13 horas de funcionamiento. Al ser un tiempo tan largo y como los datos de las señales de interés se procesarán de manera offline, es necesario que los archivos de datos sean lo más livianos posible, para esto se realizó la primera prueba preliminar que trato de la realización pruebas cortas del SBFV con diferentes tiempos de muestreo, así ver cuál es el tiempo de muestreo mínimo de adquisición de datos para el funcionamiento de los estimadores que se han explicado en el capítulo 3 de este trabajo. En la tabla 4-1 se observa el tiempo de muestreo de la prueba y si con ese tiempo de muestreo funcionan los observadores.

Tabla 4-1. RESULTADOS DE PRIMERA PRUEBA PRELIMINAR.

Tiempo de muestreo de la prueba	¿Funciona los observadores?
$2 * 10^{-5}$ [s]	Si
$4 * 10^{-5}$ [s]	Si
$1 * 10^{-4}$ [s]	Si
$2 * 10^{-4}$ [s]	No

En la tabla 4-1 se observa que el tiempo de muestreo con el cual los archivos de datos nos queden más livianos y que funcionen los estimadores es de $1 * 10^{-4}$ [s] lo cual significa que se guardarán 10000 muestras por cada segundo para que los archivos sean más fáciles de procesar y no es posible de usar un tiempo mayor debido a que simulink entrega un error y recomienda bajar el tiempo de muestreo. Una vez ya obtenido el tiempo de muestreo mínimo para que funcionen los observadores, se realizó una última prueba preliminar que consistió en el funcionamiento del sistema de bombeo fotovoltaico por 3 horas. Para la prueba se configuró la conexión de la bomba de hidráulica en estrella y el inversor con control escalar, además el inversor ABB NO será alimentado por la red eléctrica como en las anteriores pruebas preliminares realizadas, ya que será alimentado por un voltaje de CC proveniente del string de paneles solares mencionados en el capítulo 2.

En las figuras 4-2 y 4-3 se muestra los voltajes de línea-neutro y las corrientes de líneas que alimentan a la bomba de agua en esta prueba preliminar de 3 horas, estas horas corresponden desde las 1 pm hasta las 4 pm. En la figura 4-2 pareciera que hay un pequeño desbalance en la línea V_{bn} , esto se trata de un peak de voltaje mayor que se produce cada cierta cantidad de tiempo.

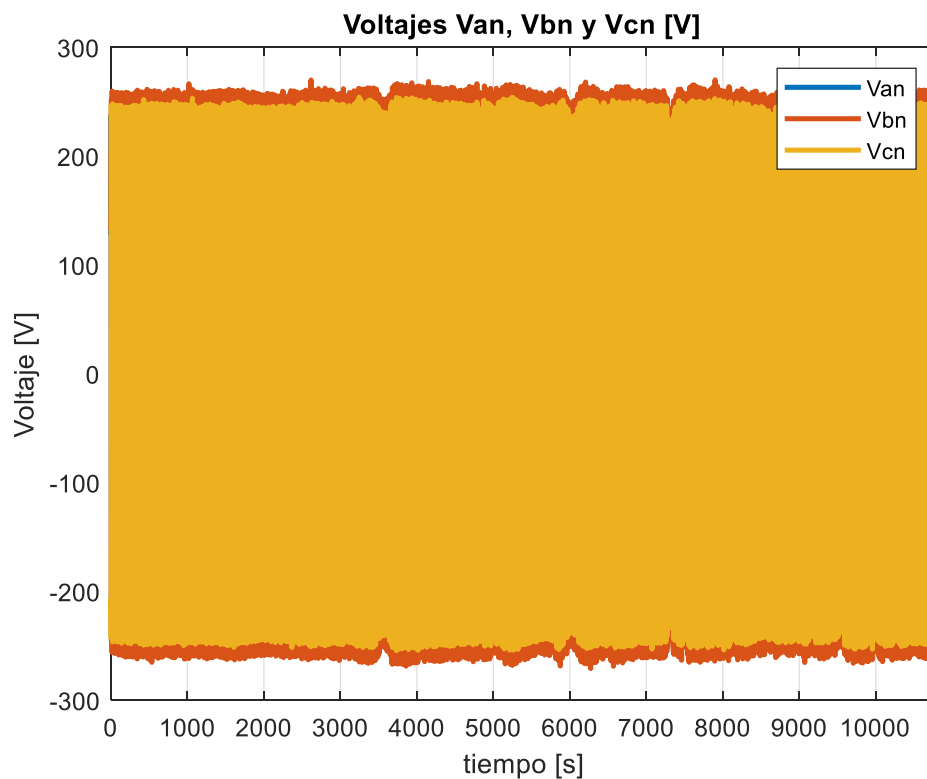


Fig. 4-2. Voltajes de línea-neutro obtenidas en la segunda prueba preliminar.

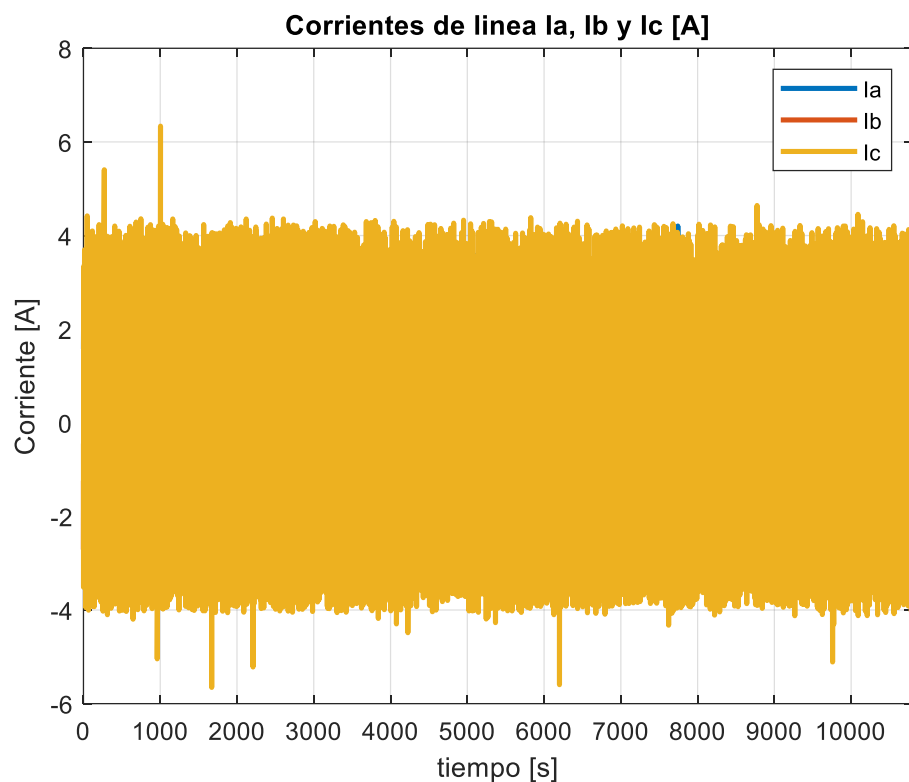


Fig. 4-3. Corrientes de línea obtenidas en la segunda prueba preliminar.

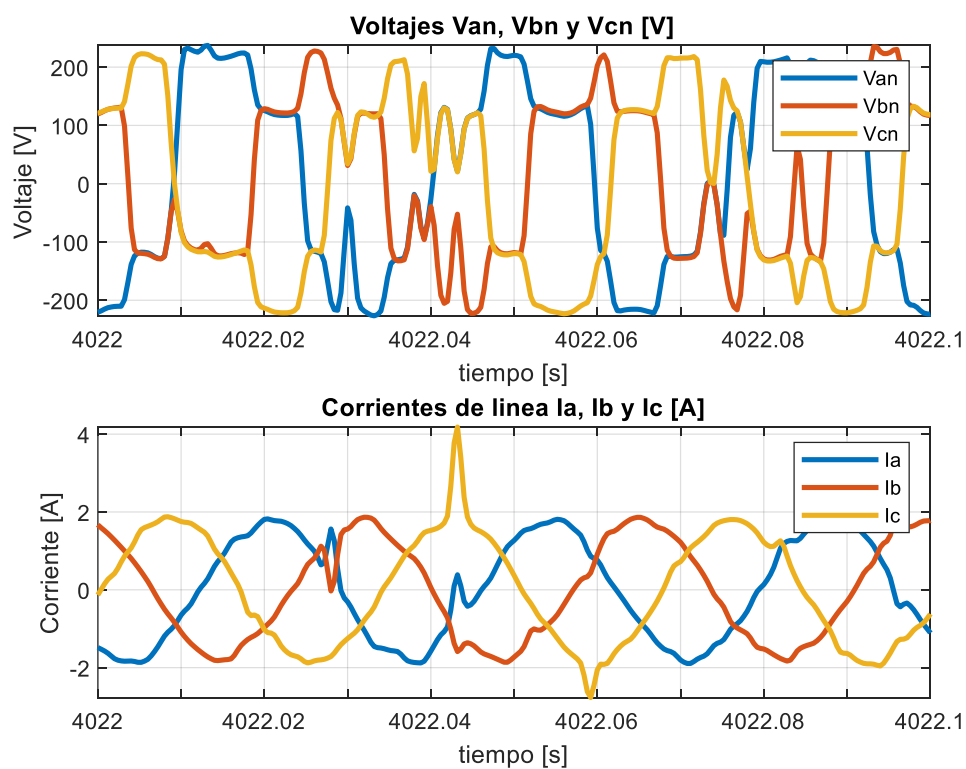


Fig. 4-4. Voltaje y Corrientes de línea obtenidas en la segunda prueba preliminar (Zoom).

En la figura 4-4 se hace un zoom de las señales de voltaje y corriente, donde se observa que la corriente de línea I_c presenta un peak del doble de la amplitud cada cierto tiempo pero que no es constante en cada ciclo, estos peak en el voltaje y corriente pueden ser eliminados con la función de Matlab “hampel” el cual es un filtro de Hampel que es capaz de detectar y eliminar valores atípicos de una señal. En las figuras 4-5 y 4-6 muestran la comparación de las fases del voltaje y corriente con y sin el filtro de Hampel. Para una mejor apreciación en las figuras 4-7 y 4-8 se realizó un zoom en el mismo periodo de tiempo que en la figura 4-4

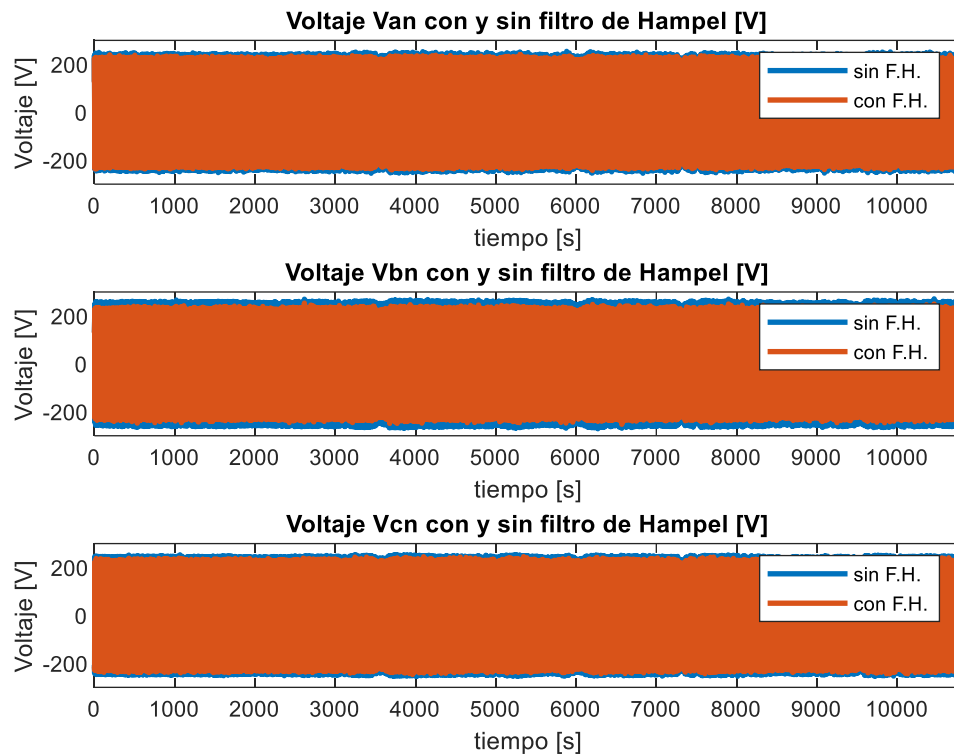


Fig. 4-5. Voltajes con y sin filtro de Hampel.

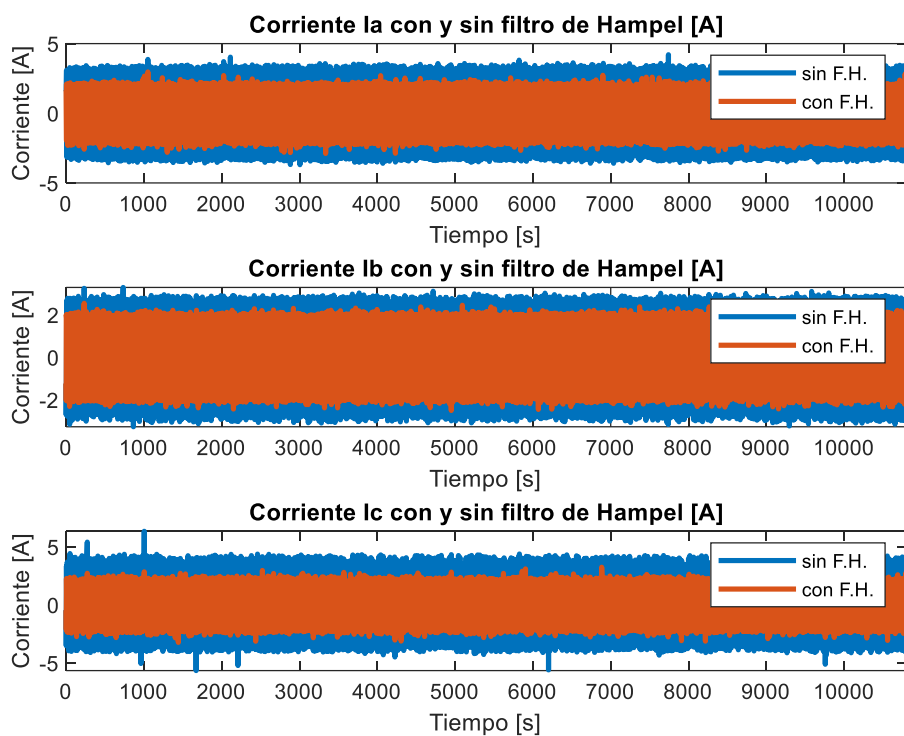


Fig. 4-6. Corriente con y sin filtro de Hampel.

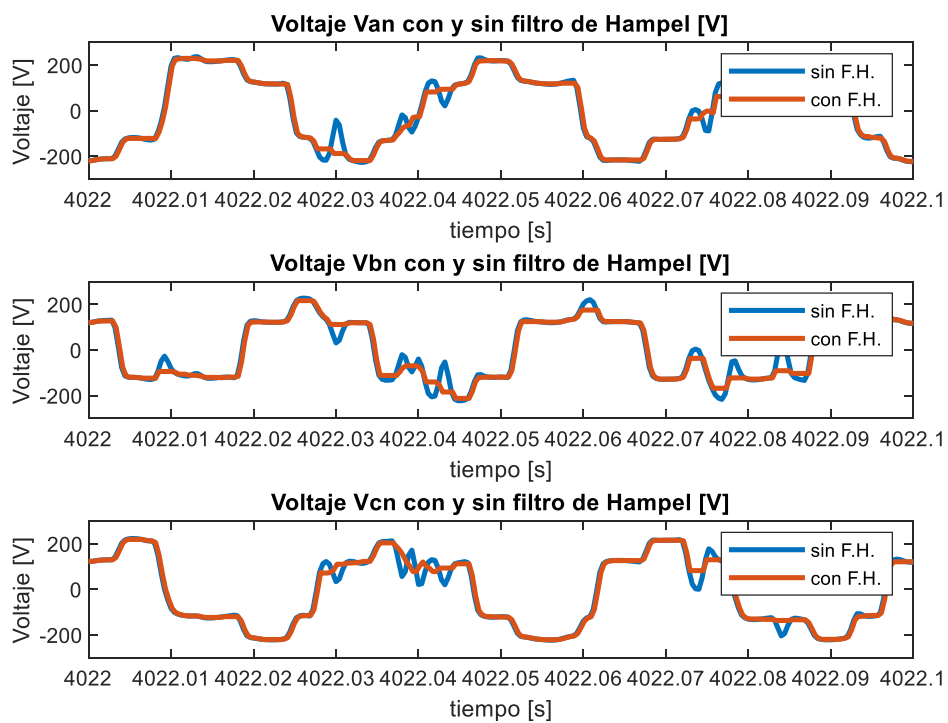


Fig. 4-7. Voltajes con y sin filtro de Hampel (Zoom).

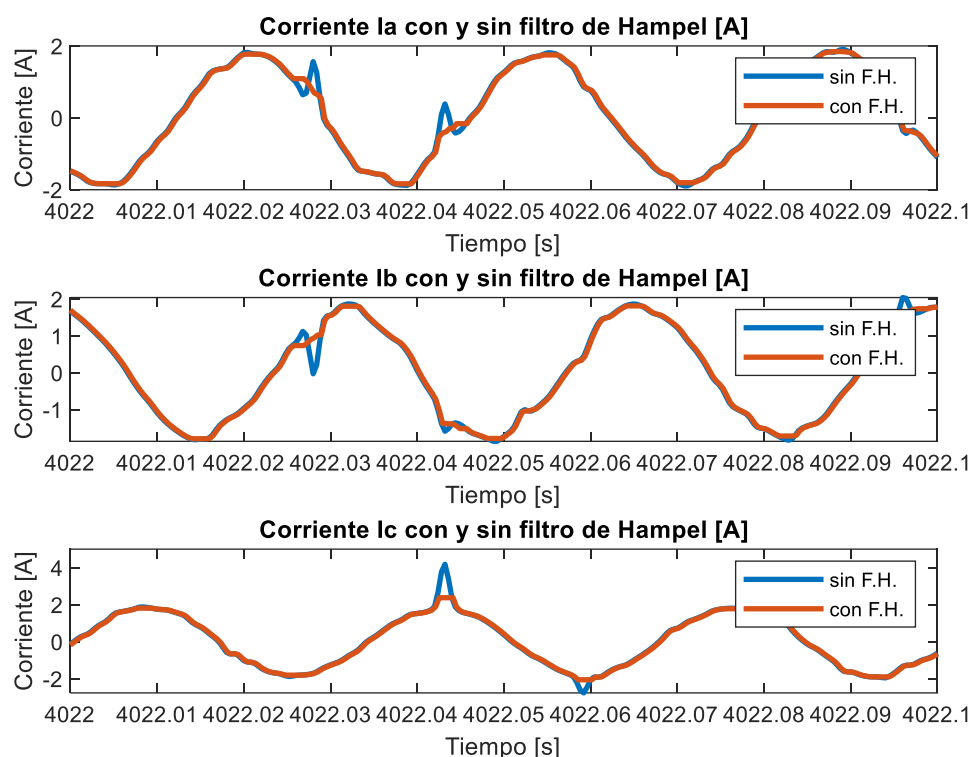


Fig. 4-8. Corriente con y sin filtro de Hampel.

La figura 4-9 se puede ver la velocidad y torque eléctrico estimados en la segunda prueba preliminar, se puede apreciar que estas señales poseen mayor oscilación que las señales obtenidas en la figura 3-21 y 3-22, estas oscilaciones se pueden deber a que al conectar al alimentar el inversor con una fuente DC como lo son los paneles solares, el inversor debe transformar esta fuente en AC trifásica, lo cual por su modulación provoca armónicos que con un filtro de 5 Hz no son eliminados completamente. Por lo cual ocuparemos la función "medfilt1" de Matlab la cual es un Filtrado de mediana de 1D, con esto logramos reducir la oscilación presentadas en las señales de velocidad y torque. Esta función de Matlab será utilizada en los resultados de las pruebas de día completo de operación del SBFV.

En la figura 4-10 se observa la presión de impulsión, la presión de succión y el caudal, todas estas señales han sido obtenidas por los sensores descritos en el capítulo 3 y son el resultado de la segunda prueba preliminar. Al igual que en las señales de velocidad y torque se utilizó el filtrado de mediana en las señales de presiones.

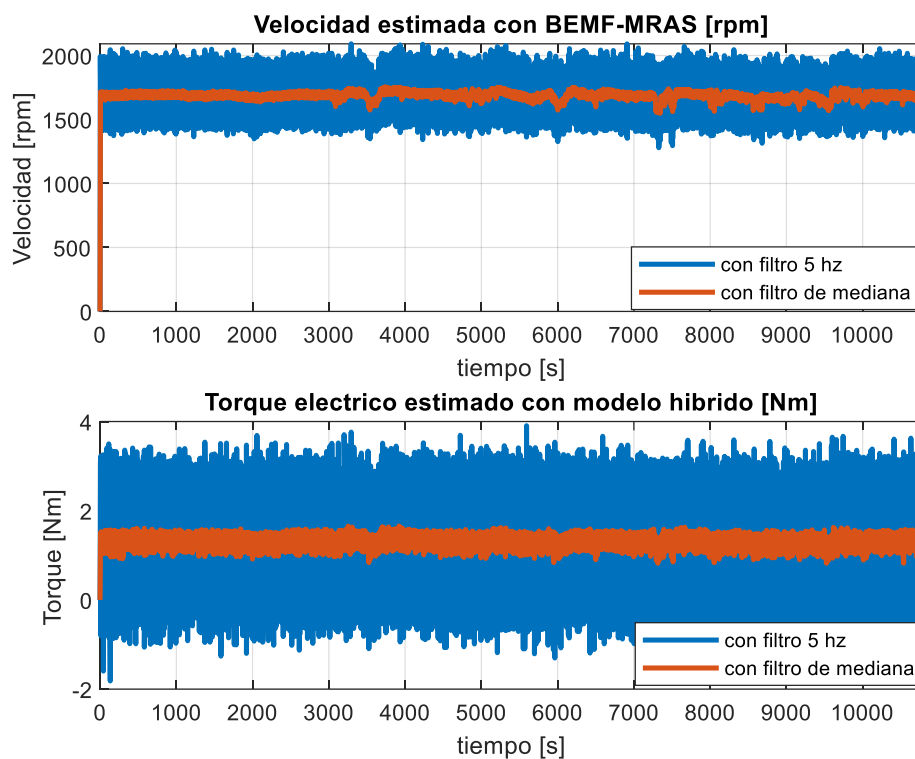


Fig. 4-9. Velocidad y torque eléctrico estimados en la segunda prueba preliminar.

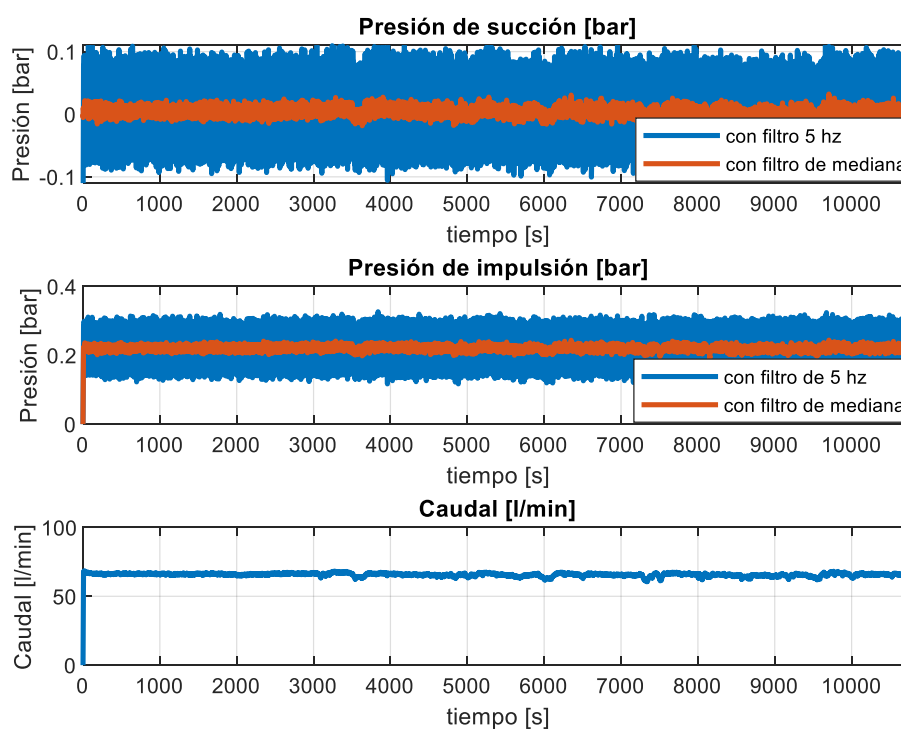


Fig. 4-10. Presiones y caudal obtenidos en la segunda prueba preliminar.

En la figura 4-11 se muestra la potencia de alimentación de la bomba de agua, se puede ver la gráfica de potencia original, la potencia con el filtro Hampel y con el filtro de mediana. En las pruebas de día completo de operación se utilizará el filtro de mediana para mostrar la potencia de entrada de la bomba, ya que es la que presenta menor oscilaciones y puede ser mejor interpretado.

En la figura 4-12 se ve la potencia mecánica del motor de la bomba de agua en esta prueba preliminar. Se realiza una comparación de la potencia sin y con filtro de mediana, al igual que en los casos anteriores el filtro de mediana nos asegura menos oscilación y poder interpretar mejor el valor cuantitativo de la potencia mecánica. Lo mismo ocurre en la figura 4-13 pero esta vez siendo la potencia hidráulica del SBFV, por lo tanto en las pruebas de día completo de operación del SBFV se utilizó el filtro de mediana para mostrar los resultados de la potencia mecánica y la potencia hidráulica.

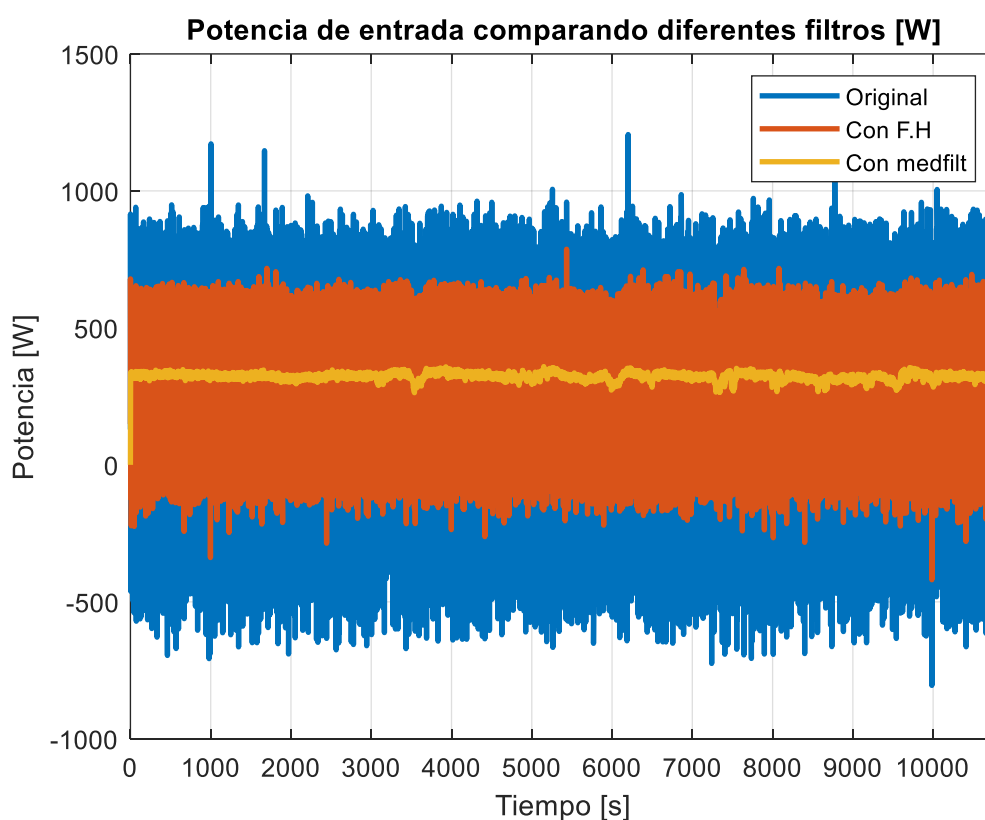


Fig. 4-11. Comparación de filtros en la potencia de entrada de la bomba hidráulica.

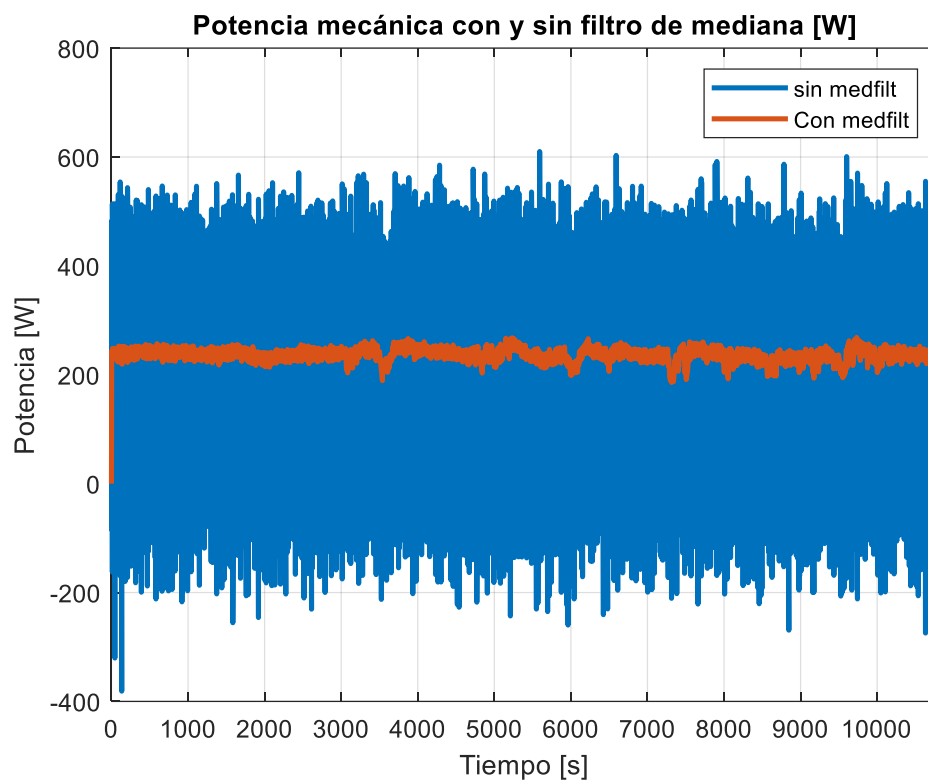


Fig. 4-12. Potencia mecánica sin y con filtro de mediana.

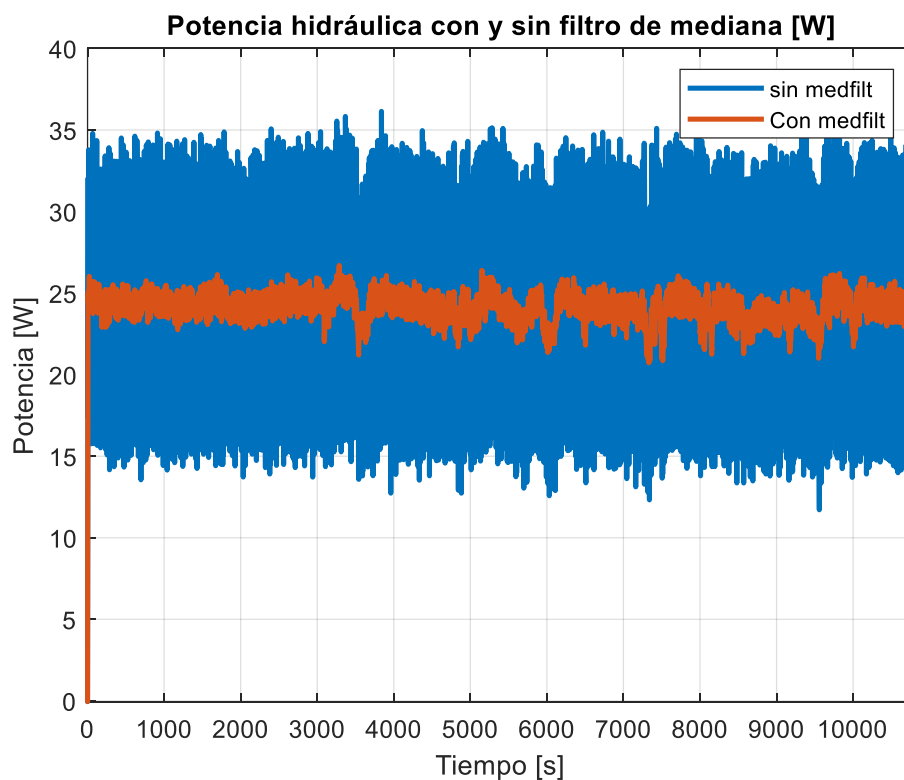


Fig. 4-13. Potencia Hidráulica del SBFV sin y con filtro de mediana.

4.4 Evaluación de SBFV - día completo de operación

Las pruebas de día completo consisten en el monitoreo y estimación de variables como el voltaje y corriente de alimentación, velocidad, torque eléctrico, presión de succión, presión de impulsión y caudal de un SBFV funcionando desde la mañana hasta el anochecer, así poder captar el comportamiento del sistema ante la salida y ocultamiento del sol. Las pruebas se realizaron con un string de 10 y 7 paneles, además el inversor de marca ABB fue configurado para utilizar el control escalar y para bombeo fotovoltaico. Se realizó dos pruebas de día completo por cada configuración de string, una con la bomba de agua configurada con una conexión en estrella y otra prueba de día completo fue configurada con una conexión en delta. Hay que añadir también que las pruebas se dividirán 3 tramos de tiempo iguales.

4.4.1 SBFV configurado en estrella con 10 paneles solares.

El día realizado esta prueba fue el 17 de enero del 2023, para ver la irradiancia del día en un solo grafico se encuentra en el anexo C y se dividirá la prueba en 3 tramos de tiempo.

4.4.1.1 Tramo 1 (desde las 7:00 hasta las 11:36)

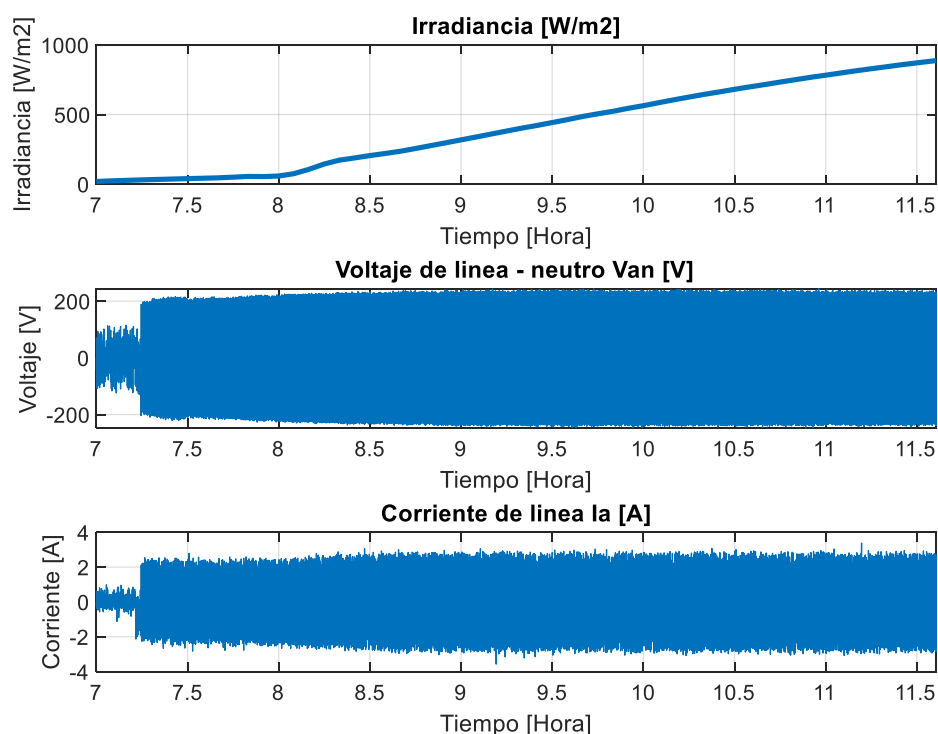


Fig. 4-14. Irradiancia, Voltaje y Corriente de línea de la fase A en tramo 1 de tiempo.

En la Figura 4-14 se observa la irradiancia, voltaje y corriente de una de la fase de la bomba de agua, se muestra solo una fase para una mejor visualización. Si se desea ver los otros Voltajes y Corrientes estos se encuentran en el anexo D. Se observa que entre las 7 y 8 de la mañana la irradiancia es poca y va en aumento lentamente pero el inversor trata de alimentar la bomba y lanza pulsos de voltaje y corriente. Después de las 8 am la irradiancia comienza a aumentar constantemente lo que provoca un aumento en el voltaje y corriente en la amplitud y frecuencia. En este tramo de tiempo la irradiancia llega a un peak máximo de 883 [W/m²], la amplitud del voltaje y corriente máximo en el tramo son de 200 [V] y 1.8 [A] respectivamente. Si se desea ver los demás voltajes y corrientes se encuentran en el anexo D.

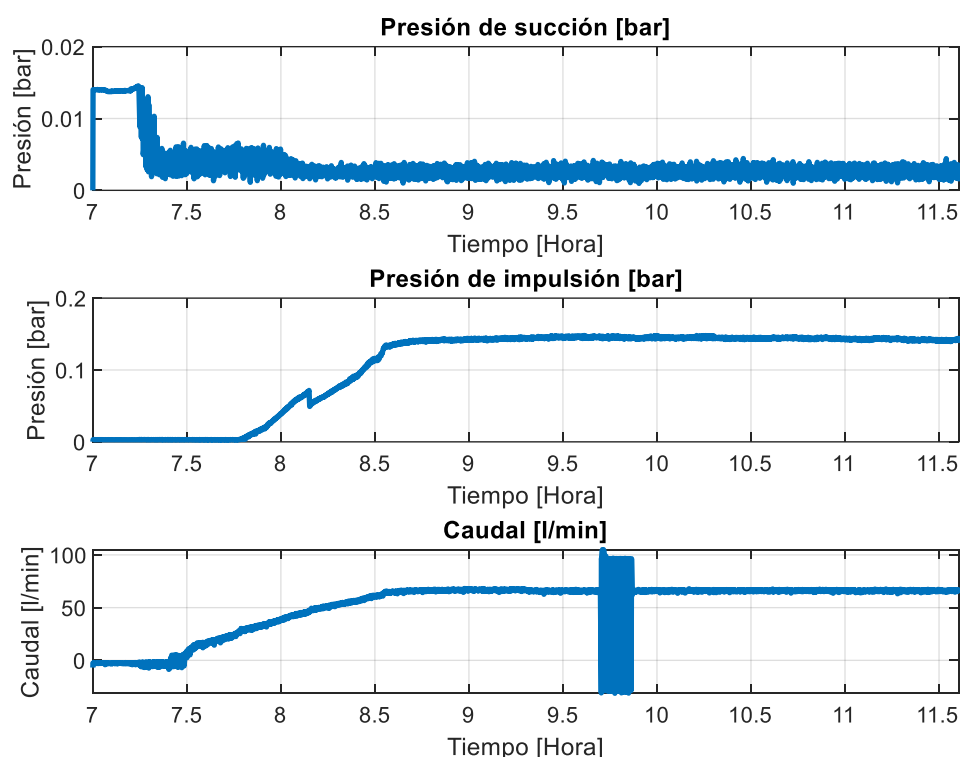


Fig. 4-15. Presiones y Caudal del SBFV en tramo 1.

En la figura 4-15 se aprecian la presión de succión, impulsión y el caudal del SBFV configurado en estrella con 10 paneles para el primer tramo de tiempo. La presión de succión es baja prácticamente cero en todo el tramo en donde el SBFV está en funcionamiento, en cambio la presión de impulsión es 0 [bar] hasta que comienza un incremento desde las 7:50 hasta las 8:35 horas donde alcanza un valor de 0.14 [bar]. El caudal presenta un incremento desde las 7:25 hasta las 8:35, este incremento va desde 0 [l/min] hasta los 60 [l/min], además hay que notar que la medición presenta

una perturbación desde las 9:40 hasta las 9:55. Esta perturbación se presentó en las distintas pruebas tomadas el mes de enero ocurriendo siempre entre las 9:00 hasta las 11:30, la hipótesis del porqué ocurre esta perturbación es debido al módulo de conversión de corriente a voltaje XY-IT0V se encuentra desprotegido y es interferido por algún campo magnético generando ruido en el laboratorio de energías renovables de la UCSC donde se encuentra el área de trabajo.

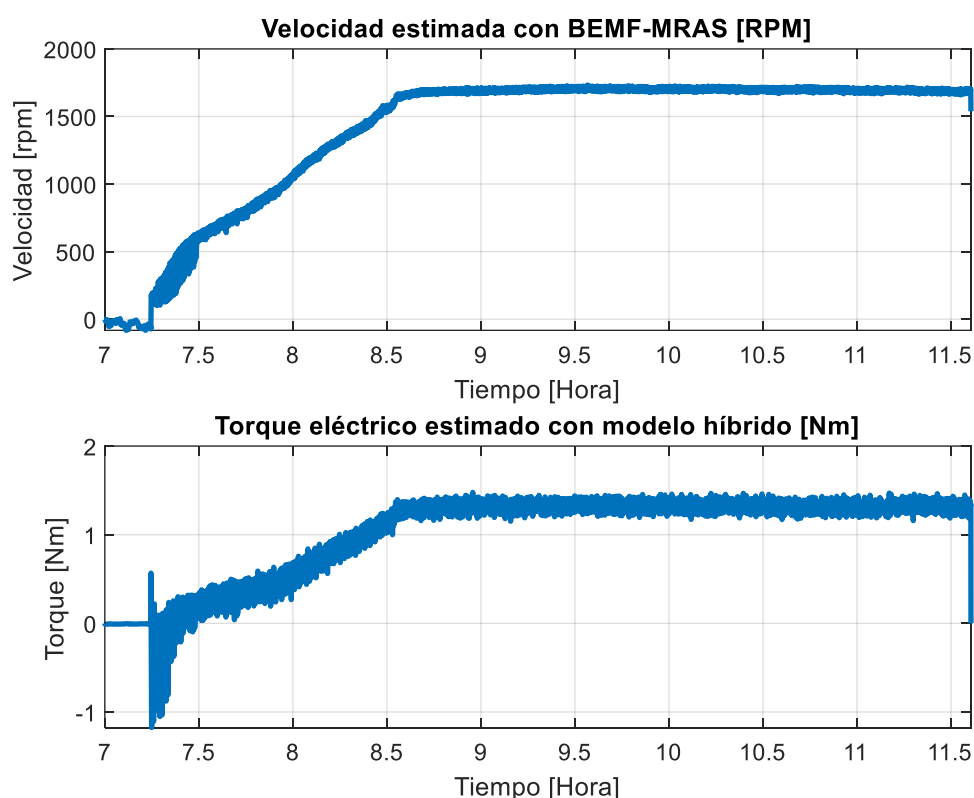


Fig. 4-16. Velocidad y Torque estimados de la bomba de agua en tramo 1 de tiempo.

En la figura 4-16 se muestran la velocidad y torque estimados por los observadores en el primer tramo de tiempo de la prueba del SBFV configurado en estrella con 10 paneles. La velocidad va en aumento desde las 7:15 hasta las 8:35 horas este aumento va desde 0 [rpm] hasta alcanzar los 1670 [rpm], el torque eléctrico estimado gracias el modelo híbrido también se incrementa al mismo tiempo que la velocidad, pero su incremento va de 0 [Nm] hasta los 1.3 [Nm].

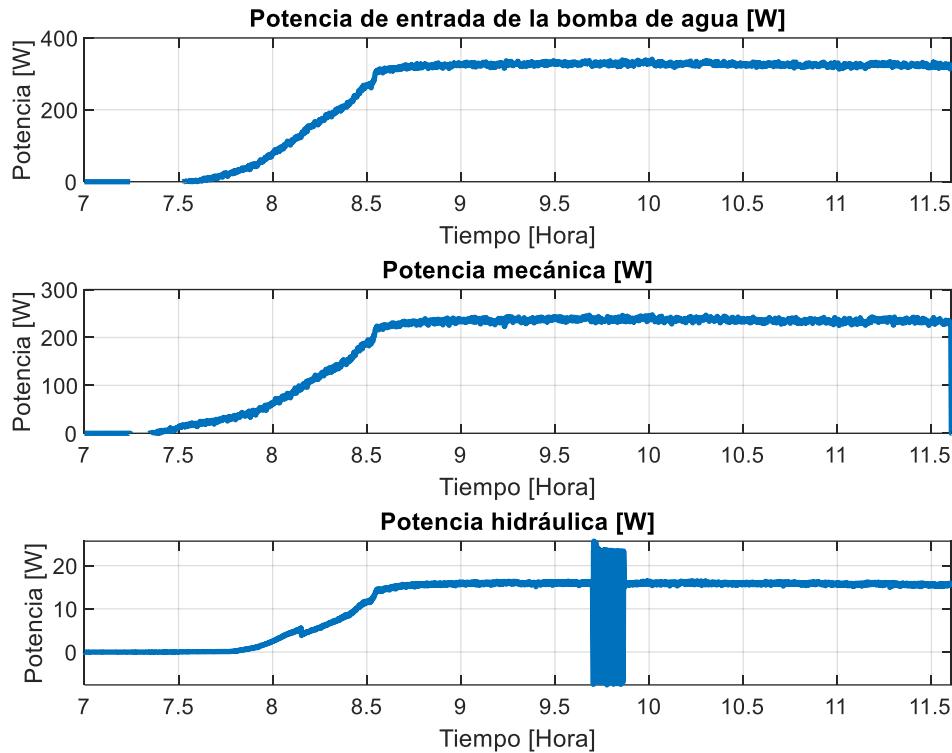


Fig. 4-17. Potencia de entrada, mecánica e hidráulica del SBFV en el tramo 1 de tiempo.

La figura 4-17 nos muestra algunas de las potencias que se encuentran presentes en el SBFV, la potencia de entrada va en aumento desde las 7:25 hasta las 8:35 horas donde alcanza el valor de 313.9 [W], después de alcanzar ese valor la potencia de entrada no aumenta de manera considerable. La potencia mecánica presenta la misma forma que la potencia de entrada, pero su valor alcanzado a las 8:35 horas es de 220.3 [W] este valor es menor debido a que esta potencia es la que entrega en el eje del motor de la bomba de agua, por lo que la diferencia entre las potencias es debido a las pérdidas que presenta el motor de la bomba. La potencia hidráulica va en aumento desde las 7:45 hasta las 8:35 horas donde alcanza un valor de 14.65 [W] este valor es considerablemente menor que las anteriores potencias debido a que está relacionada a la potencia necesaria para mover el agua al lugar de destino y como se puede notar en la figura 2-1 la altura donde el agua es elevada es solo a 1.3 metros. Otra cosa para notar en la potencia hidráulica es la perturbación ocurrida entre las 9:40 y 9:55 horas, esto es debido a que la potencia hidráulica es calculada en función al caudal el cual presenta esta misma perturbación.

4.4.1.2 Tramo 2 (desde las 11:36 hasta las 16:13)

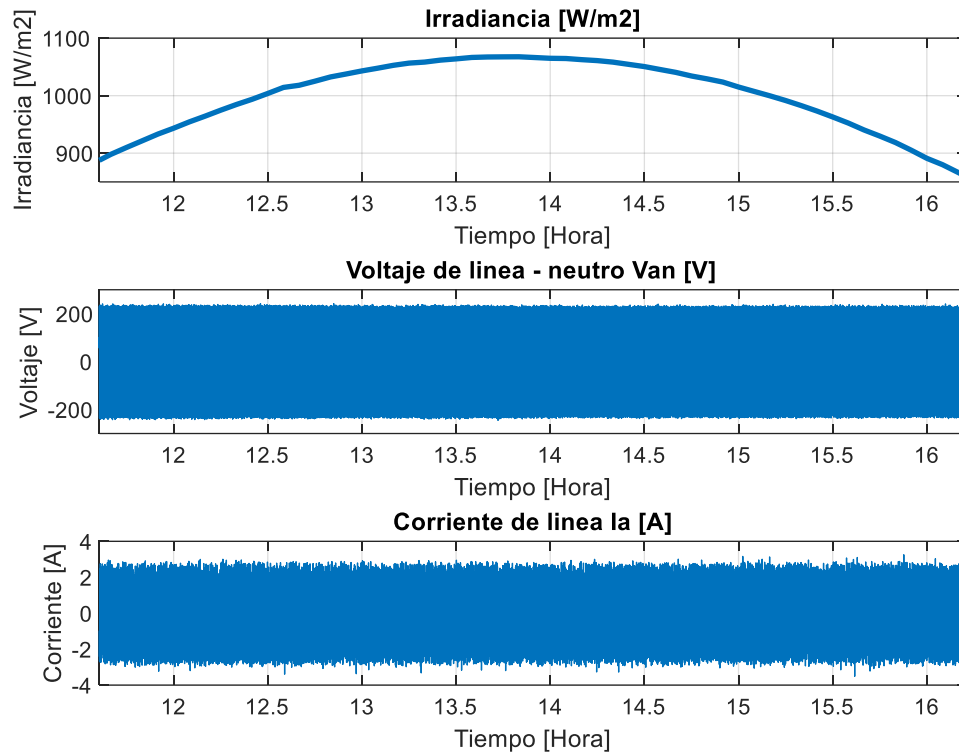


Fig. 4-18. Irradiancia, Voltaje y Corriente de línea de la fase A en tramo 2 de tiempo.

En la figura 4-18 se muestran la irradiancia, voltaje y corriente de línea de la prueba de día completo de operación con el SBFV configurado en estrella con 10 paneles solares en el segundo tramo de tiempo. La irradiancia en este tramo llega a 1067 [W/m2] el cual es el peak máximo del día y es alcanzado a las 13:45 después de alcanzar este máximo la irradiancia comienza a decaer. El voltaje y corriente alcanzan una amplitud máxima de 210 [V] y 1.8 [A]. La amplitud máxima alcanza de voltaje en esta prueba es inferior al voltaje nominal de la bomba de agua configurada que corresponde a 400 [V], por lo que se espera que en esta prueba el SBFV no trabaje en sus valores nominales en ningún momento del día.

La figura 4-19 nos muestran las presiones de succión e impulsión, además del caudal generado por el SBFV en el segundo tramo de tiempo. La presión de succión del sistema es 0.003 [bar] lo cual es bastante baja si la comparamos con la presión de impulsión la cual es de 0.141 [bar] estas presiones se mantienen prácticamente constantes en lo que transcurre este tramo de tiempo. El caudal máximo registrado en el segundo tramo de tiempo de esta prueba es de 66 [l/min].

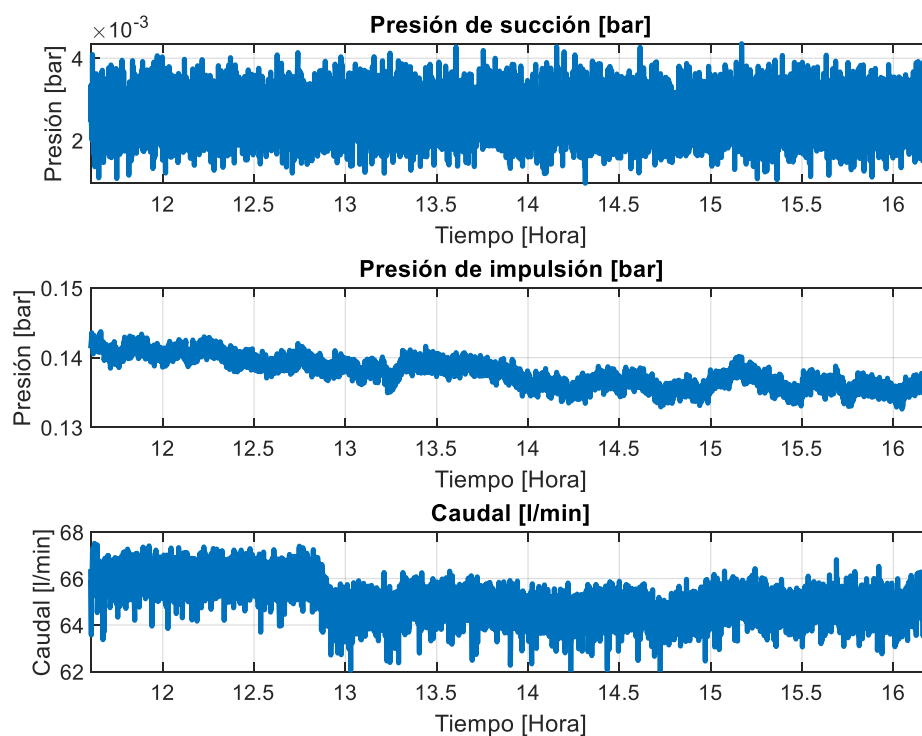


Fig. 4-19. Presiones y Caudal del SBFV en tramo 2 de tiempo.

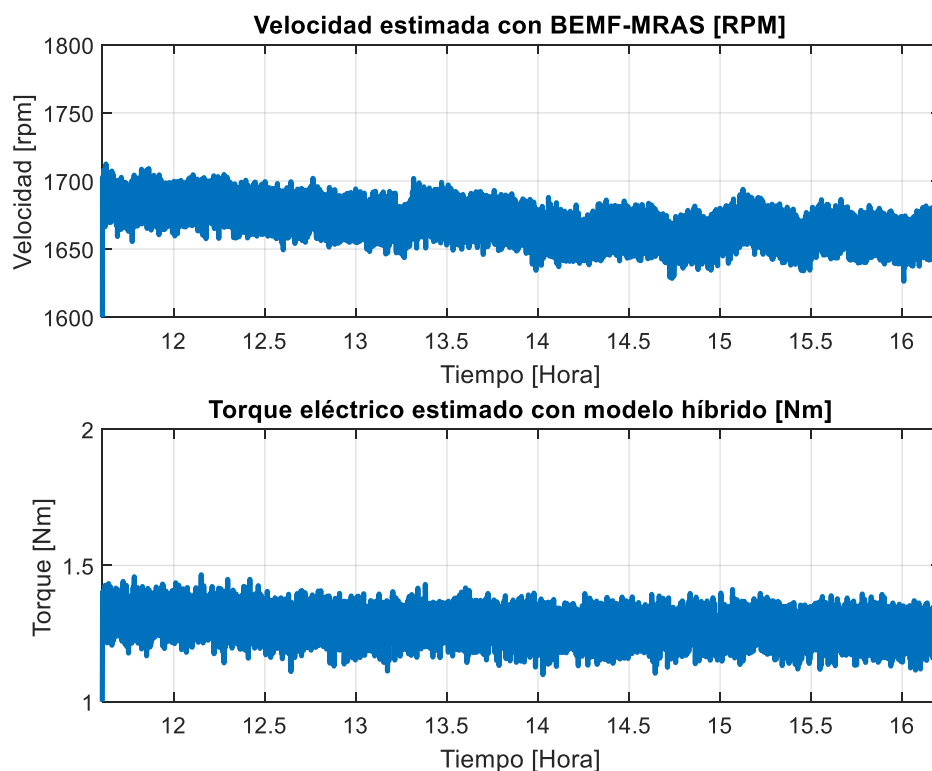


Fig. 4-20. Velocidad y Torque estimados de la bomba de agua en tramo 2 de tiempo.

La figura 4-20 se ve la velocidad y torque estimados en el segundo tramo de tiempo, la velocidad máxima alcanzada es de 1690 [rpm] lo cual es inferior a los 2800 [rpm] que corresponde a la velocidad nominal del motor y el torque eléctrico máximo es de 1.35 [Nm], en este tramo la velocidad y torque no presentan una variación notable.

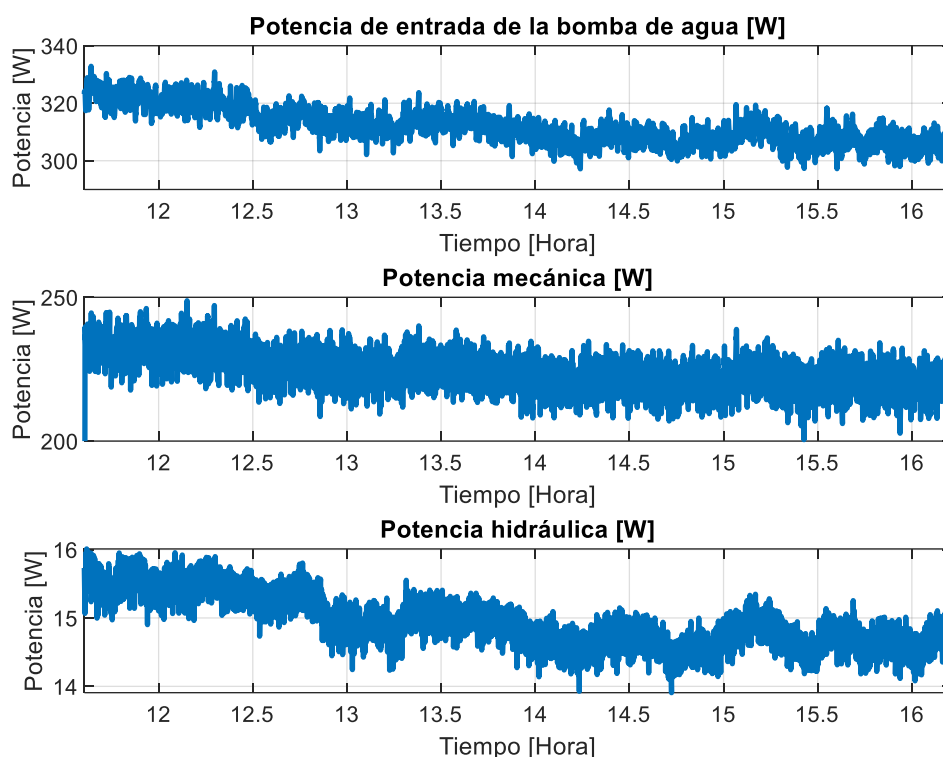


Fig. 4-21. Potencia de entrada, mecánica e hidráulica del SBFV en el tramo 2 de tiempo.

En la figura 4-21 se observa la potencia de entrada, la potencia mecánica y la potencia hidráulica del SBFV en el segundo tramo de tiempo para la primera prueba de día completo de operación. En este tramo de tiempo es donde la prueba alcanza las potencias sus máximos valores, para la potencia de entrada de la bomba es de 327.4 [W] y al final del tramo disminuyo hasta los 307.2 [W]. La potencia mecánica máxima alcanzada es de 235.43 [W] y para el tiempo final del tramo disminuyo hasta los 213.6 [W] y la potencia hidráulica máxima alcanzada es de 15.5 [W] y para el final del tramo disminuye hasta los 14.6 [W]. La diferencia entre la potencia de entrada y la potencia mecánica es de 91.97 [W].

4.4.1.3 Tramo 3 (desde las 16:13 hasta las 20:50)

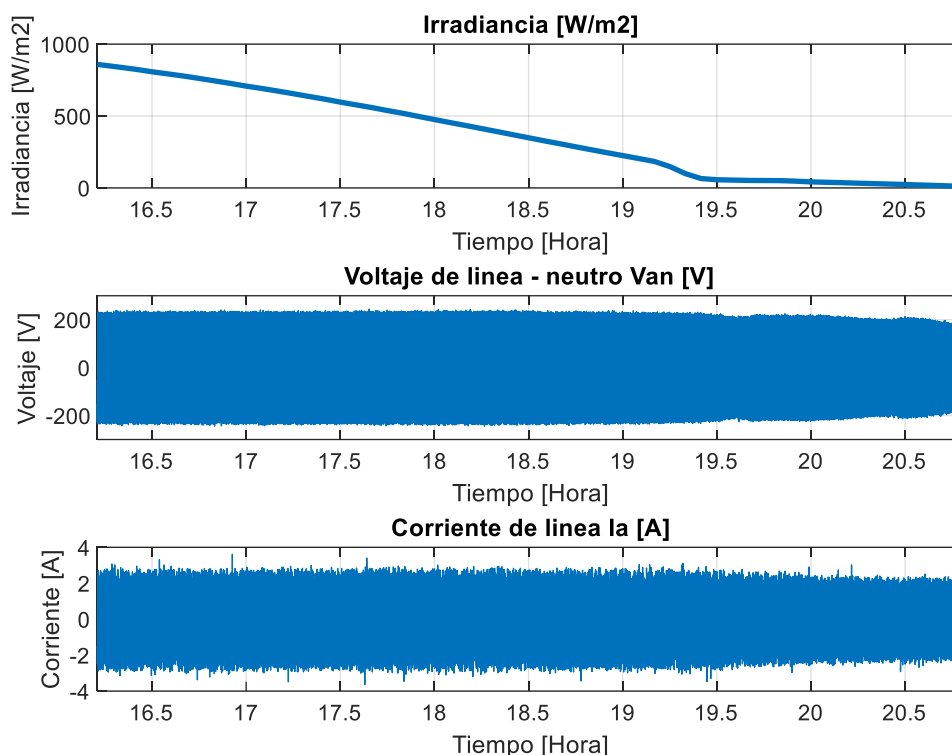


Fig. 4-22. Irradiancia, Voltaje y Corriente de línea de la fase A en tramo 3 de tiempo.

En la figura 4-22 se muestran la irradiancia, voltaje y corriente de línea de la prueba en el tercer y último tramo de tiempo en la cual se encuentra la puesta del sol, por lo cual la irradiancia se encuentra en constante decrecimiento y es casi nula a las 19:25 hora. La irradiancia máxima en este tramo sucede a las 16:13 cuando inicia el tramo, su valor es de 852 [W/m²] y la amplitud máxima del voltaje y corriente es de 198 [V] y 1.7 [A].

La presión de succión, presión de impulsión y caudal obtenidas en el tercer tramo de tiempo de la prueba se muestran en la figura 4-23. Como ocurre en los otros tramos de tiempo la presión de succión tiende a cero y la presión de impulsión máxima es de 0.14 [bar] y comienza su disminución a las 19:30 hasta alcanzar el valor de 0 [bar] a las 20:05 horas. El caudal máximo en este tramo de tiempo es de 65 [l/min] y comienza a disminuir a las 19:30 hasta las 20:25 horas donde el caudal es 0 [l/min], Las disminuciones de las variables medidas en este tramo es debido a que el tiempo corresponde a la hora de la puesta de sol lo que conlleva una disminución de irradiancia.

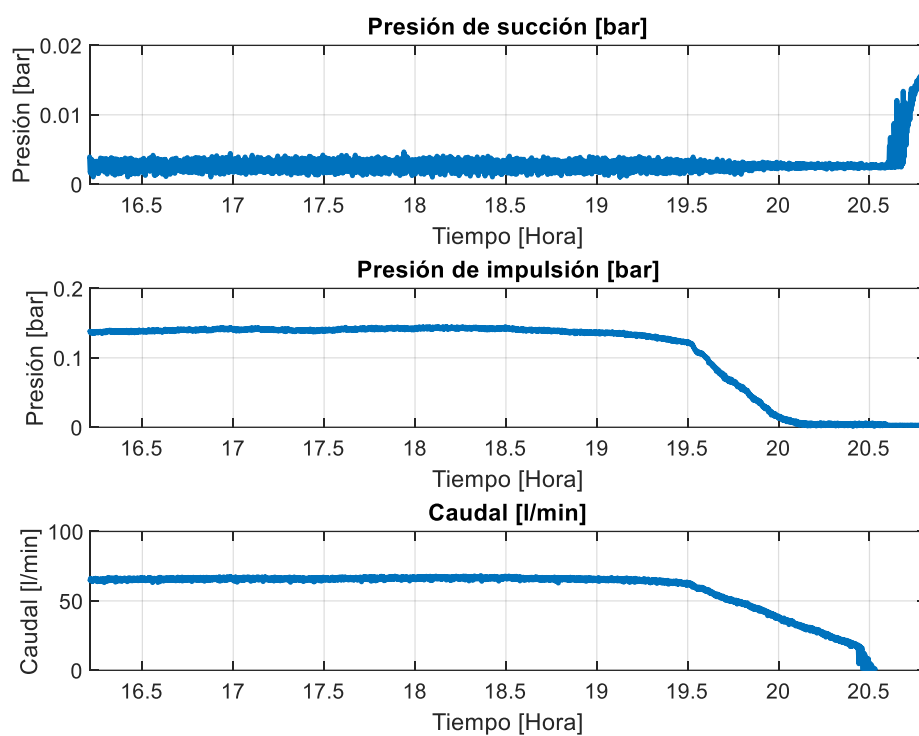


Fig. 4-23. Presiones y Caudal del SBFV en tramo 3 de tiempo.

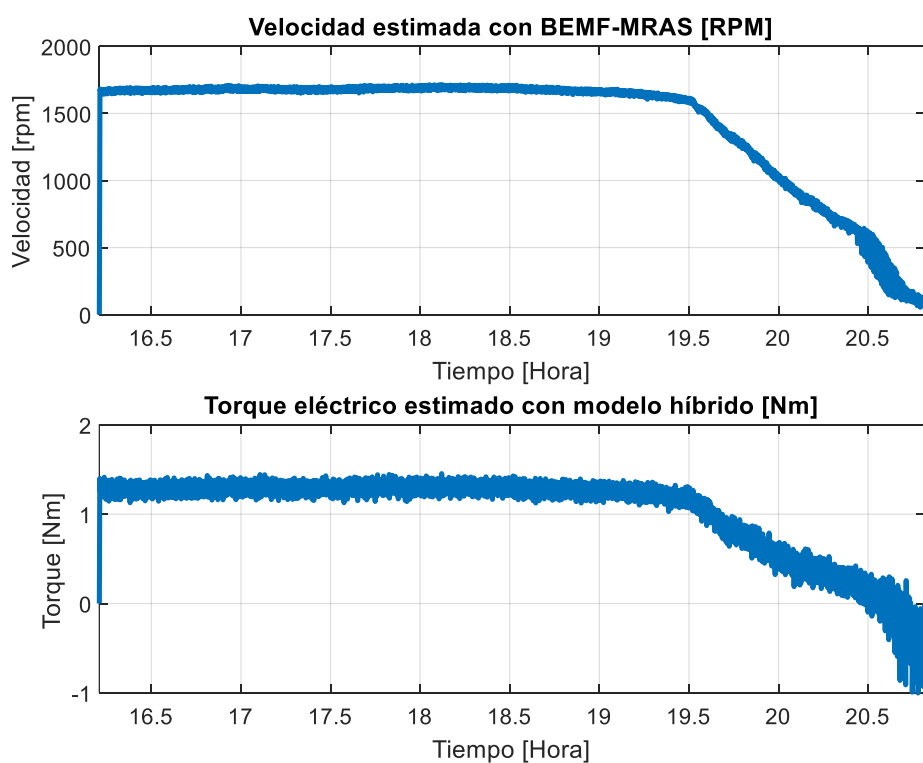


Fig. 4-24. Velocidad y Torque estimados de la bomba de agua en tramo 3 de tiempo.

En la figura 4-24 se aprecia la velocidad y torque eléctrico estimados en el tercer tramo de tiempo, se ve que la velocidad disminuye desde las 19:30 hasta las 20:50 horas hay que notar en la figura 4-16 que la bomba ha dejado de bombear un caudal a las 20:25 pero la velocidad del motor a esa hora era de 650 rpm, esto nos dice que el motor de la bomba siguió funcionando, pero la velocidad es tan baja que no es capaz de bombear agua por la tubería de impulsión o que el sensor de caudal no puede detectar caudales tan bajo.

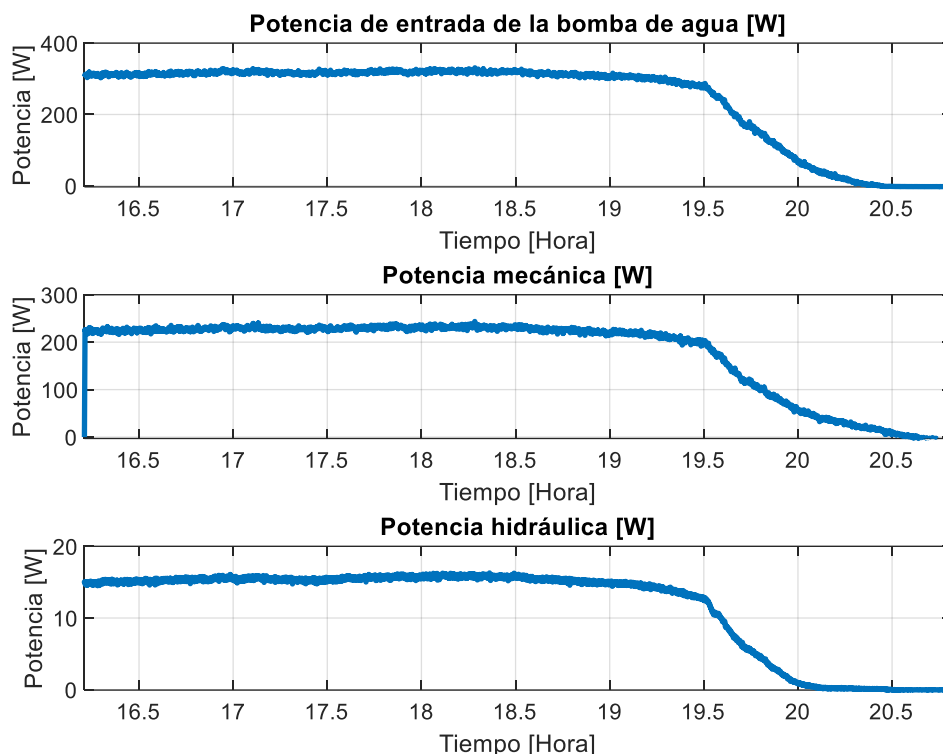


Fig. 4-25. Potencia de entrada, mecánica e hidráulica del SBFV en el tramo 3 de tiempo.

En la figura 4-25 se muestran la potencia de entrada, potencia mecánica y la potencia hidráulica. La potencia de entrada de la bomba de agua la mayor parte del tramo de tiempo 3 se mantiene sin mucha variación con un valor de 320 [W] hasta que comienza a disminuir a las 19:25 hasta las 20:30 horas que la potencia es nula. La potencia mecánica ocurre lo mismo que en la potencia mecánica pero el valor es de 222 [W]. Con respecto a la potencia hidráulica esta comienza a disminuir a las 19:45 horas y llega a ser nula a las 20:10 horas.

En la tabla 4-2 se presentan los valores máximos alcanzados en la prueba del SBFV configurado en estrella con 10 paneles fotovoltaicos.

Tabla 4-2. VALOR MÁXIMO ALCANZADO POR LAS VARIABLES DE INTERÉS (ESTRELLA-10 PANELES).

Variable	Magnitud máxima
Voltaje de línea - neutro	210 [V]
Corriente de línea	1.8 [A]
Presión de succión	0.003 [bar]
Presión de impulsión	0.141 [bar]
Caudal	66 [l/min]
Velocidad estimada	1690 [rpm]
Torque eléctrico estimado	1.31 [Nm]
Potencia de entrada	327.4 [W]
Potencia mecánica	235.43 [W]
Potencia hidráulica	15.5 [W]

4.4.2 SBFV configurado en delta con 10 paneles solares.

El día realizado esta prueba fue el 24 de enero del 2023, para ver la irradiancia del día en un solo gráfico se encuentra en el anexo C y se dividirá la prueba en 3 tramos de tiempo.

4.4.2.1 Tramo 1 (desde las 7:30 hasta las 11:50)

En la Figura 4-26 se observa la irradiancia, el voltaje y la corriente de una de la fase de la bomba de agua, se muestra solo una fase para una mejor visualización. Si se desea ver los otros voltajes y corrientes estos se encuentran en el anexo D. La irradiancia va en aumento constante desde las 7:50 hasta las 11:50, esto es debido a que este tramo de tiempo corresponde a la mañana del día donde el sol comienza a salir. La irradiancia máxima alcanza en este tramo de tiempo es de 940.8 [W/m²] que ocurre al final del tramo de tiempo, otro evento interesante a notar es la caída de irradiancia que ocurre entre las 9:35 y las 10:30 horas, esto podría deberse a un nublado parcial del día por las nubes.

El voltaje V_{ab} va en aumento la frecuencia y la amplitud a medida que la irradiancia va en aumento hasta llegar a una amplitud de 323.3 [V] y frecuencia de 50 [Hz] al igual que a corriente de fase I_{ab} va en aumento hasta alcanzar un valor de 2.5 [A]. Se debe notar dos cosas la primera es que la variación de irradiancia anteriormente mencionada se ve reflejada en las señales de voltaje y corriente, la segunda que los valores de voltaje y corriente de fase alcanzan los valores nominales de alimentación de la bomba de agua, por lo que se espera que el SBFV trabaje en sus valores nominales.

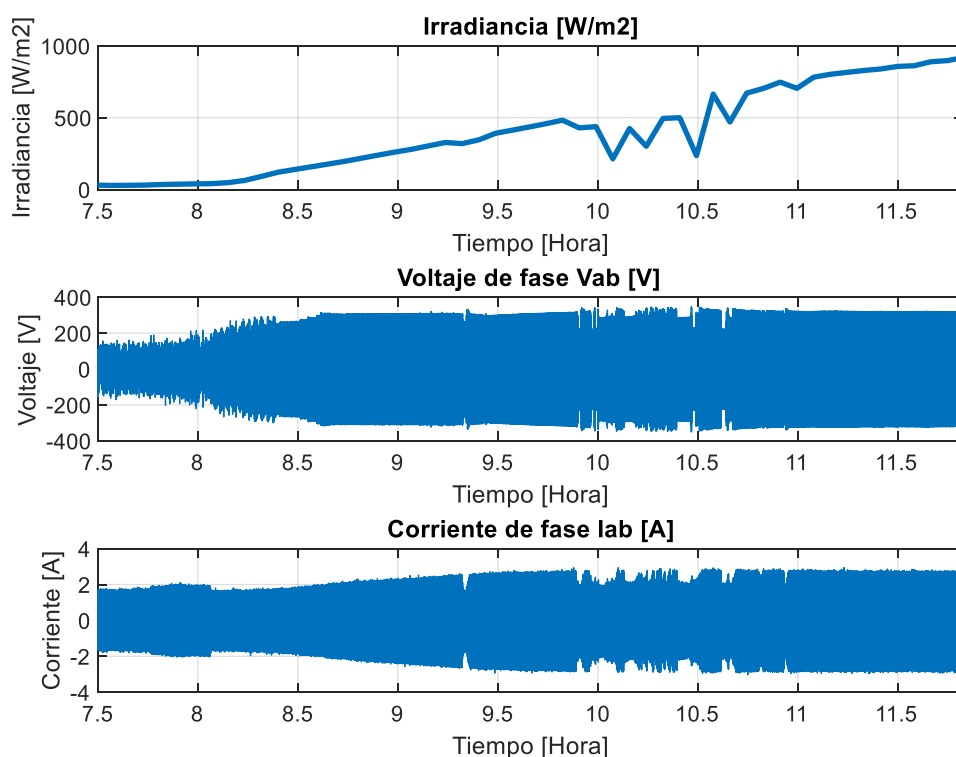


Fig. 4-26. Irradiancia, Voltaje y Corriente de fase (a-b) en tramo 1 de tiempo.

La figura 4-27 se ve la presión de succión, presión de impulsión y el caudal del SBFV en el tramo 1 de tiempo. El valor de la presión de succión es de 0.003 [bar] el cual es muy cercano a cero [bar], en cambio el valor de la presión de impulsión no es nulo y va en aumento hasta llegar a los 0.29 [bar] a las 9:00 horas. Para el caudal podemos notar que presenta la misma perturbación que en la prueba anterior y el valor máximo alcanzado es de 90 [l/min].

En la figura 4-28 se muestra la velocidad alcanzada por el motor de la bomba de hidráulica y el torque eléctrico generado en el primer tramo de tiempo. La velocidad va en aumento desde las 8:00 horas y alcanza una velocidad de 2830 [rpm], esta velocidad es ligeramente superior a la velocidad nominal de la bomba que corresponde a 2800 [rpm]. El torque eléctrico va en aumento al igual que la velocidad, pero este alcanza un valor de 1.95 [Nm] lo cual es inferior a los 2.5 [Nm] que equivalen al torque nominal de la bomba, esto puede deberse porque la bomba al estar en tan baja altura no presenta una carga muy pesada para levantar el agua. Las variaciones presentadas en el voltaje y corriente de fase se ven su efecto en la velocidad y torque eléctrico.

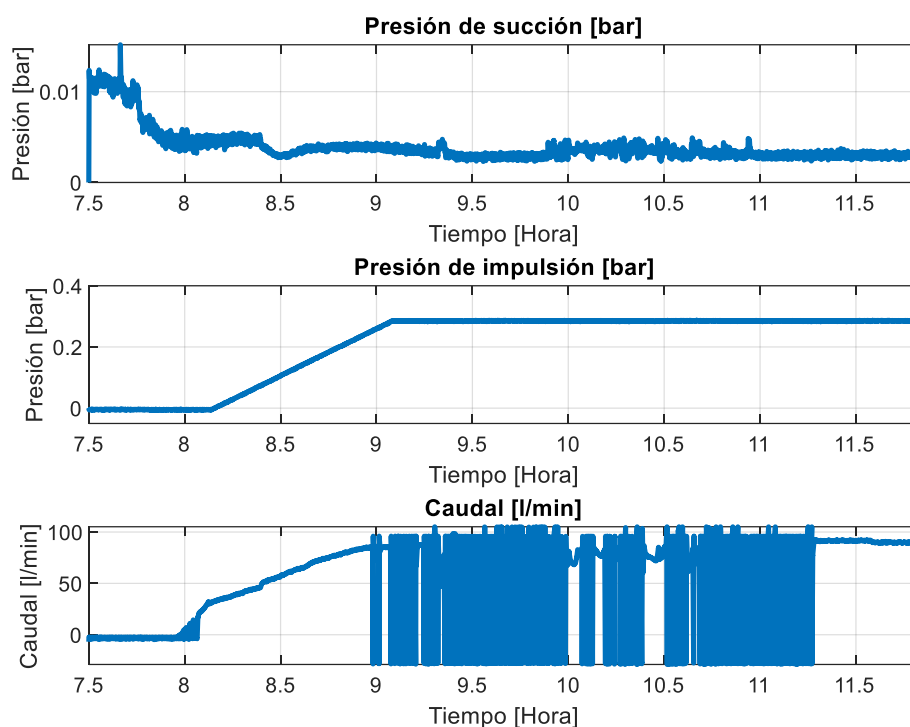


Fig. 4-27. Presiones y Caudal del SBFV en tramo 1 de tiempo.

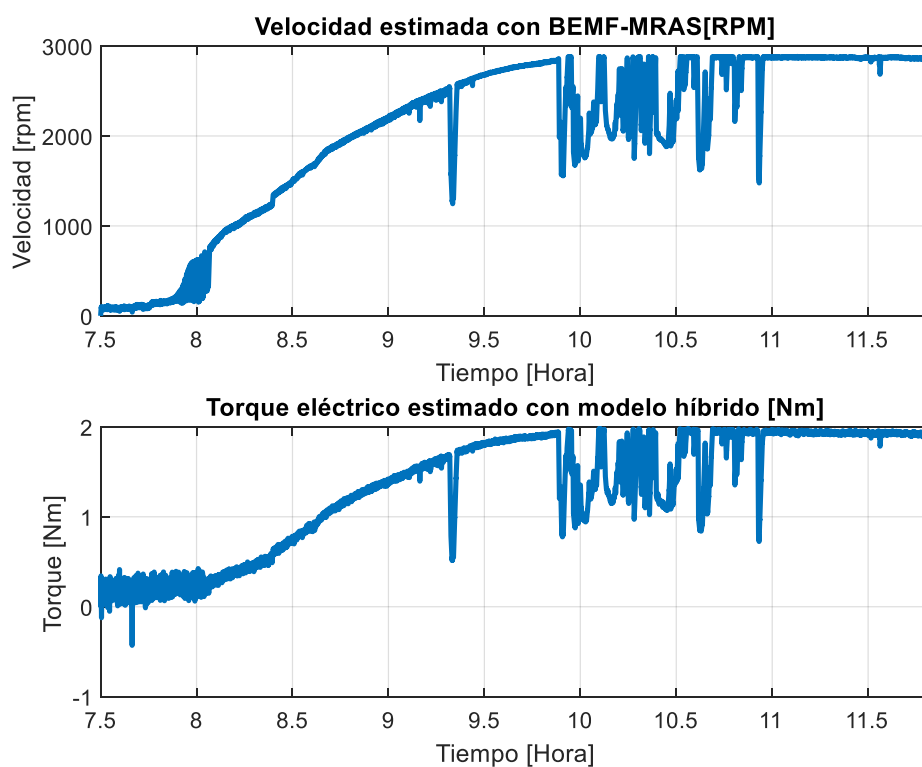


Fig. 4-28. Velocidad y Torque estimados de la bomba de agua en tramo 1 de tiempo.

La potencia de entrada, mecánica e hidráulica del primer tramo de tiempo de la prueba de día completo de operación del SBFV configurado en delta con 10 paneles se presentan en la figura 4-29. La potencia de entrada de la bomba de agua va aumentando a medida que aumenta la irradiancia debido a que este periodo de tiempo corresponde a la mañana del día llegando a un valor de 650.9[W]. La potencia mecánica también presenta un incremento desde las 8:10 horas y llega a un valor de 580.3[W] y la potencia hidráulica llega a 42.2 [W]. hay que notar que en la potencia de entrada y la potencia mecánica presenta una variación desde las 9:50 hasta las 10:50 horas debido a la variación mencionada anteriormente en el voltaje y corriente de fase, además la potencia hidráulica presenta la misma perturbación que el caudal ya que esta es calculada en función del caudal.

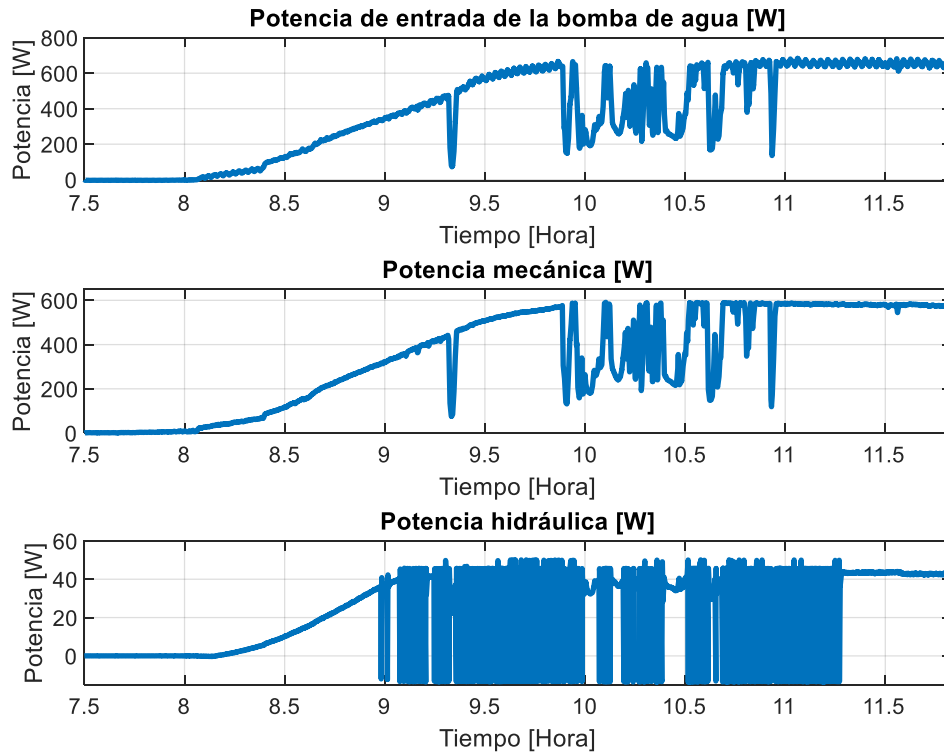


Fig. 4-29. Potencia de entrada, mecánica e hidráulica del SBFV en el tramo 1 de tiempo.

4.4.2.2 Tramo 2 (desde las 11:50 hasta las 16:10)

La figura 4-30 muestra la irradiancia, el voltaje de fase y la corriente de fase en el segundo tramo de tiempo para la prueba de día completo de operación del SBFV configurado en delta con 10 paneles fotovoltaico. En este periodo de tiempo la irradiancia alcanza su valor máximo del día el cual corresponde a $1111.9 \text{ [W/m}^2\text{]}$, la amplitud máxima del voltaje V_{ab} es de 325.2 [V] y de la corriente I_{ab} es de 2.56 [A] . La irradiancia presenta una variación que se ve reflejada en las señales de voltaje y corriente.

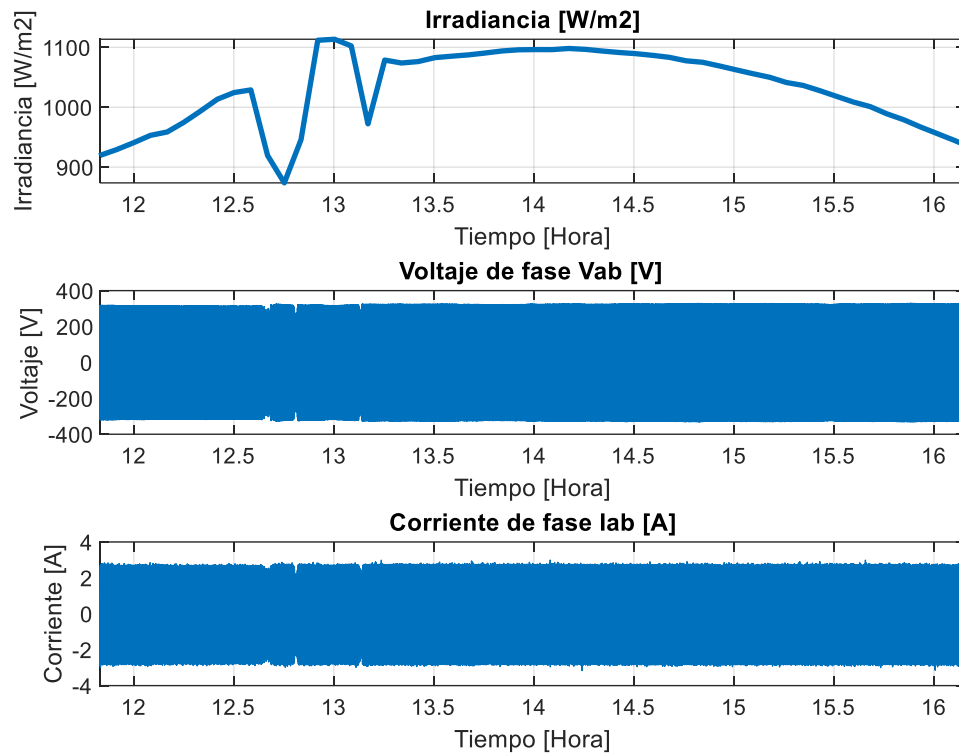


Fig. 4-30. Irradiancia, Voltaje y Corriente de fase (a-b) en tramo 2 de tiempo.

En la figura 4-31 se aprecia la presión de succión, la presión de impulsión y el caudal del SBFV en el segundo tramo de tiempo. Se observa que los gráficos no sufren una gran variación en el tiempo por lo que sus valores máximos alcanzados son de 0.003 [bar] para la presión de succión, de 0.29 [bar] para la presión de impulsión y 90 [l/min] para el caudal.

Se puede ver en la figura 4-32 la velocidad y torque eléctrico del motor de la bomba de agua en el segundo tramo de tiempo. La velocidad máxima alcanzada es 2850 [rpm] y el torque eléctrico alcanzado en este periodo de tiempo es de 1.96 [Nm] . Las gráficas presentan una variación debido a la variación de las señales de voltaje y corrientes mencionada anteriormente.

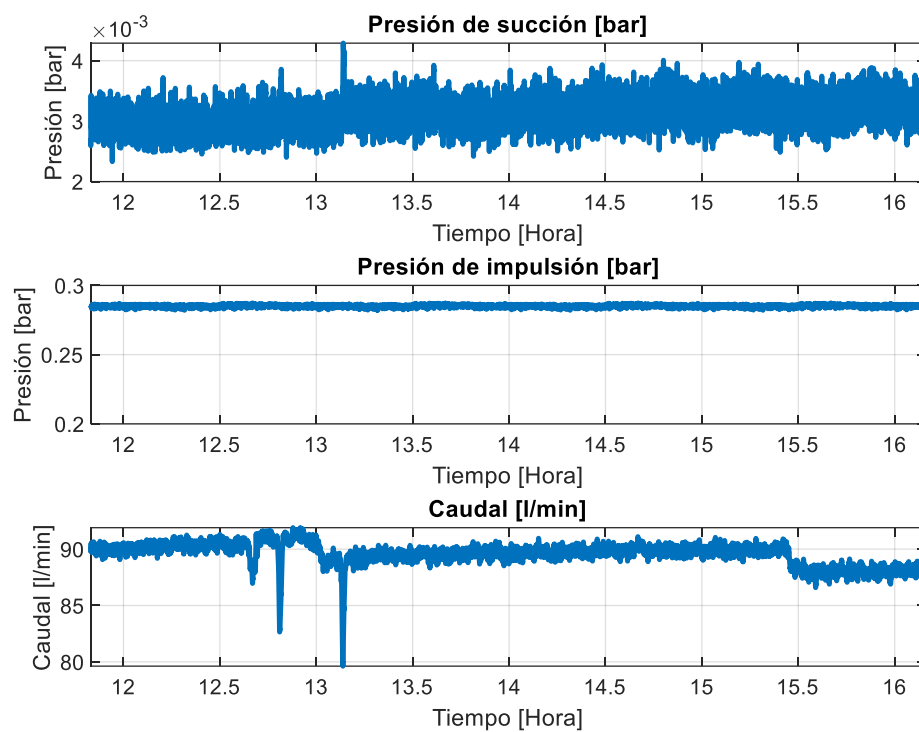


Fig. 4-31. Presiones y Caudal del SBFV en tramo 2 de tiempo.

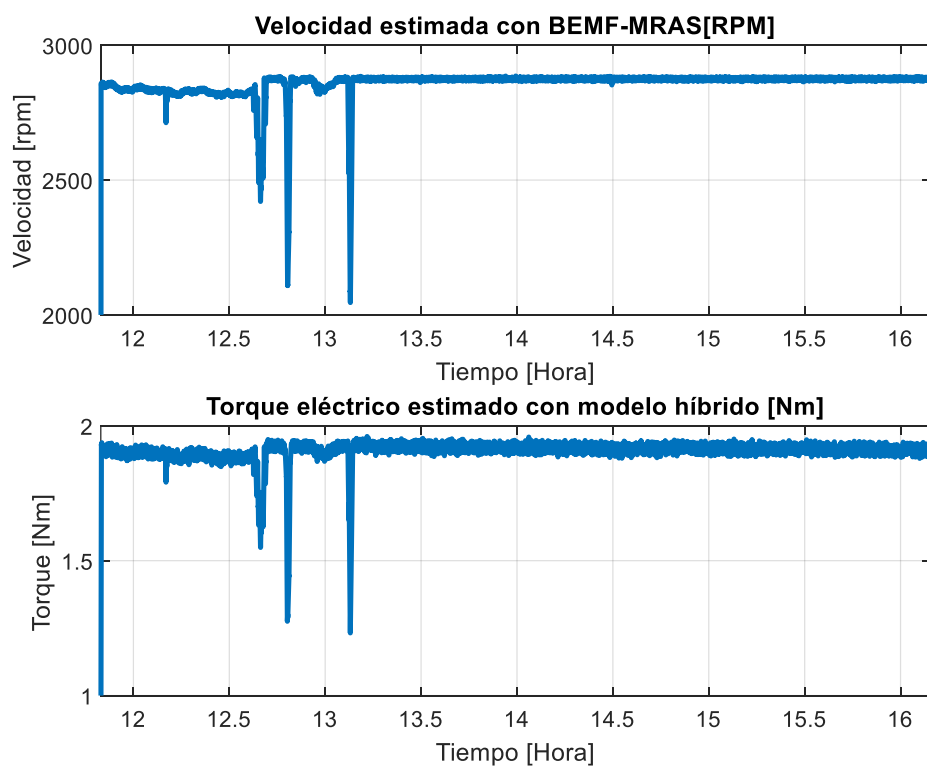


Fig. 4-32. Velocidad y Torque estimados de la bomba de agua en tramo 2 de tiempo.

La figura 4-33 muestra la potencia de entrada, la potencia mecánica y la potencia hidráulica del SBFV en el segundo periodo de tiempo. La potencia de entrada máxima de la prueba aparece en este tramo de tiempo y es de 660.4 [W], para la potencia mecánica de 590.7 [W] y de la potencia hidráulica de 43.6 [W]. La potencia de entrada y mecánica presentan una variación entre las 12.46 y 13:15 hora debido a la variación que se produce en el voltaje y corriente de fase, la variación ocurrida en la potencia hidráulica se debe a la variación de caudal ya que esta es calculada en función de este. La diferencia que existe entre la potencia de entrada y la potencia mecánica es de 69.7 [W].

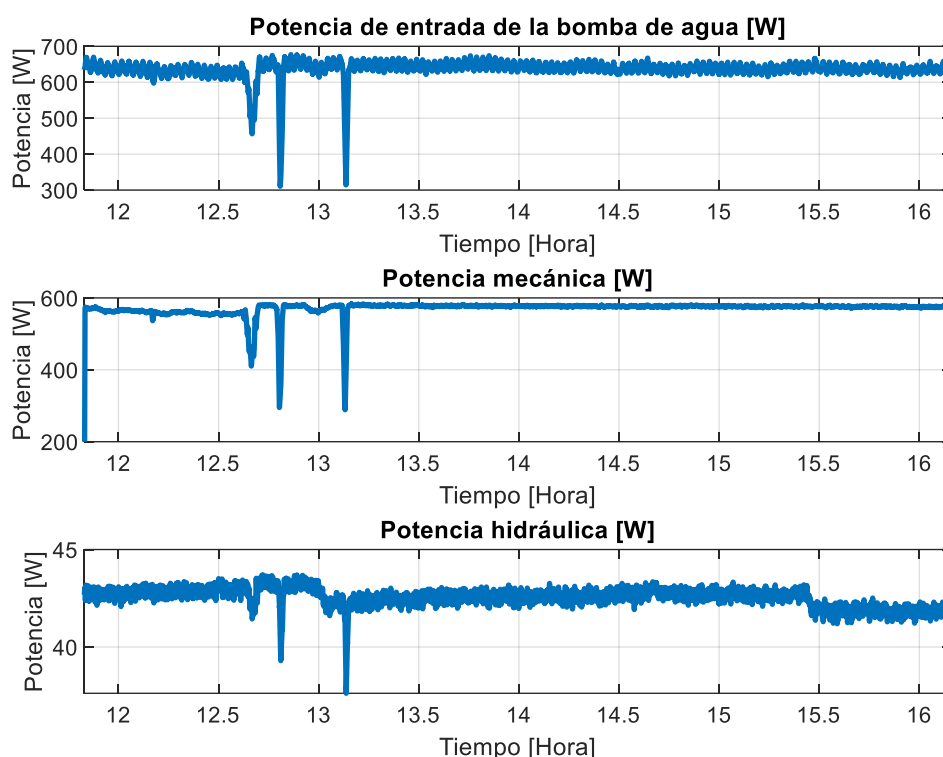


Fig. 4-33. Potencia de entrada, mecánica e hidráulica del SBFV en el tramo 2 de tiempo.

4.4.2.3 Tramo 3 (desde las 16:10 hasta las 20:30)

La figura 4-34 se observan las gráficas de irradiancia, el voltaje V_{ab} y la corriente I_{ab} en el tercer tramo de tiempo. Este tramo corresponde al ocaso del día por lo que la irradiancia va disminuyendo hasta ser casi nula a las 20:00 horas. El voltaje y corriente de fase va disminuyendo debido a la disminución de la irradiancia.

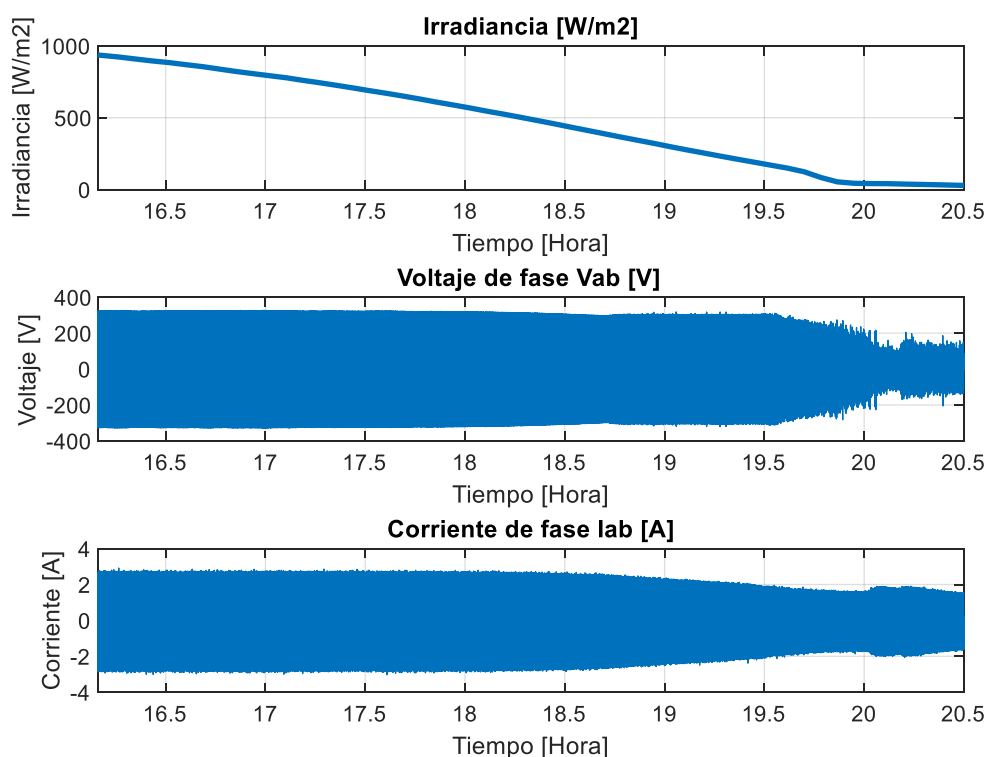


Fig. 4-34. Irradiancia, Voltaje y Corriente de fase (a-b) en tramo 3 de tiempo.

En la figura 4-35 se ve la presión de succión, la presión de impulsión y el caudal del sistema en la prueba de día completo de operación con la bomba de agua configurada en delta con 10 paneles fotovoltaicos. La presión en este periodo de tiempo se mantiene siendo prácticamente nula, pero la presión de impulsión y el caudal va disminuyendo debido a que este periodo corresponde al tiempo donde el sol se oculta para dar paso a la noche.

La velocidad y torque eléctrico para el tercer tramo de tiempo es mostrada en la figura 4-36. Como este periodo de tiempo corresponde al ocaso del día por lo que la velocidad y el torque eléctrico comienzan a disminuir hasta llegar a cero.

La figura 4-37 muestran la potencia de entrada, mecánica e hidráulica en el tercer tramo de tiempo que corresponde a las horas finales del día. Las potencias en este periodo de tiempo van disminuyendo hasta ser nulas debido a la disminución de la irradiancia a medida que cae la noche.

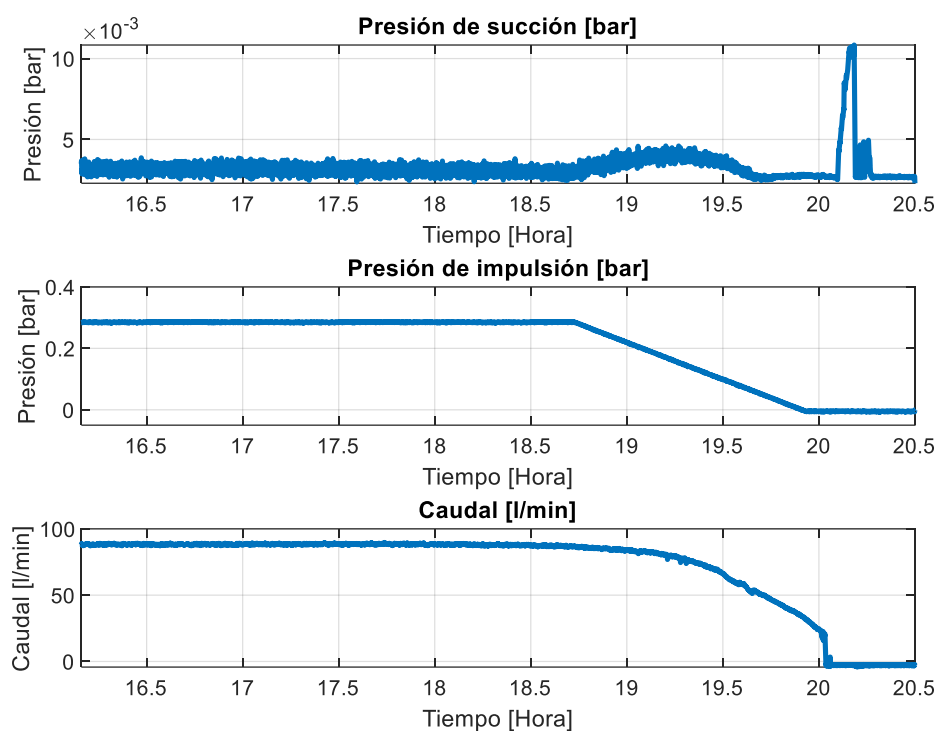


Fig. 4-35. Presiones y Caudal del SBFV en tramo 3 de tiempo.

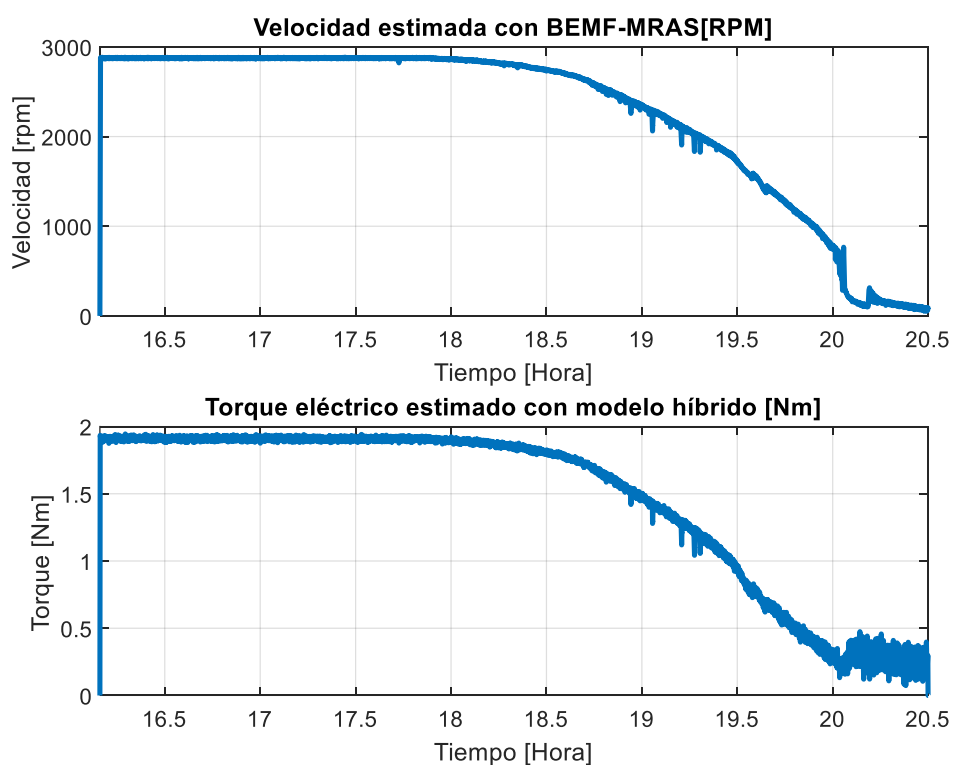


Fig. 4-36. Velocidad y Torque estimados de la bomba de agua en tramo 3 de tiempo.

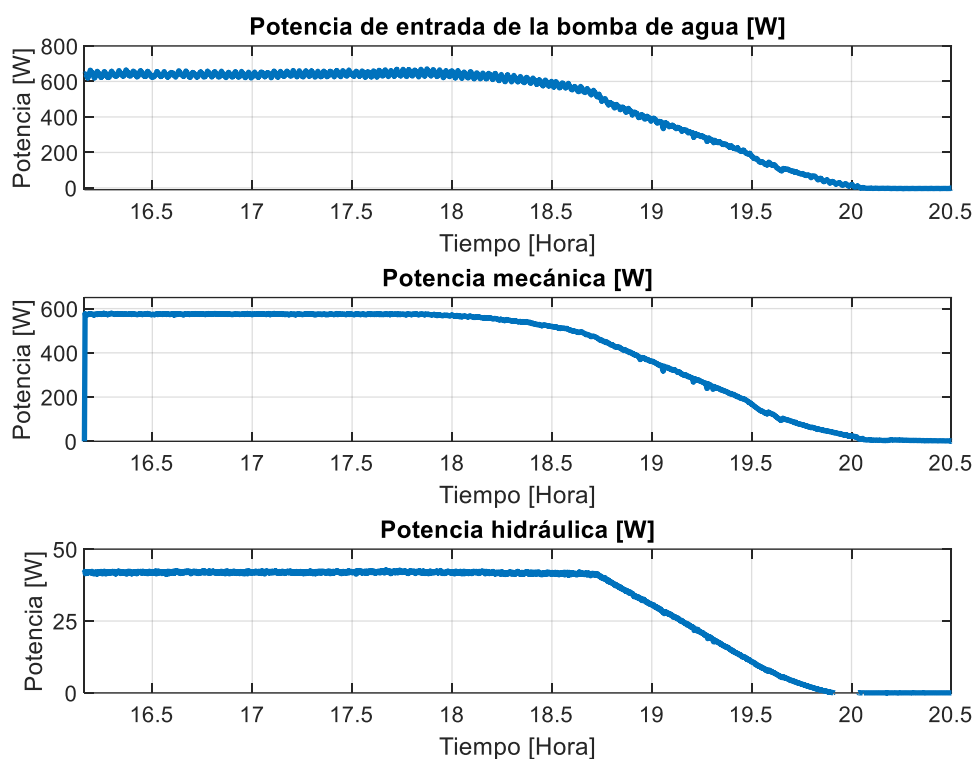


Fig. 4-37. Potencia de entrada, mecánica e hidráulica del SBFV en el tramo 3 de tiempo.

En la tabla 4-3 se presentan los valores máximos alcanzados en la prueba del SBFV configurado en delta con 10 paneles fotovoltaicos.

Tabla 4-3. VALOR MÁXIMO ALCANZADO POR LAS VARIABLES DE INTERÉS (DELTA-10 PANELES).

Variables	Magnitud máxima
Voltaje de fase	325.2 [V]
Corriente de fase	2.56 [A]
Presión de succión	0.003[bar]
Presión de impulsión	0.29 [bar]
Caudal	90 [l/min]
Velocidad estimada	2850 [rpm]
Torque eléctrico estimado	1,96 [Nm]
Potencia de entrada	660.4 [W]
Potencia mecánica	590.7 [W]
Potencia hidráulica	43.6 [W]

4.4.3 SBFV configurado en estrella con 7 paneles solares.

El día realizado esta prueba fue el 23 de marzo del 2023, para ver la irradiancia del día en un solo grafico se encuentra en el anexo C y se dividirá la prueba en 3 tramos de tiempo

4.4.3.1 Tramo 1 (desde las 8:30 hasta las 12:15)

En la Figura 4-38 se observa la irradiancia, voltaje y corriente de línea una de la fase de la bomba de agua, se muestra solo una fase para una mejor visualización. Si se desea ver los otros voltajes y corrientes estos se encuentran en el anexo D. Este periodo de tiempo corresponde a la salida del sol, por lo que la irradiancia va en aumento y esto se ve reflejado en el gráfico donde la irradiancia alcanza un valor de 901 [w/m²]. El voltaje V_{an} alcanza un valor de 145 [V] el cual se esperaba que fuera menor a la prueba con la misma configuración con 10 paneles fotovoltaicos. porque al haber menos módulos en serie, menos es el voltaje peak que puede generar el sistema fotovoltaico. La corriente I_a alcanzada en esta etapa es de 1.6 [A].

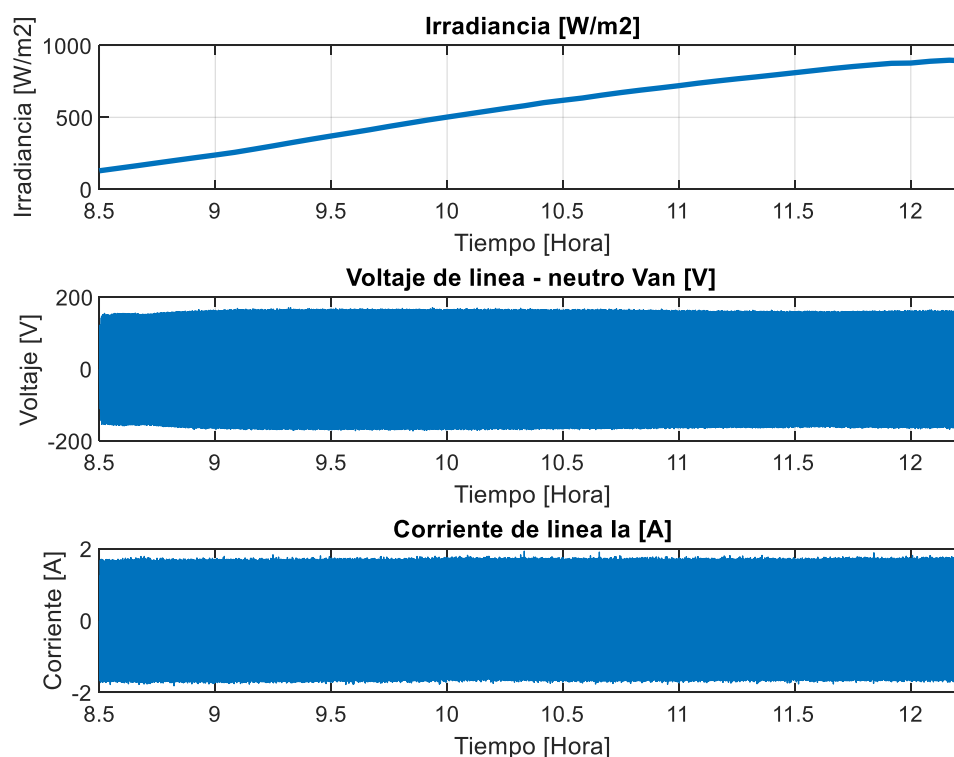


Fig. 4-38. Irradiancia, Voltaje y Corriente de línea de la fase A en tramo 1 de tiempo.

La figura 4-39 se ven la presión de succión, la presión de impulsión y el caudal presentes en el primer tramo de tiempo para esta prueba de operación de día completo. Al igual que en las pruebas anteriores la presión de succión tiende a ser cercana a cero. Este periodo de tiempo al corresponder con la salida del sol hace que la irradiancia vaya en aumento, lo que afecta en las otras variables como ocurre con la presión de impulsión y caudal que aumentan hasta alcanzar un valor de 1.37 [bar] y 43 [l/min] respectivamente.

La velocidad y torque eléctricos del primer periodo de tiempo se encuentran representados en la figura 4-40. En este tramo la velocidad y torque presentan un incremento constante hasta las 9:00 horas aproximadamente, llegando a una velocidad de 1320 [rpm] y un torque eléctrico de 1.17 [Nm].

La figura 4-41 se muestra la potencia de entrada, la potencia mecánica y la potencia hidráulica para el primer periodo de tiempo. La potencia de entrada de la bomba de agua va en aumento hasta alcanzar un valor de 255.2 [W] y desde las 9:10 horas se mantiene entre 250 y 260 [W] hasta el final del tramo. La potencia mecánica aumenta hasta los 166 [W] y se mantiene entre los 160 y 170 [W]. finalmente, la potencia hidráulica aumenta hasta los 10.3 [W] y se mantiene entre los 10 y 11 [W].

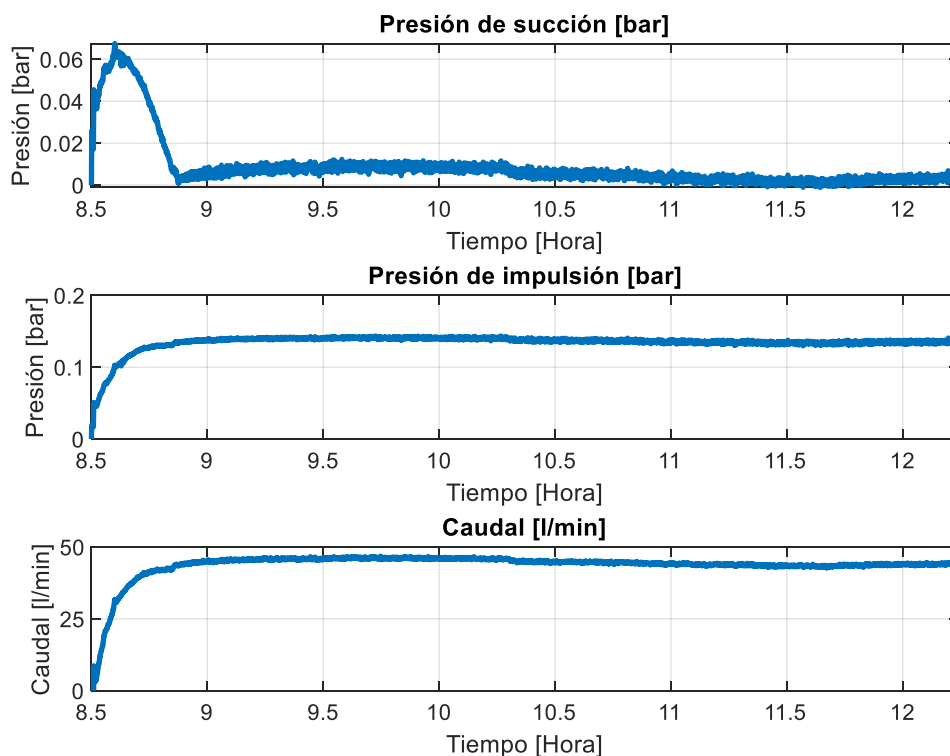


Fig. 4-39. Presiones y Caudal del SBFV en tramo 1 de tiempo.

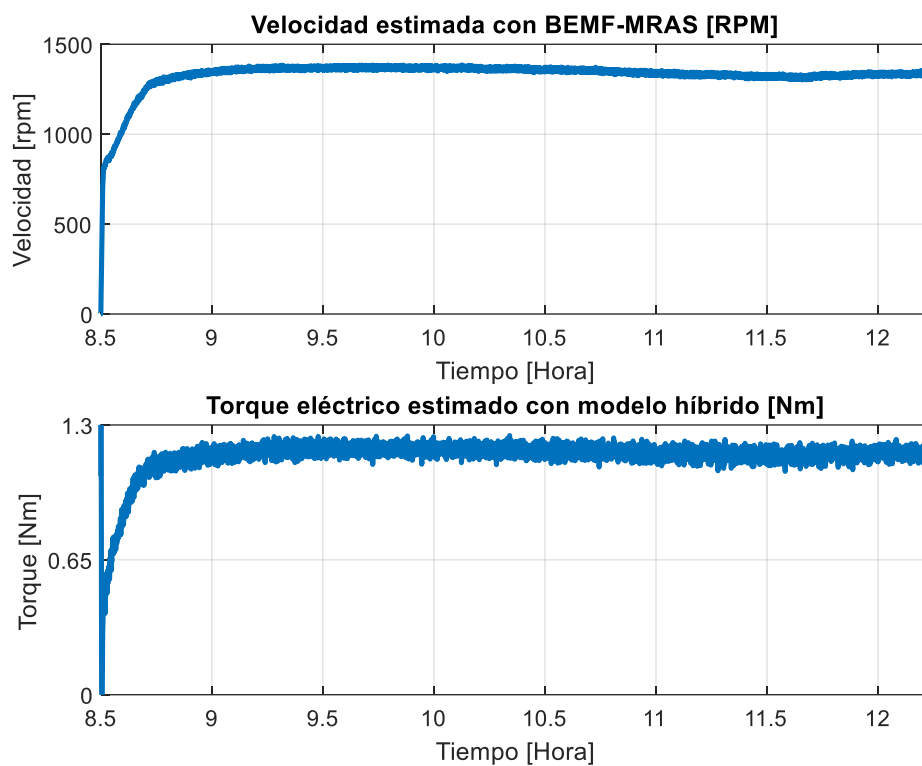


Fig. 4-40. Velocidad y Torque estimados de la bomba de agua en tramo 1 de tiempo.

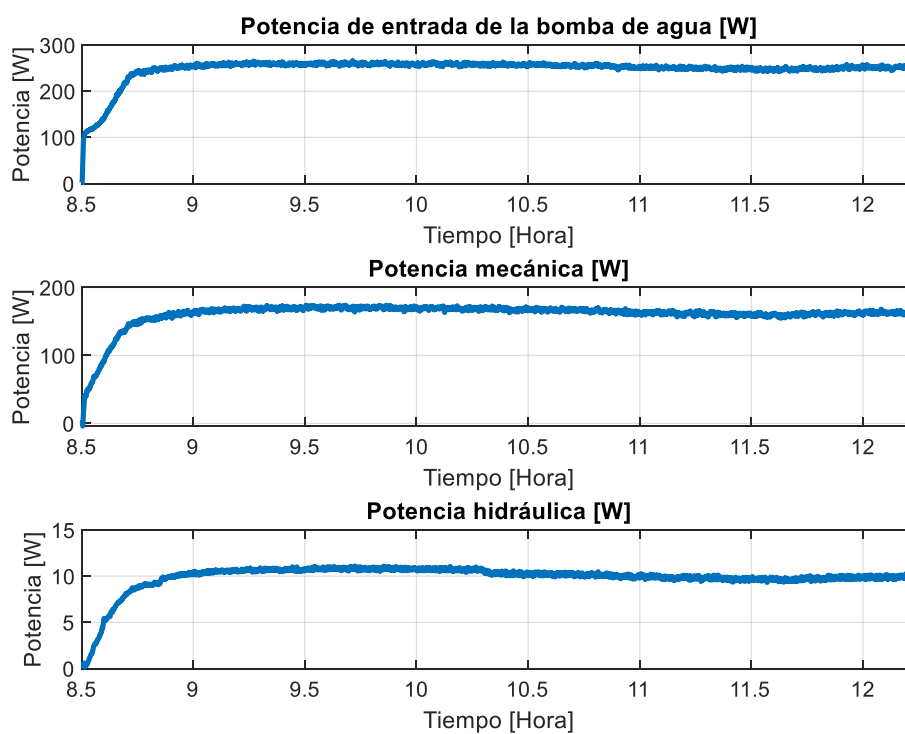


Fig. 4-41. Potencia de entrada, mecánica e hidráulica del SBFV en el tramo 1 de tiempo.

4.4.3.2 Tramo 2 (desde las 12:15 hasta las 15:59)

La irradiancia, voltaje Van y corriente Ia del segundo periodo de tiempo se muestra en la figura 4-42. En este tramo de tiempo las variables de interés alcanzan su valor máximo del día, donde la irradiancia máxima alcanzada en la prueba es de 985 [W/m²], la amplitud máxima alcanzada en el voltaje línea-neutro es de 165 [V] y la corriente de línea de 1.79 [A].

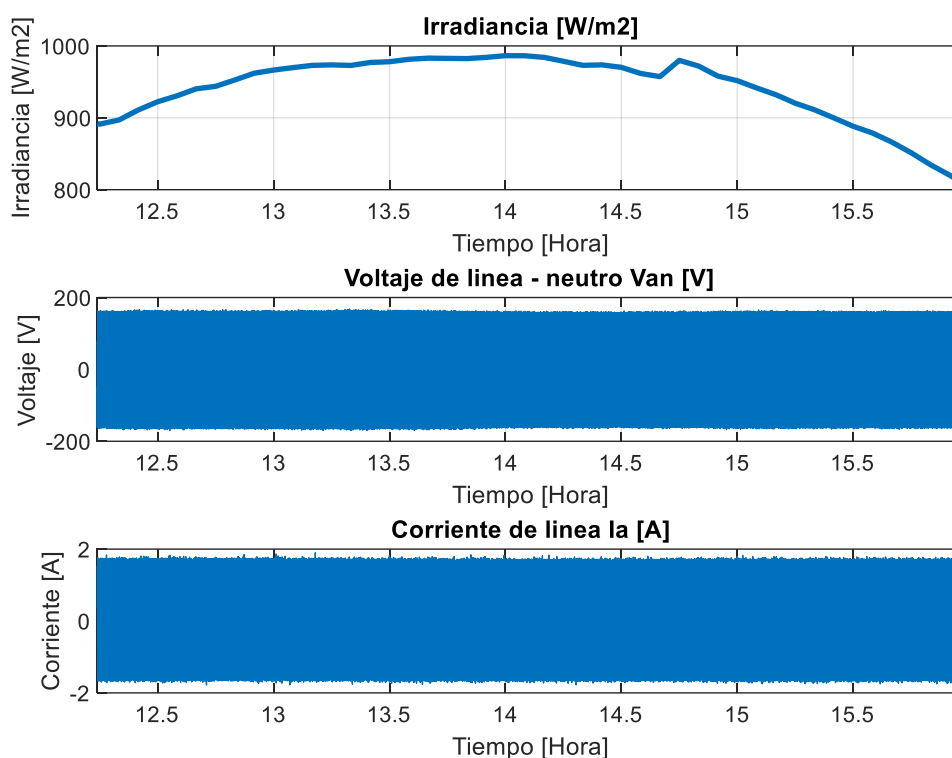


Fig. 4-42. Irradiancia, Voltaje y Corriente de línea de la fase A en tramo 2 de tiempo.

La figura 4-43 se muestra la presión de succión sigue siendo baja con un valor de 0.005 [bar], en cambio la presión de impulsión si presenta un valor significativo el cual equivale a 0.139 [bar] y el caudal alcanza un valor de 45 [l/min]. Al igual que en las otras pruebas de día de completo de operación los valores más altos obtenidos aparecen este periodo de tiempo donde la irradiancia llega a su peak máximo del día.

La velocidad y el torque eléctrico del segundo tramo de tiempo son presentados en la figura 4-44. En este periodo de tiempo de la prueba la velocidad y torque alcanzan su peak máximos, siendo de 1360 [rpm] para la velocidad y 1.26 [Nm] respectivamente.

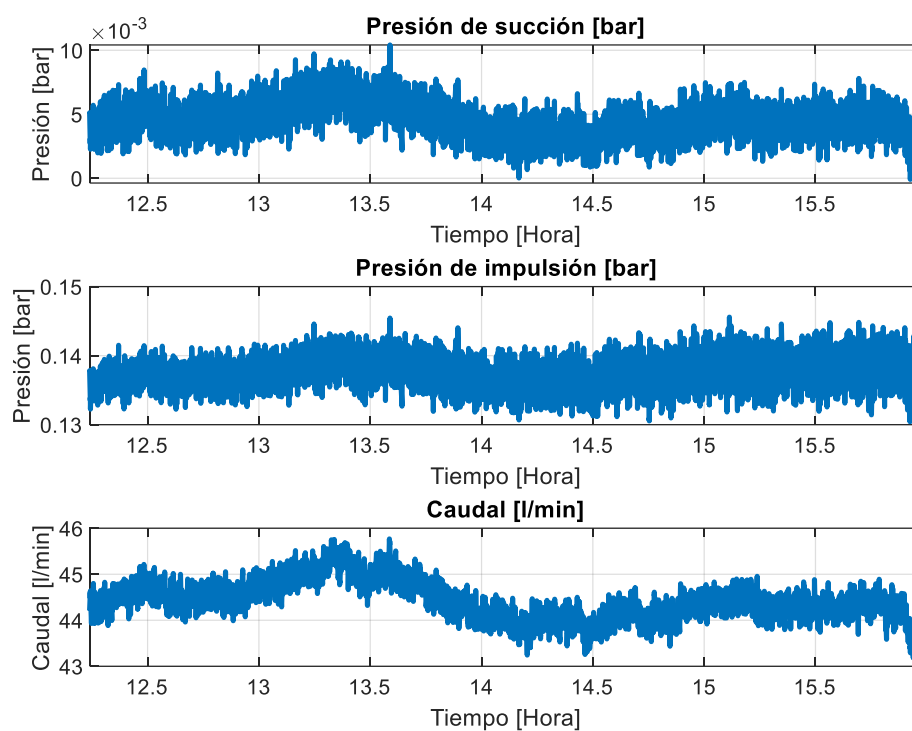


Fig. 4-43. Presiones y Caudal del SBFV en tramo 2 de tiempo.

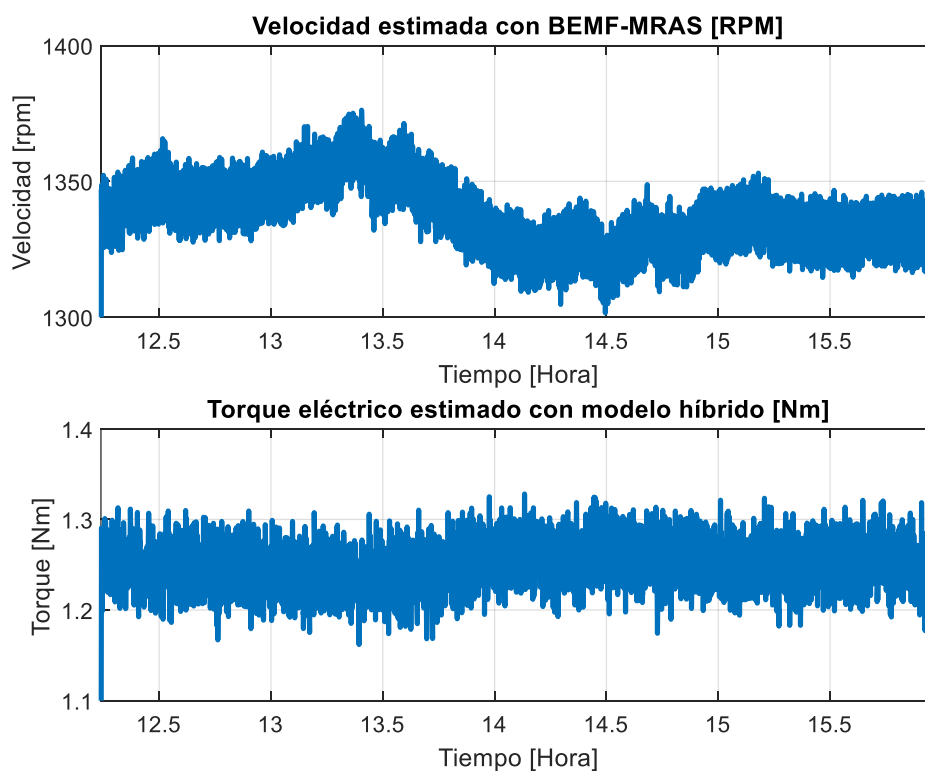


Fig. 4-44. Velocidad y Torque estimados de la bomba de agua en tramo 2 de tiempo.

La figura 4-45 se observan las potencias de entrada, mecánica e hidráulica del SBFV para el segundo tramo de tiempo. Como se puede ver en las gráficas el valor de las potencias en este periodo de tiempo no sufren una variación significativa. La potencia de entrada llega a tener un valor de 258 [W], la potencia de mecánica de 177 [W] y la potencia hidráulica de 10.8 [W]. La diferencia entre la potencia de entrada y mecánica es de 81 [W].

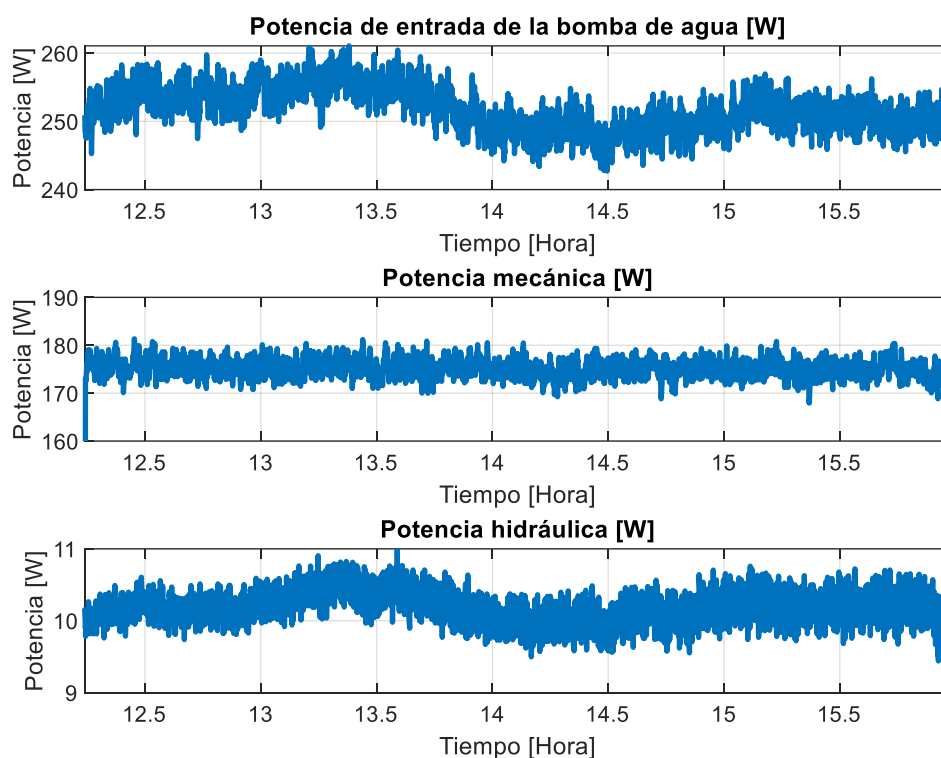


Fig. 4-45. Potencia de entrada, mecánica e hidráulica del SBFV en el tramo 2 de tiempo.

4.4.3.3 Tramo 3 (desde las 15:59 hasta las 19:42)

En la figura 4-46 se ve la irradiancia, voltaje de línea-neutro y corriente de línea en el último tramo de la prueba de día completo de operación del SBFV configurado en estrella con 7 paneles fotovoltaicos. Este periodo de tiempo corresponde al ocaso del día por lo que las variables de interés van en disminución hasta alcanzar su valor nulo. Esto se aprecia en irradiancia donde a las 19:00 horas es prácticamente nula. Lo mismo ocurre con las señales de voltaje y corriente.

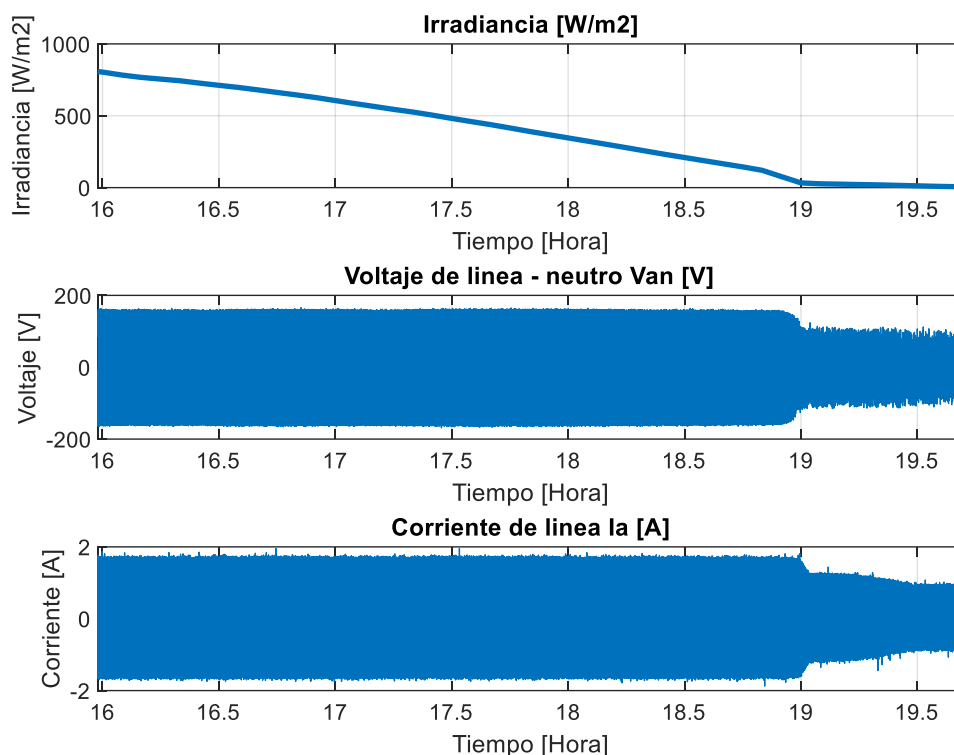


Fig. 4-46. Irradiancia, Voltaje y Corriente de línea de la fase A en tramo 3 de tiempo.

La figura 4-47 se muestra la presión de succión, la presión de impulsión y el caudal para el tercer tramo de tiempo. La presión de succión es cercana a cero y la presión de impulsión comienza su disminución a las 18:50 horas al igual que el caudal. Esta disminución en las presiones y caudal ocurre debido a que en este periodo de tiempo comienza a caer la noche.

En la figura 4-48 se presentan la velocidad y torque eléctrico alcanzados en el último periodo de tiempo para la prueba de día completo de operación del SBFV configurado en estrella con 7 paneles fotovoltaicos. Este tramo de tiempo ocurre en el ocaso del día por lo que la irradiancia se encuentra en descenso y esto se ve reflejada en la velocidad y torque del motor de la bomba de agua, donde a las 19:50 horas comienzan a disminuir drásticamente.

En la figura 4-49 se presentan las gráficas de potencia de entrada, potencia mecánica y potencia hidráulica para el último tramo tiempo para la prueba de día completo de operación del SBFV configurado en estrella con 7 paneles fotovoltaicos. Como se ha explicado anteriormente, este periodo de tiempo corresponde al ocaso del día por lo que la irradiancia va en disminución constante lo que afecta directamente a las variables de interés como lo son las potencias. Las potencias se mantienen casi sin variación desde el comienzo del periodo hasta las 18:50 donde comienza su disminución.

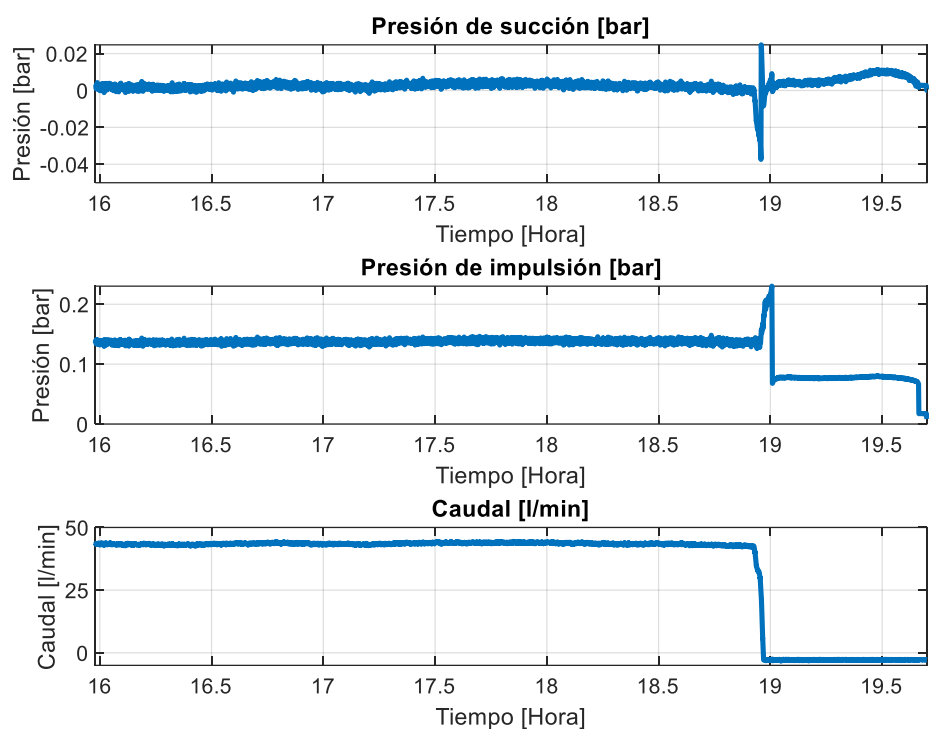


Fig. 4-47. Presiones y Caudal del SBFV en tramo 3 de tiempo.

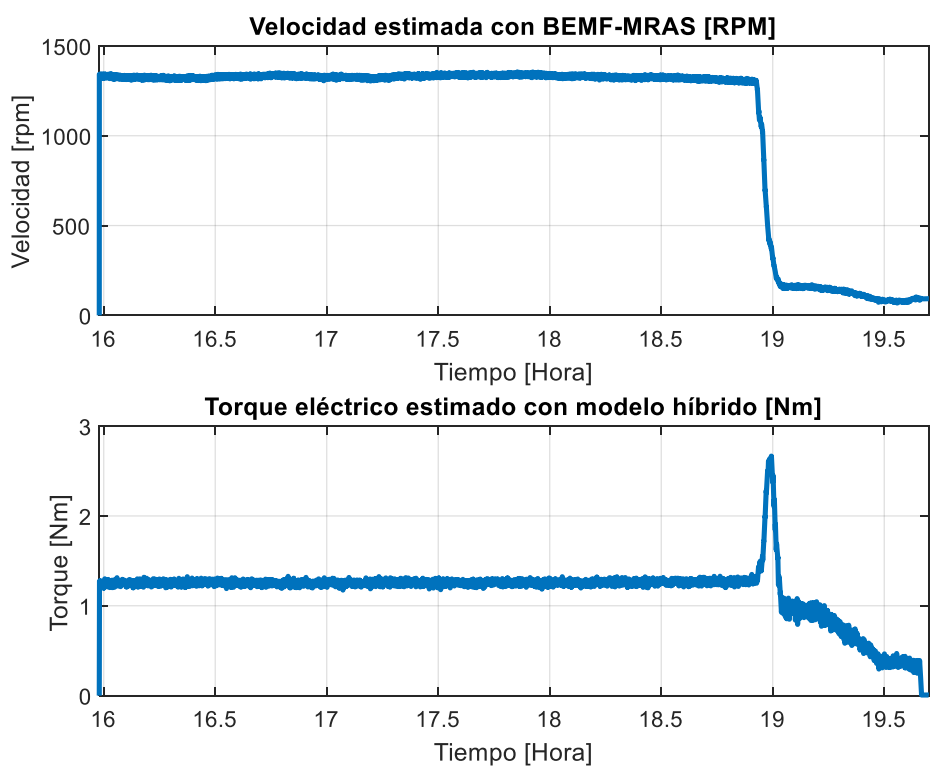


Fig. 4-48. Velocidad y Torque estimados de la bomba de agua en tramo 3 de tiempo.

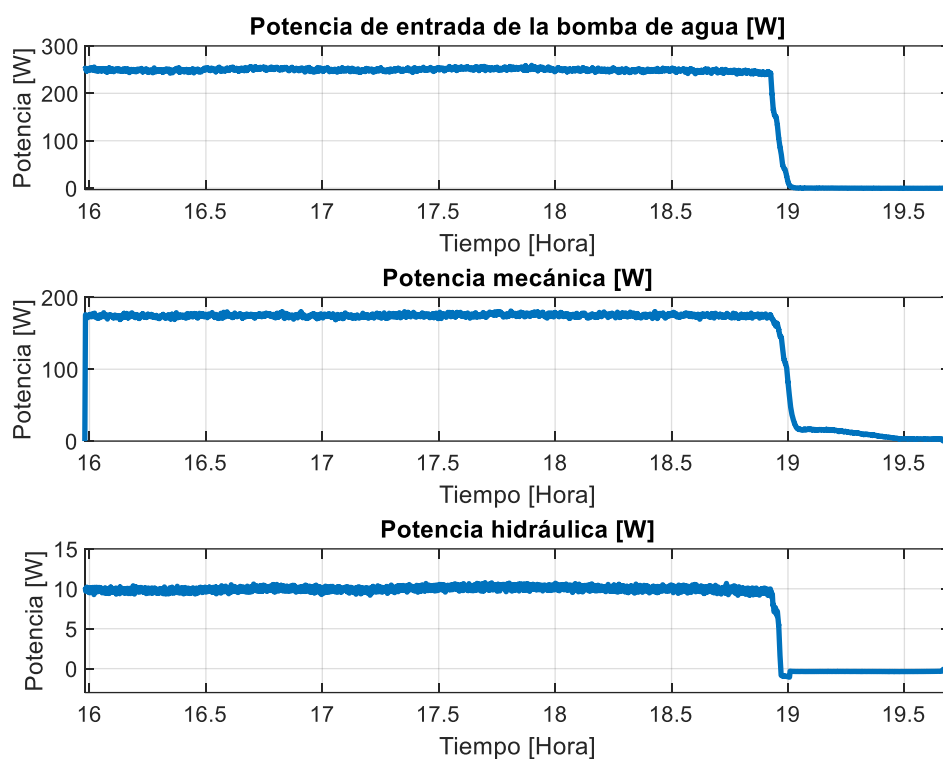


Fig. 4-49. Potencia de entrada, mecánica e hidráulica del SBFV en el tramo 3 de tiempo.

En la tabla 4-4 se presentan los valores máximos alcanzados en la prueba del SBFV configurado en estrella con 7 paneles fotovoltaicos.

Tabla 4-4. VALOR MÁXIMO ALCANZADO POR LAS VARIABLES DE INTERÉS (ESTRELLA-7 PANELES).

Variable	Magnitud máxima
Voltaje de línea - neutro	165 [V]
Corriente de línea	1.79 [A]
Presión de succión	0.005 [bar]
Presión de impulsión	0.139 [bar]
Caudal	45 [l/min]
Velocidad estimada	1360 [rpm]
Torque eléctrico estimado	1.26 [Nm]
Potencia de entrada	258 [W]
Potencia mecánica	177 [W]
Potencia hidráulica	10.8 [W]

4.4.4 SBFV configurado en delta con 7 paneles solares.

El día realizado esta prueba fue el 24 de marzo del 2023, para ver la irradiancia del día en un solo grafico se encuentra en el anexo C y se dividirá la prueba en 3 tramos de tiempo.

4.4.4.1 Tramo 1 (desde las 8:25 hasta las 12:06)

En la Figura 4-50 se observa la irradiancia, el voltaje y la corriente de una de las fases de la bomba de agua, se muestra solo una fase para una mejor visualización. Si se desea ver los otros Voltajes y Corrientes estos se encuentran en el anexo D. Es periodo de tiempo corresponde a la salida del sol por lo que la irradiancia va en aumento, lo que conlleva que las variables de interés también presenten una curva de incremento dentro de este tramo de tiempo. La irradiancia alcanza los 886.1 [W/m²], El voltaje V_{ab} en este periodo llega a tener una amplitud de 220.3 [V] y la corriente I_{ab} una amplitud de 1.88 [A]. Al reducir de 10 a 7 paneles fotovoltaicos en series, se aprecia la reducción en el voltaje y corriente al compararlo con la misma configuración.

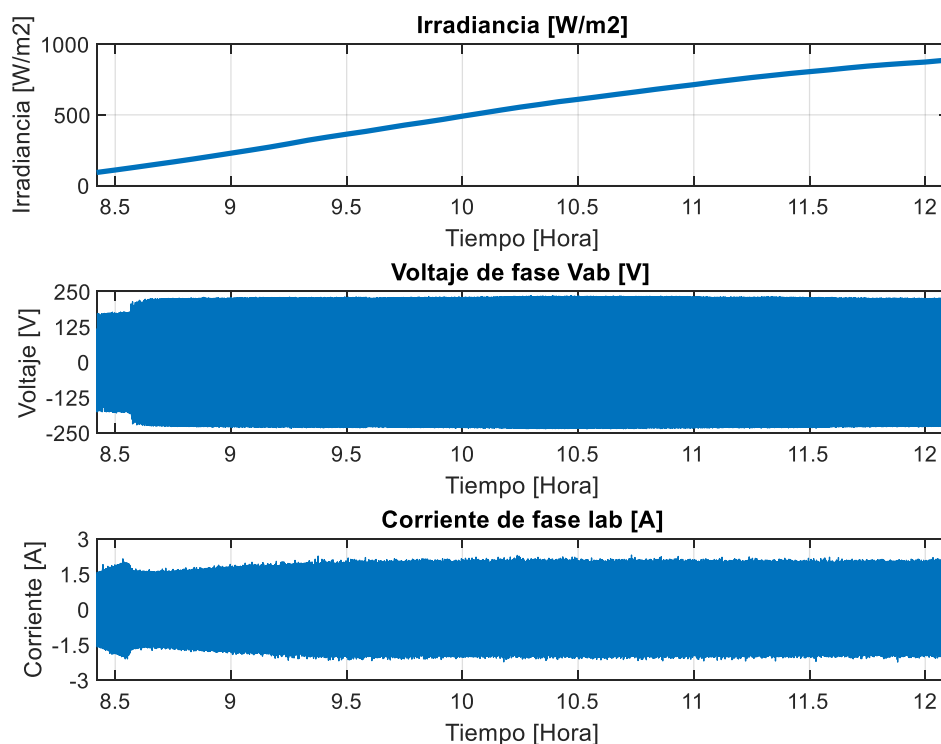


Fig. 4-50. Irradiancia, Voltaje y Corriente de fase (a-b) en tramo 1 de tiempo.

Las gráficas de la presión de succión, presión de impulsión y caudal se encuentran en la figura 4-51. Como en las pruebas anteriores la presión de succión tiende a ser pequeña (0.002 [bar]) al compararla con la presión de impulsión (0.22 [bar]) y como en este periodo de tiempo la irradiancia comienza a aumentar lo que provoca un incremento en las variables de interés. El caudal del SBFV en este primer periodo de tiempo aumenta hasta alcanzar un valor de 76 [l/min].

La figura 4-52 se presentan las gráficas de velocidad y torque del SBFV en el primer periodo de tiempo. Al ser el primer tramo de tiempo de la prueba, las gráficas presentan un incremento hasta llegar a un valor relativamente estable. Los valores de la velocidad y torque eléctrico alcanzado en esta etapa de la prueba son de 2050 [rpm] y 1.42 [Nm] respectivamente.

Las potencias para las pruebas de día completo de operación del SBFV configurado en delta con 7 paneles fotovoltaicos se muestran en la figura 4-53. Se ve que las potencias van en incremento continuo desde las 8:32 hasta las 9:35 horas donde la potencia de entrada llega a 430.1 [W], la potencia mecánica a 284.5 [W] y la potencia hidráulica a 30.1 [W].

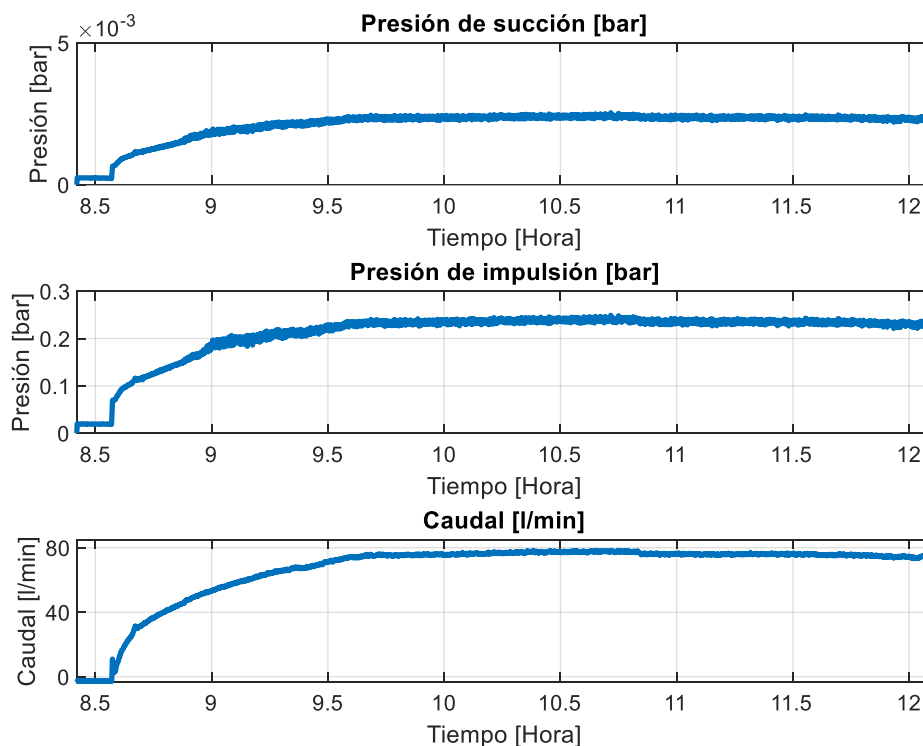


Fig. 4-51. Presiones y Caudal del SBFV en tramo 1 de tiempo.

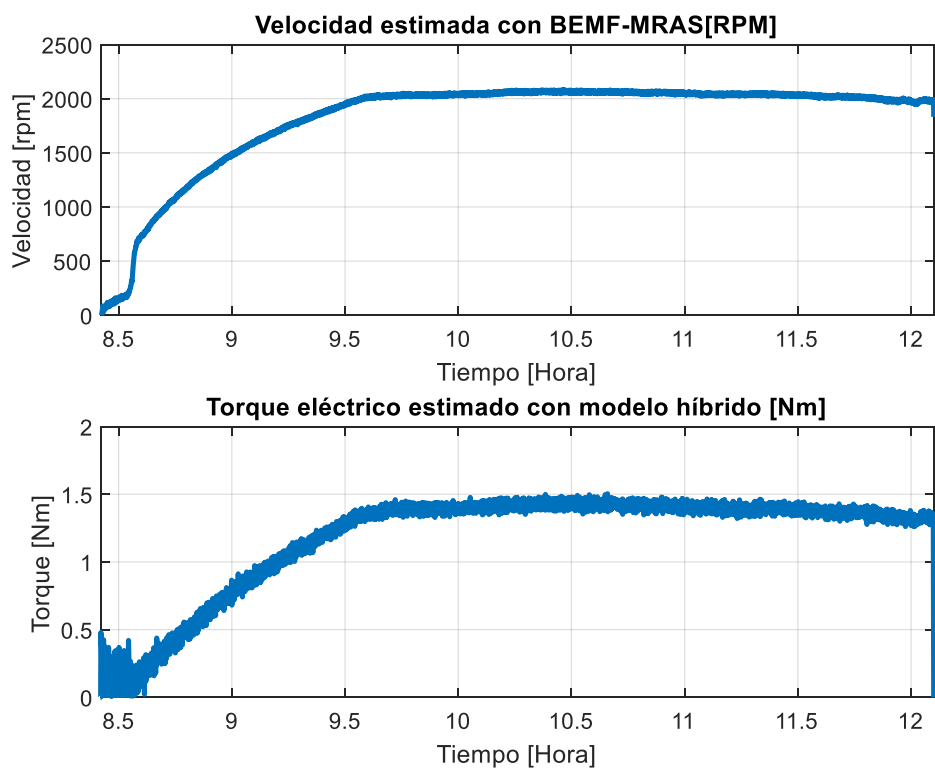


Fig. 4-52. Velocidad y Torque estimados de la bomba de agua en tramo 1 de tiempo.

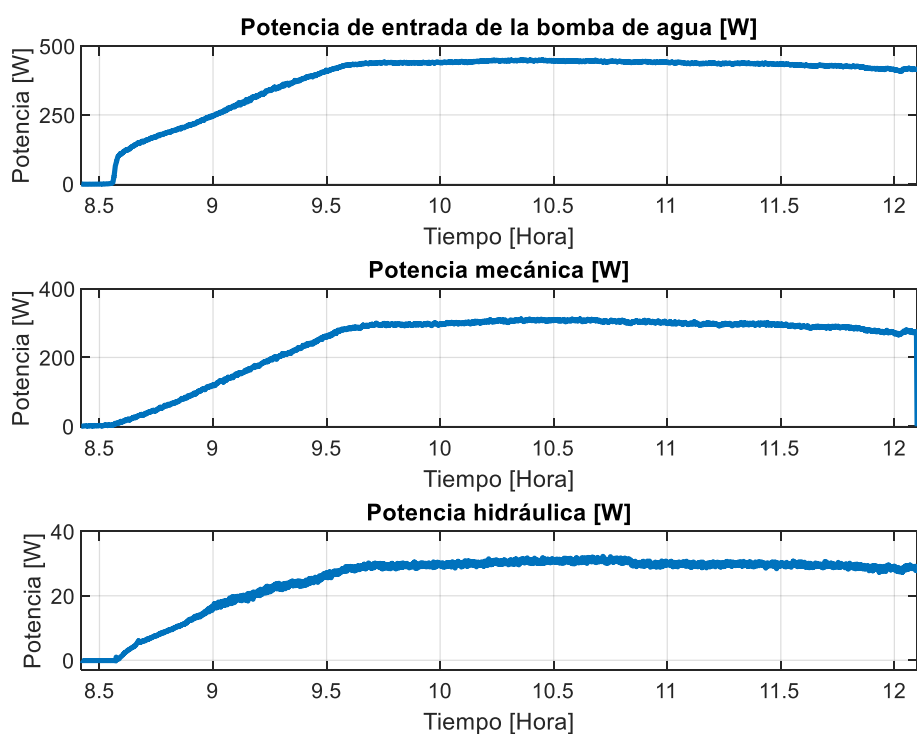


Fig. 4-53. Potencia de entrada, mecánica e hidráulica del SBFV en el tramo 1 de tiempo.

4.4.4.2 Tramo 2 (desde las 12:06 hasta las 15:47)

La irradiancia, Voltaje y corriente de fase (a-b) del segundo tramo de tiempo son mostrada en la figura 4-54. La irradiancia en este periodo llega a su máximo peak de 993.96 [W/m²], al ocurrir en el peak máximo en este periodo hace que los valores máximos alcanzados por las variables de interés ocurran en este tramo. La amplitud máxima alcanzada por el voltaje V_{ab} es de 225.9 [V] y la corriente de fase I_{ab} alcanza una amplitud máxima de 1.93 [A].

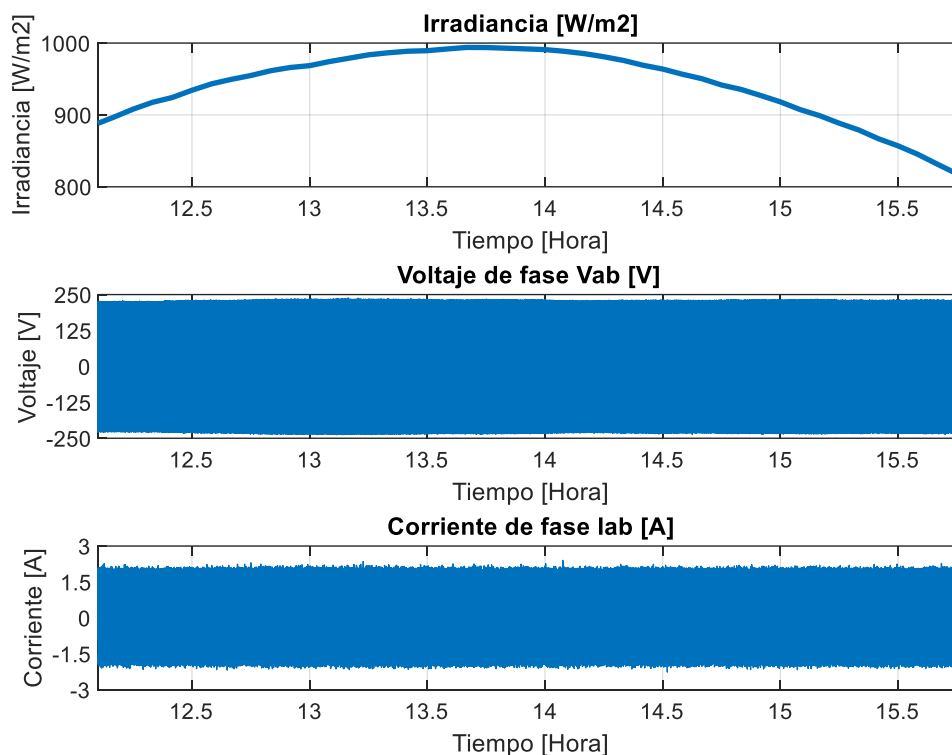


Fig. 4-54. Irradiancia, Voltaje y Corriente de fase (a-b) en tramo 2 de tiempo.

La figura 4-55 se muestran las presiones de succión y impulsión, además del caudal del SBFV en el segundo tramo de tiempo. La presión de succión en este periodo sigue siendo insignificante teniendo un valor de 0.0024 [bar]. La presión de impulsión alcanza su máximo de 0.24 [bar] y en lo que transcurre el segundo periodo no presenta una variación notable. El caudal máximo alcanzado en esta prueba aparece en este periodo de tiempo y es de 78.8 [l/min].

La velocidad y torque eléctrico del segundo tramo mostradas en las gráficas de la figura 4-56 llegan a su punto máximo en este periodo de tiempo. La máxima velocidad alcanzada el SBFV en la prueba es de 2089.1 [rpm] y el torque eléctrico máximo es de 1.45 [Nm].

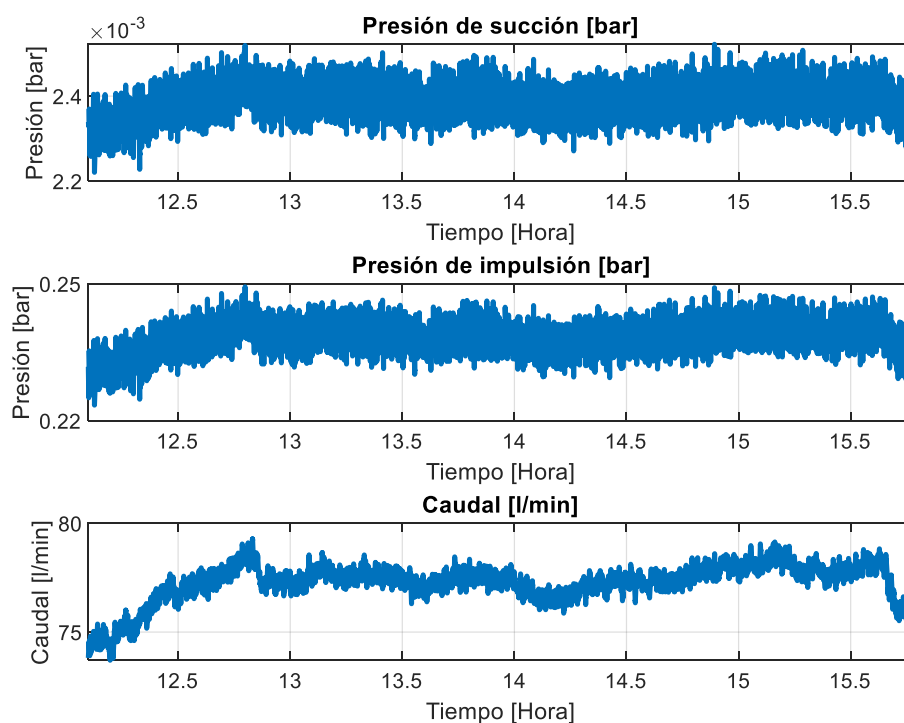


Fig. 4-55. Presiones y Caudal del SBFV en tramo 2 de tiempo.

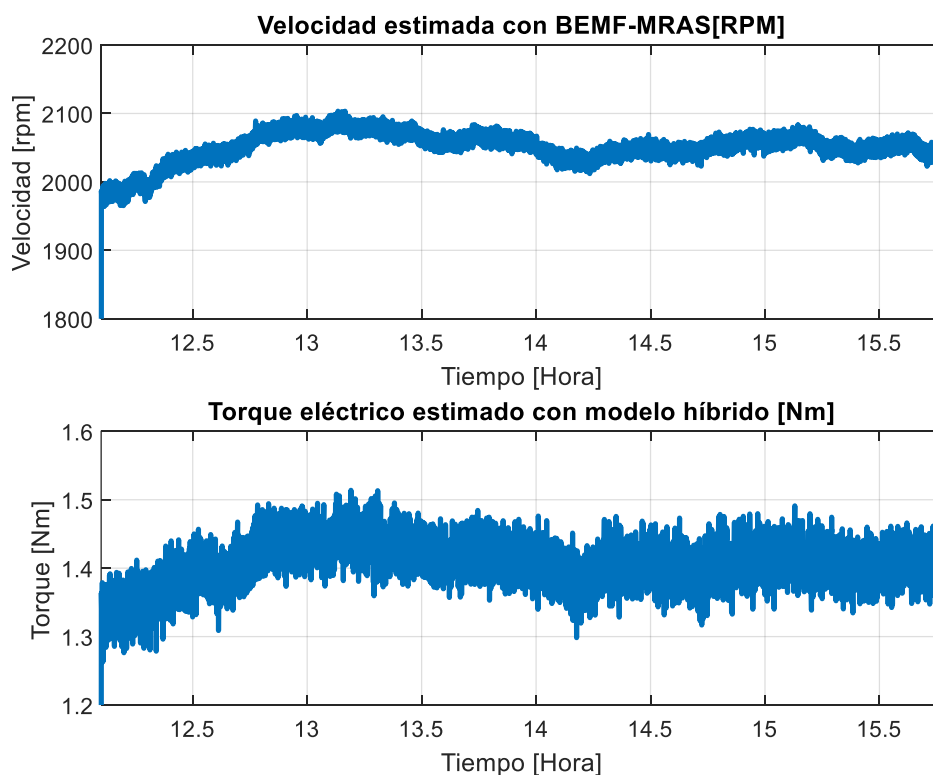


Fig. 4-56. Velocidad y Torque estimados de la bomba de agua en tramo 2 de tiempo.

La figura 4-57 se muestran la potencia de entrada, la potencia mecánica y la potencia hidráulica en el segundo periodo de tiempo. En este tramo de tiempo de la prueba, las potencias alcanzan su peak máximo del día debido a que la irradiancia se encuentre en su curva máxima. La potencia de entrada de la bomba de agua alcanzó los 450.1 [W], la potencia mecánica los 318.6 [W] y la potencia hidráulica llega a los 31.6 [W]. la diferencia de potencia entre la potencia de entrada y mecánica es de 131.5 [W].

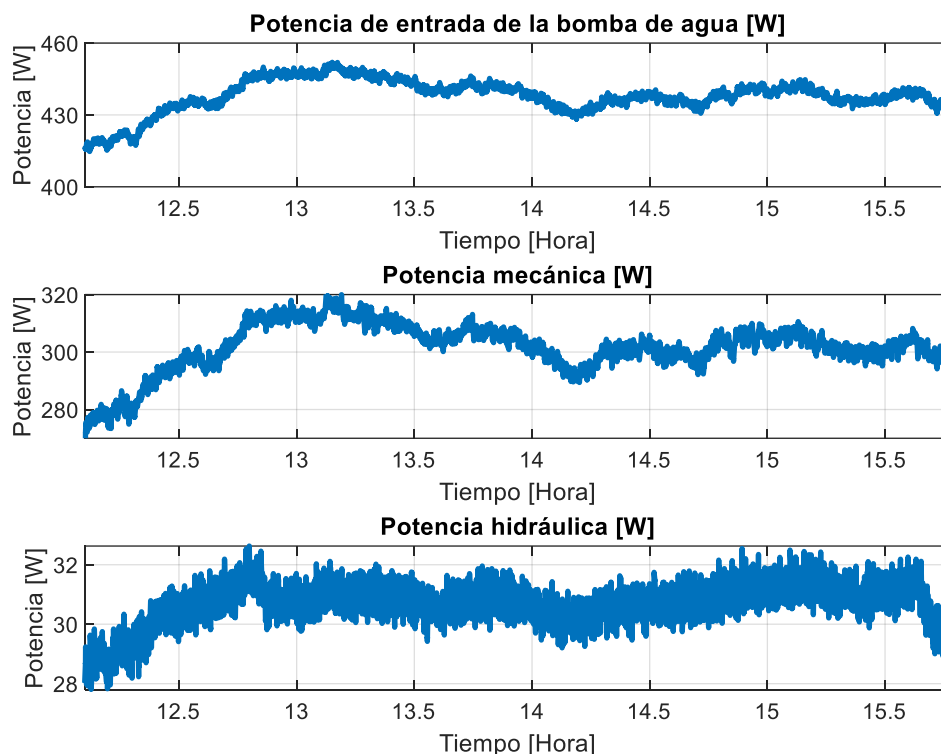


Fig. 4-57. Potencia de entrada, mecánica e hidráulica del SBFV en el tramo 2 de tiempo.

4.4.4.3 Tramo 3 (desde las 15:47 hasta las 19:28)

En la figura 4-58 se muestra la irradiancia, voltaje de fase (a-b) y corriente de fase (a-b) para el último tramo de tiempo que corresponde al ocaso del día. Este periodo de tiempo al corresponder con el ocultamiento del sol, la irradiancia va en disminución hasta las 19:00 horas donde la irradiancia es nula. El Inversor aun con poca irradiancia trata de hacer funcionar y lanza pulsos de voltaje y corrientes que se ven reflejados en las gráficas.

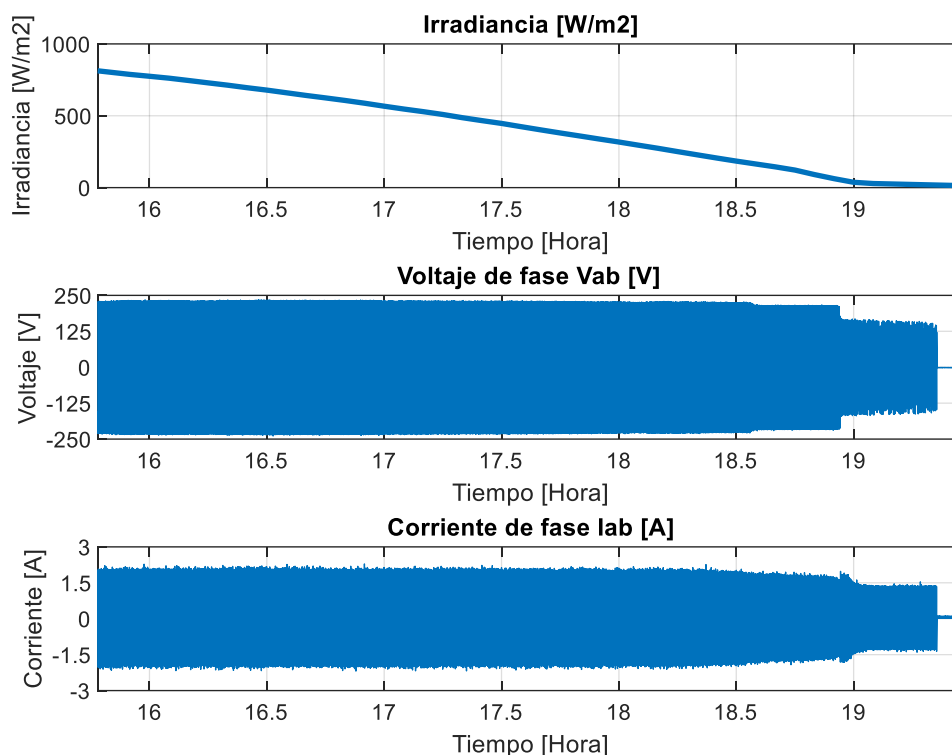


Fig. 4-58. Irradiancia, Voltaje y Corriente de fase (a-b) en tramo 3 de tiempo.

La figura 4-59 muestran las gráficas de presión de succión, la presión de impulsión y el caudal del tercer periodo de tiempo de la prueba de día completo de operación del SBFV configurado en delta con 7 paneles solares. Las gráficas presentan una disminución constante desde las 18:20 horas debido al ocultamiento del sol lo que provoca una caída en la irradiancia.

Las gráficas de velocidad y torque estimados para el tercer tramo de tiempo son mostradas en la figura 4-60. La velocidad y torque presentan una disminución constante desde las 18:20 horas debido a la disminución de irradiancia.

La potencia de entrada del motor, potencia mecánica y potencia hidráulica del tercer y último tramo de tiempo para la prueba de día completo de operación del SBFV configurado en delta con 7 paneles fotovoltaico se muestran en las gráficas de la figura 4-61. Se puede ver que entre las 18:00 y 19:00 horas las potencias comienzan a disminuir constantemente debido a la disminución de irradiancia que no permite al sistema fotovoltaico seguir generando energía para poder suministrar al SBFV.

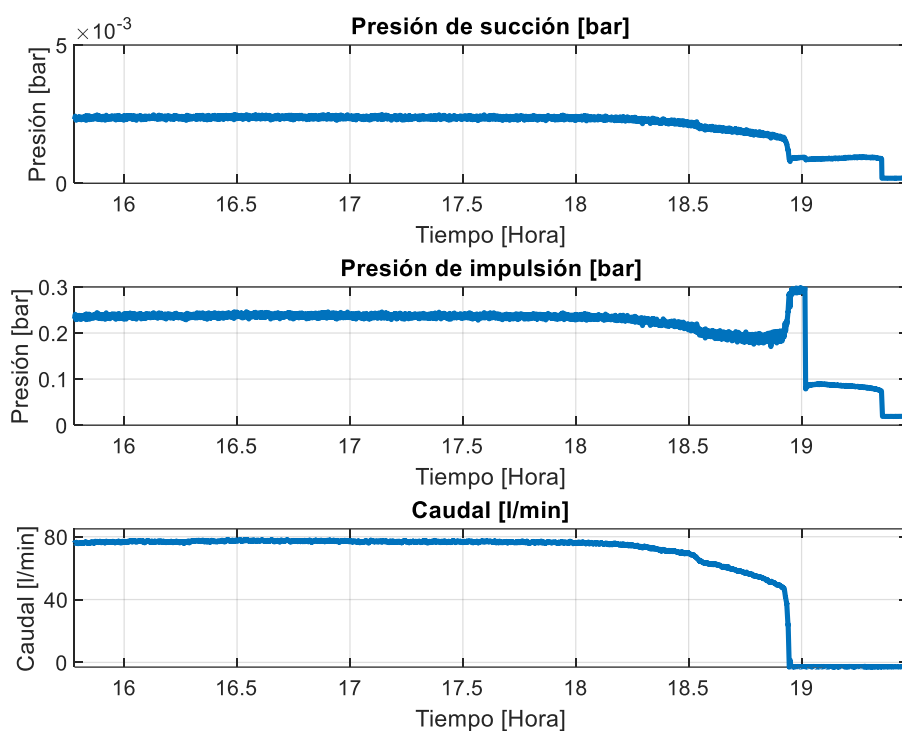


Fig. 4-59. Presiones y Caudal del SBFV en tramo 3 de tiempo.

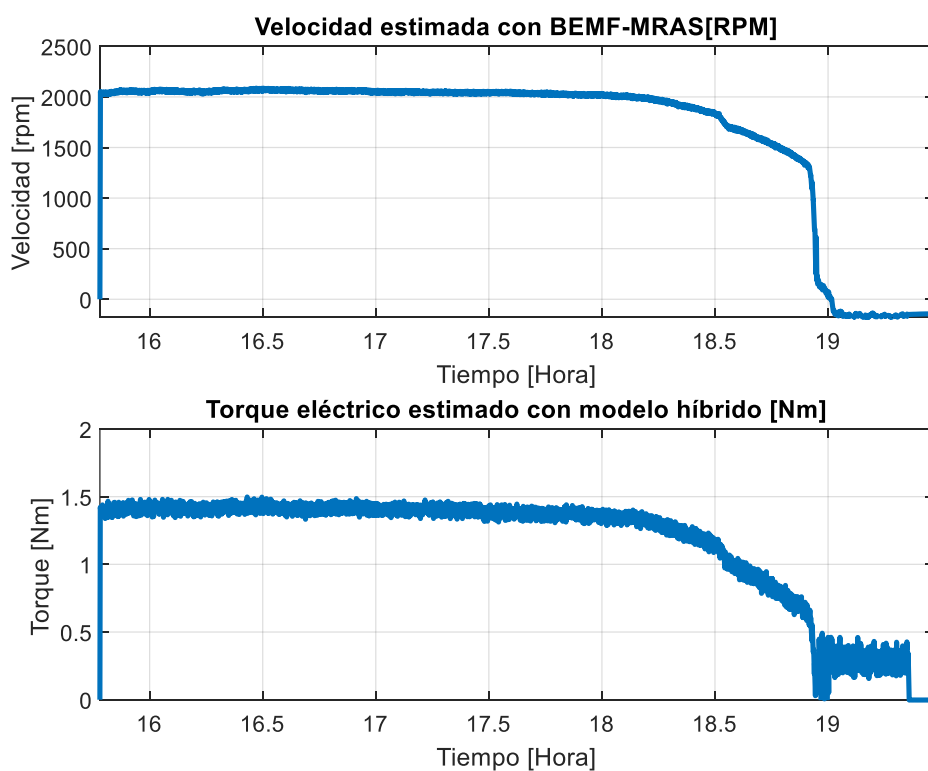


Fig. 4-60. Velocidad y Torque estimados de la bomba de agua en tramo 2 de tiempo.

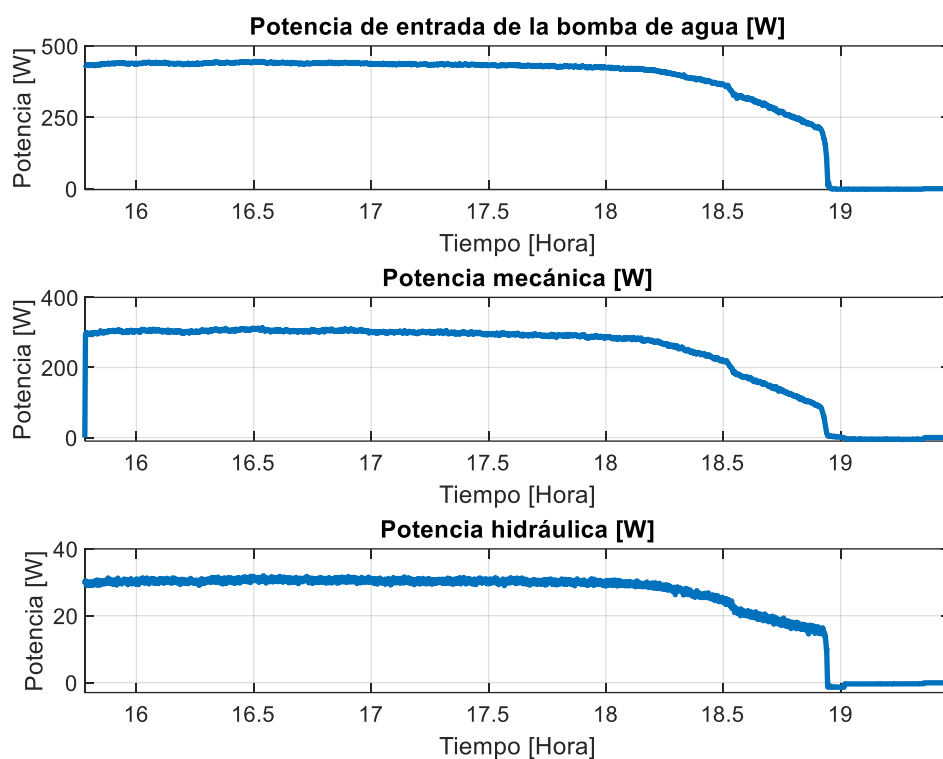


Fig. 4-61. Potencia de entrada, mecánica e hidráulica del SBFV en el tramo 2 de tiempo.

En la tabla 4-5 se presentan los valores máximos alcanzados en la prueba del SBFV configurado en delta con 7 paneles fotovoltaicos.

Tabla 4-5. VALOR MÁXIMO ALCANZADO POR LAS VARIABLES DE INTERÉS (DELTA-7 PANELES).

Variables	Magnitud máxima
Voltaje de fase	225.9 [V]
Corriente de fase	1.93 [A]
Presión de succión	0.0025 [bar]
Presión de impulsión	0.24 [bar]
Caudal	78.8 [l/min]
Velocidad estimada	2089.1 [rpm]
Torque eléctrico estimado	1.45 [Nm]
Potencia de entrada	450.1 [W]
Potencia mecánica	318.6 [W]
Potencia hidráulica	31.6 [W]

4.5 Análisis de resultados

En esta sección se analizan los resultados obtenidos en las pruebas de día completo de operación anteriormente presentadas, para esto primero se presentan los resultados alcanzados en porcentaje respecto a su valor nominal y después se realizan comparaciones entre pruebas, ya sea comparando pruebas con la misma cantidad de paneles fotovoltaicos, pero con distinta conexión configurada y con la misma conexión, pero con distinta cantidad de paneles fotovoltaicos.

En la tabla 4-6 se ven los porcentajes alcanzados de la prueba de día completo de operación del SBFV configurado con conexión estrella con 10 paneles fotovoltaicos con respecto a los valores nominales.

Tabla 4-6. PORCENTAJES CON RESPECTO A SU VALOR NOMINAL (SBFV CONFIG. ESTRELLA CON 10 PANELES).

Variable	Porcentaje del valor nominal
Voltaje de línea - neutro	52.5%
Corriente de línea	90%
Caudal	73.33%
Velocidad del motor	60.4%
Torque eléctrico	51.98%

Como se puede notar en la tabla 4-6 los valores para la primera prueba nunca alcanzan su valor nominal siendo la corriente la más cercana con un 90% mientras que las más bajas son el voltaje y torque siendo un 52.5% y 51.98% respectivamente. Esto es debido a que con 10 paneles solares en serie como en la prueba no alcanzan a entregar el voltaje necesario para llegar al voltaje nominal (400 V) en estrella. La diferencia entre la potencia de entrada y la potencia mecánica es de 91.97 [W] esta diferencia se debe a las pérdidas en el cobre y núcleo del motor de inducción de la bomba de agua.

En la tabla 4-7 se ven los porcentajes alcanzados de la prueba de día completo de operación del SBFV configurado con conexión delta con 10 paneles fotovoltaicos con respecto a los valores nominales.

Tabla 4-7. PORCENTAJES CON RESPECTO A SU VALOR NOMINAL (SBFV CONFIG. DELTA CON 10 PANELES).

Variable	Porcentaje del valor nominal
Voltaje de fase	99.9%
Corriente de fase	104.2%
Caudal	100%
Velocidad del motor	101.78%
Torque eléctrico	77.7%

Como se ve en la tabla 4-7 en la segunda prueba el SBFV trabajo a su valor nominal excepto por el torque el cual llego 77.7% aun así, es el valor de torque más alto alcanzado en las 4 pruebas. Hay variables como lo son la corriente y velocidad que superan su valor nominal, esto se debe a la poca altura que la bomba de agua tiene que levantar el agua y esto mismo explicaría porqué el torque eléctrico no llega a su valor nominal ya que la carga en el sistema es pequeña. La diferencia entre la potencia de entrada y mecánica en esta prueba es de 69.7 [W].

En la tabla 4-8 se ven los porcentajes alcanzados de la prueba de día completo de operación del SBFV configurado con conexión estrella con 7 paneles fotovoltaicos con respecto a los valores nominales.

Tabla 4-8. PORCENTAJES CON RESPECTO A SU VALOR NOMINAL (SBFV CONFIG. ESTRELLA CON 7 PANELES).

Variable	Porcentaje del valor nominal
Voltaje de línea - neutro	41.5%
Corriente de línea	89.5%
Caudal	50%
Velocidad del motor	48.57%
Torque eléctrico	49.6%

La prueba de día completo de operación del SBFV configurado en conexión estrella con 7 paneles presenta el peor rendimiento con respecto a los valores nominales, entregando solo el 50% del caudal nominal de la bomba de agua. Este resultado era esperable ya que con 10 paneles fotovoltaicos en series del SBFV no son capaz de alcanzar el voltaje nominal en estrella de la bomba de agua, menos iba a ocurrir al disminuir los paneles solares a 7. La diferencia entre la potencia de entrada y mecánica es de 81 [W].

En la tabla 4-9 se ven los porcentajes alcanzados de la prueba de día completo de operación del SBFV configurado con conexión delta con 7 paneles fotovoltaicos con respecto a los valores nominales.

Tabla 4-9. PORCENTAJES CON RESPECTO A SU VALOR NOMINAL (SBFV CONFIG. DELTA CON 7 PANELES).

Variable	Porcentaje del valor nominal
Voltaje de fase	69.4%
Corriente de fase	79.09%
Caudal	87.5%
Velocidad del motor	74.6%
Torque eléctrico	57.53%

A pesar de que el SBFV está configurado en conexión delta, no es capaz de trabajar en sus valores nominales al disminuir a 7 los paneles fotovoltaicos, pero aun así consigue ser la segunda prueba con mayor caudal máximo entregado, correspondiendo a 87.5% de los 90 [l/min] que es lo nominal en la bomba de agua. La diferencia entre la potencia de entrada y mecánica es de 131.4 [W].

Un punto para notar es que la presión de impulsión del SBFV aumenta si el caudal de agua bombeado aumenta. Hay que notar que la diferencia entre la potencia de entrada y mecánica que corresponden a las pérdidas producidas en el motor de la bomba son menores cuando la bomba trabaja más cercana a sus valores nominales, que en nuestras pruebas se da con el SBFV configurado en delta con 10 paneles.

Al comparar las pruebas con la misma cantidad de paneles, pero el SBFV configurado con distinta conexión (delta y estrella) se ve que en ambos casos ya sea de 10 o 7 paneles fotovoltaicos, la conexión delta presenta un mejor rendimiento respecto a la estrella. Para el caso de 10 paneles fotovoltaicos el SBFV configurado en delta entrega un 26.67% más de caudal, el motor de la bomba es un 41.38% más veloz y un torque eléctrico de 25.72% mayor con respecto a los valores nominales de la bomba de agua. Con respecto a las potencias las del SBFV configurado en estrella son menores que en delta, siendo la potencia de entrada del SBFV en estrella un 49.5% del SBFV en delta, la potencia mecánica y hidráulica del sistema en estrella corresponden a un 39.85% y 35.6% de las potencias del sistema en delta respectivamente. Para el caso de 7 paneles fotovoltaicos ocurre lo mismo que en el de 10, donde el SBFV configurado con conexión delta presenta un mejor rendimiento respecto a los valores nominales que el sistema con conexión estrella respecto a los valores nominales de la bomba de agua. La bomba de agua en conexión delta entrega un 37.5% más de caudal, es un 26.03% más veloz y posee un 7.93% mayor que la bomba al

estar en estrella. Para el caso de las potencias del SBFV con 7 paneles solares al igual que en caso de 10 paneles fotovoltaicos el sistema con una conexión estrella sus potencias son menores que en delta, la potencia de entrada del sistema con conexión en estrella corresponde a un 57.3% de la potencia de entrada del sistema en delta, las potencias mecánica y hidráulica del SBFV configurado con conexión estrella corresponden a un 55.73% y 34.17% respectivamente de las potencias del sistema en delta.

Ahora si se compara las pruebas del SBFV con la misma configuración (delta y estrella) pero con distinta cantidad de paneles fotovoltaicos (7 y 10 paneles), el SBFV con 10 paneles fotovoltaicos presenta mejor rendimiento ya sea en estrella o delta, esto se debe a que el sistema cuenta con 3 paneles más en serie para poder alimentar a la bomba de agua a través del inversor ABB. Para el SBFV configurado en conexión estrella con 10 paneles entrega un 23.33% más de caudal que el sistema con 7 paneles fotovoltaicos respecto al caudal nominal de la bomba de agua, en cuanto a la velocidad y torque el sistema configurado en estrella que cuenta con 10 paneles es 11.83% y 2.38% mayor que el sistema configurado en estrella con 7 paneles respectivamente, esto es en base a los valores nominales de caudal, velocidad y torque de la bomba de agua. Para las potencias las pruebas con los SBFV con 7 paneles son menores que con 10 paneles, en el caso de las pruebas en estrella la potencia de entrada con 7 paneles es un 78.7% de la potencia de entrada del SBFV configurado en estrella con 10 paneles, la potencia mecánica y hidráulica del SBFV configurado en conexión estrella con 7 paneles es un 75.18% y 69.67% de las potencias del sistema con 10 paneles fotovoltaicos. En delta pasa lo mismo, cuando el SBFV cuenta con 10 paneles presenta un mejor rendimiento que con 7 paneles fotovoltaicos, presentando un 12.5%, 27.18% y 20.17% más de caudal, velocidad y torque respectivamente, el sistema con 10 paneles en conexión delta. En delta la potencia de entrada consumida por la bomba hidráulica del SBFV con 7 paneles fotovoltaico es un 68.15% de la potencia de entrada del sistema con 10 paneles, pero la potencia mecánica generada por el motor de la bomba hidráulica del SBFV con 7 paneles fotovoltaico es un 53.93% de la generada por el sistema con 10 paneles. Si se comparan las potencias hidráulicas, la potencia necesaria para mover el caudal del sistema en delta con 7 módulos fotovoltaicos es el 72.48% de la potencia del sistema en delta con 10 paneles fotovoltaicos.

Otra comparación importante es la eficiencia la cual calculamos de la siguiente manera:

$$eff [\%] = \frac{Potencia_{hidraulica}}{Potencia_{entrada}} * 100\%, \quad (4-1)$$

Para realizar este cálculo utilizamos Matlab donde aparte de plantear la fórmula 4-1 por cada prueba de día completo de operación del SBFV, se usó la función “ medfilt1” para aplicar un filtro de mediana en las gráficas obtenidas, el resultado se ve en la figura 4-62.

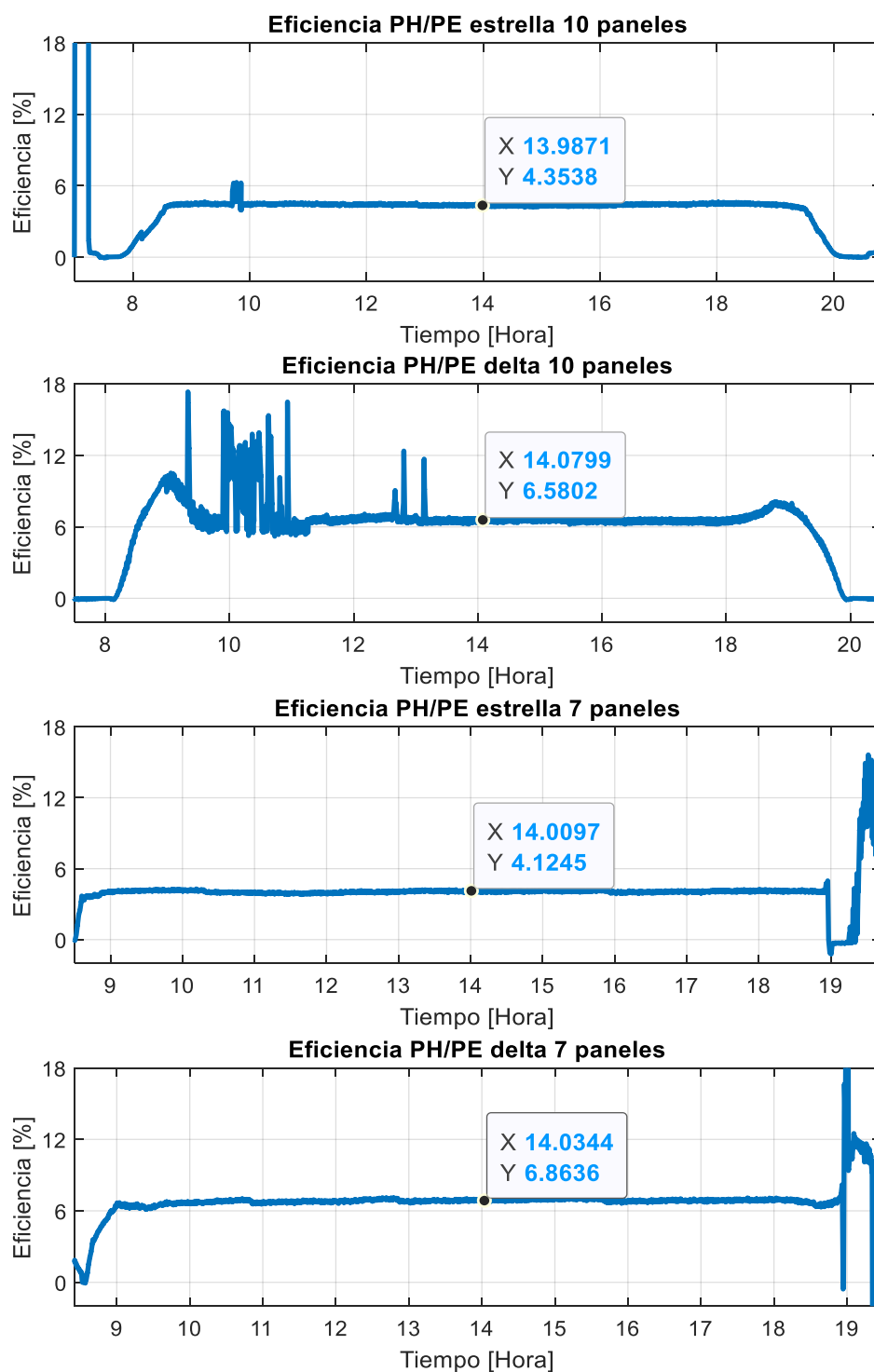


Fig. 4-62. Eficiencias de las pruebas de día completo de operación del SBFV.

En la figura 4-62 se observa que cuando la bomba de agua del SBFV está configurada en delta, el sistema presenta una mejor eficiencia comparado de la configuración en estrella, esta diferencia es de un 2% que las eficiencias al ser tan bajas es un valor considerable. Las eficiencias son bajas debido a que la potencia hidráulica es pequeña, esto se debe a que la altura que se levanta el agua en el sistema es de alrededor de 1.5 metros y la bomba están diseñadas para alturas mayores.

5. Conclusiones

5.1 Sumario

Para poder lograr este trabajo fue necesario realizar una revisión bibliográfica para ponernos en contexto sobre el estado actual de los SBFV, ya sea en donde pueden ser aplicado, su factibilidad tanto económica y social, etc. En esta revisión bibliográfica también se aprendió sobre control de accionamientos industriales necesario para la aplicación de estimadores de velocidad y torque eléctrico.

Durante el desarrollo de este informe se explicó el SBFV utilizado en conjunto del sistema de registro y monitoreo de datos. Se detallo los componentes del SBFV montado, como también los tipos de sensores utilizados y su respectiva calibración. Además, el trabajo incluyo la implementación de un estimador de velocidad (BEMF-MRAS) y un estimador de torque (modelo híbrido) en los cuales se realizaron pruebas preliminares para asegurar su correcto funcionamiento.

El SBFV montado consiste en un sistema fotovoltaico compuesto de un string de 10 paneles solares en serie, los cuales sus terminales van a un inversor que transforma la energía DC en AC para alimentar la bomba de agua, la cual cuenta con un motor inducción que al girar produce que el impulsor gire y pueda mover el agua.

El sistema de registro y monitoreo conto de 2 sensores de presión para poder medir la presión de succión y impulsión del sistema, un sensor de caudal para medir cuantos litros por minutos de agua puede bombear el SBFV, como también dos estimadores uno de velocidad y otro de torque, los cuales solo requerían del voltaje y corriente del SBFV. Se realizó una prueba preliminar en el sistema de registro y monitoreo para así poder ver su correcto funcionamiento y poder seleccionar una frecuencia de corte en el filtro pasa bajos encargado de eliminar los ruidos de alta frecuencia en las señales.

Una vez que se aseguró el correcto funcionamiento del sistema de monitoreo se procedió a realizar dos pruebas preliminares más. La primera prueba era para poder encontrar el tiempo de muestreo mínimo de funcionamiento de los estimadores y la segunda fue para probar el correcto funcionamiento del sistema ante una prueba extensa la cual duro 3 horas.

En la segunda prueba preliminar se logró notar que al alimentar el SBFV con los paneles solares, las variables de interés presentan una gran variación por lo cual se utilizaron las funciones de filtros que se encuentran en Matlab, estas funciones fueron la función “hampel” el cual es para aplicar un filtro de Hampel a la señal y así eliminar los valores atípicos en las señales de voltaje y corrientes.

La otra función de Matlab utilizada fue la función “medfilt1” el cual es un filtro de mediana de 1 dimensión. Este filtro fue utilizado en las señales de presión de succión, presión de impulsión, velocidad y torque estimados, potencia de entrada, potencia mecánica y potencia hidráulica.

Una vez listas las pruebas preliminares se procedió a realizar las pruebas de día completo, las cuales fueron con la bomba de agua configurada en conexión delta y estrella. Además, con un sistema fotovoltaico de 10 y 7 paneles en series. Donde se registró los datos del SBFV durante la mañana, tarde y noche.

5.2 Conclusiones

En base a los datos presentados en las tablas y las descripciones correspondientes, se puede concluir lo siguiente:

- El SBFV configurado en conexión estrella con 10 paneles fotovoltaicos muestra un rendimiento inferior a los valores nominales en todas las variables analizadas. El voltaje de línea-neutro alcanza el 52.5% de su valor nominal, la corriente de línea el 90%, el caudal el 73.33%, la velocidad del motor el 60.4%, y el torque eléctrico el 51.98%. Esto se debe a que, con 10 paneles solares en serie, el SBFV no logra entregar el voltaje necesario para alcanzar el valor nominal de 400 V en conexión estrella.
- Por otro lado, el SBFV configurado en conexión delta con 10 paneles fotovoltaicos muestra un rendimiento cercano a los valores nominales en la mayoría de las variables. El voltaje de fase alcanza el 99.9% de su valor nominal, la corriente de fase el 104.2%, el caudal el 100%, la velocidad del motor el 101.78%, y el torque eléctrico el 77.7%. Sin embargo, el torque eléctrico se encuentra por debajo del valor nominal. Esto se explica por la baja carga en el sistema debido a la poca altura que la bomba de agua necesita levantar el agua.
- El SBFV configurado en conexión estrella con 7 paneles fotovoltaicos presenta el peor rendimiento en comparación con los valores nominales. Solo logra entregar el 50% del caudal nominal de la bomba de agua. Esto era esperable, ya que con 10 paneles fotovoltaicos en serie, el SBFV no alcanza el voltaje nominal en estrella, y al reducir los paneles a 7, la situación empeora. El torque eléctrico y el voltaje de línea-neutro también están significativamente por debajo de sus valores nominales.

- Por último, el SBFV configurado en conexión delta con 7 paneles fotovoltaicos muestra un rendimiento mejorado en comparación con el sistema en conexión estrella con 7 paneles. Aunque no alcanza los valores nominales en todas las variables, logra un caudal máximo del 87.5% y una velocidad del motor del 74.6%, lo cual es notablemente mejor que el rendimiento en conexión estrella con la misma cantidad de paneles.
- Al comparar las pruebas con la misma cantidad de paneles, pero con distintas conexiones, se observa que tanto con 10 como con 7 paneles fotovoltaicos, la conexión delta presenta un mejor rendimiento en todas las variables en comparación con la conexión estrella. Esto se debe a que el sistema en delta logra un caudal mayor, una velocidad y torque eléctrico superiores al sistema en estrella.
- En cuanto a las potencias, tanto en las pruebas con 10 paneles como con 7 paneles fotovoltaicos, el SBFV configurado en conexión delta muestra potencias más altas en comparación con la conexión estrella. En ambos casos, la potencia de entrada, mecánica e hidráulica del sistema en delta es superior a la del sistema en estrella.

En general, se puede concluir que el rendimiento del SBFV mejora al aumentar la cantidad de paneles fotovoltaicos y al utilizar la conexión delta en lugar de la estrella. Esto se traduce en un mayor caudal, velocidad y torque eléctrico más cercanos a los valores nominales de la bomba de agua. Además, se observa que la diferencia entre la potencia de entrada y la potencia mecánica es menor cuando el SBFV trabaja más cerca de sus valores nominales. También los resultados indican que el rendimiento del SBFV se ve afectado por la configuración de conexión (estrella o delta) y la cantidad de paneles fotovoltaicos utilizados. La configuración delta muestra un mejor desempeño en términos generales, mientras que un mayor número de paneles fotovoltaicos mejora el rendimiento en ambas configuraciones. Estos hallazgos son importantes para optimizar el diseño y funcionamiento de los sistemas de bombeo fotovoltaico y lograr un mejor aprovechamiento de la energía solar.

5.3 Trabajo futuro

- Diseñar un sistema que permita aislar el módulo convertidor de corriente a voltaje XY-IT0V, para que no se produzcan errores en la medición de caudal.
- Realizar pruebas configurando el inversor con control vectorial sin sensor.
- Realizar pruebas cerrando parcialmente las válvulas de las tuberías de succión y impulsión para aumentar la carga en el motor de la bomba hidráulica.
- Realizar pruebas con sistemas fotovoltaicos montados en seguimiento solar de uno y doble eje.
- Estudiar y aplicar un algoritmo que pueda estimar el caudal por medio de las variables eléctricas del SBFV.
- Realizar pruebas de rendimiento del SBFV con sombreado parcial en los paneles del sistema fotovoltaico.

Bibliografía

- [1] Posorski R. Photovoltaic water pumps, an attractive tool for rural drinking water supply. *Sol Energy* 1996;58(4–6):155–63.
- [2] Rebecca Lindsey and Luann Dahlman. Climate Change: Global Temperature. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>.
- [3] Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, "Agricultura Chilena: Reflexiones y Desafíos al 2030", ODEPA, Santiago, 2017.
- [4] Foster R, Cota A. Solar water pumping advances and comparative economics. *Energy Procedia* 2014; 57:1431–6.
- [5] Haidar Islam. Performance Evaluation of Maximum Power Point Tracking Approaches and Photovoltaic Systems. *Energy* 10.3390/en11020365.
- [6] Gouws R, Lukhwareni T. Factors influencing the performance and efficiency of solar water pumping systems: a review. *International Journal of Physical Sciences* 2012;7(48):6169–80.
- [7] Chandel SS, Naik MN, Chandel R. Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies. *Renewable Sustainable Energy Reviews* 2015:1084–99.
- [8] Morales Silva A. A. (2019), Estimación de Torque y Velocidad para Monitoreo de Condiciones en Bombas Alimentadas con Variadores de Frecuencia Solares. [Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil Eléctrico]. Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- [9] Vas, P. (1998). *Sensorless Vector and Direct Torque Control*, Oxford University Press.
- [10] Agrebi Zorgani, Y., Koubaa, Y. & Boussak, M. (2010). Simultaneous Estimation of Speed and Rotor Resistance in Sensorless ISFOC Induction Motor Drive Based on MRAS Scheme. *The XIX International Conference on Electrical Machine – ICEM 2010*, 1-6.
- [11] Haron, A. R. & Idris, N. R. N. (2006). Simulation of MRAS-based Speed Sensorless Estimation of Induction Motor Drives using MATLAB/SIMULINK. *IEE International Power and Energy Conference*, 411-415.
- [12] Bose, B. K. (2002). *Modern Power Electronics and AC Drivers*, Prentice Hall.

Anexo A. Configuración de Sensor de Caudal

Para poder acoplar de forma correcta el Sensor de Caudal IFM SA5000 se tuvo que modificar la Tee PVC 32 mm y el bushing, como resultado de lijar y modificar estos elementos, no se podía saber ciertos datos para la configuración correcta del sensor. Uno de los datos necesarios para la configuración del Sensor es el diámetro de la unión Tee, pero al haber sido modificada no se puede saber exactamente su magnitud del diámetro, al configurar el sensor con el diámetro de la unión y al realizar la prueba preliminar mencionada en el capítulo 3 en la sección de sensores, arrojaba un valor superior a los 90 l/min aproximados que serían los correctos cuando la bomba de agua funciona en su máxima capacidad. Por lo cual se utilizó otro Sensor de caudal magnético de marca Yokogawa ADMAG modelo AXF025G que se encuentra instalado en un sistema de automatización utilizado en clases de laboratorio en la universidad, este sistema consiste en el llenado de un estanque con automatización gracias a un sistema de control y una bomba de agua de 2800 rpm. En las figuras A-1 y A-2 se puede observar el sistema completo.



Fig. A-1. Sistema de llenado automatizado que se encuentra en el laboratorio de UCSC.

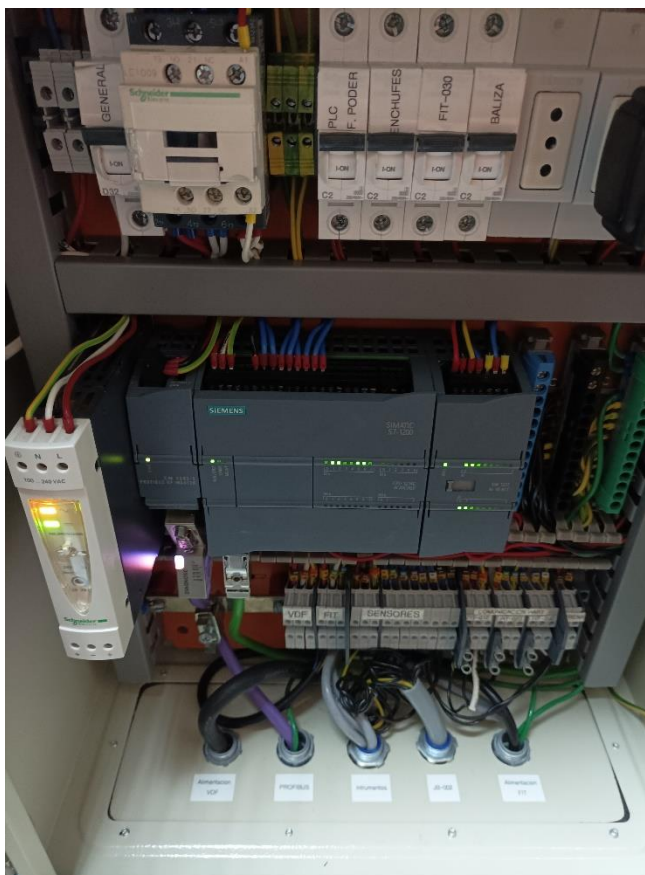


Fig. A-2. Sistema de control para el llenado automatizado que se encuentra en el laboratorio de la UCSC.



Fig. A-3. Sensor de caudal magnético Yokogawa ADMAG modelo AXF025G.

Para la calibración del sensor de caudal IFM SA5000 utilizamos como maestro al sensor de caudal magnético Yokogawa, por lo cual acoplamos el sensor de caudal IFM al sistema anteriormente mencionado, en la figura A-4 se puede ver la manera de acoplamiento del Sensor IFM.

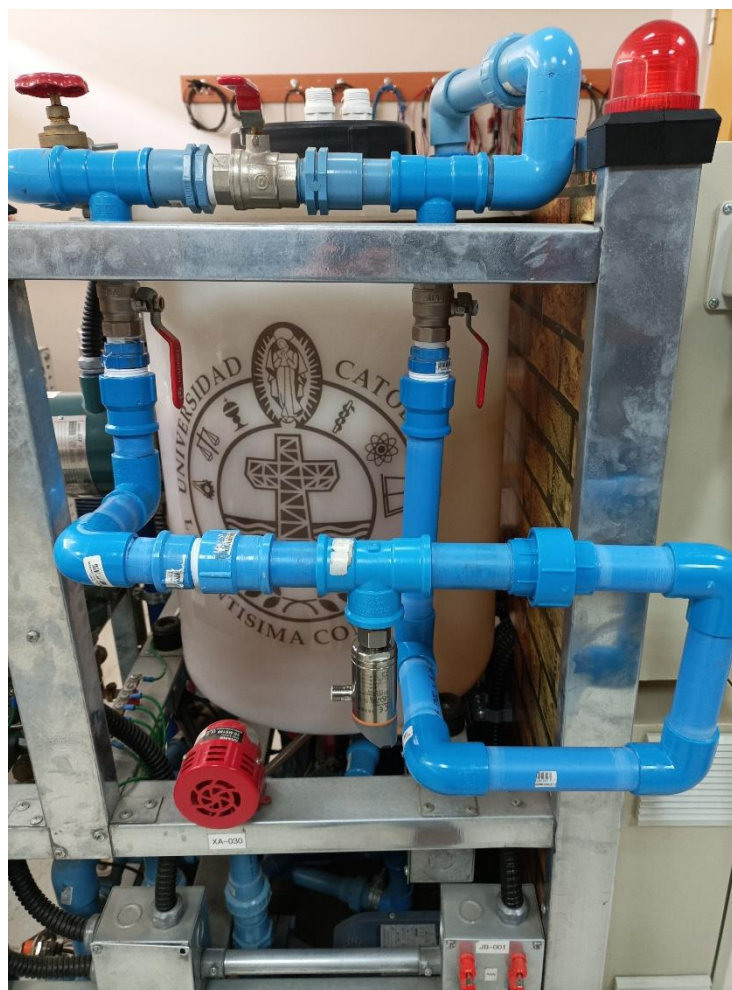


Fig. A-4. Acoplamiento del sensor de caudal IFM SA5000 al sistema.

Una vez acoplado el sensor se comenzó la calibración, para esto se realizó una prueba haciendo funcionar la bomba de agua del sistema desde los 100 rpm a 2800 rpm en intervalos de 100 a 100, se realizó esta prueba con distintas configuraciones de diámetros para el sensor IFM y se iba comparando con lo que marcaba la pantalla led de este sensor con lo que marcaba la pantalla led del sensor Yokogawa. Las configuraciones de diámetros que más se acercaron a los valores del sensor de caudal magnético Yokogawa fueron al configurar el sensor de caudal IFM con diámetro de 25 mm y 26 mm, esto se puede observar en las figuras A-5 y A-6.

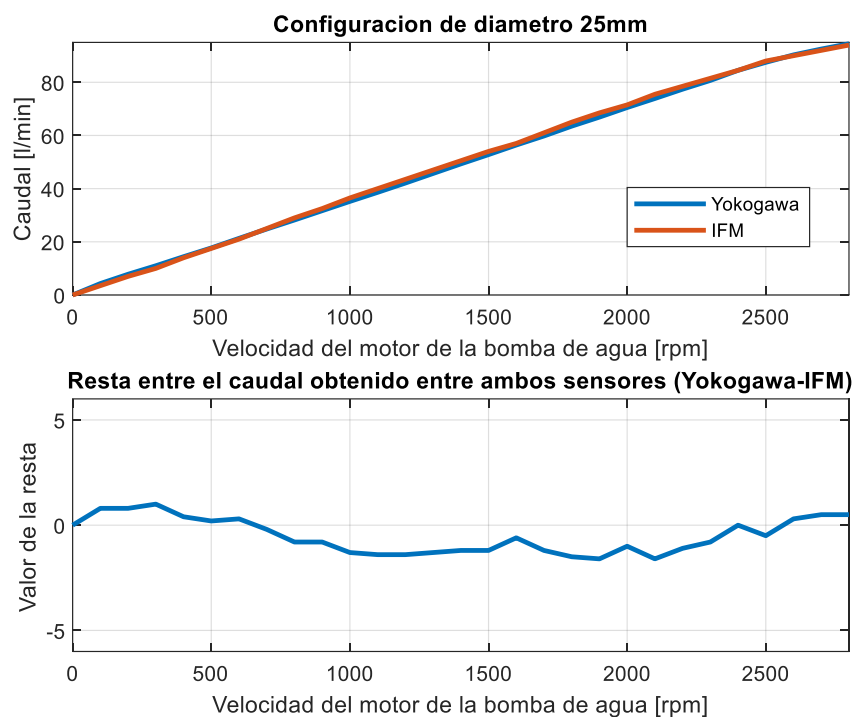


Fig. A-5. Gráfico comparativo entre el caudal obtenido por el sensor Yokogawa y el IFM (configurado con un diámetro 25mm).

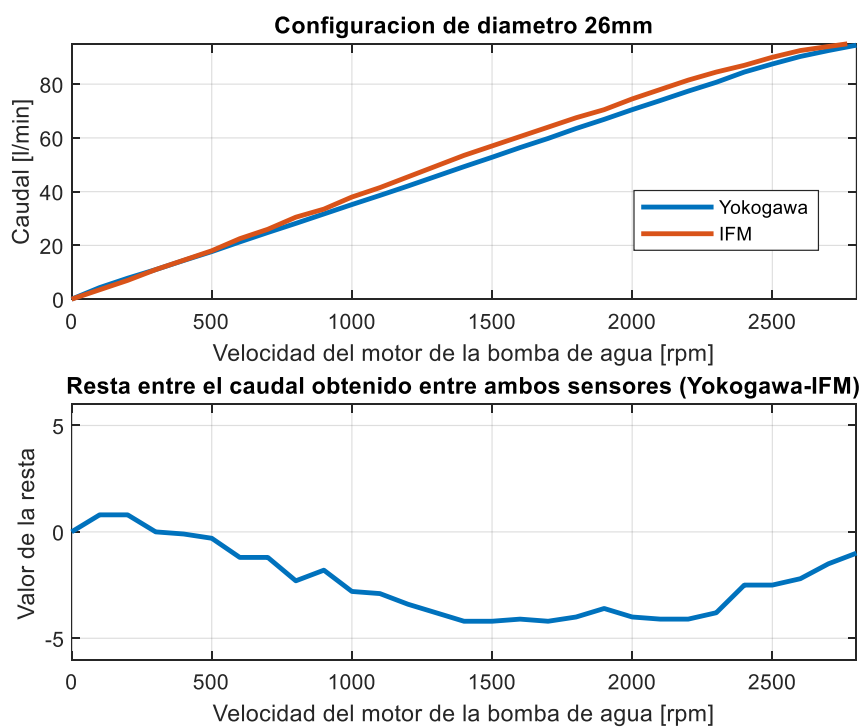


Fig. A-6. Gráfico comparativo entre el caudal obtenido por el sensor Yokogawa y el IFM (configurado con un diámetro 26mm).

Lo que se observar en las figuras A-4 y A-5 es que el sensor de caudal IFM con una configuración de diámetro de 25mm está más cercana a los valores que entrega el sensor de caudal magnético Yokogawa, además, hay que considerar que la pantalla led del sensor Yokogawa muestra decimales del x.0 al x.9, en cambio la pantalla led del sensor IFM solo muestra dos números de decimales, los cuales son x.0 y x.5 lo cual puede explicar la pequeña diferencia. Una vez calibrado el sensor de caudal IFM SA5000 se procedió a desacoplar del sistema de llenado de estanque automatizado para volver a acoplarlo en el SBFV utilizado en este trabajo de habilitación profesional.

Otro parámetro importante para configurar son los valores de caudal máximo y mínimo de la señal analógica utilizada, la cual consiste en una señal de corriente de 4 a 20 mA, donde se configuro que en 4 mA corresponden a un caudal de 0 l/min y que 20 mA corresponde a 95 l/min. La señal entregada por el sensor IFM al ser de corriente no es posible procesarla con la Dspace MicroLabBox 1202 por lo cual es necesario usar un módulo convertidor de corriente a voltaje como se muestra en la figura 3-8. Este módulo de modelo XY-IT0V transforma la señal de corriente de 0-20 mA a una señal de voltaje de 0-10 V, por lo cual nos dificulta la obtención de una ganancia para transformar la señal de voltaje a l/min debido a que el 0 l/min en la señal entregada por el sensor IFM son 4 mA y cuando el módulo transformador transforma esta señal no entrega 0 de voltaje debido a que el 0 de voltaje en el módulo equivale a una corriente de 0 mA. Para poder calcular esta ganancia tenemos la información que caudal tiene un aumento lineal con respecto a la velocidad que funciona la bomba de agua. Por lo tanto, realizamos una prueba con el sistema de bombeo montado haciendo funcionar la bomba de agua en dos velocidades y obteniendo el valor del voltaje de la señal entregada por el módulo XY-IT0V, estos valores se muestran en la tabla A-1.

Tabla A-1. VALORES DE LA PRUEBA REALIZADA

Velocidad de la bomba	Caudal	Voltaje de la señal
1400 [rpm]	55.5 [l/min]	5.3564 [V]
2800 [rpm]	93 [l/min]	8.5791 [V]

Ahora con estos dos puntos, se utiliza la ecuación de la recta y queda mostrada en la ecuación A-1.

$$Q - 55.5 = \frac{93-55.5}{8.5791-5.3564} (V - 5.3564), \quad (A-1)$$

Donde:

Q : Caudal del SBFV

V : Voltaje de la señal entregada por el módulo convertidor

Finalmente, al despejar Q de la ecuación A-1 obtenemos la ganancia para poder transformar el voltaje de la señal que nos entrega el módulo convertidor en el caudal del sistema.

$$Q = 11.6362 * V - 6.8281, \quad (A-2)$$

Anexo B. Modelos de estimación (Simulink)

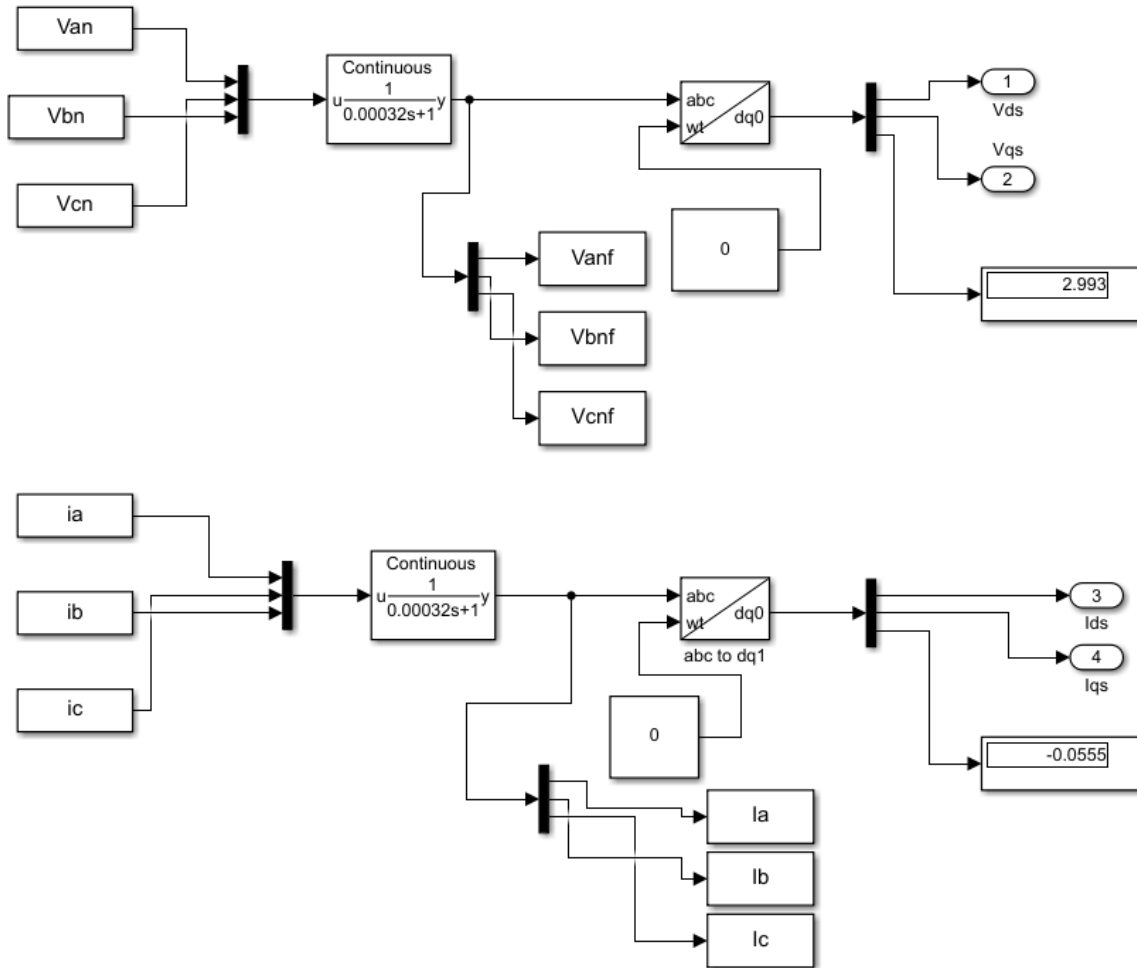


Fig. B-1. Transformación de coordenadas abc a qd0.

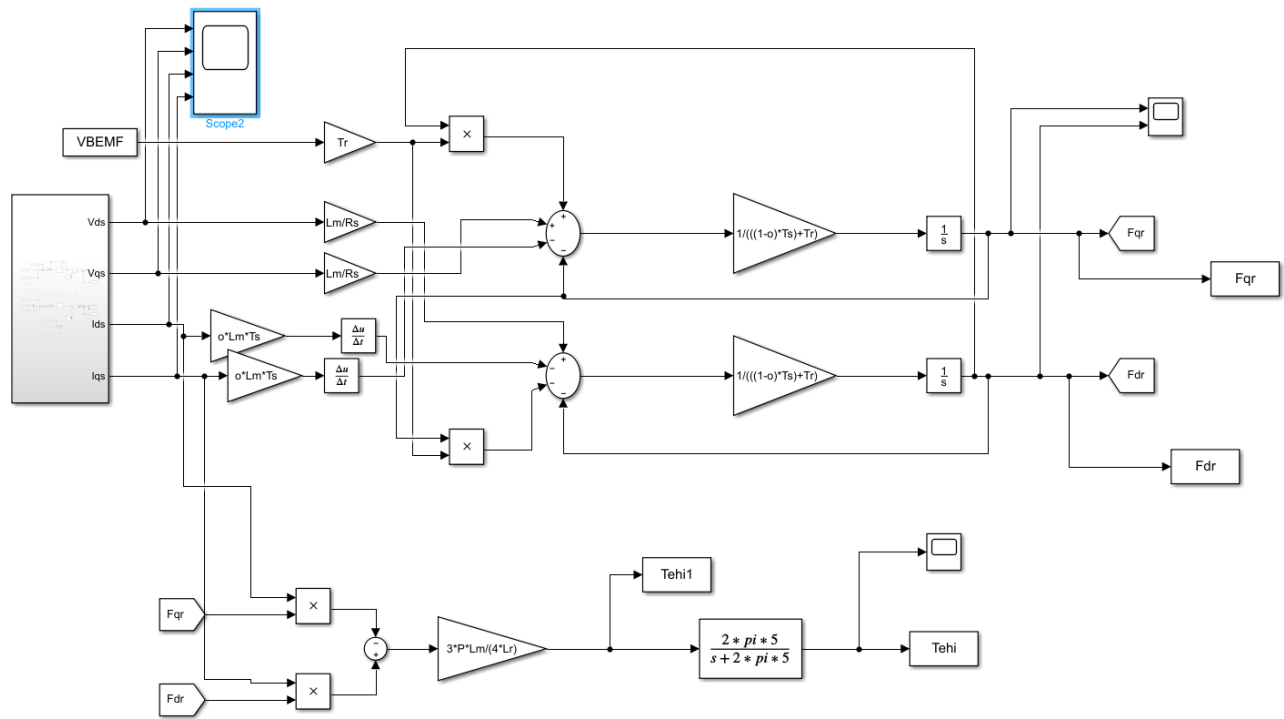


Fig. B-2. Modelo híbrido implementado en Simulink.

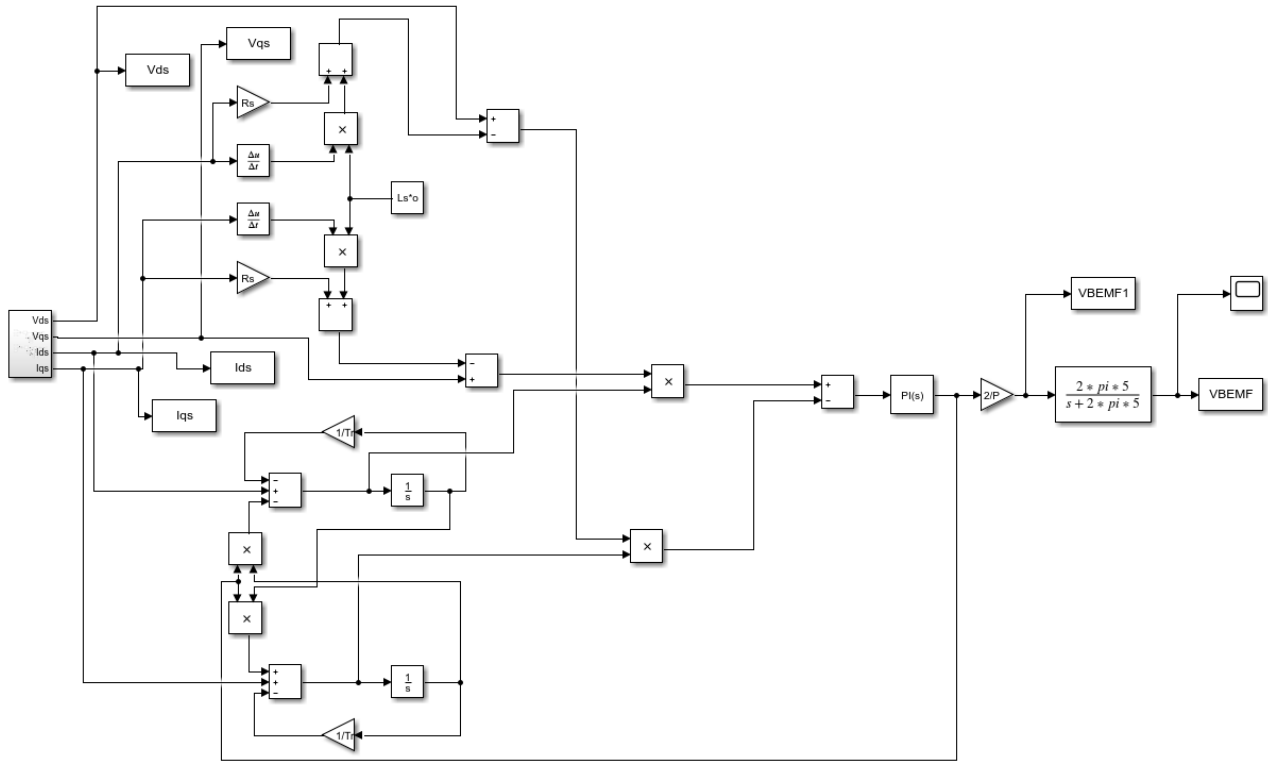


Fig. B-3. BEMF-MRAS implementado en Simulink.

Anexo C. Irradiancia de los días de prueba

La UCSC cuenta con una plataforma de monitoreo y recolección de datos en su planta fotovoltaica llamado VCOM Cloud, en el cual se puede obtener la potencia generada por cada inversor y también se puede obtener la irradiancia diaria, esta última nos interesa en los días donde se realizó las pruebas.

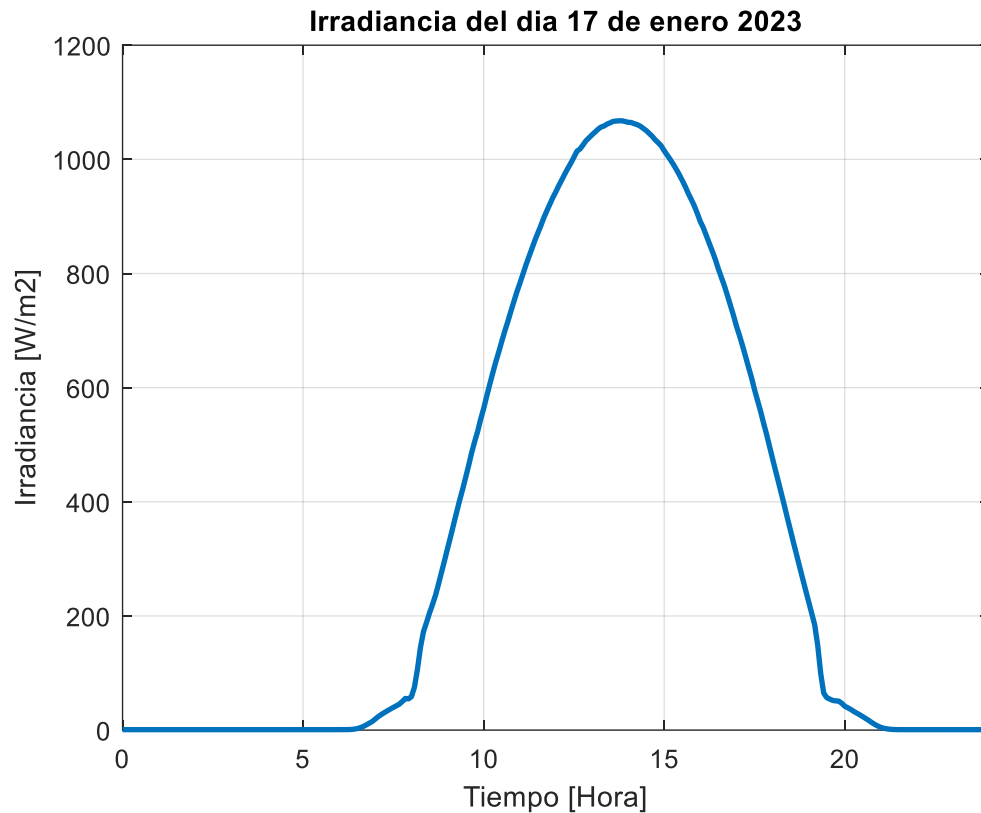


Fig. C-1. Irradiancia del día 17 de enero del 2023.

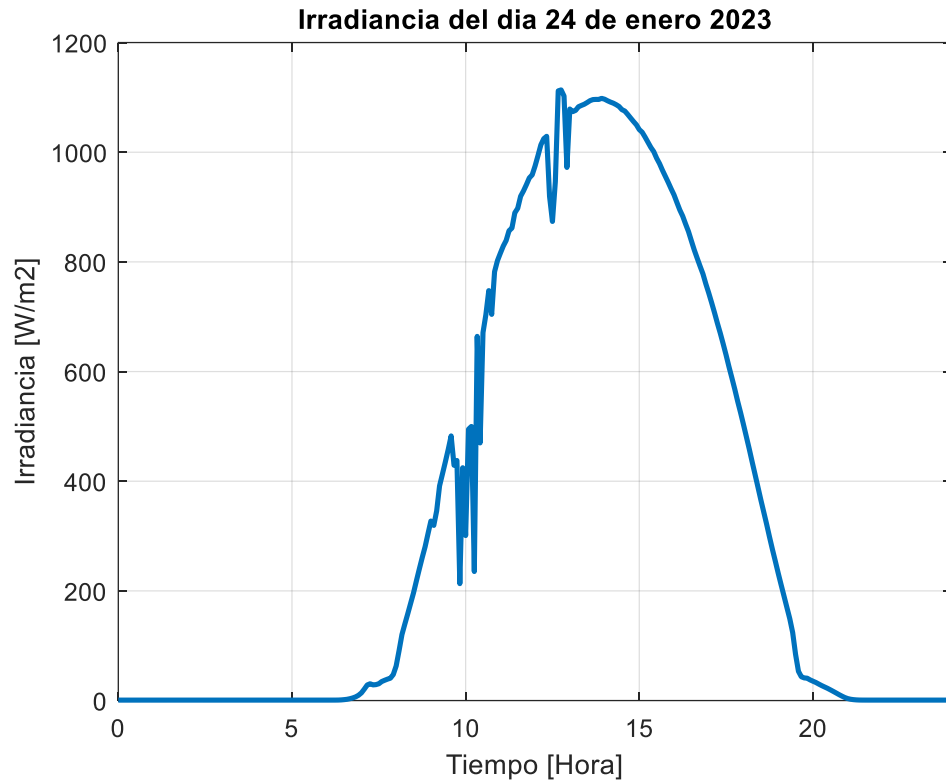


Fig. C-2. Irradiancia del día 24 de enero del 2023.

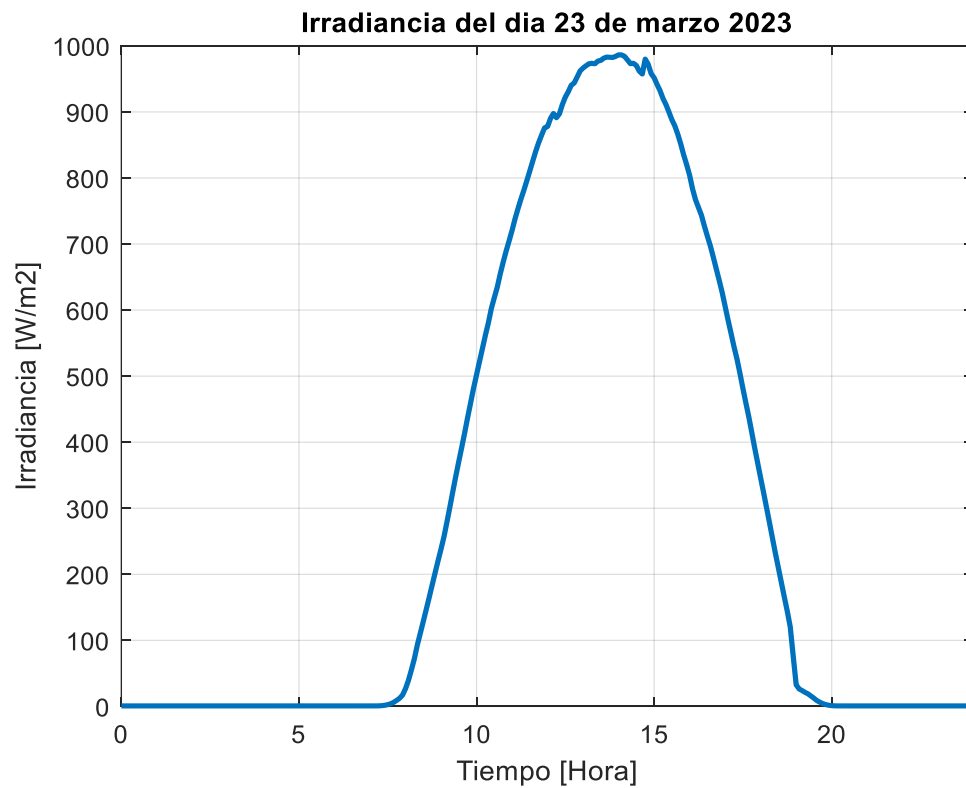


Fig. C-3. Irradiancia del día 23 de marzo del 2023.

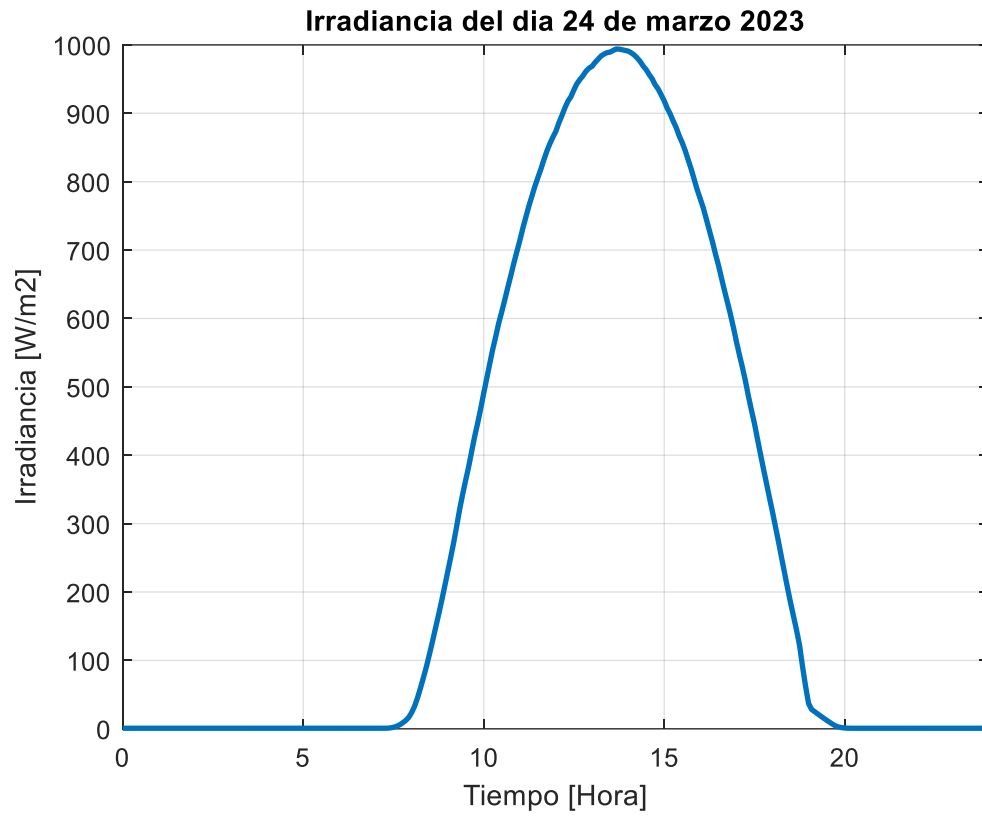


Fig. C-4. Irradiancia del día 24 de marzo del 2023.

Anexo D. Voltajes y Corrientes (Completos)

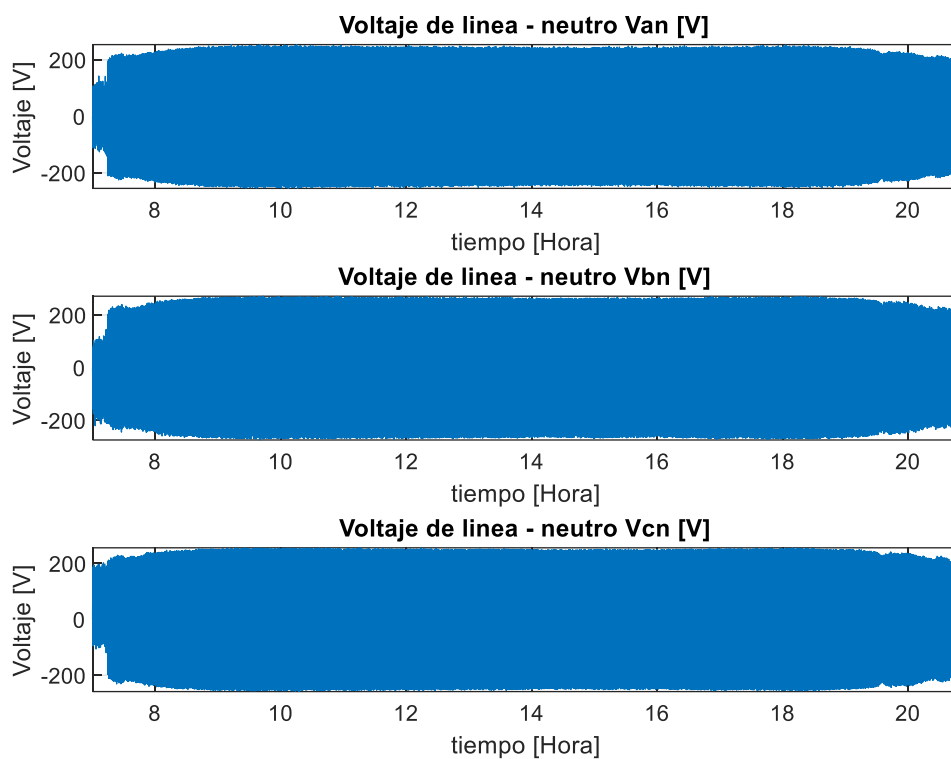


Fig. D-1. Voltajes de línea – neutro de la prueba del día 17 de enero, 2023.

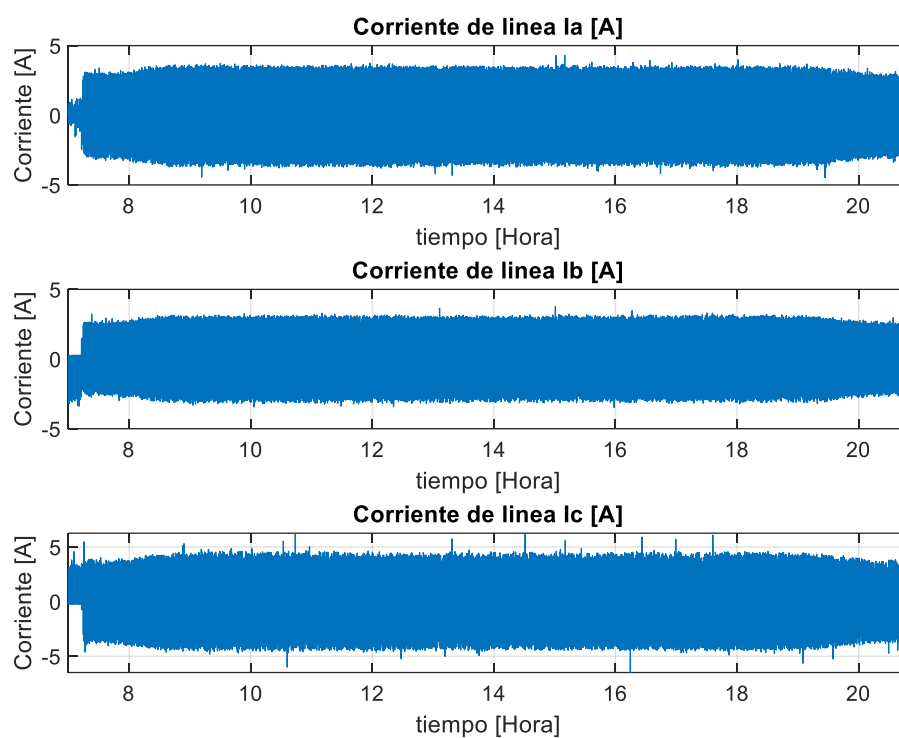


Fig. D-2. Corrientes de línea de la prueba del día 17 de enero, 2023.

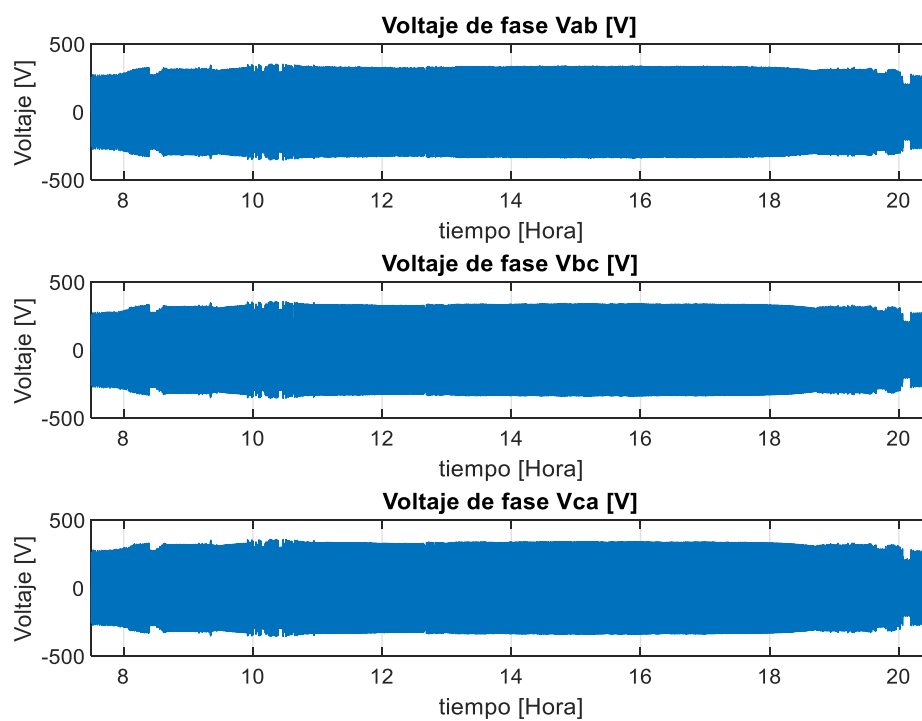


Fig. D-3. Voltajes de fase de la prueba del día 24 de enero, 2023.

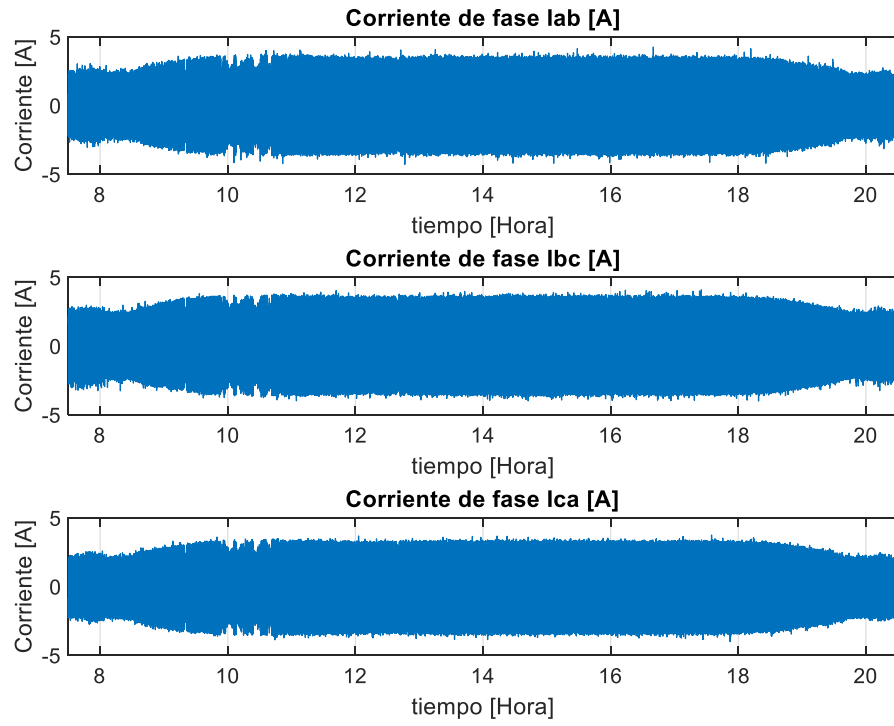


Fig. D-4. Corrientes de fase de la prueba del día 24 de enero, 2023.

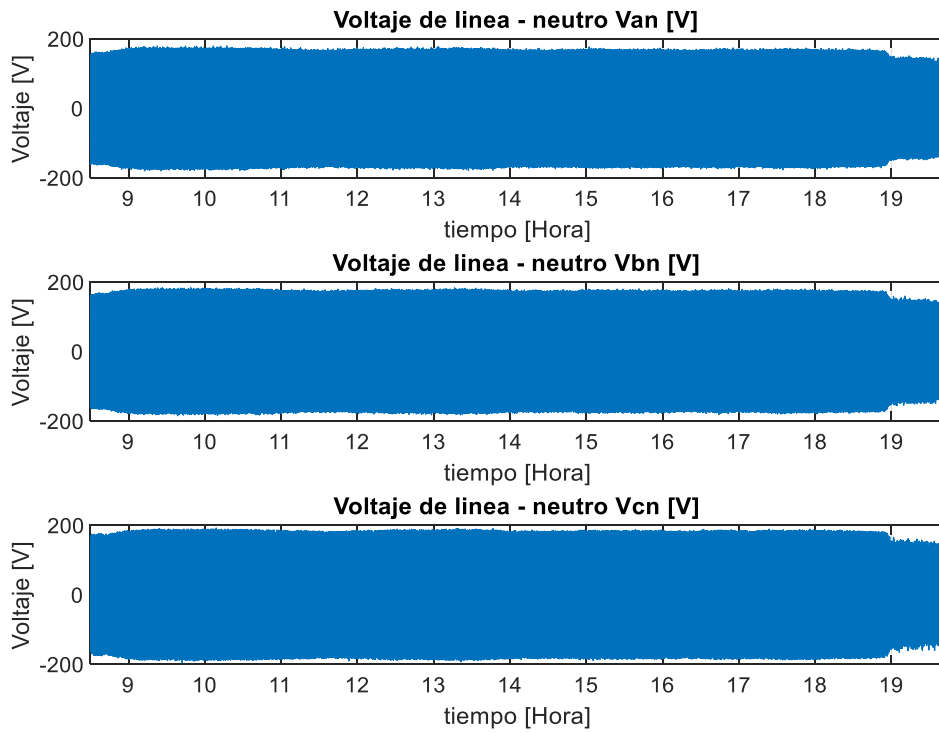


Fig. D-5. Voltajes de línea – neutro de la prueba del día 23 de marzo, 2023.

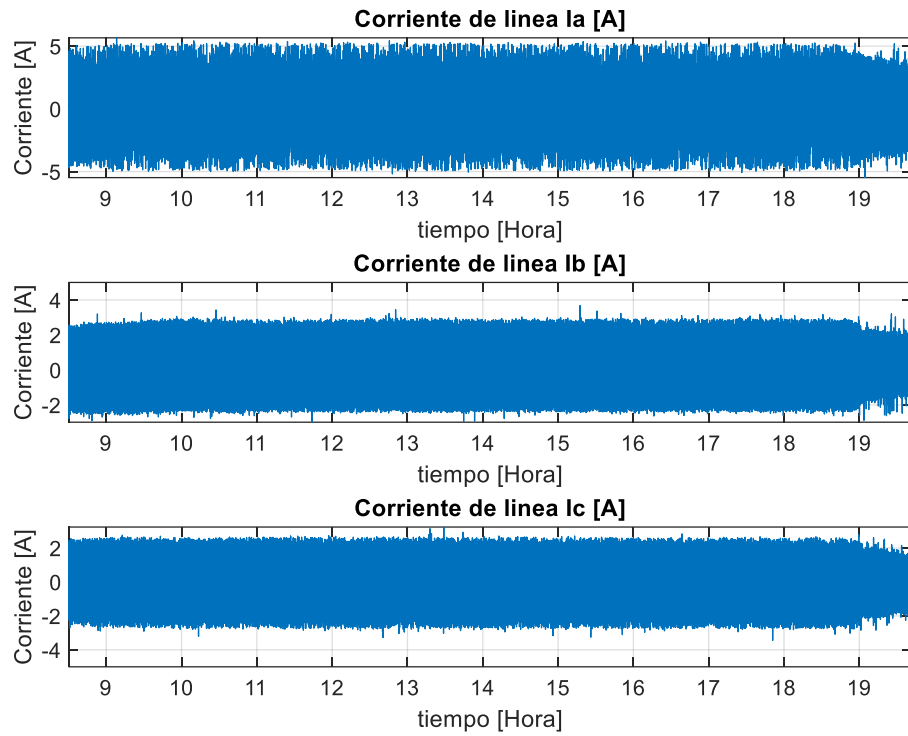


Fig. D-6. Corrientes de línea de la prueba del día 23 de marzo, 2023.

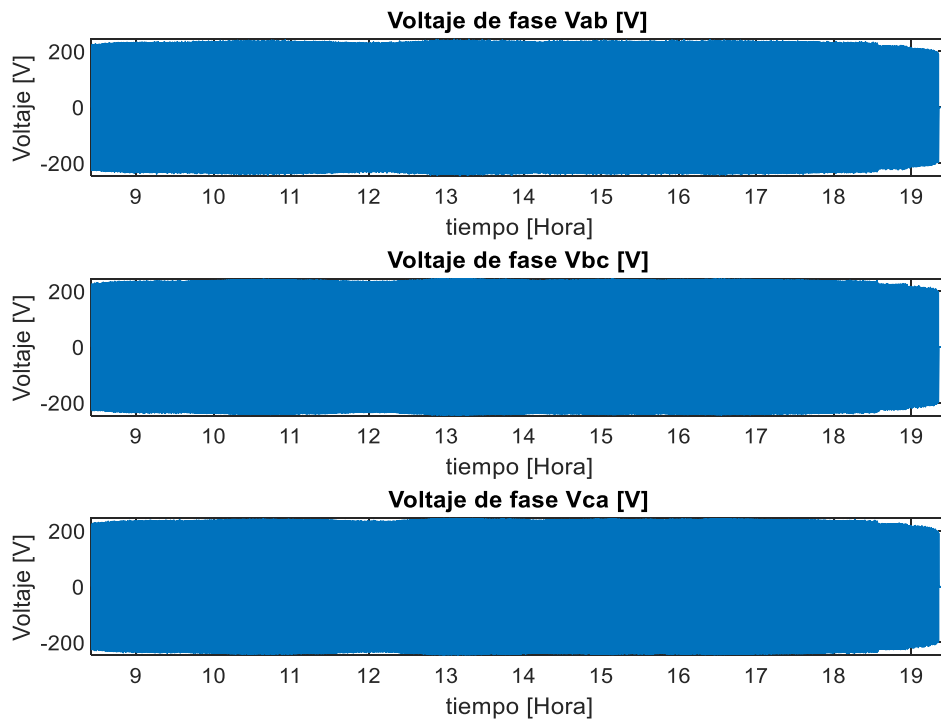


Fig. D-7. Voltajes de fase de la prueba del día 24 de marzo, 2023.

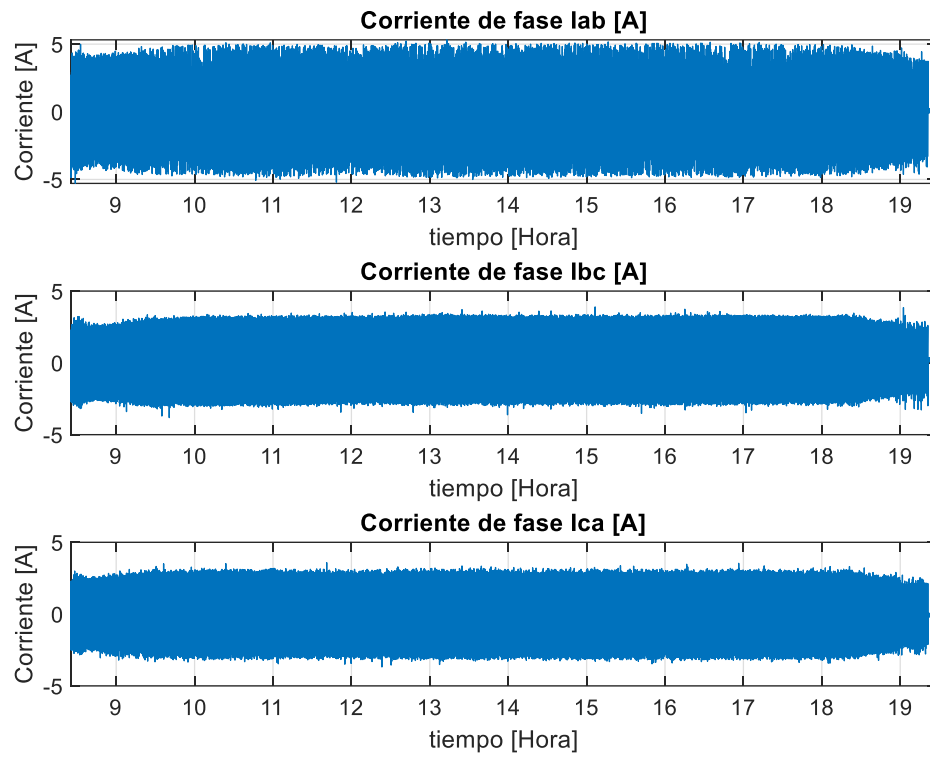


Fig. D-8. Corrientes de fase de la prueba del día 24 de marzo, 2023.