

**UNIVERSIDAD DON BOSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN GESTIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES**



TRABAJO DE GRADUACIÓN:

Aplicación de variadores de frecuencia con doble fuente de alimentación, por la red eléctrica y fuente fotovoltaica, para uso en bombeo de agua.

PARA OPTAR AL GRADO DE:

Maestro en Gestión de Energías Renovables

PRESENTADO POR:

Elix Alejandro Umaña Martínez

Miguel Ángel Hernández Chacón

Carlos Edwin Fuentes González

ASESOR:

Carlos Alberto Nájera Pérez

ANTIGUO CUSCATLÁN, LA LIBERTAD, EL SALVADOR,
CENTROAMÉRICA.
JUNIO DE 2022

Agradecimientos.

Al ingeniero Ramón Elías Aguilar Quintanilla, por su asesoría técnica y soporte durante todo el proceso de investigación previa, revisión de diseños y total acompañamiento en la implementación de los proyectos realizados para este trabajo de graduación. Este trabajo de investigación no habría sido posible sin el respaldo del Ingeniero Aguilar y sus conocimientos hidráulicos, así como su capacidad para gestión y financiamiento para la construcción de los dos proyectos prácticos que se implementaron durante el desarrollo de esta tesis.

A la empresa envasadora de agua, Pure Life Care, por su apoyo y confianza para financiar y prestar sus instalaciones para efectuar el primero proyecto en El Salvador para el diseño desarrollado en esta tesis de alimentación híbrida, permitiéndolo aprovechar la energía solar en el bombeo de agua en sus operaciones industriales.

A nuestras familias, por su apoyo durante las largas jornadas en las diferentes etapas de este trabajo de graduación.

Resumen ejecutivo.

Este trabajo de graduación, se han realizado investigaciones sobre aplicaciones de sistemas de alimentación híbrida en bombeo de agua, entendiéndose por alimentación híbrida, la capacidad de suministrar energía -a una carga, que en este caso es un motor eléctrico acoplado a una bomba para agua- de la distribuidora eléctrica como de un generador solar fotovoltaico.

En el Capítulo 1, se presentan diferentes sistemas de arranque, protección y operación de motores eléctricos usados en bombeo de agua, cuando estos se encuentran conectados a una red de distribución eléctrica. Se revisan algunos detalles particulares de los variadores de frecuencia, y las ventajas que estos ofrecen, para usarlos más adelante en el diseño de propuesto para aplicaciones aisladas e híbridas.

Posteriormente, en el Capítulo 2, se presenta y aplica una metodología de diseño y dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos, selección de motor y bomba para agua, y se usa esto para diseñar y evaluar un sistema de bombeo aislado, sin conexión a una red eléctrica.

Luego, en el Capítulo 3, se explica el modelo conceptual del sistema híbrido propuesto en este trabajo de graduación, se relaciona esto con la metodología de diseño y dimensionamiento del capítulo 2, y con la aplicación de variadores de frecuencia para bombeo, planteada en el capítulo 1. En este capítulo se realiza un análisis preliminar que relaciona los costos de las energías, así como los porcentajes de mezclas de cada una, con los valores resultantes de costo de energía total entrando a un sistema de bombeo. También se hacen estimaciones del costo de convertir diferentes sistemas a híbrido.

A su vez, en el Capítulo 4 se desarrollan diferentes análisis comparativos entre los sistemas conectados a la red, aislados e híbridos, empleando datos y análisis matemáticos y financiero, con valores de costos provenientes de cotizaciones efectuadas en el mercado de El Salvador. Se hace un análisis del ahorro total que se puede esperar durante la vida de un proyecto, así como el tiempo de recuperación de la inversión.

Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo de investigación.

Índice general

Agradecimientos.....	2
Resumen ejecutivo.	3
Índice general	4
Índice de tablas.....	6
Índice de figuras	8
Introducción	11
Objetivos generales	12
Objetivos específicos.....	12
Capítulo 1. Evaluación de diseños comúnmente utilizados en sistemas de bombeo de agua conectados a la red eléctrica.....	13
I. Diseños típicos.	13
II. Identificación de protecciones implementadas en sistemas de bombeo.....	18
III. Tipos comunes de sistemas de arranque.....	20
IV. Costeo por bloques o componentes principales.....	21
V. Estructura de costos de sistemas de bombeo conectados a la red.	24
VI. Diferencias cualitativas entre los diferentes sistemas de arranque.....	26
VII. Observaciones del capítulo.....	28
Capítulo 2. Diseño de un sistema fotovoltaico aislado para alimentar un sistema de bombeo de agua.	29
I. Diseños típicos.	29
II. Proceso de diseño de estación de bombeo alimentada por energía solar fotovoltaica. ...	31
III. Selección de tipo de motor y de convertidor.	34
IV. Ventaja del uso de variadores de frecuencia para bombeo de agua.	36
V. Dimensionamiento de generador fotovoltaico.....	37
VI. Costeo por bloques o componentes principales, orientado a estructura de costos.	39
VII. Estructura de costos de sistemas aislado.	41
VIII. Observaciones del capítulo.	42
Capítulo 3. Diseño un sistema de alimentación eléctrica híbrido de la red eléctrica y de una fuente fotovoltaica, para alimentar un sistema de bombeo de agua.....	43
I. Conceptos básicos de un sistema híbrido.....	43
II. Tipos generales de sistemas híbridos.	44
III. Análisis de la mezcla de energías.	47
IV. Constitución de un sistema híbrido.	53
V. Esquema de diseño de sistema híbrido propuesto.	55
VI. Características del sistema híbrido propuesto.	57
VII. Diagrama eléctrico.....	60
VIII. Dimensionamiento de sistemas híbridos.....	60
IX. Comportamiento de sistema híbrido.....	61
X. Costeo por bloques o componentes principales, orientado a estructura de costos.	66
XI. Estructura de costos de sistemas eléctrico híbrido para bombeo de agua.	69
XII. Costeo de generadores fotovoltaicos para aplicación híbrida.	70
XIII. Observaciones del capítulo.	73

Capítulo 4. Análisis comparativo y resultados experimentales de diferentes diseños de sistemas de alimentación, aislado, conectado a la red e híbrido de alimentación simultánea de la red y solar-fotovoltaica.....	74
Conclusiones y Recomendaciones	105
Bibliografía.....	107
Anexos.....	110
I. Glosario	110
II. Especificación técnica de ANDA	112
III. Costeo de diferentes arrancadores del Capítulo 1.	114
IV. Costeo de diferentes arrancadores del Capítulo 2.	115
V. Costeo de diferentes arrancadores del Capítulo 3.	116
VI. Tarifas usadas para el estudio.....	120
VII. Periodos de tarifas diferenciadas de energía, aplicables en El Salvador.	121
VIII. Factura en sitio de instalación de sistema de 30 hp, antes de instalación de sistema de alimentación híbrida.....	122
IX. Memoria de cálculo dotación de agua potable proyecto ACRASAME - ZP, Cantón Zapotal, Suchitoto, Cuscatlán, El Salvador.....	123
i. Demanda de agua.....	123
ii. Fuente de agua.	124
iii. Carga dinámica total del sistema y flujo de diseño.....	124
iv. Selección y cálculo de bomba.....	126
vi. Verificación del diseño del sistema con respecto a la demanda de agua del proyecto. 128	
X. Datos usados para análisis económico y energético en Capítulo 4.	130

Índice de tablas

Tabla 1. Elementos de diferentes tipos de arrancadores.	22
Tabla 2. Tabla de costos unitarios para un equipo de bombeo de 7.5 hp.....	23
Tabla 3. Porcentajes de costos de cada componente, estación de bombeo de 7.5 hp.	24
Tabla 4. Selección de sistema de arranque según aplicación.	27
Tabla 5. Tabla de costos unitarios para un equipo de bombeo solar de 7.5 hp, aislado.....	41
Tabla 6. Porcentajes de costos de cada componente, estación de bombeo solar de 7.5 hp, aislada.	41
Tabla 7. Fuente de energía actuando en diferentes fracciones de un día cualquiera.....	62
Tabla 8. Evaluación de ecuación (3.22) con distintos valores de r_c y de k_{efv}	64
Tabla 9. Costeo de sistema eléctrico fotovoltaico para bombeo, tipo aislado.	66
Tabla 10. Costeo de sistema eléctrico para bombeo, conectado a red.	67
Tabla 11. Costeo de un sistema híbrido de 7.5 y 30 hp.	67
Tabla 12. Resumen de costos en US\$/hp y diferenciales de costos.	68
Tabla 13. Porcentajes de costos de cada componente, estación de bombeo híbrida de 7.5 y 30 hp según diseño propuesto.	69
Tabla 14. Potencias muestreadas de sistemas de bombeo.....	70
Tabla 15. Costos normalizados de energía con diferentes cantidades de horas de operación, sistema híbrido, 80% de participación de energía solar.	77
Tabla 16. Ahorros de energía para diferentes potencias de bombeo y diferentes porcentajes de participación de energía solar.....	78
Tabla 17. Tiempos de recuperación de la inversión (en años), 80% de participación de generador fotovoltaico.....	79
Tabla 18. Tiempos de recuperación de la inversión (en años), 60% de participación de generador fotovoltaico.....	81
Tabla 19. Tiempos de recuperación de la inversión (en años), 40% de participación de generador fotovoltaico.....	82
Tabla 20. Ventajas y desventajas de diferentes tipos de sistemas de alimentación eléctrica.....	84
Tabla 21. Tiempo muestreado en sistema híbrido de 7.5 hp.....	91
Tabla 22. Tiempo muestreado en sistema híbrido de 7.5 hp, recortando horas de menor radiación.	93
Tabla 23. Distribución de la energía entre 7am y 5pm, sistema de 7.5 hp.....	93
Tabla 24. Costeo de sistemas de arranque y protección de Capítulo 1.	114
Tabla 25. Costeo de arrancadores de 7.5 hp de Capítulo 2.	115
Tabla 26. Costeo de sistema para potencia de bombeo 30 hp, conectado a red, Capítulo 3.....	116
Tabla 27. Costeo de sistema para potencia de bombeo 30 hp, aislado, Capítulo 3.....	117
Tabla 28. Costeo de sistema para potencia de bombeo 30 hp, híbrido, Capítulo 3.	118
Tabla 29. Costeo de sistemas de 1 a 250 hp, híbridos, precios de segundo trimestre de 2022.	119
Tabla 30. Costo unitario en \$/hp de diferentes sistemas, potencias desde 1 hasta 250 hp.....	120
Tabla 31. Datos para diseño de pozo.....	125
Tabla 32. Características de panel fotovoltaico a usar en diseño.....	127
Tabla 33. Voltajes para diseño de generador fotovoltaico.	128
Tabla 34. Características generales de generador fotovoltaico para sistema de bombeo de 30 hp.	128
Tabla 35. Datos para cálculo de \$/hp y multiplicadores en kWp/hp para dimensionamiento de potencia total de arreglos de paneles fotovoltaicos.	130
Tabla 36. Datos para cálculo de costo normalizado de energía en sistema conectado a red.	131
Tabla 37. Datos para cálculo de costo normalizado de energía en sistema aislado.	132

Tabla 38. Datos para cálculo de costo normalizado de energía en sistema híbrido.	133
Tabla 39. Datos para estimaciones de tiempos de recuperación de inversión simple.....	134
Tabla 40. Valores calculados de energía consumida en cada sistema, total en 20 años de operación.	134

Índice de figuras

Figura 1. Esquema ilustrativo de la instalación de una bomba sumergible.	14
Figura 2. Esquema ilustrativo de la instalación de una bomba de tipo turbina vertical.	15
Figura 3. Esquema ilustrativo de la instalación de una bomba de superficie, en este caso tipo centrífuga.	16
Figura 4. Esquema eléctrico básico de bloques, de los elementos principales en la alimentación eléctrica de un motor de un sistema de bombeo.	17
Figura 5. Esquema de un sistema de arranque directo mediante contactor(es).	20
Figura 6. Esquema de un sistema de arranque electrónico mediante arrancador suave.	20
Figura 7. Esquema de un sistema de arranque electrónico mediante variador de frecuencia.	20
Figura 8. Distribución de costos porcentuales de cada tipo de diseño típico.	24
Figura 9. Variación de costos en función de potencia de sistema de bombeo.	25
Figura 10. Variación de costos en función de potencia de sistema de bombeo.	26
Figura 11. Esquema general de un sistema de bombeo aislado alimentado por energía solar.	29
Figura 12. Proceso de diseño estación de bombeo con generador solar aislado.	32
Figura 13. Diseño de sistema de bombeo con motor DC sin controlador independiente de carga.	35
Figura 14. Diseño de sistema de bombeo con motor DC con controlador independiente de carga ⁴⁵	35
Figura 15. Diseño de sistema de bombeo con motor trifásico AC.	35
Figura 16. Señal PWM de voltaje y de carga.	36
Figura 17. Curva de potencia disponible a la salida de un variador de frecuencia.	38
Figura 18. Impacto de cada componente en una instalación de bombeo con generador fotovoltaico aislado.	42
Figura 19. Esquema conceptual de sistema de bombeo híbrido en donde se mezclan las energías de dos fuentes.	43
Figura 20. Esquema conceptual de sistema de bombeo híbrido en donde se combinan los costos de las dos fuentes de energía.	47
Figura 21. Esquema conceptual de un sistema híbrido.	52
Figura 22. Sistema conectado a la red.	54
Figura 23. Esquema básico de sistema aislado con generador fotovoltaico.	54
Figura 24. Representación esquemática de sistema híbrido, con dos fuentes de energía.	56
Figura 25. Flujos de potencia en sistema híbrido.	57
Figura 26. Diagrama eléctrico de sistema híbrido.	60
Figura 27. Curva de potencia disponible a la salida de un variador de frecuencia de un sistema híbrido.	61
Figura 28. Costo total de energía en un sistema híbrido, en relación a la energía de la distribuidora.	65
Figura 29. Relación de costos de sistemas híbridos de diferentes capacidades.	70
Figura 30. Costo unitario de fuente DC comparado con sistema híbrido.	71
Figura 31. Costo en dólares por cada hp y kWp por cada hp.	71
Figura 32. Evaluación de costos internos en sistemas híbridos de diferentes potencias.	72
Figura 33. Niveles de irradiación solar en El Salvador.	75
Figura 34. Comparación de costos de instalaciones de sistemas de potencia para bombeo de agua con tecnología híbrida, aislada y conectada a la red, rango de 1 a 20 hp.	75

Figura 35. Comparación de costos de instalaciones de sistemas de potencia para bombeo de agua con tecnología híbrida, aislada y conectada a la red, rango de 1 a 250 hp.....	76
Figura 36. Costo normalizado de la energía en sistemas de bombeo híbridos de diferentes capacidades, desde 4 hasta 10 horas de operación diarias, 80% de participación de energía solar.	77
Figura 37. Porcentaje de ahorro luego de 20 años de operación de cada sistema.....	78
Figura 38. Tiempo de recuperación de inversión, sistemas de bombeo de potencias desde 1 hasta 250 hp, de 4 a 8 horas de bombeo, 80% de participación solar.	80
Figura 39. Tiempo de recuperación de inversión, sistemas de bombeo de potencias desde 1 hasta 250 hp, de 4 a 8 horas de bombeo, 60% de participación solar.	81
Figura 40. Tiempo de recuperación de inversión, sistemas de bombeo de potencias desde 1 hasta 250 hp, de 4 a 8 horas de bombeo, 40% de participación solar.	82
Figura 41. Consumo energético de sistemas de diferentes potencias, tomando la potencia consumida de red como base de referencia.	84
Figura 42. Resultados de simulación de Monte Carlos en costo económico por pagos de energía, con diferentes valores C_{efvn}	85
Figura 43. Evaluación de sensibilidad de variables.	86
Figura 44. Tablero AC con variador de frecuencia con alimentación híbrida.	87
Figura 45. Tablero de control de sistema híbrido de 7.5 hp.....	87
Figura 46. Tablero DC en proyecto de sistema de bombeo híbrido de 7.5 hp.....	88
Figura 47. Sistema de monitoreo de aplicación híbrida realizada, con y sin capacidad de hacer mezcla de energía, funcionando en empresa envasadora de agua en El Salvador.	89
Figura 48. Flujos de potencia entrantes en sistema de 7.5 hp.	89
Figura 49. Flujos de potencia a la entrada y a la salida de variador de 7.5 hp.....	90
Figura 50. Pérdidas de potencia en sistema de 7.5 hp.....	90
Figura 51. Energía en sistema muestreado de 7.5 hp, híbrido.	91
Figura 52. Porcentajes de energía en sistema muestreado de 7.5 hp, híbrido, muestreo de 6:43am a 5:37pm.....	92
Figura 53. Distribución de la energía, día muestreado en sistema híbrido de 7.5 hp, muestreo de 6:43am a 5:37pm, valores en porcentajes.	92
Figura 54. Distribución de la energía, día muestreado en sistema híbrido de 7.5 hp, muestreo de 7am a 5pm, eliminando horario con baja radiación solar.	94
Figura 55. Paneles solares del proyecto, 96 paneles de 540 watts, total de 51.84 kWp.	95
Figura 56. Interior de caseta de bombeo, con tableros de control, AC y otros.	96
Figura 57. Interior de Tablero de AC, de alimentación y protección de motor con 30 hp de salida, para bombeo de agua.....	96
Figura 58. Tablero de control, con PLC de marca Altus.....	97
Figura 59. Tablero protecciones DC.	97
Figura 60. Área pozo en proyecto de 30 hp.	98
Figura 61. Placa de datos de motor sumergible usado en proyecto.	98
Figura 62. Vista de tableros de AC, DC y control, en proyecto híbrido de 30 hp.	98
Figura 63. Protecciones DC en exterior, bajo techo.....	99
Figura 64. Variador INVERTEK alimentado la carga a frecuencia reducida.....	99
Figura 65. Interfaz de monitoreo de flujos de potencia activa, corrientes y voltajes en sistema con operación exclusiva de distribuidora eléctrica, sistema híbrido de 30 hp.....	100
Figura 66. Interfaz de monitoreo durante operación a partir de distribuidora eléctrica, sistema híbrido de 30 hp.....	100

Figura 67. Interfaz de monitoreo con flujos de potencia activa, corrientes y voltajes en sistema con operación exclusiva de fuente solar, sistema híbrido de 30 hp.	101
Figura 68. Interfaz de monitoreo durante operación aislada a partir de fuente solar, sistema híbrido de 30 hp.	101
Figura 69. Esquema indicativo de flujos de potencia activa, corrientes y voltajes en sistema con operación híbrida, sistema híbrido de 30 hp.	102
Figura 70. Estado de interfaz de monitoreo, durante operación híbrida, sistema híbrido de 30 hp.	102
Figura 71. Diagrama de Sankey ilustrando flujos de potencia puntuales, sistema híbrido de 30 hp.	103
Figura 72. Distribución de la potencia en sistema híbrido de 30 hp, muestra puntual.	104
Figura 73. Imagen de factura de un sistema de bombeo de 30 hp, conectado a la red.	122

Introducción

En El Salvador el acceso al agua es muy difícil, por tanto, muchas comunidades e industrias tienen sus propios sistemas de bombeo desde pozos, el gobierno subsidia 520 comunidades que consumen anualmente más de 63.76 GWh¹. Siendo el agua un elemento indispensable para la vida, resulta de alta importancia encontrar soluciones cada vez más económicas y fiables que faciliten el acceso al vital líquido.

En ese sentido, y empleando las tecnologías de electrónica de potencia más recientes tales como los variadores de frecuencia, es posible llevar a cabo diseños e implementaciones de sistemas de alimentación híbridos (alimentado por la red eléctrica y un sistema fotovoltaico) para motores trifásicos desde 0.5 hp hasta 250 hp utilizados en equipos de bombeo de agua, que combinen el costo de la energía solar fotovoltaica con la alta disponibilidad de las redes convencionales de distribución eléctrica. Esto plantea un problema de optimización económica, en que se debe encontrar un punto de equilibrio entre un gran sistema fotovoltaico aislado versus un sistema conectado a la red.

En este proyecto de investigación se abordan diferentes diseños de sistemas de alimentación eléctrica para aplicaciones de bombeo de agua, a fin de concluir sobre la conveniencia de cada una de las fuentes de energía eléctrica, dado el estado del arte de la tecnología, así también se plantea una estructura de costos con la finalidad de que la metodología utilizada en este trabajo pueda ser replicada en el futuro, aun con las variaciones en los precios de materiales y equipos.

¹ Elaboración propia con datos de (CNE, 2020)

Objetivos generales

- Realizar una evaluación técnica y económica de la aplicación de variadores de frecuencia con doble fuente de alimentación, donde uno es la red eléctrica y la otra fuente es un sistema fotovoltaico, para uso en bombeo de agua, en comparación con sistemas conectados únicamente a una red eléctrica convencional o únicamente a un sistema fotovoltaico aislado.

Objetivos específicos.

- Evaluar diseños preestablecidos o comúnmente usados en un sistema eléctrico conectado a la red para alimentar un motor eléctrico de bombeo agua, desglosando su estructura de costos.
- Diseñar un sistema fotovoltaico aislado, para alimentar un variador de frecuencia y controlar un motor eléctrico para bombeo de agua, optimizado económicamente, desglosando su estructura de costos.
- Diseñar un sistema de alimentación eléctrica híbrida que combine y gestione al mismo tiempo energía de la red eléctrica y energía de un sistema solar-fotovoltaico, para alimentar un variador de frecuencia y controlar un motor eléctrico de bombeo de agua, optimizado económicamente, desglosando su estructura de costos.
- Comparar los rendimientos económicos y energéticos de cada diseño, ya sea aislado, conectado a la red e híbrido, de manera analítica, a través de simulaciones, análisis numérico, y análisis experimental, con la finalidad de determinar la conveniencia de cada uno, para luego recomendar aquel diseño que ofrezca mejores resultados.

Capítulo 1. Evaluación de diseños comúnmente utilizados en sistemas de bombeo de agua conectados a la red eléctrica.

I. Diseños típicos.

En este capítulo se da un abordaje general a algunos diseños típicos de instalaciones de bombas para agua alimentadas directamente de la red eléctrica de una distribuidora local, o por un grupo autógeno (motor de combustión interna y generador).

Al referirse a un sistema de bombeo de agua, este puede ser realizado de diferentes maneras. Además, existen diferentes formas de clasificar los sistemas de bombeo.

Dado que este estudio no se centró sobre tipos o clasificaciones de sistemas de bombeo, sino que solamente se hará un abordaje general a fin de contextualizar sobre los equipos a los que nos referimos, utilizaremos una clasificación basada en la ubicación de la bomba y el motor eléctrico.

En función de lo anterior, clasificaremos los sistemas de bombeo dependiendo de la ubicación de la bomba y motor², de la siguiente manera:

- a) **Sistemas sumergibles**, son aquellos donde tanto bomba como motor están sumergidos en el líquido a bombear.
- b) **Sistemas como las bombas de hélice, también de llamadas bombas de flujo axial, de turbina o de eje vertical**, donde el motor se encuentra fuera del líquido impulsado y la parte mecánica que impulsa el líquido (que puede ser una bomba axial, una turbina o una hélice) está inmersa en el líquido a impulsar hacia la superficie.
- c) **Sistemas de superficie**, cuando tanto bomba como motor están fuera del líquido.

² Clasificación simple para fines ilustrativos, elaborada en base a (Sherer, 2021) y (IrrigationTutorials.com, 2021)

En la figura 1 se presenta una ilustración de una aplicación típica usando una bomba sumergible. En las bombas sumergibles, el motor eléctrico y la bomba para agua se ubican en inmersos en el agua que se bombea, y por lo tanto un cable eléctrico sumergible es usado para llevar la electricidad hasta el motor, además una tubería se utiliza para conducir el agua bombeada desde el fondo hasta la superficie.

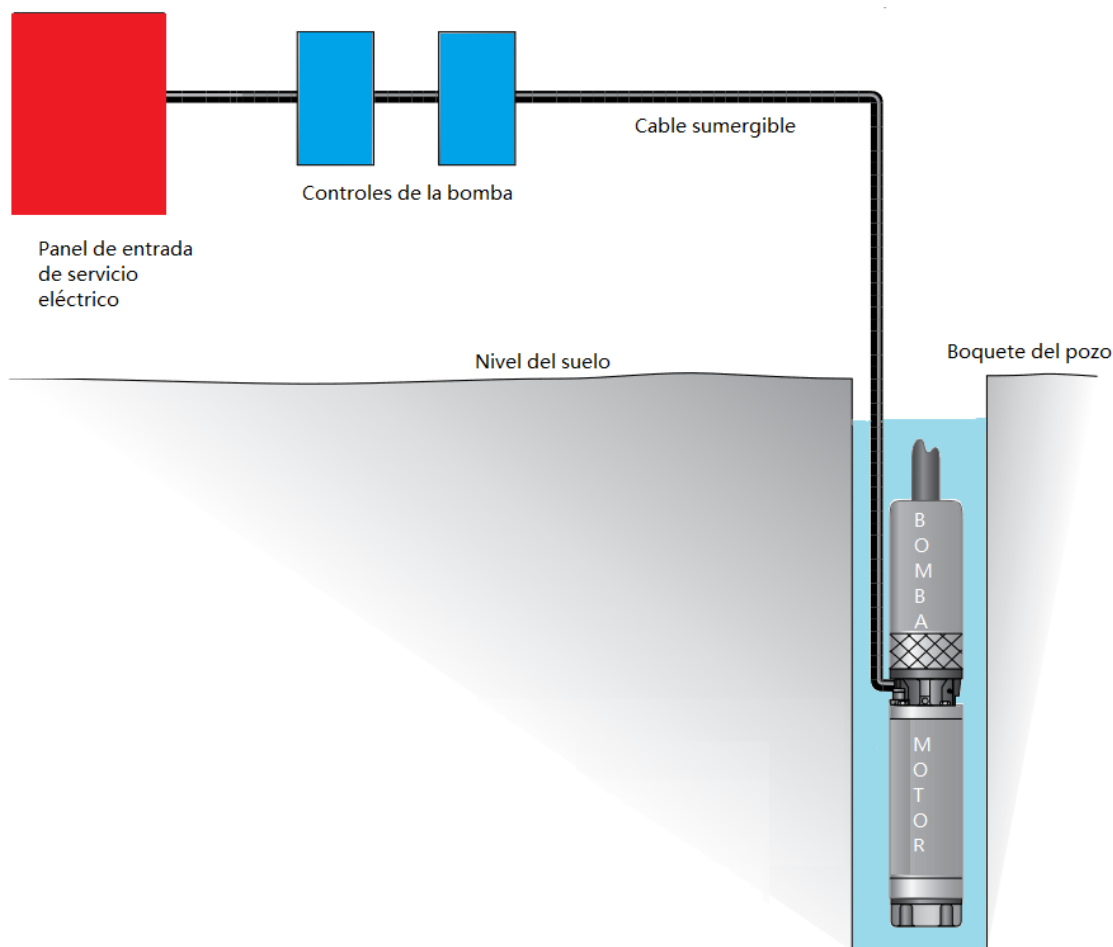


Figura 1. Esquema ilustrativo de la instalación de una bomba sumergible³.

³ Elaborado en base a (Franklin-Electric, 2015) página 12.

En las bombas verticales, el motor eléctrico se instala sobre la superficie, directamente encima del pozo. Luego, un eje vertical transmite el par o rotación desde el motor eléctrico hasta una bomba (por lo general de múltiples etapas) instalada cerca del fondo del pozo, la cual impulsa el agua hacia la superficie.

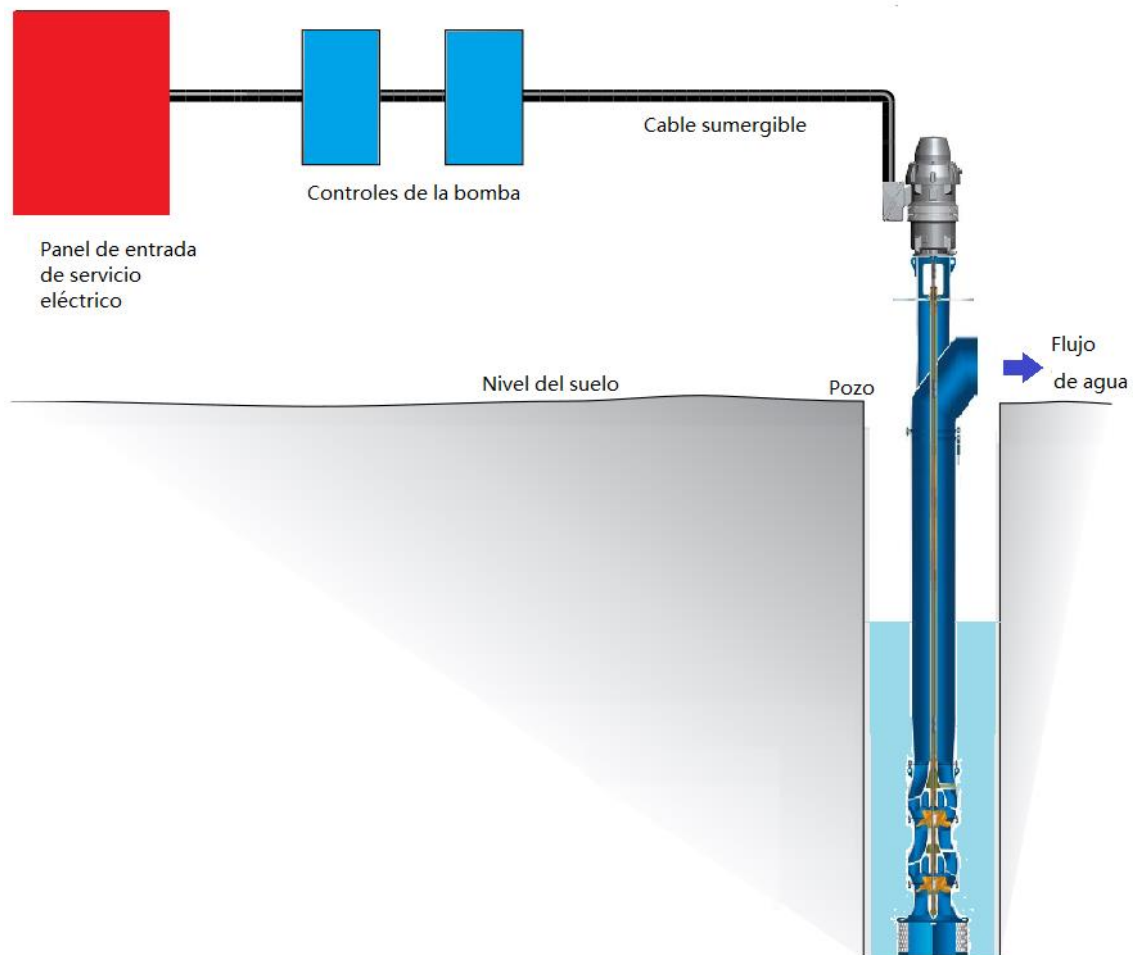


Figura 2. Esquema ilustrativo de la instalación de una bomba de tipo turbina vertical⁴.

⁴ Elaborado en base a (Franklin-Electric, 2021), página 6.

Existen algunas aplicaciones prácticas en las cuales los cuerpos de agua o tanques de agua se encuentra ya sea a nivel de superficie o a poca profundidad (por lo general menos de ocho metros, aunque puede llegar a 50 metros). En esos casos, se pueden utilizar sistemas de bombeo instalados a nivel de superficie, donde tanto la bomba como el motor están fuera del cuerpo de agua.

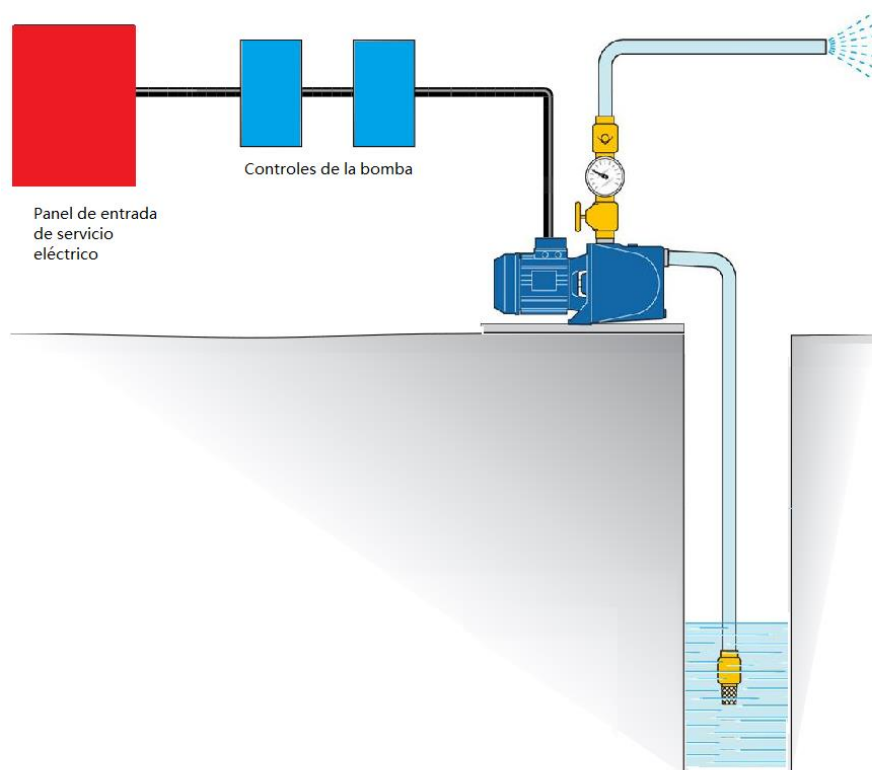


Figura 3. Esquema ilustrativo de la instalación de una bomba de superficie, en este caso tipo centrífuga⁵.

En los diferentes sistemas de bombeo presentados anteriormente, se puede observar que los paneles eléctricos de control y alimentación del motor eléctrico acoplado a la bomba cumplirán las siguientes funciones⁶:

- i. Arranque y apagado de motor.
- ii. Operación y control del motor en condiciones normales.
- iii. Protección de motor en condiciones anormales.

⁵ Elaborado en base a (VALCO, 2015)

⁶ Tomado de (Guyer, 2012)

Se entenderá por “condiciones normales de operación”, aquella operación del sistema de bombeo, con las variables dentro de valores aceptables de operatividad segura del sistema, ya sean estas variables de tipo eléctrico (ej. Corriente, voltaje, frecuencia), mecánico (ej. velocidad de giro, presión del agua) o hidráulicas (ej. Nivel de agua).

En la Figura 4 se observa un esquema general de la interconexión de un motor para bombeo a la red eléctrica. Notar que normalmente los motores para bombeo se encuentran acoplados mecánicamente a las bombas para agua, mediante una relación de 1:1. La velocidad de rotación en la práctica depende del número de polos del motor.

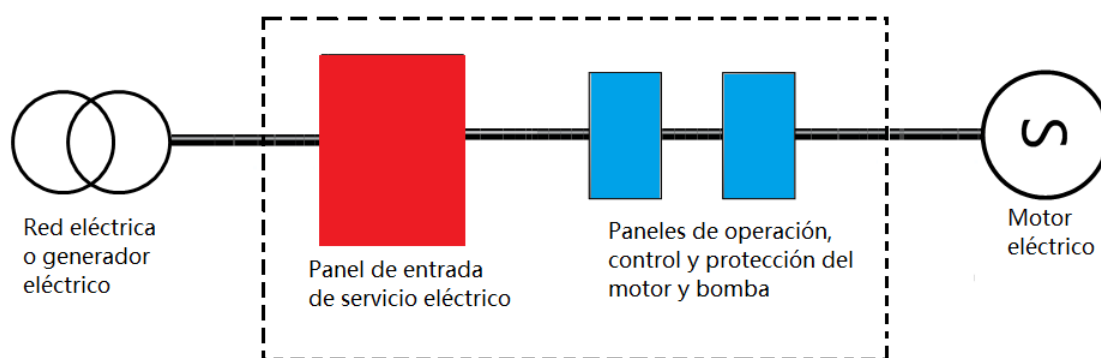


Figura 4. Esquema eléctrico básico de bloques, de los elementos principales en la alimentación eléctrica de un motor de un sistema de bombeo.

Los paneles eléctricos que se muestran en la Figura 4 pueden reemplazarse en la práctica por los siguientes tipos específicos de equipos⁷:

- a) Sistema de arranque directo con contactores.
- b) Arrancador suave electrónico.
- c) Variador de frecuencia.
- d) Otros sistemas de arranque, control, operación, control y protección⁸.

En este capítulo, se explorarán brevemente los sistemas de los literales a, b y c anteriores, a fin de analizar sus características generales, componentes típicos, y también se compararán a nivel de costos para un mismo tamaño de equipo de bombeo.

Con respecto al motor eléctrico, en sistemas de bombeo convencionales conectados a la red eléctrica o alimentados mediante un generador eléctrico rotativo, dicho motor puede ser

⁷ Se ha tomado como referencia la clasificación básica dada en Allen-Bradley. (2014).

⁸ Se deben tomar en cuenta las características de cada instalación eléctrica y el estado de cada componente, al tratarse de sitios de bombeo existentes, tal como la condición de la subestación eléctrica, acometida eléctrica, **red de tierra**, tablero principal, estado de la calidad de energía.

monofásico o trifásico. En el capítulo 2 de este trabajo de graduación se explicará por qué la tecnología actual favorece el uso de motores trifásicos en sistemas que dependen de energía solar fotovoltaica.

II. Identificación de protecciones implementadas en sistemas de bombeo.

A fin de sistematizar o resumir los componentes principales comunes a los diferentes diseños, el primer reto resulta de identificar que la cantidad de protecciones que se implementan varían según el propietario de la instalación, según el tamaño de la instalación (potencia de la bomba) y según el tipo de sistema de arranque.

En la búsqueda bibliográfica se encontraron las diferentes categorías de regulaciones de diseño de instalaciones eléctricas para interconexión de estaciones de bombeo:

1. En el mundo, existen diferentes niveles y detalles de regulaciones de la gestión del agua. Existen algunas regulaciones emitidas por entidades de gobierno municipal, regional, provincial, estatal, nacional⁹. Para esta tesis, se efectuó una búsqueda de normativas que contaran con suficientes detalles sobre cómo deben realizarse las instalaciones de motores eléctricos acoplados a bombas de agua, lo cual se tomó en cuenta para valorar si las protecciones usadas comúnmente en El Salvador son suficientes y acordes a prácticas aceptadas en otros países.
2. La Asociación Nacional de Protección contra Incendios (NFPA, por sus siglas en inglés), posee normativas con alcance limitado a sistemas de bombeo de agua contra incendio¹⁰.
3. La Asociación Estadounidense de Obras de Aguas (*American Water Works Association, AWWA*) es una organización internacional, dedica a la investigación científica y educación alrededor de la gestión del agua. La AWWA elabora algunas normas aplicables a sistemas de bombeo, incluyendo la instalación mecánica y eléctrica de algunos tipos de bombas¹¹.
4. El Instituto Hidráulico de Estados Unidos de América¹², es una organización que aglutina a fabricantes de bombas y de sistemas hidráulicos de América del Norte, que elabora y emite normas de diseño y construcción asociados con sistemas de bombeo, incluyendo bombas para agua accionadas eléctricamente.
5. En El Salvador, la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados, ANDA, es a la vez *entidad administradora y principal empresa pública proveedora*

⁹ Como (Frederick County, 2017), (Watercare, 2020), (City of Wanneroo, 2020) , (Seattle Public Utilities, 2020)

¹⁰ Tomado de (NFPA, 2018)

¹¹ En base a (AWWA, 1988) (AWWA, 2016) (AWWA, 2017)

¹² Tomado de (Hydraulic Institute, 2021)

de agua potable de El Salvador, y esta institución ha emitido una serie de especificaciones técnicas generales para el diseño de sistemas de bombeo de agua¹³.

La especificación de ANDA¹⁴ detalla protecciones que se deben implementar en caso de instalación de motores eléctricos trifásicos sumergibles contra las condiciones de fallas más comunes¹⁵ como las siguientes:

- Baja carga / Sobre carga.
- Bajo Voltaje/Alto Voltaje.
- Desbalance de corriente.
- Inversión de fases.
- Arranque frecuente o repetido (fuera de lo normal).

Para el caso de ANDA¹⁶, las siguientes protecciones deben implementarse en proyectos de bombeo de agua:

- Sobretensión.
- Cortocircuito.
- Sobrecarga de corriente.
- Monitor de voltaje, para protección contra bajo y alto voltaje, pérdida de fase, inversión de giro, desbalance de voltaje.
- Protección por falla a tierra mediante transformador diferencial.

Notar que, en el caso de ANDA, no se indica qué protecciones tienen que usarse en función de la potencia de bomba. Esto podría interpretarse como que la especificación disponible puede usarse en bombas de cualquier tamaño. Lo que suele suceder en la práctica, en sistemas *que no son de ANDA*, es que, a menor tamaño de la bomba, se usan equipos de protección más sencillos y económicos.

Para el caso de ANDA, a ser una empresa pública, por lo general construye, mantiene y opera estaciones de bombeo de gran capacidad (más de 100 hp), donde puede haber sentido económico en implementar todas esas protecciones, ya que bombas de ese tamaño suelen tener un gran costo económico, y por tanto se puede justificar una mayor inversión en protecciones.

¹³ Basado en (ANDA, Consultado en 2021)

¹⁴ Basado en (ANDA, Consultado en 2021)

¹⁵ Ver Anexo II de este documento, “Especificación técnica de ANDA”, para más detalles.

¹⁶ Ver Anexos II de este documento, “Especificación técnica de ANDA”, para más detalles.

III. Tipos comunes de sistemas de arranque.

Para fines de este trabajo de investigación, se presentan a continuación los tipos de sistemas de arranque¹⁷ típicamente usados para energizar motores eléctricos acoplados a bombas para agua.

1. Arranque directo mediante contactores.
2. Arranque electrónico mediante arrancador suave.
3. Arranque electrónico mediante variador de frecuencia (VFD).

Esquemas básicos de los diseños anteriores se muestran en la Figura 5, Figura 6 y Figura 7.

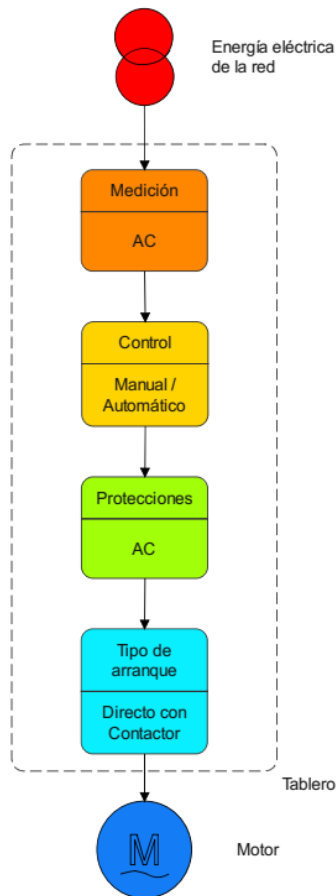


Figura 5. Esquema de un sistema de arranque directo mediante contactor(es)¹⁸.

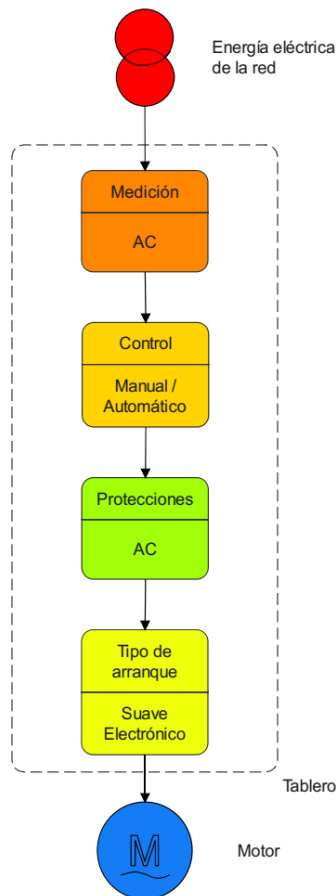


Figura 6. Esquema de un sistema de arranque electrónico mediante arrancador suave¹⁹.

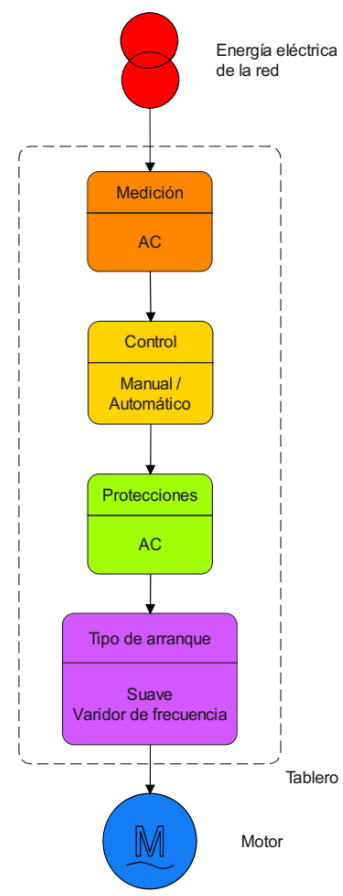


Figura 7. Esquema de un sistema de arranque electrónico mediante variador de frecuencia²⁰.

¹⁷ Clasificación tomada de (Allen-Bradley, 2014) y de (c3controls.com, 2021)

¹⁸ Basado Franklin Electric. (2019)

¹⁹ SOLCON. (2018)

²⁰ Basado en (INVERTEK, 2019) y en (Franklin-Electric, 2014), también llamado VFD según Anexo I.

Luego de presentados los diferentes tipos de sistemas de arranque y operación de las bombas (sistema usado para la alimentación eléctrica del motor de la bomba), para este trabajo de investigación, se plantea en el siguiente apartado un ejercicio de análisis económico de los diferentes diseños de sistemas de arranque de sistemas de bombeo, usando datos de cotizaciones realizadas en El Salvador por el equipo de trabajo de esta tesis.

Adicionalmente, se hace en este estudio una revisión de otros trabajos de investigación enfocados especialmente en el tema de costeo de sistemas de arranque de motores.

IV. Costeo por bloques o componentes principales.

Costear un sistema de bombeo tiene los siguientes inconvenientes:

1. Los sistemas de bombeo pueden ser muy variados y diversos en sus características, dependiendo de la aplicación del agua, o incluso dependiendo de las marcas comerciales usadas, así será de variable el costo los equipos de bombeo usados, generando diferencias en orden de magnitud de 1 a 10 para una capacidad²¹, por tanto, es difícil y además se pierde información al seleccionar un monto específico para una potencia dada de bombeo.
2. Los accesorios, sensores, equipos de interconexión y protección serán muy variables según el *criterio del diseñador y las exigencias del usuario final*, especialmente variando con la aplicación específica (irrigación, abastecimiento de tanques, distribución comunitaria, etcétera) y con el tamaño de la bomba²², lo que produce una enorme cantidad de posibilidades de que puede incluir un sistema de bombeo.
3. Para una misma potencia de motor, un sistema conectado a red, uno aislado y uno híbrido tienen algunos elementos comunes, tales como el equipo de bombeo (motor y bomba), cable de alimentación, sensores de parte hidráulica, elementos hidráulicos (por ejemplo, tubería, válvulas, indicadores de presión, tanques de captación)²³. Por lo anterior, se consideran en la evaluación económica solamente los tableros eléctricos necesarios para constituir cada tipo de sistema de alimentación.

Los puntos 1, 2 y 3 anteriores crean un *espectro de aplicaciones* sumamente amplio, que vuelve una tarea sumamente compleja definir y cotizar cada una de las variantes posibles.

Dicho lo anterior, y con la finalidad de presentar una estructura de costos segregada de un sistema para arranque de motor que sea susceptible de ser analizada, se tomó como referencia un sistema de bombeo de agua de pozos profundos como los comúnmente usados en

²¹ Estimación propia en base cotizaciones en el mercado de El Salvador y en base a (Allen-Bradley, 2014)

²² Observación propia del equipo de trabajo de esta tesis, luego de estudiar la diversidad en que pueden presentarles los sistemas de bombeo.

²³ Observación propia del equipo de trabajo de esta tesis, luego de estudiar la diversidad en que pueden presentarles los sistemas de bombeo.

comunidades rurales. Para el caso, en este capítulo se usará con fines referenciales²⁴ un sistema de bombeo de 7.5 hp²⁵, y en base a eso se hacen las descripciones de materiales y costos que se presentan a continuación.

Tabla 1. Elementos de diferentes tipos de arrancadores.
Elaboración propia con base a bibliografía²⁶.

Equipo o material	Contactor	Arrancador Suave	Variador de frecuencia
Protecciones generales			
Interruptor termomagnético	x		
Porta fusible		x	x
Fusibles		x	x
Relé bimetálico	x		
Guardamotor		x	
Monitor de nivel de agua	x	x	x
Monitor de voltaje	x	x	x
Tipo de arranque o control			
Contactor	x		x
Arrancador suave		x	
Variador de frecuencia			x
Accesorios			
Gabinete	x	x	x
Termostato			x
Ventiladores			x
Rejilla plástica	x	x	
Pilotos	x	x	x
Manetas	x	x	x
Interruptor termomagnético	x	x	x
Canaleta ranurada	x	x	x
terminales, etiquetado, otros	x	x	x
Conductores			
THHN	x	x	x
TFFN	x	x	x

²⁴ Para el caso de este estudio, se tomó la decisión de limitarlo a sistemas de bombeo comunes, a fin de incrementar el rango de aplicación de los resultados. Además, se seleccionó una muestra de capacidad de 7.5 hp, para fines de hacer un costo real de las partes disponibles en El Salvador, ya que se cuenta con la posibilidad de realizar pruebas empíricas de operación de una bomba de esta capacidad, lo cual permitirá, además del abordaje teórico o analítico, tener datos reales.

²⁵ En capítulos posteriores se explicará por qué esta capacidad específica resulta muy conveniente para hacer un estudio preliminar comparativo.

²⁶ Se ha tomado de referencia IBEE. (2015)

Tabla 2. Tabla de costos unitarios²⁷ para un equipo de bombeo de 7.5 hp.
Elaboración propia con precios cotizados en El Salvador en mayo, 2021²⁸.

#	Descripción de componente	Contactor	Arrancador suave	Variador de frecuencia
1	Protecciones generales	\$214.34	\$246.34	\$379.56
2	Tipo de arranque o control	\$40.00	\$637.47	\$875.00
3	Accesorios	\$353.05	\$353.05	\$572.98
4	Conductores	\$10.92	\$7.68	\$7.68
	Costo total	\$618.31	\$1,244.54	\$1,835.22

Los siguientes componentes **no varían su precio** independientemente del tipo de sistema de alimentación²⁹, ya que se pueden usar los mismos equipos independientemente del sistema de arranque:

- Subestación eléctrica de alimentación.
- Cable de acometida de baja tensión.
- Interruptor principal de baja tensión.
- Cable superficial o sumergible a hasta equipo de bombeo (motor).
- Equipo de bombeo (bomba y motor eléctrico, mecánicamente acoplados).
- Sensores e interruptores de nivel de agua y otros sensores acoplados al sistema de bombeo.
- Red de tierra o polarización

La razón por lo cual estos precios no varían, es porque en determinados rangos de potencia y tipos de aplicación, pueden usarse los tres tipos de diseños, con algunas excepciones relativas las condiciones específicas del tipo de aplicación³⁰.

Otra razón para no incluir el sistema de bombeo es que este realmente tiene un amplio rango de variación en su costo, según el tipo de bomba que se utilice. Algunos estudios se centran solamente en medir la variación del sistema de arranque, protección y operación en función del tamaño en caballos de fuerza del sistema de bombeo³¹.

²⁷ Elaboración propia en base a cotizaciones efectuadas en primer semestre de 2022.

²⁸ Para más detalles, ver Anexo III, con costeo de cada sistema de arranque directo a la fecha de este estudio.

²⁹ Observación propia al comparar los diferentes esquemas de la Figura 5, Figura 6, Figura 7 y sus materiales de instalación, como se indica en la Tabla 1.

³⁰ Esto también se muestra en (Allen-Bradley, 2014) e (IBEE, 2015)

³¹ Un estudio como ese se presenta en Allen-Bradley. (2014).

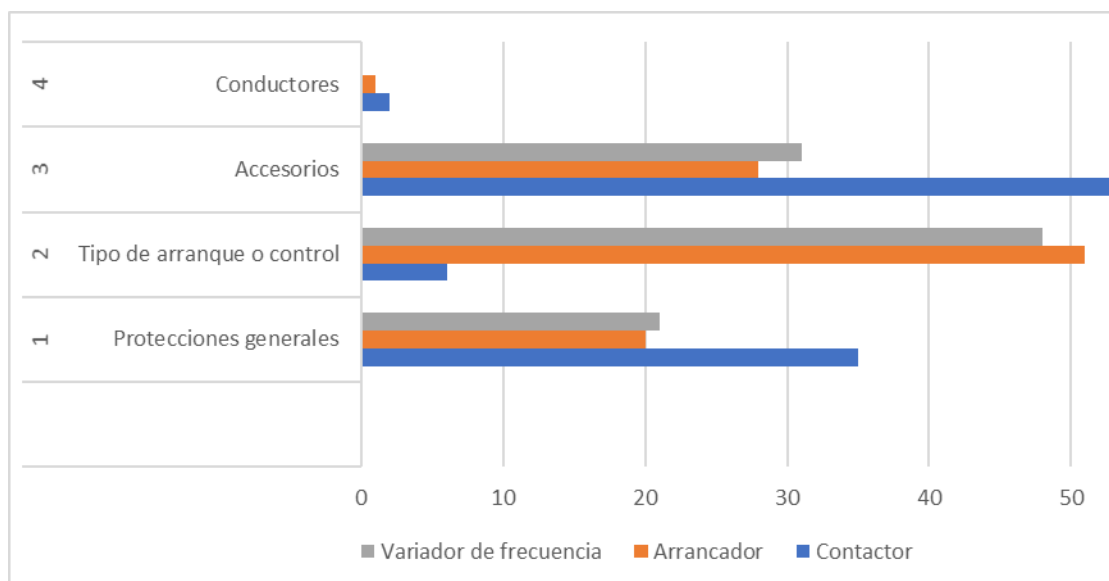


Figura 8. Distribución de costos porcentuales de cada tipo de diseño típico.³²

En la Figura 8 se puede observar que el medio o sistema de arranque es el que representa el mayor costo en cualquiera de los casos que incluyen electrónica de potencia (arrancador suave y variador de frecuencia), mientras que el caso con contactor es el más económico. Para el caso de la instalación con contactor, la mayor parte de los costos está en los accesorios y las protecciones.

Con los datos de la Tabla 2, en el siguiente apartado se muestra el impacto porcentual de cada grupo de componentes, en la estructura de costos presentada para las diferentes partes de un sistema de arranque.

V. Estructura de costos de sistemas de bombeo conectados a la red.

Del apartado anterior, y con datos producto de la elaboración propia de un pequeño estudio de mercado en que se han cotizado los diferentes accesorios, se ha llegado a la siguiente estructura de costos para una estación de bombeo de 7.5 hp.

Tabla 3. Porcentajes de costos de cada componente, estación de bombeo de 7.5 hp.

#	Descripción de componente	Contactor	Arrancador suave	Variador de frecuencia
1	Protecciones generales	35%	20%	20.6%
2	Tipo de arranque o control	6%	51%	48%
3	Accesorios	57%	28%	31%
4	Conductores	1.8%	0.6%	0.4%
	Costo total	100%	100%	100%

³² Elaboración propia en base a cotizaciones efectuadas en primer semestre de 2022.

Un estudio más amplio fue realizado por el fabricante Allen-Bradley en 2014³³, comparando sistemas de arranque y protección según diseños IEC y NEMA. Los resultados mostraron que, a menor amperaje, el variador y el arrancador suave tienen costos similares, pero a medida que aumentan el amperaje y la potencia, también lo hace el costo del variador.

La Figura 9 y Figura 10 muestran las comparaciones de costos iniciales de un arrancador IEC y NEMA con un arrancador suave y variador de frecuencia.

Tomar en cuenta lo siguiente:

- SMC: un arrancador suave.
- Drive: arranque suave mediante variador de frecuencia o VFD.
- IEC DOL: Arranque directo mediante contactores, con diseño según estándar IEC.
- NEMA DOL: Arranque directo mediante contactores, con diseño según estándar NEMA.

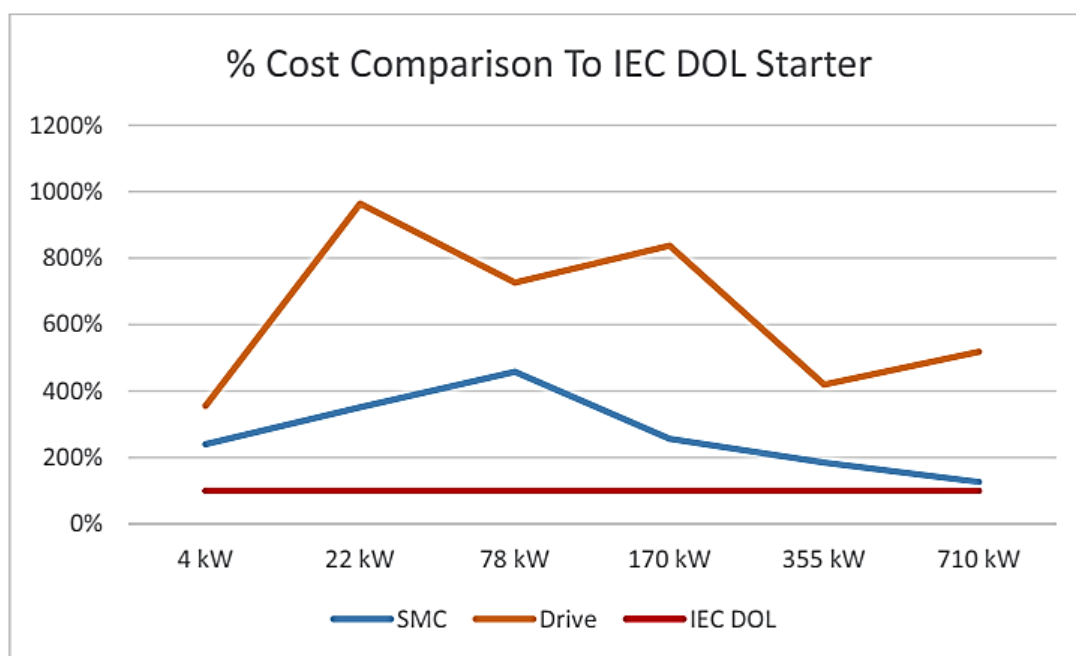


Figura 9. Variación de costos en función de potencia de sistema de bombeo³⁴.

³³ Esto se muestra en (Allen-Bradley, 2014)

³⁴ Tomado de Allen-Bradley. (2014), página 15.

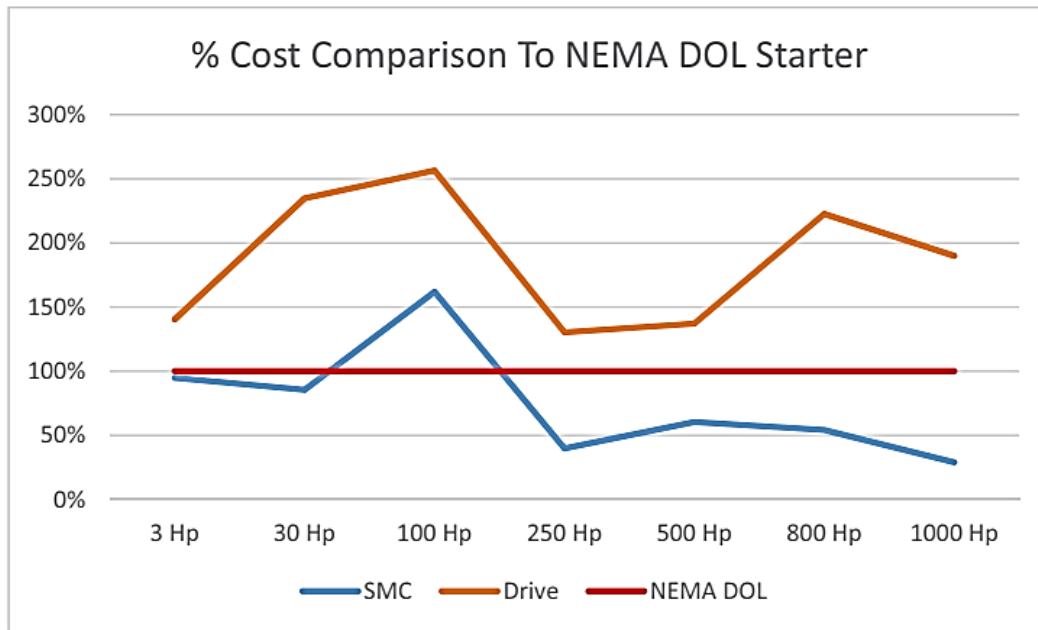


Figura 10. Variación de costos en función de potencia de sistema de bombeo³⁵.

Como se puede ver en las Figura 9 y Figura 10, para diseños tipo IEC, el arranque directo resulta más económico. En el caso del diseño NEMA, el autor de (Allen-Bradley, 2014) afirma que un arrancador suave puede resultar más económico para potencias arriba de 150 hp. Ahora bien, en todos los casos, el variador de frecuencia puede ser 1.5 y 10 veces más costoso que un arranque directo, según el diseño que se elija para su instalación.

VI. Diferencias cualitativas entre los diferentes sistemas de arranque.

Además de las diferencias económicas (costo inicial, de mantenimiento y operación), existen algunas diferencias técnicas cualitativas entre cada sistema de arranque, las cuales determinan que algunos sistemas de arranque, operación y protección sean más convenientes en algunas aplicaciones que en otra.

Entre las aplicaciones en las cuales es recomienda el uso de **arrancadores suaves** son aquellas que requieren las siguientes funcionalidades³⁶:

- Aplicaciones con par de arranque bajo o medio.
- Aplicaciones con poca carga.
- Poco o ningún control de velocidad durante el modo de ejecución.
- Reducir el desgaste mecánico y los daños al sistema.
- Control de la irrupción.

³⁵ Tomado de Allen-Bradley. (2014), página 15.

³⁶ Según recomendaciones de Allen-Bradley. (2014).

- Monitoreo de energía.

Mientras tanto, las aplicaciones en las cuales resulta mejor un **variador de frecuencia** típicamente incluyen entre sus requisitos las siguientes características³⁷:

- Aplicaciones monofásicas en ciertos variadores
- Control de velocidad y eficiencias del sistema que operan a velocidades reducidas durante el modo de ejecución.
- Aplicaciones con alto par de arranque.
- Retroalimentación continua para el control de la posición crítica.
- Sosteniendo el rotor a velocidad cero.
- Reducir el desgaste mecánico y los daños al sistema.

Tabla 4. Selección de sistema de arranque según aplicación³⁸.

Aplicación	Arrancador a Tensión Plena (ATP)	Arrancador suave	Variador de frecuencia
Bombeo normal con motor monofásico.	Sí	No	No
Bombeo normal con motores trifásicos menores a 10 HP a 440 Vca o 7.5 HP a 220 Vca.	Sí	Sí	No ³⁹
Bombeo normal con motores trifásicos mayores a 10 HP a 440 Vca o 7.5 HP a 220 Vca.	No	Sí	No ⁴⁰
Bombeo a presión constante en redes de agua potable, riego por goteo o aspersión (no incluye motores monofásicos).	No	No	Sí
Bombeo de pozos que se abaten o en el aforo de pozos nuevos (adaptación de la bomba a la capacidad de aporte del pozo modo de flujo constante).	No	No	Sí

³⁷ Según recomendaciones de Allen-Bradley. (2014).

³⁸ Basado en IBEE. (2015).

³⁹ Esta afirmación es a la fecha del estudio citado, no obstante, los avances tecnológicos y ampliación del portafolio de los fabricantes pueden permitir implementar estas capacidades también con variadores de frecuencia.

⁴⁰ Esta afirmación es a la fecha del estudio citado, no obstante, los avances tecnológicos y ampliación del portafolio de los fabricantes pueden permitir implementar estas capacidades también con variadores de frecuencia.

VII. Observaciones del capítulo.

A partir de los datos anteriores, en los sistemas de bombeo muestreados a nivel de costos, se pueden hacer las siguientes observaciones:

1. Las estructuras de costos de la instalación con variador de frecuencia es el tipo de sistema de arranque de mayor costo de los tres analizados.
2. El sistema de arranque representa la mayor parte del costo cuando se trata de sistemas de arranque con variador de frecuencia y arrancador suave.
3. El arranque con variador de frecuencia puede costar varias veces más que un sistema arranque directo, para todas las potencias evaluadas, incluso de varios cientos de caballos de potencia, mientras que un sistema de arrancador suave puede tener un precio intermedio o incluso costar menos que un sistema de arranque directo.

Capítulo 2. Diseño de un sistema fotovoltaico aislado para alimentar un sistema de bombeo de agua.

En este capítulo se realizará el diseño de un generador solar fotovoltaico, destinado para alimentar una estación de bombeo de agua.

I. Diseños típicos.

La forma general de una estación de bombeo alimentada por un generador fotovoltaico incorpora componentes de más (protecciones DC) y otros de menos (protecciones AC), comparado con una estación de bombeo alimentada por una red de distribución eléctrica.

En la Figura 11 se presenta un sistema de bombeo que utiliza solamente energía solar (que no está conectado a una distribuidora eléctrica, no usa baterías, ni usa moto-generador de diésel o gasolina) a través de un arreglo de paneles fotovoltaicos. Este tipo de instalación se conoce como ‘aislada’, ya que no posee una conexión a una red de distribución eléctrica local. Este tipo de estación se podrá operar cuando esté disponible la fuente de energía local en capacidad suficiente para permitir la operación correcta de la bomba.

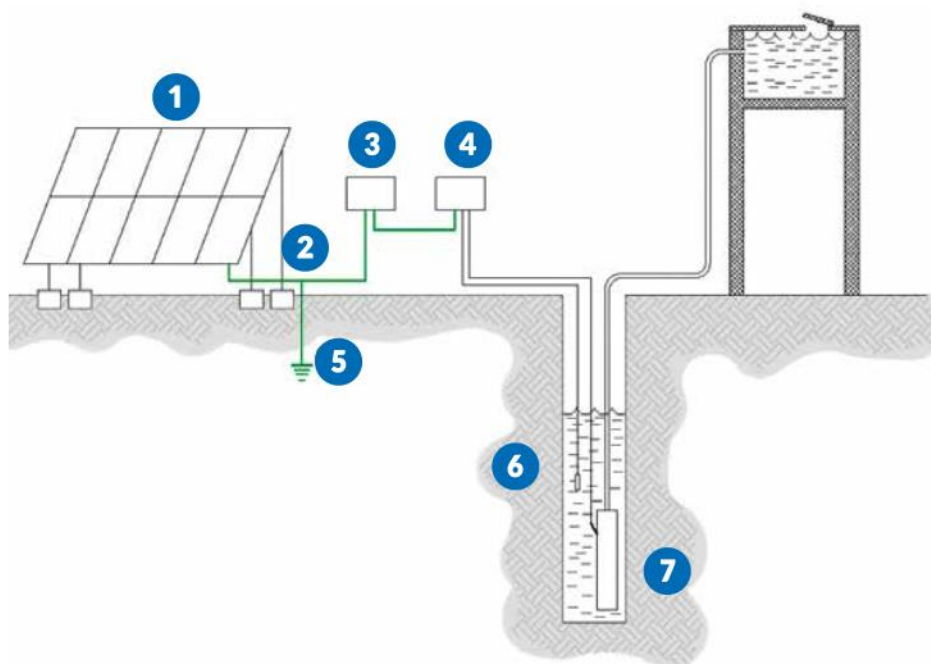


Figura 11. Esquema general de un sistema de bombeo aislado alimentado por energía solar⁴¹.

El diseño de la Figura 11 consta de los siguientes bloques funcionales:

1. Arreglo de paneles solares fotovoltaicos.
2. Cableado en DC.
3. Cajas de conexiones y protecciones en DC, así como mecanismos de apertura en DC.

⁴¹ Fuente: Imagen referencial tomada de (AAHI, 2020).

4. Equipo electrónico de potencia que transfiere potencia eléctrica a un motor eléctrico, que puede ser de dos tipos:
 - a. Convertidor DC/AC, tal como un variador de frecuencia o un inversor fotovoltaico.
 - b. Convertidor DC/DC, como un controlador electrónico para manejar un motor DC.
5. Puesta a tierra del sistema.
6. Fuente de agua con control de nivel.
7. Conjunto motor-bomba, en este caso sumergible.

Luego de extraer el agua, los sistemas alimentados por fuentes fotovoltaicas aisladas deben de verter el agua bombeada en un tanque de captación. Esto es así porque el sistema estará indisponible durante toda la noche, y también puede estar indisponible a lo largo del día, debido a insuficiente irradiancia solar. Cuando insuficiente irradiancia llega a los paneles solares, el voltaje DC de salida puede ser muy bajo para alimentar adecuadamente el convertidor electrónico o para hacer operar la bomba de agua.

El sistema aislado, según el tipo de controlador DC/AC o DC/DC, puede incrementar su tiempo de utilización agregando ya sea

- (a) baterías o
- (b) un generador accionado por motor de combustión interna (grupo autógeno, diésel o gasolina).

El uso de estas fuentes de respaldo, si bien es una alternativa que puede incrementar el alcance y aplicaciones de sistemas fotovoltaicos aislados, está fuera del alcance de este trabajo de investigación.

En cuanto al diseño general de estaciones de bombeo de agua, para propósitos de este documento, podemos clasificarlas en dos categorías generales:

Con motor DC: Estos son sistemas de bombeo con bomba para agua accionada por motor de corriente directa. El motor es manejado por un equipo de electrónica de potencia, el cual es alimentado por un arreglo de paneles fotovoltaicos. La instalación puede o no contar con baterías para garantizar la operación aun con baja irradiancia.

Con motor AC: Se trata de sistemas de bombeo con bomba para agua accionada por motor de corriente alterna. El motor puede ser alimentador por:

- *Inversor DC/AC:* En este caso, el motor puede ser monofásico o trifásico, y no se tiene capacidad de regulación de la frecuencia del lado de AC, por lo que tampoco se puede controlar la velocidad de rotación del motor alimentado. Este tipo de sistema solamente se puede operar cuando se tiene suficiente potencia disponible a la entrada.
- *Variador de frecuencia (VFD):* Este tipo de instalación permite implementar buena parte de las protecciones eléctricas en el lado de AC a través de la configuración del VFD. El VFD también permite regular la velocidad de rotación del motor, y con ello se consigue regular la velocidad de rotación de la bomba, lo cual facilita controlar ya

sea el caudal o la presión de trabajo. Así también, se puede reducir la potencia que la bomba demanda de la instalación.

Para este trabajo de graduación, se ha seleccionado específicamente un sistema de bombeo con variador de frecuencia, VFD. El VFD alimenta, controla y protege el motor.

II. Proceso de diseño de estación de bombeo alimentada por energía solar fotovoltaica.

Para el caso de aplicaciones autónomas o aisladas, alimentadas por generadores solares fotovoltaicos, el proceso de diseño suele ser más largo que diseñar solamente la estación de bombeo, sino que se debe diseñar también la fuente, es decir, el generador fotovoltaico.

En estas aplicaciones también se tiene capacidad de decidir sobre el tipo de motor, ya que pueden emplearse tanto motores de corriente alterna como motores de corriente directa.

Luego, se puede incorporar a la instalación una segunda fuente de energía alternativa, tal como un banco de baterías para almacenar carga y compensar o alimentar el sistema cuando no hay suficiente radiación solar, o bien agregar un grupo autógeno.

Dado que este proceso de diseño de una estación de bombeo de una estación de bombeo alimentada por un generador fotovoltaico aislado es bastante largo, se sale de los alcances de este trabajo proporcionarlo en detalle. El proceso en detalle usado se puede consultar en la bibliografía⁴². En este trabajo, se estarán mencionando los pasos más relevantes o críticos del proceso de diseño de este tipo de estaciones de bombeo, así como destacando algunas variantes de sus componentes principales, existentes en la actualidad.

En general, el proceso de diseño se puede resumir con el siguiente diagrama de bloques de la Figura 12.

En el proceso de diseño se hace siguiendo los pasos recomendados por Water Mission de UNICEF⁴³, estos pasos se pueden resumir en términos generales en los siguientes:

1. Establecimiento de criterios de diseño en función de características y disponibilidad del recurso hídrico, fuente de energía, destino del recurso hídrico y forma de utilización.
2. Selección de conjunto bomba-motor.
3. Dimensionamiento de arreglo fotovoltaico.

⁴² Ver document de UNICEF y Water Missions para más detalles. (Water-Missions, 2021)

⁴³ (Water-Missions, 2021)

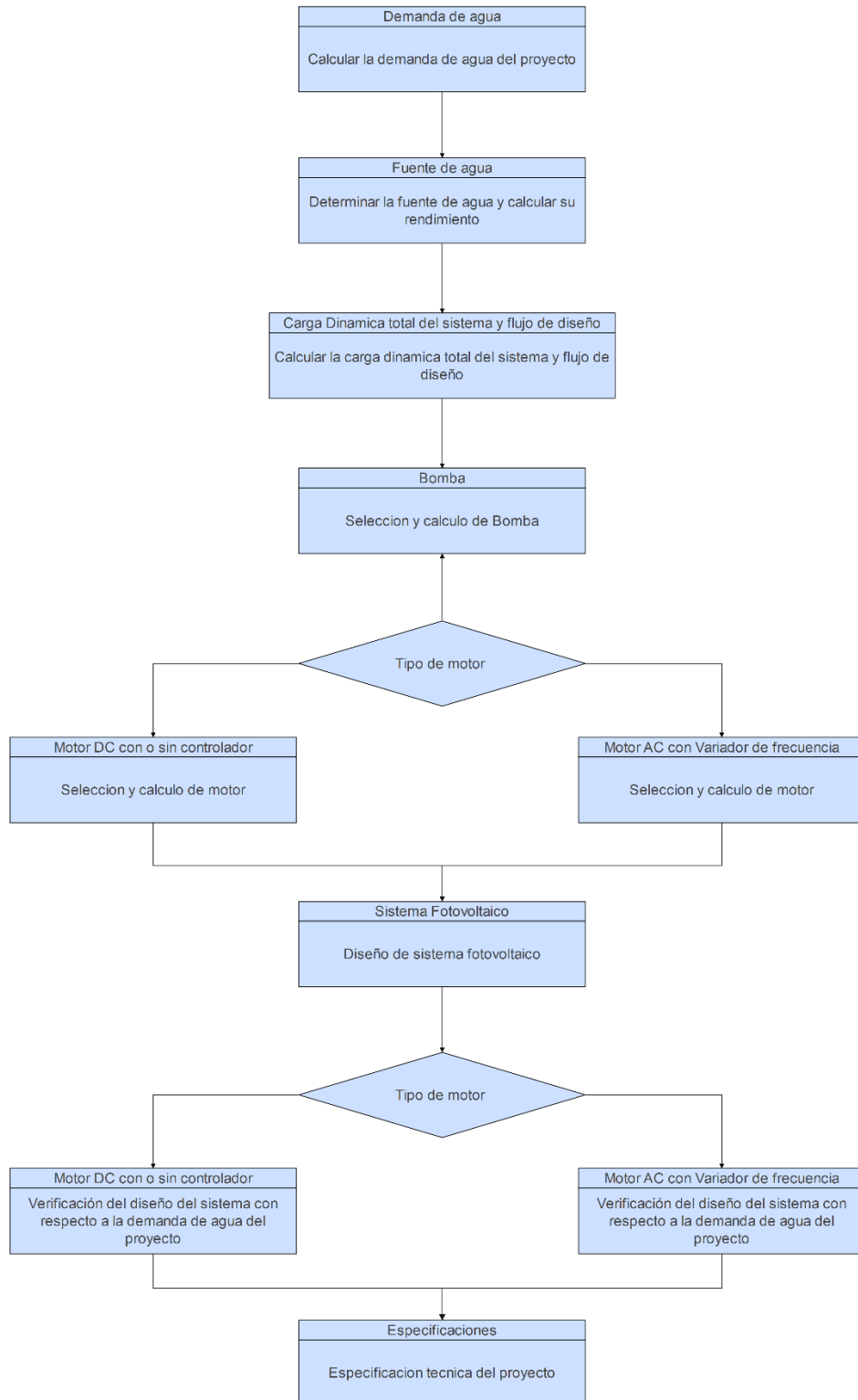


Figura 12. Proceso de diseño estación de bombeo con generador solar aislado.⁴⁴

⁴⁴ Basado en proceso detallado en (Water-Missions, 2021).

El proceso de la Figura 12 se puede explicar de la siguiente manera:

1. **Demanda de agua:** Se estima la demanda de agua diaria o mensual, según el tipo de aplicación, las horas de uso. La demanda de agua puede o no estar vinculada directamente con el bombeo, ya que la instalación puede contar con un tanque de almacenamiento.
2. **Fuente de agua:** Se estima la disponibilidad del recurso hídrico, la cantidad de metros cúbicos que se pueden extraer diariamente o en flujo continuo, sin agotar el recurso. Así también, se identifican las diferencias de altura entre la fuente de agua y el lugar donde el agua será vertida.
3. **Carga dinámica del sistema y flujo de diseño:** En esta parte, se estiman las cargas tanto mecánicas por caudal de agua como carga eléctrica producto de ese caudal. Se elige un valor de caudal viable para el sistema, pudiendo establecerse un flujo máximo y uno mínimo.
4. **Selección de motor y pre-cálculo de bomba para agua:** En este paso, se elige el tipo de bomba según la aplicación (sumergible, de superficie, eje vertical) y el caudal requerido, así como otros criterios tales como precio, disponibilidad de repuestos y facilidad de mantenimiento. Existen muchas formas de clasificar los tipos de bombas, pero en cuanto a los motores que estas pueden tener, la mejor clasificación para propósitos de esta tesis:
 - a. Motor de corriente alterna, o motor AC.
 - b. Motor de corriente directa, o motor DC.

Al seleccionarse el tipo de motor, se está definiendo el tipo de instalación interna (DC o AC), lo cual determinará otros equipos a utilizar.

En este paso se elige una o varias bombas posibles (compatible con el motor seleccionado), no necesariamente se toma una decisión definitiva en ese tema.

5. **Diseño del sistema fotovoltaico:** Se selecciona el tipo de generador fotovoltaico a utilizar, se eligen los paneles, la forma de instalación (con o sin seguidor solar), alineamiento, inclinación, así como potencia y voltajes de salida. Luego se diseña el cableado en DC y el esquema de protecciones necesarias. Normalmente el arreglo fotovoltaico deberá sobredimensionarse con respecto a la potencia total en controladores electrónicos o equipos de bombeo instalados. El diseño de este sistema tendrá un alto impacto en el costo total de la estación de bombeo.
6. **Verificación de funcionalidad del motor, controlador y generador fotovoltaico:** Se verifican las curvas de rendimiento de la bomba a diferentes frecuencias de operación, a fin de obtener un ciclo de trabajo de bombeo de agua compatible con la aplicación del proyecto. Se hacen verificaciones de potencias y caudales a diferentes niveles de irradiancia, y se toma una decisión final sobre la bomba a utilizar,

compatible con tamaño y tipo de instalación (AC o DC), según sus curvas de trabajo.

7. **Especificaciones:** Se genera un listado de características específicas de los equipos, materiales, instrumentos de monitoreo, planos y esquema de instalación, con los valores de diseño y detalles técnicos de la instalación.

La memoria de cálculo para el dimensionamiento de un sistema de bombeo de 30 hp, aislado, puede encontrarse en el Anexo IX.

En los sistemas conectados a la red se cuenta con la energía disponible en la red eléctrica más cercana, la cual por lo general dependerá de una fuente de potencia rígida, por lo cual la potencia a entregar a la bomba puede estar limitada solamente por la subestación local; es decir que, en todos los casos, mientras esté disponible la energía eléctrica en el lugar y exista el recurso hídrico, la bomba podrá trabajar a plena capacidad.

En el caso de estaciones de bombeo con generador fotovoltaico (GFV) se cuenta con una ***fuerza de energía que es variable***, así como es variable la irradiancia solar en el lugar. Al depender el bombeo completamente de una variable estocástica como la irradiancia, *la potencia disponible es poco predecible, no es programable o despachable*. Adicionalmente, desde un punto de vista solamente técnico, el tamaño o capacidad del GFV dependerá de la potencia de la bomba, de la irradiancia en el lugar de instalación a lo largo del año, y de la aplicación del agua⁴⁵.

III. Selección de tipo de motor y de convertidor.

Como se mencionó anteriormente, en la actualidad existen dos tipos generales de tecnologías disponibles destacables para aplicaciones de bombeo: con motor de corriente alterna (AC) y corriente directa (DC)⁴⁶.

Algunos diseños de instalaciones de un motor DC, usados para el arranque y protección de sistemas de bombeo aislados, se muestran en la Figura 13 y la Figura 14. Mientras tanto, el diseño básico del tablero de arranque y protección de un sistema aislado que usa un motor AC se presenta en la Figura 15.

⁴⁵ Para más detalles, ver sección 4, “Diseño de sistema FV”, en (Water-Missions, 2021).

⁴⁶ (Ohio-Electric-Motors, 2021)

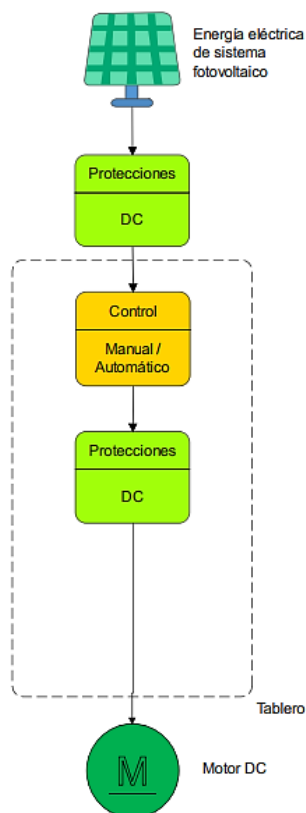


Figura 13. Diseño de sistema de bombeo con motor DC sin controlador independiente de carga.⁴⁷

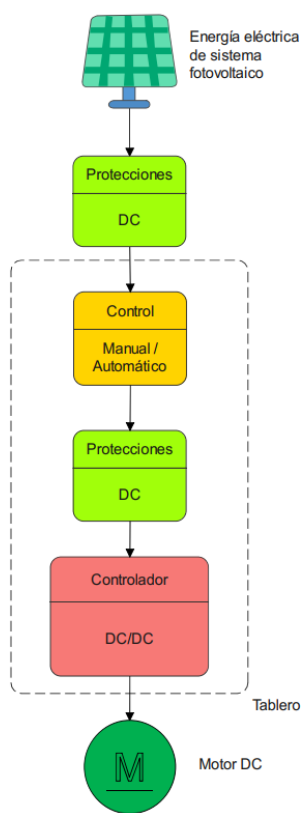


Figura 14. Diseño de sistema de bombeo con motor DC con controlador independiente de carga⁴⁵.

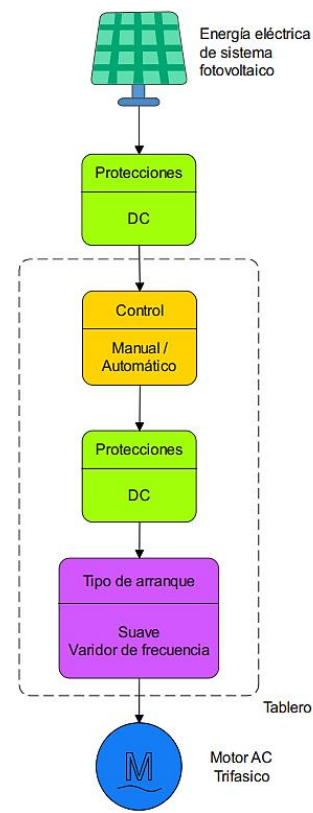


Figura 15. Diseño de sistema de bombeo con motor trifásico AC⁴⁸.

La selección del tipo de motor condiciona el resto de los componentes de la instalación, y producirá diferentes diseños. Para el caso de los sistemas con motores DC, estos pueden requerir un controlador de carga, externo e independiente, ya que en algunos momentos la potencia disponible de manera instantánea es insuficiente para alimentar el motor, esto origina dos categorías de sistemas puramente DC, uno con controlador independiente y la otra en el que el controlador va incorporado en el motor DC.

Esto se ilustra de manera general en la Figura 13 y Figura 14.

En la Figura 13 se muestra un diagrama de bloques de los principales grupos de componentes necesarios en un sistema de bombeo de agua, en el que se usa un motor DC alimentado directamente por la fuente DC. En este diseño, normalmente el motor cuenta con un controlador incorporado internamente⁴⁹, y se usa especialmente en aplicaciones en donde la intermitencia del bombeo no sea un problema.

⁴⁷ Elaboración propia basada en (TAIFU, 2021)

⁴⁸ Elaboración propia basada en (INVERTEK SOLAR, 2019).

⁴⁹ Diseño según (TAIFU, 2021)

Por otra parte, la Figura 14 muestra el esquema básico de una instalación de un motor DC alimentador por un controlador DC/DC. Este controlador puede incorporar funciones que permitan compensar en alguna medida las variaciones del voltaje en la fuente DC⁵⁰. Adicionalmente, pueden tener capacidad para agregar un banco de baterías.

En la Figura 15 se muestra un diagrama de bloques de los principales grupos de componentes necesarios en un sistema de bombeo de agua, en el que se usa un VFD para arrancar, alimentar, controlar y proteger un motor de AC⁵¹. Para que esto sea posible, el variador requiere la característica de tener accesible y poder ser alimentado en su bus DC⁵².

IV. Ventaja del uso de variadores de frecuencia para bombeo de agua.

Una de las técnicas usadas en variadores de frecuencia disponibles en la industria, es modulación por ancho de pulso (PWM).

La Figura 16 muestra la forma general de una señal de voltaje modulada por a ancho de pulso PWM (tren de pulsos de diferente ancho o duración), y el *voltaje promedio* que “percibirá” una carga tal como un inductor (línea negra continua senoidal) alimentado por esa señal de voltaje discontinuo.

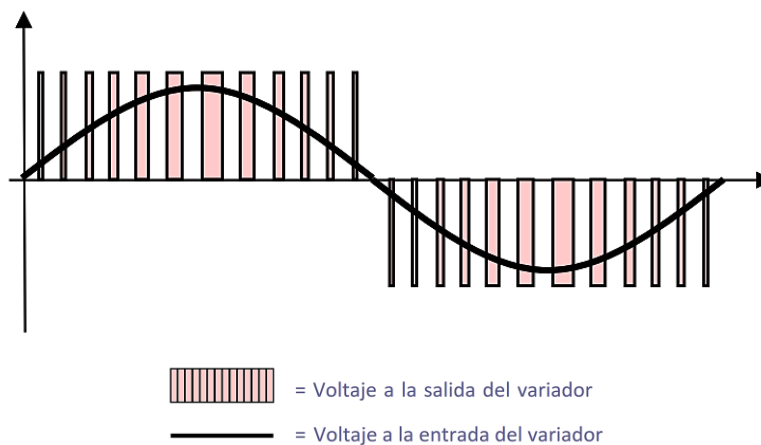


Figura 16. Señal PWM de voltaje y de carga⁵³.

Cuando una señal PWM se usa para alimentar motores de inducción, tales como los motores trifásicos comunes usados en bombeo, se obtiene la capacidad de regular la velocidad de rotación de la bomba, controlando el ciclo de trabajo de la señal PWM. Al controlar la

⁵⁰ (GRUNDFOS, 2021), (GRUNDFOS, 2021), (SHAKTI PUMPS, 2018)

⁵¹ (ABB S. , 2018)

⁵² (INVERTEK, 2019)

⁵³ Para más detalle ver (INVERTEK, 2014)

velocidad de rotación de la bomba, se regula el flujo de agua a la salida, así también se puede reducir o aumentar la potencia que la bomba demanda.

Esta capacidad de regulación de la potencia de la bomba tiene un mínimo valor empírico, que es aquella velocidad de rotación por debajo de la cual la bomba ya no extrae agua. Por encima de ese valor, la potencia que demanda el variador puede ser también variable, y *eso permite que el variador pueda ajustarse hasta cierto punto a la potencia disponible en la fuente.*

Si, por ejemplo, la fuente es un generador fotovoltaico, el variador permitirá que la estación de bombeo opere a plena potencia cuando existen niveles de irradiancia solar suficientes. Cuando la irradiancia cae por debajo de determinados valores, el variador puede continuar operando, pero a menor potencia.

Otra ventaja del uso de los variadores de frecuencia es la posibilidad de emplearlos con motores trifásicos AC, que son los más comunes en el mercado de El Salvador para aplicaciones de bombeo de agua. Esto facilita el acceso a repuestos y por tanto repercute en la viabilidad del mantenimiento de la instalación, en el mediano y largo plazo, ya que los motores DC y sus repuestos no son comunes en el mercado salvadoreño.

V. Dimensionamiento de generador fotovoltaico.

Dentro del proceso de diseño, uno de los pasos críticos es el dimensionamiento del arreglo fotovoltaico, ya este componente suele representar una parte significativa del costo de la instalación.

El arreglo fotovoltaico deberá ser sobredimensionado en relación con la potencia del motor a alimentar, en todos los casos de aplicaciones aisladas.⁵⁴

Si bien, en aplicaciones de bombeo de agua, a menudo la carga puede ser estable, uno de los problemas de un sistema fotovoltaico aislado es la variabilidad en la fuente, esto debido a *variación de la intensidad de la luz solar* en el sitio de utilización (1) a lo largo del día y del año, como resultado de la variación de la posición relativa del Sol en el cielo, y (2) la variabilidad en el nivel de irradiancia como resultado de nubosidad u otros fenómenos meteorológicos.

Dados los dos aspectos anteriores, a la hora de dimensionar el arreglo fotovoltaico, se debe considerar que exista capacidad suficiente de potencia disponible en paneles fotovoltaicos, para compensar cuando la potencia disponible se reduzca como producto de una reducción de la irradiancia solar.

⁵⁴ Para más detalles, ver sección 4, “Diseño de sistema FV”, en (Water-Missions, 2021)

Aun cuando el arreglo fotovoltaico esté sobredimensionado, la potencia utilizable dependerá del dispositivo de electrónica de potencia usado. Tanto inversores como variadores tienen un umbral de voltaje mínimo de entrada a partir del cual comenzarán a operar.

En el caso de sistemas de bombeo, ese umbral debe ser aquel que permita bombear un caudal de agua mínimo aceptable, y con ello, operar con seguridad la bomba, a fin de evitar daño por fricción y sobrecalentamiento.

En la Figura 17 se pueden observar cómo se comportará un sistema de bombeo con variador de frecuencia, bajo condiciones ideales (sin nubosidad, fallos en la instalación o equipos).

- La región celeste, representa la energía total irradiada a lo largo del día en el sitio de generador solar fotovoltaico.
- La región anaranjada representa la potencia y energía realmente aprovechada de la luz radiante.

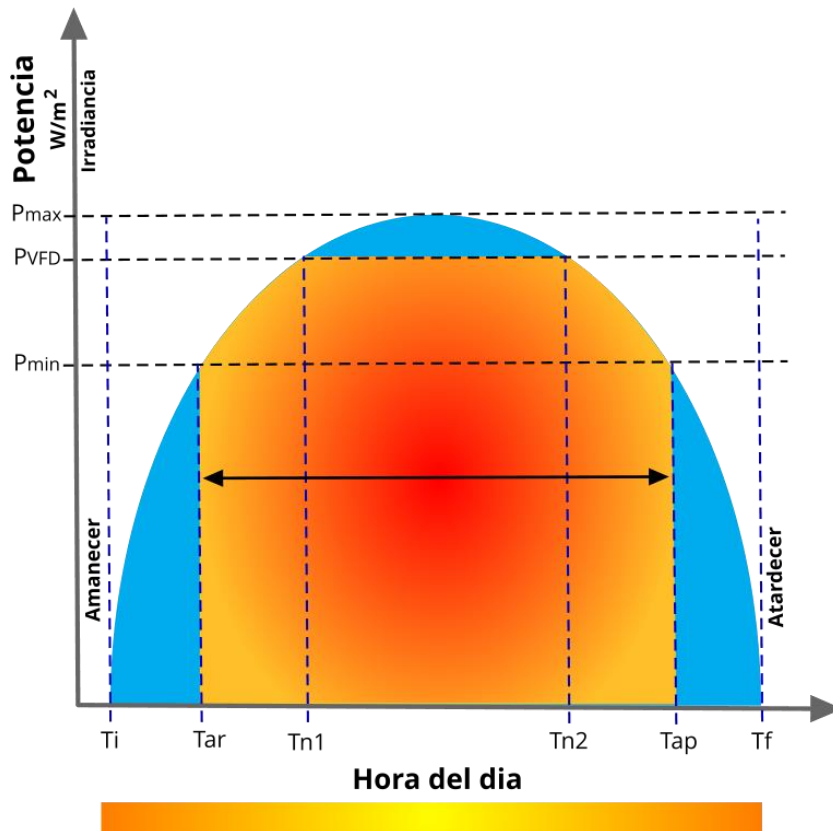


Figura 17. Curva de potencia disponible a la salida de un variador de frecuencia.

Además, se observan los siguientes puntos:

- T_i : Representa la hora del amanecer, a partir de la cual comienza a haber irradiación solar, si bien esta es transformada en un voltaje DC a la salida de un arreglo solar, este voltaje no es suficiente para ser aprovechada por un inversor o, en nuestro caso, variador de frecuencia.

- T_{ar} : Es el monto del día a partir del cual un inversor recibe un voltaje a la entrada que permite la operación correcta del variador de frecuencia y su carga.
- P_{min} : Es la potencia de salida mínima a partir del cual el equipo de bombeo puede ser operado, según sea la aplicación. Esa potencia se obtiene un nivel de radiación específico de cada sitio y carga.
- T_{n1} : Representa la hora del día a la cual la irradiancia ya es suficiente para que el arreglo solar proporcione un voltaje y potencia a salida, tal que permite operar al equipo de potencia a la potencia nominal.
- P_{VFD} : Es la potencia de salida del inversor al cual el equipo de bombeo puede operar a plena potencia o potencia nominal.
- P_{max} : Es la potencia máxima disponible en el sitio, en DC, producto del tamaño del arreglo solar sobre dimensionado. La potencia total de los paneles solares, P_{max} , es mucho mayor a la potencia nominal del VFD alimentado, P_{VFD} .
- T_{n2} : Es la hora del día a partir del cual la irradiancia baja del nivel que permite la operación a potencia nominal del sistema de bombeo. Por debajo de este punto, en un sistema aislado, el VFD debe reducir la velocidad de operación del motor, a fin de reducir la demanda de potencia y permitir que la bomba siga operando a potencia reducida.
- T_{ap} : Es la hora a la cual la irradiancia se reduce a punto tal que el variador de frecuencia apaga el equipo del bombeo, ya que la potencia disponible a la entrada del VFD es insuficiente. Normalmente esto ocurrirá en combinación con una caída del voltaje de entrada DC por debajo de valores mínimos aceptables para la operación. En este punto la potencia disponible a la entrada del variador es P_{min} .
- T_f : Es la hora de la puesta de sol, cuando termina el día y por tanto no hay luz solar disponible, ni hay potencia suficiente a la entrada del variador.

En la Figura 17 puede observar que la sección anaranjada entre T_{ar} y T_{n1} , así como el área anaranjada entre T_{n2} y T_{ap} , son áreas de energía que se pueden aprovechar gracias a la capacidad del VFD de operar el sistema de bombeo aún por debajo de la potencia nominal, reduciendo la velocidad de rotación del motor.

VI. Costeo por bloques o componentes principales, orientado a estructura de costos.

En el Anexo IV se presenta un cuadro detallado de los ítems cotizados, considerados dentro del diseño evaluado. Para el caso, se ha considerado un sistema de 7.5 hp, aislado, para fines de referencia. Este diseño corresponde al de la Figura 15.

Para dimensionar el sistema, se ha seguido la metodología indicada en la Figura 12, la cual es acorde al método descrito en (Water-Missions, 2021)⁵⁵.

Un elemento clave para comenzar el dimensionamiento de estos sistemas es la potencia eléctrica del motor, que para una bomba sumergible de 7.5 hp es de 5.5 kW. Por una regla empírica, el doble⁵⁶ de esta potencia dará la potencia total mínima del arreglo fotovoltaico. Es decir, 11 kW, que es solamente *un punto de partida*.

Luego, se debe tomar en cuenta cuáles son los voltajes de operación de los paneles reales que se piensa usar, o de los que se dispone en el mercado, además de su potencia en W_{pico} .

Otra condición por cumplir en el arreglo fotovoltaico es que el voltaje de una cadena de paneles debe ser superior al voltaje de trabajo normal del bus DC del variador de frecuencia (si el variador estuviera conectado una fuente rígida de potencia), a fin de que el variador pueda funcionar con el voltaje que le proporcionen los paneles. Esto le pone un tamaño a la cadena de paneles. Más paneles en serie significan más voltaje.

A su vez, se debe tomar en cuenta el voltaje máximo de circuito abierto de una cadena de paneles fotovoltaicos, para evitar destruir el variador de frecuencia. Los variadores tienen un voltaje máximo de trabajo en el bus DC, por arriba de ese valor, se puede dañar su electrónica.

Aplicando los criterios brindados anteriormente, se iteró hasta llegar a un tamaño de arreglo que permite garantizar la operación un suficiente número de horas (con capacidad de extraer agua), y se llegó a un arreglo de paneles fotovoltaicos que tiene 32 paneles de 405 watts (con cuatro cadenas de ocho paneles en serie), para una potencia total de 12960 watts, que equivale a 12.96 kW.

Finalmente, los 11 kW de referencia iniciales, aplicando métodos iterativos, se convirtieron en 12.96 kW, considerando las características reales de los paneles a utilizar, las limitantes de voltaje del variador de frecuencia y usando una simulación de irradiancia (que considera nubosidad probable) en el sitio de bombeo.

⁵⁵ “Sistemas de agua mediante energía solar, documento guía para el diseño y la instalación”, elaborado por “Water Missions” y UNICEF, contiene la metodología largamente detallada, en un documento de 123 páginas. Ya que eso representa un trabajo aparte de gran extensión, aquí simplemente se replica el método, se he evitado copiarlo. Se recomienda al lector consultar este documento de UNICEF para más detalles, los cuales solamente se mencionan de manera general en este trabajo de investigación.

⁵⁶ Observación y sugerencia propia de este trabajo de graduación.

Tabla 5. Tabla de costos unitarios para un equipo de bombeo solar de 7.5 hp, aislado.⁵⁷

#	Descripción de componente	Contactor
1	Paneles solares y estructuras, 12960 watts pico.	\$8,750.72
2	Protecciones DC en exteriores y accesorios solares exteriores	\$165.79
3	Tablero DC (incluye variador de frecuencia)	\$1,869.16
	Costo total	\$10,785.67
	Costo en \$ _{total} /hp	\$1,438.09
	Costo en \$ _{total} /W _{pico}	\$0.83

VII. Estructura de costos de sistemas aislado.

A partir de los datos del apartado anterior, se puede estimar un costo por las categorías de componentes de la Tabla 5, esto se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Porcentajes de costos de cada componente, estación de bombeo solar de 7.5 hp, aislada.⁵⁸

#	Descripción de componente	Monto
1	Paneles solares y estructuras, 12960 watts pico.	81.2%
2	Protecciones DC en exteriores y accesorios solares exteriores	1.6%
3	Tablero DC (incluye variador de frecuencia)	17.3%
	Costo total	100.00%

En la Tabla 6 se puede observar que la mayor parte del costo de esta instalación (81.2%) se debe a los paneles solares para configurar la fuente de energía. Si se suma a eso el costo de las protecciones especiales que solamente se deben usar en instalaciones solares fotovoltaicas en corriente directa, la porción del costo llega a 83%.

⁵⁷ Elaboración propia con precios cotizados en El Salvador en septiembre, 2021. Ver Anexo IV para detalles.

⁵⁸ Elaboración propia con precios cotizados en El Salvador en septiembre, 2021. Ver Anexo IV para detalles.

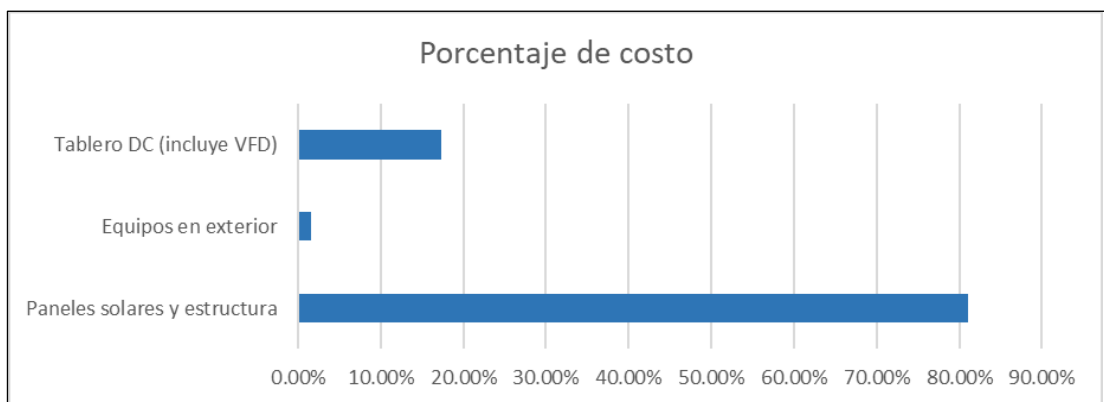


Figura 18. Impacto de cada componente en una instalación de bombeo con generador fotovoltaico aislado.

En la Figura 18 se puede observar que, para el caso del tipo de estación de bombeo analizada, la mayor parte del costo financiero de su construcción está en los paneles solares.

VIII. Observaciones del capítulo.

- La utilización de un variador de frecuencia, además de permitir la incorporación de una amplia variedad de funciones de protección y monitoreo, permite operar una estación de bombeo a potencia variable.
- Al emplear variador de frecuencia, se puede modificar una estación de bombeo existente, en algunos casos manteniendo el motor, especialmente cuando se trate de motores trifásicos.
- En una estación de bombeo alimentada por un generador fotovoltaico aislado, la mayor parte del costo lo representan los paneles solares.

Capítulo 3. Diseño un sistema de alimentación eléctrica híbrido de la red eléctrica y de una fuente fotovoltaica, para alimentar un sistema de bombeo de agua.

I. Conceptos básicos de un sistema híbrido.

Para este trabajo de graduación, se estarán explorando las características de sistemas de bombeo de alimentación híbrida con las siguientes características:

- Una de las fuentes de energía es la red eléctrica local, es decir, una fuente rígida de potencia.
- La otra fuente de energía es un generador fotovoltaico, o sea, una fuente no rígida de potencia.
- Un equipo de bombeo, que puede ser sumergible, de superficie o de turbina vertical.

Aunque son variantes posibles, para simplificar el análisis del problema, **no se estarán considerando** los siguientes tipos de instalación:

- Con baterías de respaldo.
- Con grupo electrógeno de respaldo.

Un sistema híbrido como el propuesto en este trabajo de graduación, tendrá la capacidad de mezclar las energías, como se muestra en la Figura 19:

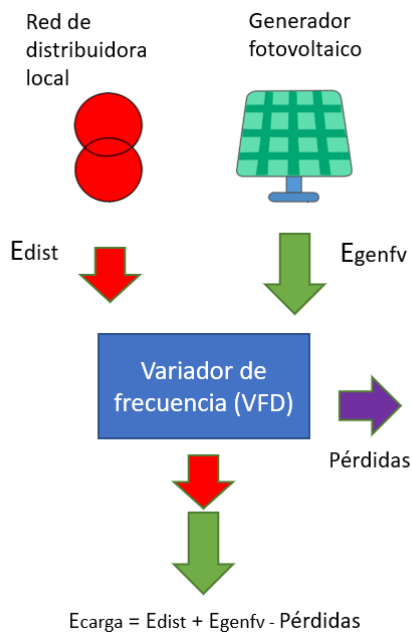


Figura 19. Esquema conceptual de sistema de bombeo híbrido en donde se mezclan las energías de dos fuentes.⁵⁹

⁵⁹ Fuente: Elaboración propia.

II. Tipos generales de sistemas híbridos.

Para este trabajo de graduación, se estará usando la siguiente división:

a. *Sistema con dos fuentes, con capacidad de operación no simultánea.*

Existe la posibilidad de construir híbridos sin capacidad de mezclar energías. Esto se puede conseguir de diferentes maneras⁶⁰. Una de ellas es empleando dos variadores de frecuencia, uno con capacidad de alimentación vía DC, y el otro con capacidad de alimentación desde AC. Luego, se obtienen dos salidas en PWM, las cuales van a una transferencia eléctrica, que puede ser manual o automática. En la **transferencia**, al lado de la carga, se conecta el motor de la bomba. También se puede omitir el variador de frecuencia de lado de la fuente AC, pero siempre se requerirá un tablero de arranque y protección.

Otra manera de alimentar el equipo de bombeo es usar un inversor DC/AC para aplicaciones aisladas, una transferencia eléctrica (que puede ser manual) y un tablero de arranque y protección en AC. Luego, se puede usar la transferencia para alternar entre dos fuentes. Este tipo de aplicación tiene la desventaja que el arreglo fotovoltaico tendría que sobredimensionarse para permitir el arranque de la bomba, o usar un arrancador suave o variador de frecuencia. A su vez, el sistema se apagaría en los momentos de baja irradiancia solar, teniendo que conectarlo a la red de una distribuidora local.

b. *Sistema con dos fuentes, con capacidad de operación simultánea.*

Este tipo de sistema “híbrido” que nos interesa, y se puede realizar de diferentes maneras con el objetivo de combinar prestaciones de cada fuente de energía y tener también la capacidad de mezclar las energías. Entre estos sistemas, podemos mencionar:

1. Alimentación eléctrica mediante inversor de voltaje, del tipo conectado a red (“inversor solar”).

El inversor se sincronizará con la señal AC de la red eléctrica, aportando energía proveniente de un arreglo fotovoltaico. La salida será una señal senoidal de 60 Hz, sincronizada con la red, que se puede usar para alimentar un equipo de bombeo o cualquier otra carga.

⁶⁰ Un ejemplo de estos sistemas, basados en transferencias entre dos fuentes alternativas de energía, puede encontrarse en (JNTECH Sistemas híbridos, 2022).

Este sistema tiene las ventajas⁶¹ siguientes:

- i. Fácil de aplicar, siempre que se encuentre un inversor con características necesarias para operar conectado a la red.
- ii. El equipo de bombeo se puede operar a plena potencia, todo el tiempo, pero porque el inversor eléctrico está sincronizado con la red de una distribuidora local y es la red de la distribuidora la que ofrece la robustez y confiabilidad, así como tasas de disponibilidad.
- iii. Los excedentes de energía o energía sobrante pueden ser inyectada a la distribuidora, obteniendo algún beneficio económico por ello.
- iv. La aplicación de la energía puede ser cualquier otra, sin restringirse solamente a equipos de bombeo.

En las desventajas, se puede citar:

- i. No permite operar el equipo de bombeo de manera aislada, sin señal de voltaje de la distribuidora eléctrica.
- ii. Se tiene que añadir un tablero con un arrancador suave, variador de frecuencia o caja de arranque en general para la bomba, encareciendo la instalación. En cualquier caso, se deben añadir elementos adicionales para implementar funciones de conexión, desconexión, protección eléctrica, variación de velocidad u otras aplicaciones.
- iii. Al depender de un inversor conectado a red, en algunos casos, no se podrá realizar primero la parte solar, con la capacidad de eventualmente añadir la energía de la red.
- iv. Se requieren trámites con la distribuidora local, reportando la instalación fotovoltaica, así también se necesita cambiar el tipo de medidor en el sitio por uno bidireccional, agregando burocracia y gastos al proyecto.

2. Usando un variador de frecuencia.

Este variador será alimentado por dos fuentes⁶², una AC y la otra DC. La salida será una señal PWM.

⁶¹ Obtenidas a partir de una comparación con sistemas como los descritos en (Cumbre Pueblos, 2019) y (Energía para el Futuro, 2015), además de observaciones propias a partir de las curvas de potencia irradiancia y potencia diarias.

⁶² Un ejemplo de este tipo de sistema comercial puede encontrarse en (LORENTZ, 2022)

Este tipo de instalación tiene las siguientes ventajas⁶³:

- i. El variador permite implementar funciones de protección eléctrica.
- ii. El proyecto se puede realizar por partes. Por ejemplo, se puede construir y aprovechar en un año la instalación conectada a la red, y en un año siguiente se construye la fuente fotovoltaica, o viceversa.
- iii. En caso de ausencia de una fuente, la otra puede operar de manera independiente.
- iv. El variador de frecuencia permite implementar un arranque suave del motor de bombeo.
- v. La potencia del equipo de bombeo puede ser regulada, variando la velocidad de giro del motor, reduciendo el flujo de agua o implementando aplicaciones de presión constante.
- vi. Se pueden usar motores convencionales de AC, los cuales son abundantes en aplicaciones de bombeo, por tanto, se facilita el mantenimiento posterior.

Este tipo de aplicación tendrá también algunas desventajas:

- i. Siempre el costo de la inversión inicial será mayor que un sistema conectado a la red.
- ii. El motor no es alimentado mediante una señal senoidal pura, para poder obtener una señal sinusoidal se deben implementar filtros, incrementando el costo del proyecto.
- iii. Al usar el variador de frecuencia, la fuente AC verá una carga no lineal, produciendo distorsión armónica de corriente que deberá ser soportada por la fuente.

Esta no pretende ser una lista exhaustiva de sistemas híbridos. Pueden existir otros sistemas híbridos, incluso con motores de bombeo en DC, sin embargo, estos quedan fuera del alcance de este estudio.

Para el caso de este trabajo de graduación, se ha elegido un diseño con variador de frecuencia, (b-2) en este apartado, el cual es capaz de mezclar las energías. Una de una energía

⁶³ Observaciones son producto de desarrollo propio para este trabajo de graduación, obtenidas de resultados analíticos e implementaciones prácticas.

proveniente de fuente AC y otra energía proveniente de una fuente en DC, que para nuestro caso será un arreglo fotovoltaico.

III. Análisis de la mezcla de energías.

Como producto de la mezcla de energías, el costo total de energía total será resultado de la suma de los costos de las diferentes energías. Es decir, de la suma del costo de la energía tomada de la red más el costo de la energía fotovoltaica. Esto se representa en la Figura 20, a continuación.

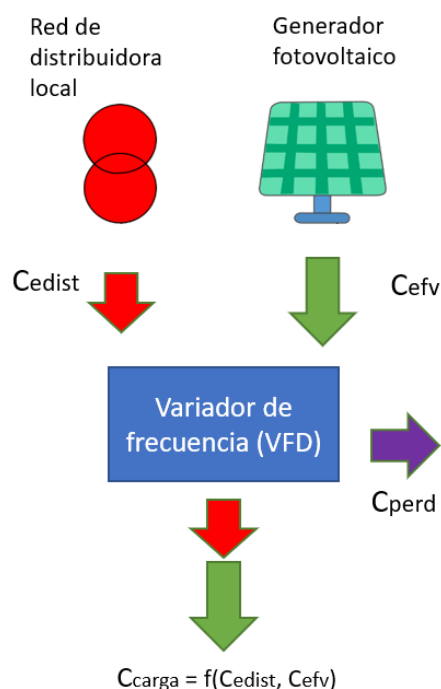


Figura 20. Esquema conceptual de sistema de bombeo híbrido en donde se combinan los costos de las dos fuentes de energía.⁶⁴

Si bien la fuente de la energía (luz solar) puede ser gratuita, no lo es la instalación eléctrica necesaria para aprovechar esa energía, esa tendrá un costo de operación (relacionado al costo de personal operativo, no asociado a un costo de un combustible), un costo financiero por el pago de la inversión y un costo de mantenimiento.

Por tanto, en términos de costos operativos, el costo total de la energía, así como el costo total normalizado (en \$/kWh) de la energía consumida por el sistema de bombeo híbrido, se muestra en abordaje analítico de la siguiente sección.

⁶⁴ Fuente: Elaboración propia.

$$C_{edist} = c_{edistn} * E_{dist} \quad (3.1) \quad \text{Costo de energía de la distribuidora eléctrica o de la red local, en USD ($)}$$

$$c_{edistn} = \frac{C_{edist}}{E_{dist}} \quad (3.2) \quad \text{Costo normalizado energía de la distribuidora eléctrica o de la red local ($/kWh)}$$

$$C_{efv} = c_{efvn} * E_{genfv} \quad (3.3) \quad \text{Costo de energía de la fuente fotovoltaica ($)}$$

$$c_{efvn} = \frac{C_{efv}}{E_{genfv}} \quad (3.4) \quad \text{Costo normalizado energía de la fuente fotovoltaica ($/kWh)}$$

La energía total consumida por el sistema se puede definir de las siguientes maneras:

$$E_{total} = E_{carga} + \text{Pérdidas} = E_{dist} + E_{genfv} \quad (3.5) \quad \text{Energía total consumida por el sistema de bombeo, igual a la energía consumida por la carga más la energía perdida. También se define como la suma de las energías que ingresan al sistema en un periodo dado. Se mide en kilovatio-hora (kWh)}$$

Mientras que los costos monetarios se pueden calcular de la siguiente forma:

$$C_{total} = c_{totaln} * E_{total} \quad (3.6) \quad \text{Costo total de la energía, como producto de la energía total demandada, multiplicada por el costo normalizado de toda la energía ($)}.}$$

$$c_{totaln} = \frac{C_{total}}{E_{total}} \quad (3.7) \quad \text{Costo normalizado de la energía total ($/kWh)}$$

$$C_{total} = c_{totaln} * (E_{dist} + E_{genfv}) \quad (3.8) \quad \text{Costo total de la energía ($)}$$

$$c_{totaln} = \frac{C_{total}}{E_{dist} + E_{genfv}} \quad (3.9) \quad \text{Costal total normalizado de la energía ($/kWh)}$$

Ahora bien, si se plantean ecuaciones para energía total y costo total, estas pueden ser como se presenta a continuación:

$$E_{total} = E_{dist} + E_{genfv} \quad (3.10) \quad \text{Energía total consumida (kWh)}$$

$$C_{total} = C_{edist} + C_{efv} \quad (3.11)$$

Costo total de la energía consumida, como resultado de la suma de los costos de energía de red local más la energía de la fuente fotovoltaica (\$/kWh).

Para fines de emplear esta metodología en cualquier instalación, es pertinente usar costos normalizados, como se muestra enseguida:

$$c_{totaln} * E_{total} = c_{edistn} * E_{dist} + c_{efvn} * E_{genfv} \quad (3.12)$$

Costo de energía como suma de los productos de la cantidad de energía, multiplicado con el costo normalizado de esa energía (\$)

$$c_{totaln} = \frac{c_{edistn} * E_{dist} + c_{efvn} * E_{genfv}}{E_{total}} \quad (3.12)$$

Costo total normalizado de la energía (\$/kWh)

$$c_{totaln} = \frac{c_{edistn} * E_{dist} + c_{efvn} * E_{genfv}}{E_{dist} + E_{genfv}} \quad (3.13)$$

Costo total normalizado de la energía (\$/kWh)

Sean:

$$k_{efv} = \frac{E_{genfv}}{E_{dist} + E_{genfv}} \quad (3.14)$$

Coefficiente de participación de la energía fotovoltaica, mide la relación de la energía aportada por el sistema fotovoltaica con respecto a toda la energía consumida por el sistema de bombeo de las dos fuentes (adimensional).

$$k_{edist} = \frac{E_{dist}}{E_{dist} + E_{genfv}} \quad (3.15)$$

Coefficiente de participación de la energía de la red, mide la relación de la energía aportada por la red local, con respecto a toda la energía consumida por el sistema de bombeo de las dos fuentes (adimensional).

Se pueden sustituir las relaciones o coeficientes de las ecuaciones (3.14) y (3.15) en la ecuación (3.13), y eso permite obtener la siguiente ecuación simplificada:

$$c_{totaln} = c_{edistn} * k_{edist} + c_{efvn} * k_{efv} \quad (3.16)$$

Como la sumatoria de las dos energías que entra al sistema es igual al 100% de la energía consumida (incluyendo pérdidas), se puede decir que:

$$k_{edist} + k_{efv} = 1 \quad (3.17)$$

Por lo tanto, se puede omitir uno de los dos coeficientes, escribiéndolo en función del otro, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$k_{edist} = 1 - k_{efv} \quad (3.18)$$

Si se define una variable que relacione los costos normalizados de las diferentes energías:

$$r_c = \frac{c_{efvn}}{c_{edistn}} \quad (3.19)$$

Relación de costos normalizados de energías, relaciona el costo unitario de la energía solar fotovoltaica con la energía de la distribuidora

Con lo anterior, se puede definir el costo unitario de una energía en función de la otra:

$$c_{edistn} * r_c = c_{efvn} \quad (3.20)$$

Sustituyendo (3.18) y (3.20) en (3.16):

$$\begin{aligned} c_{totaln} &= c_{edistn} * (1 - k_{efv}) + (c_{edistn} * r_c) * k_{efv} \\ c_{totaln} &= c_{edistn} - c_{edistn} * k_{efv} + c_{edistn} * r_c * k_{efv} \\ c_{totaln} &= c_{edistn} (1 - k_{efv} + r_c * k_{efv}) \end{aligned} \quad (3.21)$$

Finalmente, el costo total de energía consumida por el sistema (tomando en cuenta las dos entregas de energía), normalizado, ser:

$$c_{totaln} = c_{edistn} (1 - k_{efv} * [1 - r_c]) \quad (3.22)$$

La ecuación (3.22) permite hacer algunas observaciones:

1. Los valores en los cuales se cumpla la siguiente relación, producirán un costo normalizado de la energía total, **superior al costo de la energía de la distribuidora**.

$$\begin{aligned}
1 - k_{efv} + r_c * k_{efv} &> 1 \\
r_c * k_{efv} &> k_{efv} \\
r_c &> 1
\end{aligned}
\tag{3.23}$$

En estos casos, la operación del sistema se realiza a mayor costo que operar el sistema puramente con energía de la distribuidora eléctrica. Eso se debe a que en la definición de r_c , el costo normalizado de la energía fotovoltaica está en el numerador.

2. Del punto (1), se deduce que, para que exista ahorro monetario en la operación del sistema híbrido, versus un sistema conectado a la red, se debe cumplir que:

$$r_c < 1 \tag{3.24}$$

Una forma simple interpretar esto es que, para que la energía total del sistema resulte de menor costo, la energía proveniente del arreglo fotovoltaico debe ser de menor costo que la energía de la distribuidora eléctrica.

De los puntos 1 y 2 anteriores, se puede establecer un criterio:

Se puede restringir el diseño y aplicación de sistemas híbridos, a aquellos escenarios donde el costo normalizado de la energía proveniente de la fuente fotovoltaica será menor al costo de la energía de la red.

De lo anterior, también se pueden realizar las siguientes observaciones:

- i. Para que un sistema fotovoltaico tenga un bajo costo normalizado de energía, debería ser un sistema pequeño. Eso reducirá el costo de la inversión inicial (y por tanto de los pagos de anualidades), del mantenimiento y de la operación del sistema.
- ii. Un sistema fotovoltaico, mientras más pequeño, también tendrá una menor participación en el aporte energético, k_{efv} .
- iii. Luego, el reto de diseño consistirá en encontrar el sistema de más bajo costo (usualmente esto implicará reducir la capacidad del arreglo fotovoltaico a un mínimo viable, ya que los paneles solares fotovoltaico son el principal componente) que produce la mayor participación energética k_{efv} en el sistema fotovoltaico.

Un esquema de diseño básico de un sistema de alimentación híbrida puede observarse en la Figura 21. En dicha figura pueden observarse los principales bloques que se requieren en el variador de frecuencia, si se omiten las protecciones:

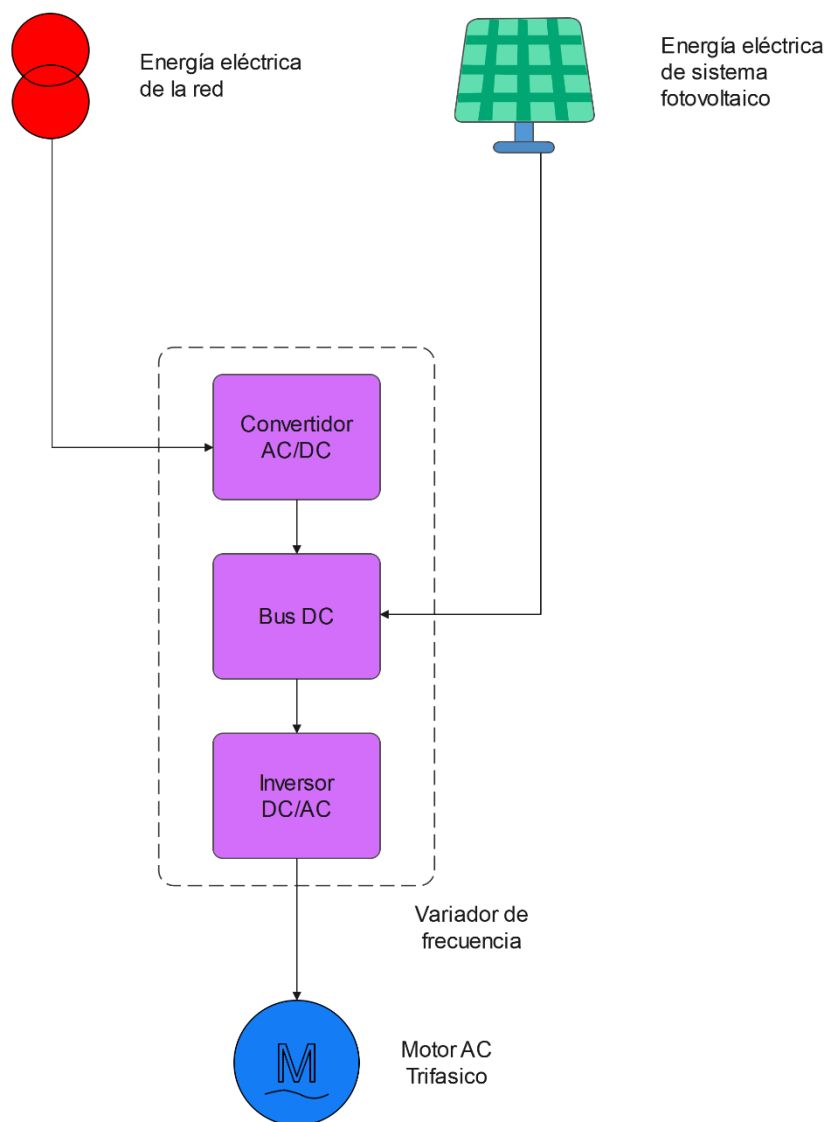


Figura 21. Esquema conceptual de un sistema híbrido.⁶⁵

- **Convertidor de AC/DC.** Este permite convertir la energía de una fuente de corriente alterna (tal como la energía de la distribuidora local) en corriente directa.
- **Bus DC.** Este es un bus de conexión que permite conectar una fuente de potencia DC, aun cuando este voltaje DC sea fluctuante, tal como un arreglo de paneles fotovoltaicos.

⁶⁵ Fuente: Elaboración propia.

- **Convertidor de DC/AC.** Este elemento toma la energía de corriente directa disponible en el Bus DC, y a partir de dispositivos de electrónica de potencia (SCRs) genera el tren de pulsos PWM.
- **Motor AC trifásico:** Esta es una restricción o limitación observada en los equipos disponibles en el mercado, por diferentes razones técnicas. Es decir, el motor que se emplea en estos sistemas debe ser trifásico. Sin bien esto puede parecer un inconveniente, realmente coincide con muchos de los motores que se usan en bombeo de agua, los cuales por lo general son motores trifásicos de inducción.

IV. Constitución de un sistema híbrido.

En este trabajo se propone que un sistema híbrido pueda constituirse en cualquiera de los siguientes órdenes:

- a) Construyendo primero un sistema de bombeo aislado con fuente fotovoltaica.
- b) Construyendo primero un sistema de bombeo alimentado con energía de red local.

A su vez, este sistema propuesto ofrece las siguientes prestaciones:

- i. Permite implementar arranque suave y protecciones eléctricas.
- ii. Los variadores también incluyen la posibilidad de monitorear variables eléctricas, tales como aquellas relacionadas con el consumo de energía y demandad de potencia.
- iii. Se pueden usar motores trifásicos de inducción comunes. Esto permite usar el tipo de motor de bombeo más común en El Salvador. Se espera que este mismo comportamiento a nivel de disponibilidad de piezas se presente en otros mercados de similar tamaño, donde no existe mucha variedad de motores en los inventarios locales de los distribuidores. Esto facilita las reparaciones tales como cambio de motor eléctrico.

La constitución de un sistema híbrido se podrá realizar ya sea teniendo un sistema conectado a la red, que ya disponga de un variador, como se muestra en la Figura 22. Si no dispone de variador con bus DC accesible, la opción de arrancador mediante variador debe ser implementada, y el variador debe permitir alimentación DC directa al bus DC.

Sistema Conectado a red

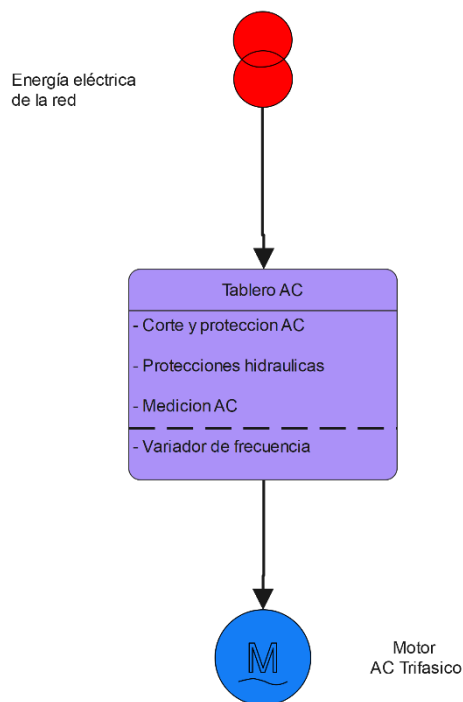


Figura 22. Sistema conectado a la red.⁶⁶

Sistema Aislado

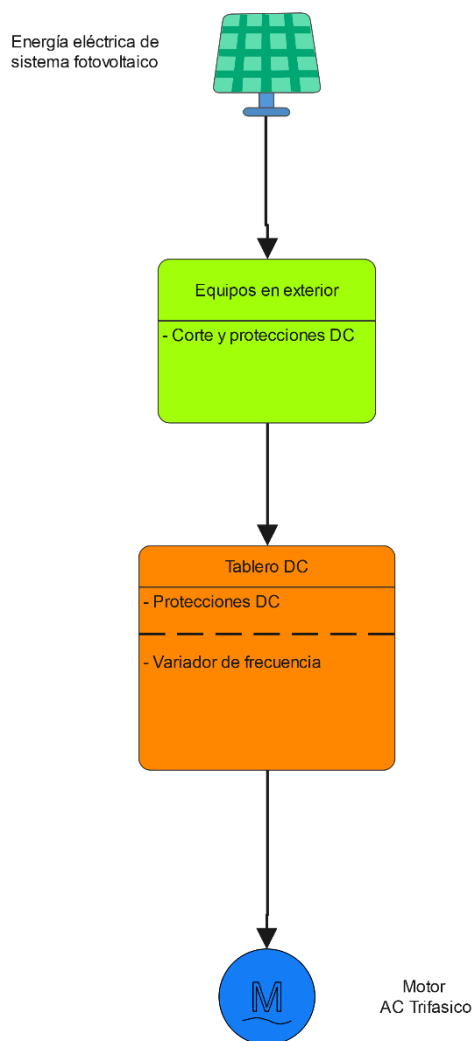


Figura 23. Esquema básico de sistema aislado con generador fotovoltaico.⁶⁷

En la Figura 22 cada bloque coloreado representa elementos que normalmente se pueden concentrar en un solo tablero o gabinete.

El sistema híbrido también puede construirse sobre un sistema aislado existente, en el cual exista un variador de frecuencia con bus DC accesible, como se muestra en la Figura 23.

⁶⁶ Fuente: Elaboración propia.

⁶⁷ Fuente: Elaboración propia.

Normalmente, la parte de mayor costo en estos sistemas son los paneles fotovoltaicos, como se muestra en el ejemplo de la Tabla 6 del capítulo 2, por lo que un sistema aislado que opere una bomba DC, también podría ser convertido, primero a una versión aislada con variador de frecuencia, y luego a una versión híbrida como la que se propone en este estudio.

En la Figura 23 cada bloque coloreado representa elementos que normalmente se pueden concentrar en un solo tablero o gabinete.

De la Figura 22 y Figura 23 pueden observarse algunos elementos en común:

1. Un variador de frecuencia.
2. Un motor eléctrico trifásico, de corriente alterna, de inducción.

Luego, cada sistema tiene sus propios componentes.

V. Esquema de diseño de sistema híbrido propuesto.

En la Figura 24 se muestra el esquema de diseño básico, propuesto para un sistema de bombeo híbrido, en donde cada bloque representa elementos que pueden ser contenidos o agrupados en un solo tablero o gabinete.

Se puede observar que en el diseño propuesto conserva características de que ya se mostraron en la Figura 22 y Figura 23, solamente se agregan algunas características o elementos nuevos, tales como:

- Sensores en el lado DC.
- Medición en el lado DC.
- Tablero de control, el cual normalmente llevará un solo controlador lógico programable (PLC).

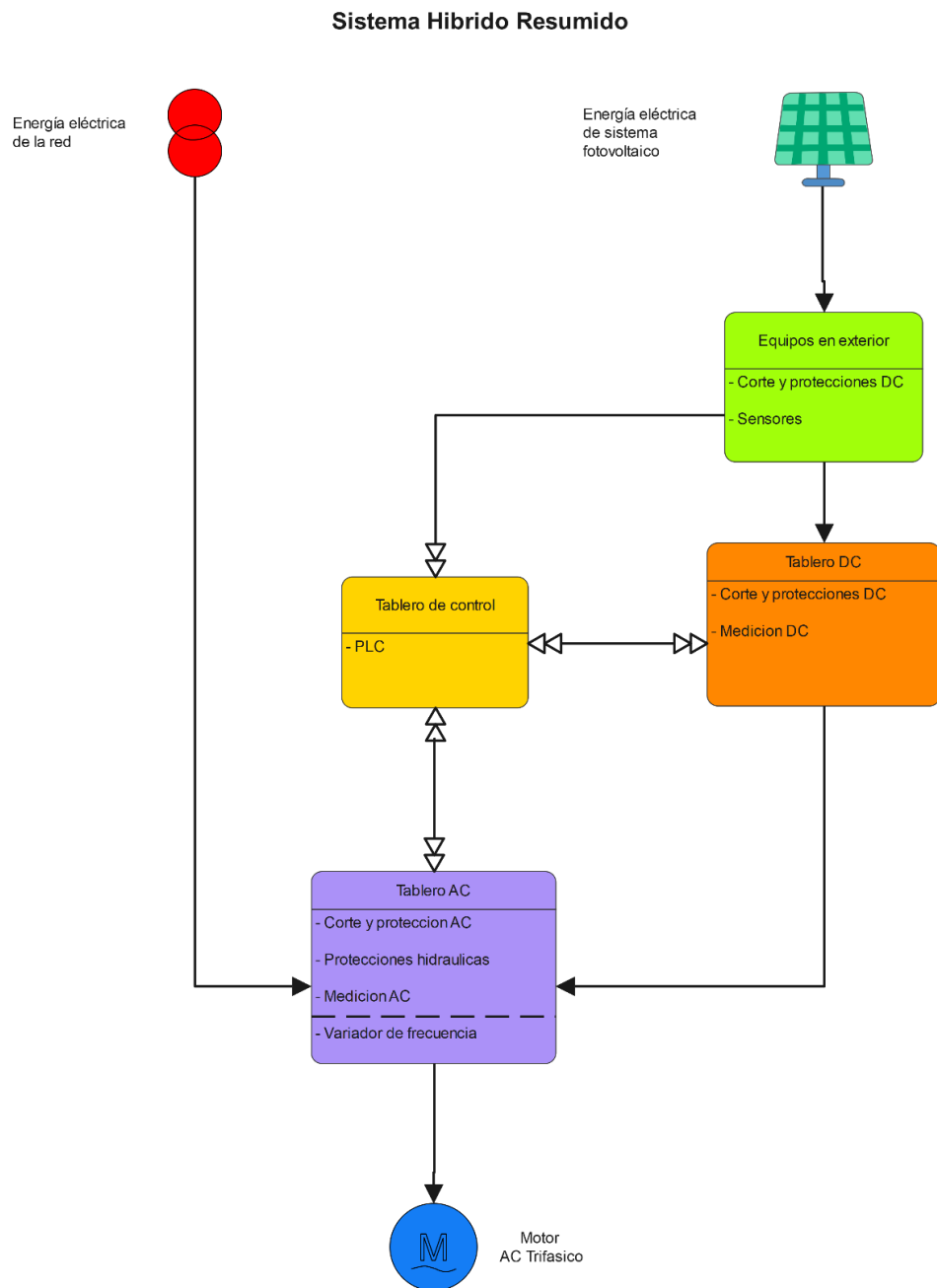


Figura 24. Representación esquemática de sistema híbrido, con dos fuentes de energía.⁶⁸

En el siguiente apartado, se muestra el comportamiento de los flujos de potencia, luego de la mezcla de potencia y energía, resultante de combinar las dos fuentes disponibles.

⁶⁸ Fuente: Elaboración propia.

VI. Características del sistema híbrido propuesto.

El sistema híbrido propuesto en este trabajo de graduación se muestra en la Figura 25.

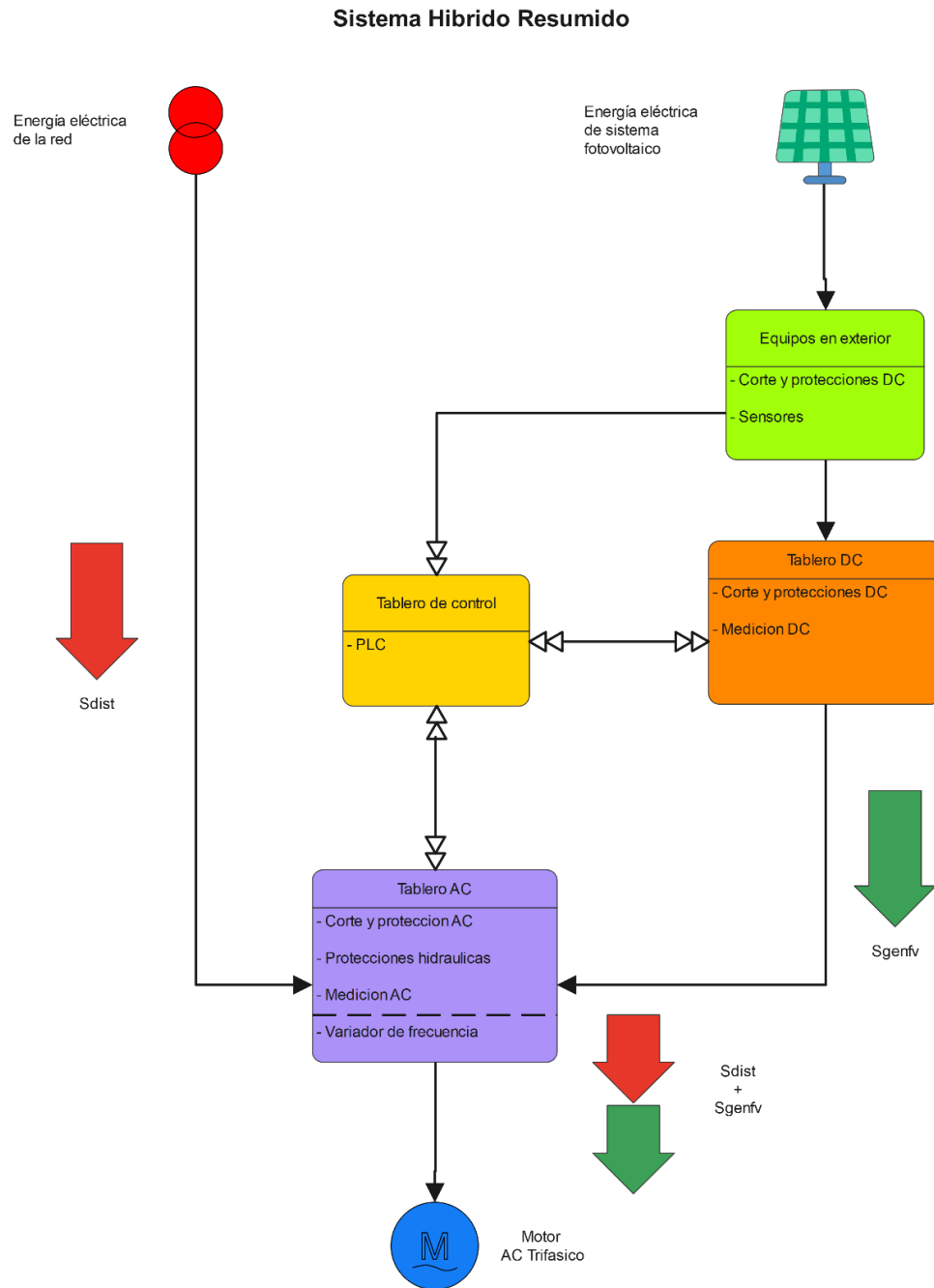


Figura 25. Flujos de potencia en sistema híbrido.⁶⁹

⁶⁹ Fuente: Elaboración propia.

S_{dist} : Potencia aparente que es proveída por la red eléctrica local.

S_{genfv} : Potencia aparente que es proveída por el generador fotovoltaico.

$S_{dist} + S_{genfv}$: En la Figura 25 muestra cómo la potencia que llega al motor es el resultado de las potencias del generador fotovoltaico y de la red local. Esta potencia se suministra en una señal PWM al motor, que será un motor trifásico de inducción.

Este tipo de sistema presenta las siguientes características:

1. Una de las dos fuentes será un arreglo fotovoltaico o generador fotovoltaico.

Si bien se pueden usar otras fuentes, tales como un banco de baterías manejadas por un gestor de baterías, o una combinación de paneles solares con baterías y un gestor de carga, esta opción puede resultar no viable en la mayor parte de casos, debido a que las baterías incrementan mucho más el costo, dependiendo de la capacidad de almacenamiento de energía que se requiera. Esta variante del diseño está fuera del alcance de este estudio. Por tanto, la fuente fotovoltaica sin baterías estará disponible solamente durante las horas en que se cuente con niveles de irradiancia suficientes.

De dimensionar el arreglo fotovoltaico con una capacidad de potencia lo suficientemente grande como para predominar en la mezcla de las energías durante el día, y siempre y cuando la instalación se haya efectuado a un costo normalizado de energía lo suficientemente bajo, el costo de utilización de la carga se verá reducido gracias a la participación de esta fuente.

2. La segunda fuente alternativa, tal como la red eléctrica local.

De esta fuente se puede esperar una alta disponibilidad de esta fuente. No obstante, esta energía se espera que sea de mayor costo que la energía solar disponible en el sitio, por tanto, si bien ofrece robustez y estabilidad al sistema, pero encarece la operación.

3. Permite operar simultáneamente tanto a las dos fuentes de energías.

La mezcla de las dos energías se espera que tendrá el siguiente efecto:

El nivel de disponibilidad del sistema será alto. Si el sistema fotovoltaico es diseñado de manera que sea capaz de operar en completa independencia de la red, y el sistema conectado a la red es capaz de operar incluso en ausencia del sistema fotovoltaico, el resultado es un sistema con alta disponibilidad, incluso superior a la disponibilidad de la red eléctrica local.

A su vez, al mezclarse las dos energías, la suma ponderada de las energías producirá una energía a un costo entre el costo de la energía de la red y el del costo normalizado de la energía proveniente de la fuente fotovoltaica, según la participación de cada fuente durante un periodo dado.

En los momentos de baja radiación, no se percibirá una reducción en la potencia disponible, ya que la caída en la potencia fotovoltaica disponible permitirá el ingreso de más potencia eléctrica de la red local. Con ello, las variaciones en los niveles de irradiancia en realidad son imperceptibles para las cargas.

Para que el sistema híbrido tenga sentido económico, y considerando que la energía solar se obtiene de manera gratuita y libre de impuestos, el sistema fotovoltaico debe tener un costo bajo, o bien un tiempo de recuperación lo suficientemente corto, para que el costo normalizado de esta energía sea bajo.

En un sistema híbrido, al disponerse de energía solar barata durante el día, se deberá priorizar la operación diurna, en las horas con irradiancia suficiente para que predomine la fuente fotovoltaica.

La disponibilidad de la fuente rígida de potencia en la red eléctrica permite operar las cargas, en este caso un motor de bombeo, a plena capacidad, todo el tiempo.

Normalmente, en sistemas aislados, se usan controles automáticos de velocidad, para operar un sistema de bombeo a frecuencia reducida (y con ello, a baja potencia, reduciendo los litros por segundo de bombeo) con los niveles de irradiancia no permite operar la bomba a plena capacidad.

Muchos sistemas aislados pueden mantenerse operando a bajas frecuencias, siempre y cuando se mantengan una velocidad mínima sugerida por el fabricante de bomba y motor, y siempre que el sistema esté elevando agua, ya que motor y bombas se enfrían con el líquido que fluye.

Esta estrategia de operación a velocidad reducida incrementa las horas de operación de un sistema aislado, y con ellos los metros cúbicos de agua bombeados. Tal estrategia ya no es necesario aplicarla en el variador de frecuencia de un sistema híbrido, puesto que cuando se reduce la potencia del lado fotovoltaico, se puede contar con la potencia firme de la red local.

VII. Diagrama eléctrico.

En cuando un diagrama eléctrico simplificado, el sistema híbrido propuesto se puede representarse de la manera que se muestra en la Figura 26.

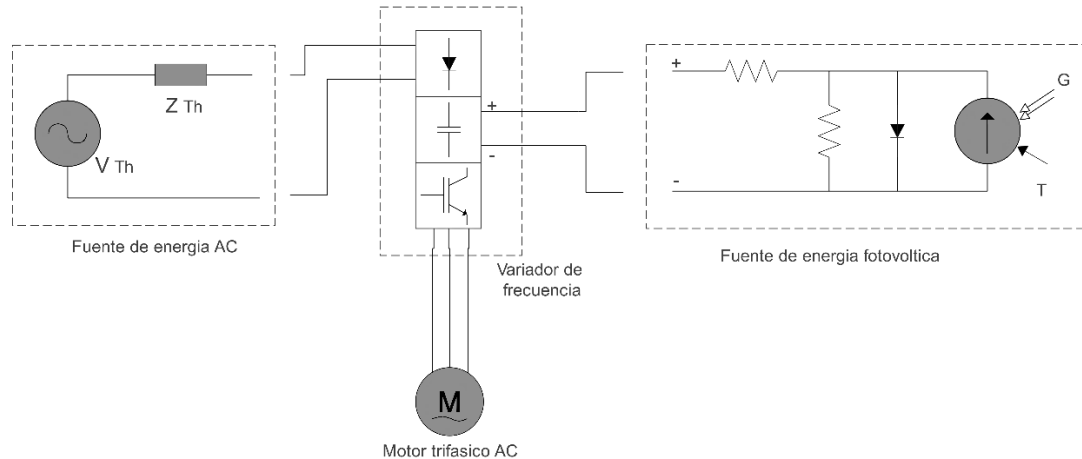


Figura 26. Diagrama eléctrico de sistema híbrido⁷⁰.

Por un lado, se tiene una fuente de voltaje, simplificada en una equivalente Thévenin de voltaje. Esta fuente de voltaje en AC representa la red eléctrica de una distribuidora local, y la impedancia de la línea local, la cual origina una caída de voltaje.

Por otro lado, el arreglo fotovoltaico se representa mediante una fuente de corriente DC⁷¹, en paralelo con un diodo y una resistencia. A su vez, esta fuente tiene una resistencia de interconexión, lo cual causará caídas de voltaje según la carga que se conecte (motor M).

Luego, al centro, el variador de frecuencia, el cual es una combinación de un convertidor AC/DC, en cascada con un bus DC, y luego un convertidor de DC/PWM.

Finalmente, al variador, del lado de señal de potencia PWM, se conecta un motor trifásico de inducción, de corriente alterna.

VIII. Dimensionamiento de sistemas híbridos.

El dimensionamiento de un sistema híbrido incluirá:

⁷⁰ Modelo de circuito de paneles solares, basado en (Roberto Herrera Salcedo, 2013).

⁷¹ Según el modelo, la fuente de corriente depende de la radiación solar (G) y de la temperatura (T). Estos datos de entrada condicionan a que un panel, de una potencia y voltaje dados, pueda producir diferentes valores de potencia a la salida según las condiciones puntuales de irradiación y temperatura en que se encuentre operando.

1. Dimensionamiento de aplicación de bombeo (bomba-motor), según fuente de agua y tipo de aplicación del bombeo.
2. Dimensionamiento y diseño de la instalación eléctrica de conexión con la red local.
3. Dimensionamiento y diseño del generador fotovoltaico.
4. Diseño de esquema de protecciones.

Los pasos 1 y 3 se encuentran en (Water-Missions, 2021), y se recomienda al lector referirse a este documento. El cálculo y dimensionamiento del sistema de bombeo, selección de bomba, está fuera de los alcances de este trabajo de graduación.

Con respecto al punto 2, el dimensionamiento y diseño del arrancador AC se basa en métodos tradicionales, como lo mostrado en (Franklin-Electric, 2015). Para este caso, el diseño deberá contemplar siempre el uso de variador de frecuencia. Para el caso del punto 4, las protecciones se pueden dimensionar siguiendo las prácticas recomendadas en el NEC⁷².

IX. Comportamiento de sistema híbrido.

En la Figura 27 se puede observar el comportamiento de la irradiancia y las fuentes de potencia para alimentar el variador de frecuencia.

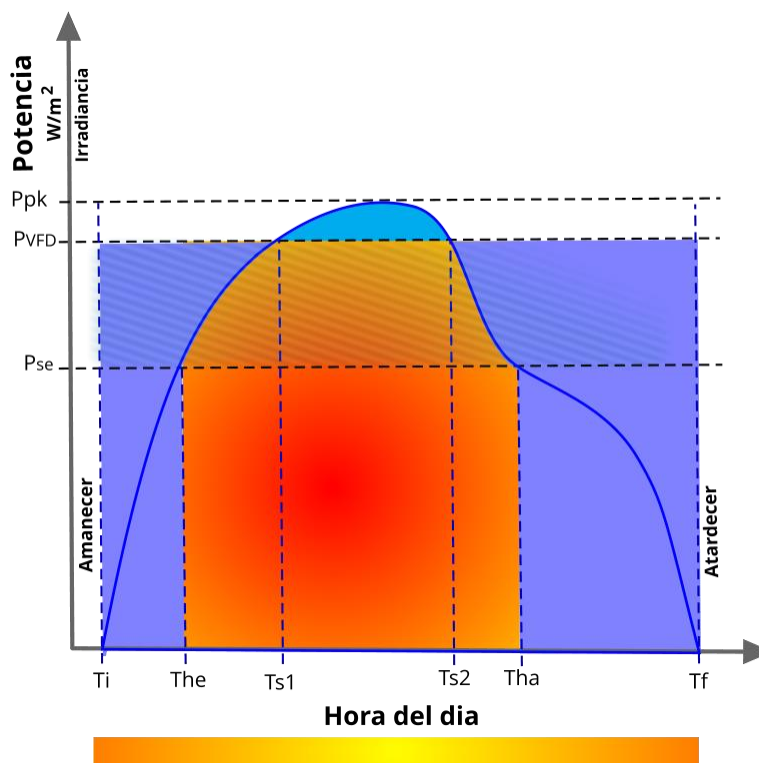


Figura 27. Curva de potencia disponible a la salida de un variador de frecuencia de un sistema híbrido.⁷³

⁷² Código Nacional Eléctrico de Estados Unidos, de aplicación común en El Salvador.

⁷³ Fuente: Elaboración propia.

Los diferentes puntos de esta curva se observan continuación:

- T_i : Es la hora del amanecer
- T_{he} : Es la hora a la cual el nivel de irradiancia permite que la fuente solar fotovoltaica aporte energía al sistema de bombeo.
- T_{s1} : Es la hora a la cual el nivel de irradiancia es tal alto, que solamente la fuente fotovoltaica es capaz de sostener el voltaje en el bus DC, y por tanto la fuente fotovoltaica aporta toda energía que sistema de bombeo consume en ese monto.
- T_{s2} : Es la hora a la cual el nivel de irradiancia baja a tal punto que la fuente fotovoltaica es insuficiente para sostener el voltaje en el bus DC, y por eso se producen ingresos de energía de la fuente AC, es decir, de la red local.
- T_{ha} : En este punto la irradiancia ha caído a punto tan bajo que la fuente fotovoltaica ha perdido capacidad de sostener el voltaje en el bus DC, y toda la potencia ingresa de la fuente AC, es decir, de la red local.
- T_f : Es la hora de la puesta de sol.

Otra manera de interpretar cómo las variaciones en la irradiancia se relacionan con el comportamiento del sistema híbrido de bombeo, se presenta en la Tabla 7

Tabla 7. Fuente de energía actuando en diferentes fracciones de un día cualquiera.⁷⁴

Tiempo de inicio	Tiempo de fin	Fuente de potencia aportando energía al sistema de bombeo
$t < T_i$	T_i	Red local
T_i	T_{he}	Red local
T_{he}	T_{s1}	Red local y generador fotovoltaico
T_{s1}	T_{s2}	Generador fotovoltaico
T_{s2}	T_{ha}	Red local y generador fotovoltaico
T_{ha}	T_f	Red local
T_f	$t >$	Red local

De la Figura 27 se puede deducir que la mayor cantidad de energía fotovoltaica que se puede inyectar al sistema de bombeo estará limitada por la cantidad de horas-sol pico del lugar.

Por tanto, tomando un día soleado promedio para calcular el valor máximo que puede tomar k_{efv} en la ecuación 3.14:

⁷⁴ Fuente: Elaboración propia.

$$k_{efv} = \frac{(Horas\ Sol\ Pico) * (Potencia\ de\ la\ carga) * \eta_{fv}}{(Horas\ Sol\ Pico) * (Potencia\ de\ la\ carga)} \quad (3.25)^{75}$$

Simplificando, se encuentra que:

$$k_{efv} = \eta_{fv} \quad (3.26)$$

El coeficiente de participación de la energía fotovoltaica, será como máximo igual a la eficiencia del sistema de bombeo operando con fuente fotovoltaica, como un sistema aislado.

Por tanto, se hace evidente que aquellas aplicaciones en que el agua se bombee entre las horas de radiación suficiente serán los que tendrán **mayor** participación de la fuente fotovoltaica aportando energía al sistema.

En estos casos, se puede esperar que la energía de origen fotovoltaico supere valores de 90%⁷⁶ de participación, sin llegar al 100%, ya que en las horas de baja irradiancia siempre entrará la potencia eléctrica de la red local. Este ingreso de la energía de la red puede suceder al amanecer, al atardecer, y durante las horas de alta nubosidad. Con lo anterior, se puede esperar que el **coeficiente máximo de participación** sea cercano a:

$$k_{efv} = 0.90 \quad (3.27)$$

Luego, haciendo el mismo análisis para determinar el **coeficiente mínimo de participación** de la energía fotovoltaica, tomando como base un día de 24 horas, se puede llegar a que:

$$k_{efv} = \frac{(Horas\ Sol\ Pico) * (Potencia\ de\ la\ carga) * \eta_{bfv}}{(24\ horas) * (Potencia\ de\ la\ carga)} \quad (3.28)$$

Simplificando:

$$k_{efv} = \frac{(Horas\ Sol\ Pico) * \eta_{bfv}}{(24\ horas)} \quad (3.29)$$

⁷⁵ Fuente: Elaboración propia.

⁷⁶ En Capítulo 4 se observará que, en la práctica, la participación de la energía solar, observada en instalaciones reales, es inferior al 90%, e incluso cercana a 80%.

Así, por ejemplo, en un sitio con 4.8 horas sol pico y 80% de eficiencia global (con fuente fotovoltaica), se tendrá que:

$$k_{efv} = \frac{(4.8 \text{ horas}) * 0.8}{(24 \text{ horas})} \quad (3.30)$$

$$k_{efv} = 0.2 * 0.8$$

$$k_{efv} = 0.16$$

Un análisis de recuperación de la inversión simple, usando un costo de la energía de la red de \$0.25/kWh, versus un costo de la energía fotovoltaica

En otros casos, la eficiencia puede variar, según la nubosidad del lugar, la latitud, niveles de contaminación del aire, topografía de los alrededores y otros factores que perjudiquen los niveles de irradiancia y la eficiencia del sistema.

Si, por otro lado, se usan valores de prueba de r_c diferentes en la ecuación (3.22), para diferentes valores de prueba de k_{efv} , se pueden obtener los costos normalizados de energía porcentuales (en relación con el costo de la energía de distribuidora) de la Tabla 8.

Tabla 8. Evaluación de ecuación (3.22) con distintos valores de r_c y de k_{efv} .⁷⁷

	k_{efv}										
	0	0.16	0.26	0.35	0.44	0.53	0.62	0.71	0.8	0.89	1
$r_c = 0.1$	100%	86%	77%	69%	60%	52%	44%	36%	28%	20%	10%
$r_c = 0.25$	100%	88%	81%	74%	67%	60%	54%	47%	40%	33%	25%
$r_c = 0.5$	100%	92%	87%	83%	78%	74%	69%	65%	60%	56%	50%
$r_c = 0.7$	100%	95%	92%	90%	87%	84%	81%	79%	76%	73%	70%
$r_c = 0.85$	100%	98%	96%	95%	93%	92%	91%	89%	88%	87%	85%
$r_c = 1$	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Gráficamente, los valores de la Tabla 8 se pueden ver en la siguiente figura:

⁷⁷ Fuente: Elaboración propia, con resultados de simulaciones.

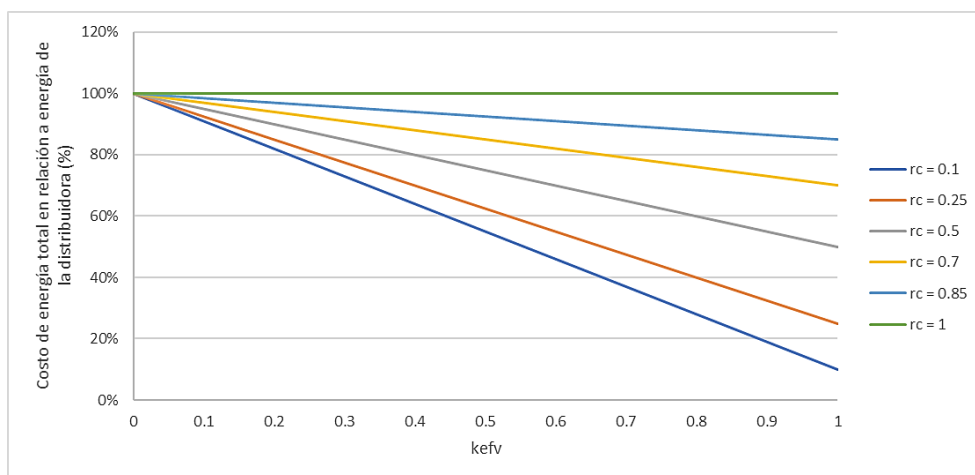


Figura 28. Costo total de energía en un sistema híbrido, en relación a la energía de la distribuidora.⁷⁸

En la Figura 28, un valor de $r_c = 0.25$, representa un escenario en donde la energía de la red vale el cuádruple del costo normalizado de la energía de fotovoltaica. Así, por ejemplo, si la energía de la red cuesta US\$0.24, la energía fotovoltaica cuesta US\$0.06.

En ese escenario, leyendo valores de la Tabla 8, se puede observar que cuando la participación de la energía fotovoltaica represente el 89% de toda la energía consumida por el sistema ($k_{efv} = 0.89$), el costo total normalizado de la energía consumida en el sistema será solamente 25% del costo de la energía de la distribuidora.

Es decir, para este ejemplo dado, existe un ahorro económico potencial de 75%, *al menos durante el primer año de operación*, ya que luego los paneles fotovoltaicos se van degradando y aportando menos energía, dependiendo del tamaño del arreglo fotovoltaico.

Es oportuno notar que, para incrementar la participación de la energía fotovoltaica (k_{efv}), en realidad se debe mantener la operación en horas de radiación solar.

Si, por el contrario, el sistema de bombeo comienza a operar más horas, incluyendo horas nocturnas, eso se traduce en mayor inyección de energía de la red, y con ello un acercamiento de costo normalizado de la energía al costo de la energía de la red.

Adicionalmente, un sistema fotovoltaico tendrá un máximo posible de energía que puede inyectar, y con ello un ahorro máximo de energía y de dinero.

⁷⁸ Fuente: Elaboración propia, con resultados de simulaciones.

X. Costeo por bloques o componentes principales, orientado a estructura de costos.

El costeo se ha realizado un análisis de precios considerando el costo de un sistema de bombeo de 7.5 y 30 hp. Primero, se ha diseñado y costeoado como sistema aislado, para ello se ha dimensionado un sistema fotovoltaico aislado⁷⁹, con la metodología propuesta en la Figura 12 del capítulo 2. El costo de este diseño se presenta en la siguiente tabla. Un detalle pormenorizado del costeo puede encontrarse en el Anexo V (a).

Tabla 9. Costeo de sistema eléctrico fotovoltaico para bombeo, tipo aislado.⁸⁰

#	Elemento	Costo sistema de 7.5 hp ⁸¹	Costo sistema de 30 hp
1	Paneles solares y estructuras	\$8,750.72 ⁸²	\$ 34,320.00 ⁸³
2	Equipos en el exterior	\$165.79	\$ 458.91
3	Tablero DC (incluye variador)	\$1,869.16	\$ 3,263.35
	Total	\$10,785.67	\$ 38,042.26
	Potencia pico instalada en paneles solares, kW _{pico}	12.96	51.84
	Costo \$ _{total} /hp	\$1,438.09	\$1,268.08
	Costo \$ _{total} /kW _{pico}	\$0.83	\$0.73

Luego de diseñado un gabinete de arranque y protección en AC, como si el equipo de bombeo fuera a ser alimentado solamente por la red corriente eléctrica local en AC. Para una lista detallada de los componentes, puede consultarse el Anexo v (b). El resumen del coste de cada tablero de arranque y protección se muestra en la siguiente tabla:

⁷⁹ Esto se hace para garantizar que este sistema tiene capacidad para operar de manera aislada, si bien en sistemas híbridos, el arreglo fotovoltaico podría ser de menor tamaño, pues no se requiere que la fuente fotovoltaica sea tan robusta para que el sistema de bombeo opere, pues la alimentación de la red aporta robustez y estabilidad a la operación.

No obstante, un arreglo fotovoltaico grande garantizará que la fuente fotovoltaica predomine sobre en el suministro de energía, la cual debería ser de más bajo costo.

⁸⁰ Fuente: Elaboración propia, con valores de cotizaciones locales de El Salvador.

⁸¹ Aun el total y costos internos son los mismos, se han reorganizado los datos de una manera diferente al Capítulo 2, dado que ya no interesa presentar a detalle todos los accesorios incluidos en un sistema aislado. La intención es coincidir con la clasificación de este capítulo, en que se presentan valores organizados por tableros, tal y como se instalan en la práctica.

⁸² Arreglo fotovoltaico es de 32x405 W = 12,960 W_{pico} en sistema de 7.5 hp. En promedio, se usaron 1728 W_{pico}/hp. Ver Tabla 25 en Anexo IV para más detalles.

⁸³ Arreglo fotovoltaico es de 96x540 W = 51,840 W_{pico} en sistema de 30 hp. En promedio, se usaron 1728 W_{pico}/hp. Ver Tabla 27 en Anexo V para más detalles de costeo.

Tabla 10. Costeo de sistema eléctrico para bombeo, conectado a red.⁸⁴

#	Elemento	Costo sistema de 7.5 hp	Costo sistema de 30 hp ⁸⁵
1	Tablero AC (incluye variador)	\$1,813.26 ⁸⁶	\$ 3,550.02
	Total	\$1,813.26	\$ 3,550.02
	Costo \$/hp	\$241.77	\$116.67

Finalmente, se diseña un sistema híbrido, que toma en cuenta los elementos comunes del sistema conectado a la red, más el sistema fotovoltaico, y se le añaden los elementos de control necesario. Para detalles, puede consultarse el Anexo V (c).

En resultado se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Costeo de un sistema híbrido de 7.5 y 30 hp⁸⁷.

#	Elemento	Costo sistema híbrido de 7.5 hp	Costo sistema híbrido de 30 hp ⁸⁸
1	Paneles solares y estructura	\$8,750.72	\$34,320.00
2	Equipos en exterior	\$165.79	\$458.91
3	Tablero DC	\$897.29	\$1,351.10
4	Tablero de Control	\$1,523.45	\$1,770.81
5	Tablero AC	\$1,835.22	\$3,550.02
	Total	\$13,172.47	\$41,450.84
	Costo \$/hp	\$1,756.33	\$1,381.69
	Costo \$ _{total} /kW _{pico}	\$1.02	\$0.80

Los valores de la Tabla 11 no son la suma aritmética de los valores dados en tablas Tabla 9 y Tabla 10. Se puede observar una disminución en el costo (\$_{total}/kW_{pico}) a medida que se incrementa la potencia de la instalación.

En la Tabla 12 se muestra los incrementos en inversión necesarios para convertir un sistema aislado o conectado a red, a híbrido.

⁸⁴ Fuente: Elaboración propia, con montos de cotizaciones locales.

⁸⁵ Ver Tabla 26 en Anexo V para más detalles.

⁸⁶ Valor tomado de Capítulo 1.

⁸⁷ Valores monetarios obtenidos a partir de cotizaciones obtenidas en mercado de El Salvador.

⁸⁸ Ver Tabla 28 en Anexo V para más detalles.

Tabla 12. Resumen de costos en US\$/hp y diferenciales de costos.⁸⁹

	Tipo de sistema de bombeo					
	Aislado		Conectado a la red		Híbrido	
	7.5 hp	30 hp	7.5 hp	30 hp	7.5 hp	30 hp
Costo de instalación de fuente, en \$/hp	\$1,438.09	\$1,268.08	\$241.77	\$120.03	\$1,753.40	\$1,381.69
[%] del sistema híbrido	82%	92%	14%	9%	100%	100%
Incremento en \$/hp para convertir a híbrido	\$315.31	\$113.61	\$1,511.63	\$1,261.66	0	0
[%] de incremento en inversión, para convertir a híbrido.	22%	9%	625%	1051%	0%	0%

De la Tabla 12 se pueden presentar los siguientes casos relevantes:

Caso 1. Pasar de un sistema conectado a la red a sistema híbrido.

Según los valores presentados en la Tabla 12, el costo de un sistema conectado a red representa solamente un 14% del costo de un sistema híbrido, para el caso de una bomba de 7.5 hp. Para convertir este sistema de conectado a red, a híbrido, se tendría que incrementar lo invertido en 625% la inversión.

Si la bomba es de 30 hp, el costo del sistema conectado a red es apenas 9% del costo de un sistema híbrido. Para convertir un sistema de esta capacidad, de conectado a red a híbrido, se tendría que incrementar la inversión un 1051%.

Los valores diferenciales anteriores no toman en cuenta la posible inversión en subestación eléctrica, pero en cualquier caso se puede afirmar, en base a los valores muestreados de 7.5 y 30 hp, que para pasar de un sistema conectado a red, a uno híbrido, **la inversión será significativa** (esto se puede asociar al costo relevante de los paneles solares). Para los valores de 7.5 y 30 hp, los diferenciales de inversión para hacer el cambio rondaron 1511 y 1260 \$/hp, respectivamente.

Caso 2. Pasar de un sistema aislado a un sistema híbrido.

Con los valores muestreados en la Tabla 12, de 7.5 y 30 hp, si se analiza el caso de convertir un sistema aislado a uno híbrido, el sistema aislado ya representa 82% de la inversión necesaria de un sistema híbrido, para el caso de una bomba de 7.5 hp, y de 92%, para una bomba de 30 hp. Esto se debe a que el sistema aislado ya cuenta con

⁸⁹ Fuente: Elaboración propia, con montos de cotizaciones locales de El Salvador.

paneles fotovoltaicos, los cuales representan la mayor parte del costo de un sistema híbrido.

Como el sistema aislado no tiene exactamente los mismos componentes que la parte solar del sistema híbrido, la inversión adicional que debe realizarse es de 22% convertirlo de aislado a híbrido, en el caso de tener un sistema de 7.5 hp, y esa inversión adicional será de solamente 9% para un caso con capacidad de 30 hp.

En los valores anteriores no se toma en cuenta la posible inversión en subestación eléctrica⁹⁰ para bombas con potencias por arriba de 7.5 hp. Para hacer estas conversiones de aislado a híbrido en las potencias muestreadas, se requerirá una inversión adicional de 315 o 113 \$/hp, si se trata de un sistema de 7.5 o de 30 hp, respectivamente.

En resumen, resulta menos costoso convertir un sistema aislado a híbrido, que convertir un sistema conectado a red a híbrido.

XI. Estructura de costos de sistemas eléctrico híbrido para bombeo de agua.

En la Tabla 13 se muestran valores de los porcentajes del costo que representan los principales componentes de un sistema de bombeo híbrido.

Tabla 13. Porcentajes de costos de cada componente, estación de bombeo híbrida de 7.5 y 30 hp según diseño propuesto.⁹¹

#	Elemento	Costo sistema híbrido de 7.5 hp	Costo sistema híbrido de 30 hp
1	Paneles solares y estructura	66.5%	82.8%
2	Equipos en exterior	1.3%	1.1%
3	Tablero DC	6.8%	3.3%
4	Tablero de Control	11.6%	4.3%
5	Tablero AC	13.8%	8.6%
	Total	100%	100%

En la Tabla 13 se observa que los elementos que se llevan la mayor parte del costo son las estructura y paneles fotovoltaicos, y a su vez se observa una concentración del costo de estos mismos componentes, a medida que se incrementa la capacidad del proyecto.

⁹⁰ Los diseños conectados a la red cotizados asumen que ya se dispone de acometida en baja tensión, con capacidad suficiente de suministro de potencia a la estación de bombeo.

⁹¹ Fuente: Elaboración propia.

XII. Costeo de generadores fotovoltaicos para aplicación híbrida.

Se efectuaron diseños y cotizaciones de sistemas de diferente tamaño, tomando como muestra los valores los valores de la Tabla 14:

Tabla 14. Potencias muestreadas de sistemas de bombeo.⁹²

Potencia de bombeo (hp)	Potencia eléctrica motor (kW)	Potencia total de paneles (kWp)
1	1.1	3.24
2	2.0	3.24
7.5	7.2	12.96
15	13.8	22.68
30	27.0	51.84
60	53.3	91.2
120	104.1	193.8
250	211.8	376.2

Con valores de cotizaciones recientes, y empleando la metodología del Capítulo 2⁹³, se realizó un análisis para determinar el costo tanto de un generador fotovoltaico. Los valores resumidos de potencia total del generador fotovoltaico (en kWp o kWpico), y el factor cálculo (relación de potencias en kWp/hp) se muestra en la Figura 29 a continuación.

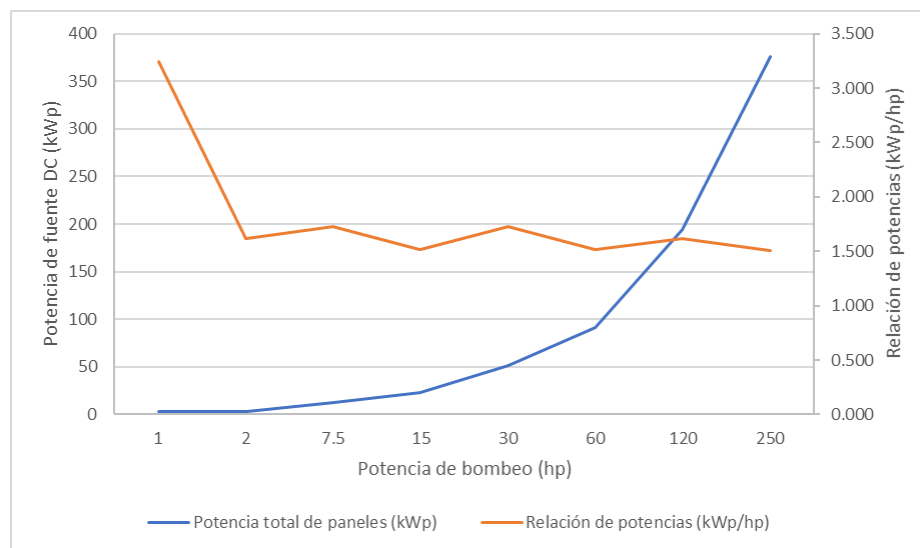


Figura 29. Relación de costos de sistemas híbridos de diferentes capacidades.⁹⁴

⁹² Fuente: Elaboración propia.

⁹³ Se usó el procedimiento indicado en (Water-Missions, 2021) para dimensionar los generadores fotovoltaicos.

⁹⁴ Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 30 se muestran de manera comparativa, las curvas de costos unitarios tanto de la fuente DC versus el sistema híbrido completo (incluyendo los tableros de control, AC, DC, cableado y accesorios).

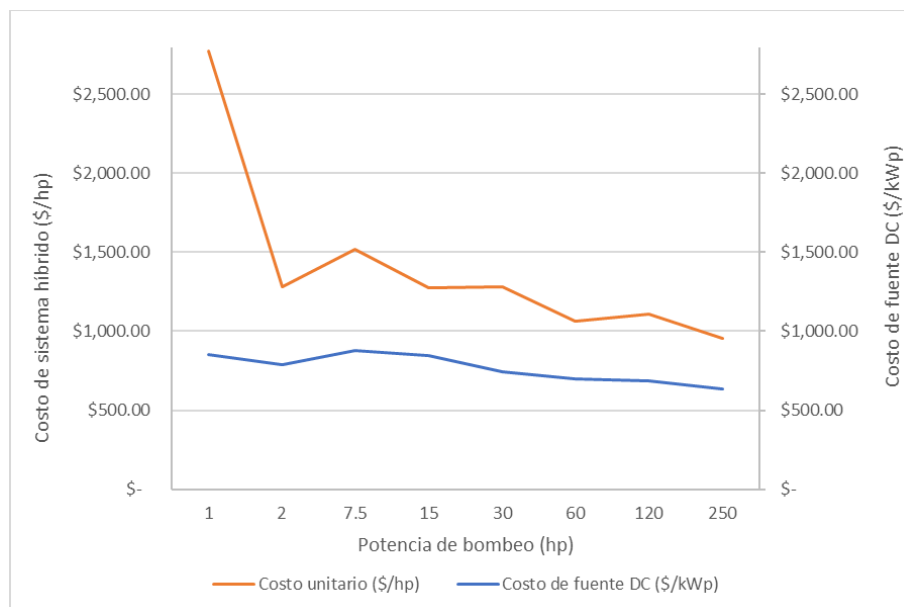


Figura 30. Costo unitario de fuente DC comparado con sistema híbrido.⁹⁵

En la Figura 31 se muestran los costos solamente de la fuente DC fotovoltaica, a nivel unitario en \$/hp.

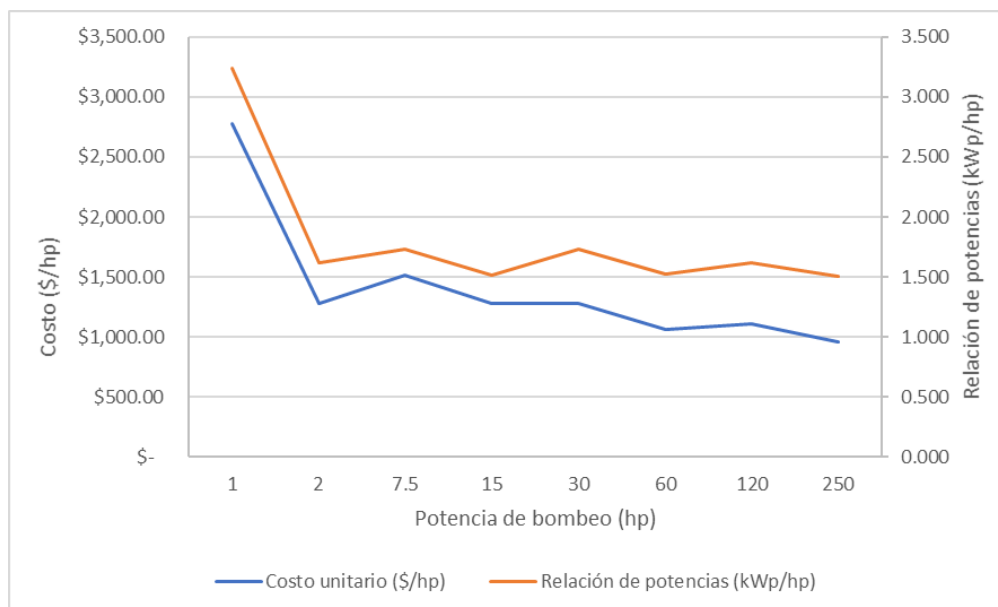


Figura 31. Costo en dólares por cada hp y kWp por cada hp.⁹⁶

⁹⁵ Fuente: Elaboración propia.

⁹⁶ Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 31 se observa una reducción sostenida en los precios a partir de 7.5 hp, con montos en \$/hp que van de 1500 a 1000 \$/hp.

Por otro lado, la relación de potencias del generador versus potencia en hp de bombeo, varía desde 3.24 hasta 1.50. Para valores superiores a 2 hp, el valor promedio de este factor es de 1.61⁹⁷.

Luego de hacer pruebas de diseños y cotizaciones de sistemas de bombeo, según capacidades de la Tabla 14, se pueden observar las tendencias de distribución de costos ilustrado en la Figura 32.

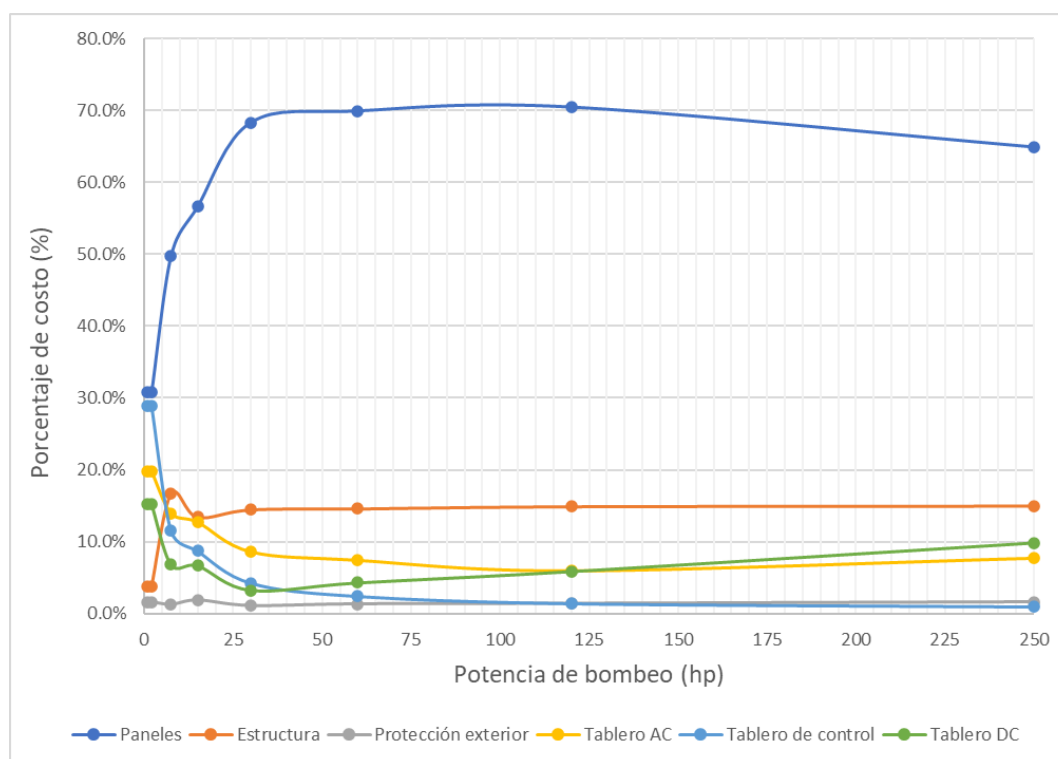


Figura 32. Evaluación de costos internos en sistemas híbridos de diferentes potencias.⁹⁸

En la Figura 32 se observa cómo la importancia de los paneles solares en el costo total del sistema de alimentación se vuelve predominante para capacidades desde 7.5 hp, con una participación alrededor del 70%, para capacidades a partir de 30 hp. Notar que este porcentaje está relacionado al multiplicador (relación de potencias en kWp/hp) de la Figura 31.

Así, por ejemplo, si este multiplicador se reduce, la reducción en el costo de la instalación puede ser significativa. Esto dependerá de cada sitio, según los niveles de irradiancia

⁹⁷ Este número es resultado de optimización realizada para este trabajo de graduación, tomando en cuenta una demanda arbitraria de agua. Si se fijan otros valores de consumo de agua, se pueden obtener otros valores, ya sea mayores o menores.

⁹⁸ Fuente: Elaboración propia, con valores de cotizaciones locales de El Salvador.

disponibles, combinados con la aplicación o uso del agua, con su respectivo promedio diario en metros cúbicos de agua bombeada.

XIII. Observaciones del capítulo.

Los sistemas híbridos propuestos no tienen capacidad de inyectar potencia a la red eléctrica de distribución externa, por tanto, y con la legislación actual de El Salvador a la fecha de elaboración de este estudio, no se requiere realizar trámites u obtener permisos de la distribuidora eléctrica, ni cambio de medidor⁹⁹.

El diseño híbrido propuesto en este trabajo de graduación puede producir ahorros, siempre y cuando el costo normalizado de la energía en la fuente fotovoltaica sea menor que el costo de la energía de la red local.

El diseño de sistema de bombeo con fuentes híbridas de energía puede producir ahorros, siempre y cuando se garantice la operación durante horas diurnas.

Existe un máximo ahorro que un sistema híbrido puede producir, y está relacionado, principalmente al tamaño del arreglo fotovoltaico (ya que con los costos actuales los paneles y estructuras son el componente de mayor peso económico en la instalación) y de la horas-sol del sitio de aplicación.

Se puede convertir un sistema conectado a la red a uno híbrido, agregando la fuente fotovoltaica, si bien en este caso la inversión puede ser significativa. El ahorro debe evaluarse para determinar si se justifica la aplicación, según sea el tipo de uso del agua, y las horas de bombeo durante cada jornada.

Un sistema aislado, si se dispone de conexión a la red, se puede convertir a híbrido, y en ese caso la inversión no es tan significativa. Por supuesto, esto supone que la red de una distribuidora existe suficientemente cerca del sitio de bombeo, para que la interconexión sea realizada a bajo costo.

Si bien para los valores probados de potencias de bombeo, desde 1 hasta 250 hp, se obtuvieron relaciones de kWp predominantemente cerca de 1.61, esto corresponde para ciertas ubicaciones en El Salvador, y demandas de agua fijas. Si varía la demanda de agua diaria, así como la ubicación, puede cambiar el factor de multiplicación, y con ello el tamaño del arreglo fotovoltaico.

⁹⁹ Según Art.1 y Art. 4 de normativa para Usuario final Productor Renovable (UPR), referirse a (SIGET, 2017), vigente a la fecha de elaboración de este documento, la normativa UPR solamente aplica a instalaciones de generación con capacidad de inyectar energía a la red de la distribuidora. El diseño usado en esta tesis, al emplear variador de frecuencia, el cual solamente tiene un convertidor AC/DC unidireccional interno, no tiene capacidad de inyectar energía del generador fotovoltaico hacia la distribuidora eléctrica.

Capítulo 4. Análisis comparativo y resultados experimentales de diferentes diseños de sistemas de alimentación, aislado, conectado a la red e híbrido de alimentación simultánea de la red y solar-fotovoltaica.

i. Comparación económica entre sistemas con diferentes fuentes.

Para esta sección, se presentarán diferentes comparaciones de diseños en diferentes escalas. En el análisis, no se toma en cuenta el tipo de motor o bomba a usar, ya que los alcances de este trabajo llegan hasta constituir las fuentes de potencia eléctrica.

A fin de poder comparar diferentes sistemas con distintas capacidades de operación, se usará la siguiente restricción:

Se tomarán en cuenta solamente la cantidad de horas máximas por día que puede aportar energía un generador fotovoltaico, debidamente dimensionado, para hacer funcionar a plena potencia el sistema que está alimentando.

Así, por ejemplo, según datos del Banco Mundial¹⁰⁰, para El Salvador, los niveles de irradiancia varían entre 4.0 y 5.0 kWh/kWp. Por ello, se estará usando un valor de 4.5 kWh/kWp (o también llamados 4.5 horas-sol pico), al ser un número intermedio. Un mapa de irradiación del territorio salvadoreño se muestra en la Figura 33.

Con lo anterior, y usando los sistemas dimensionados en Capítulo 3 (7.5 hp y 30 hp) para operación híbrida, tomando los valores empíricos registrados en estos sistemas (los cuales fueron implementados en San Martín y Suchitoto, respectivamente), se realizaron algunas observaciones, específicamente sobre la cantidad de energía que un sistema híbrido puede obtener de la fuente fotovoltaica.

¹⁰⁰ (Banco Mundial, 2020) Datos de 1999 a 2018.

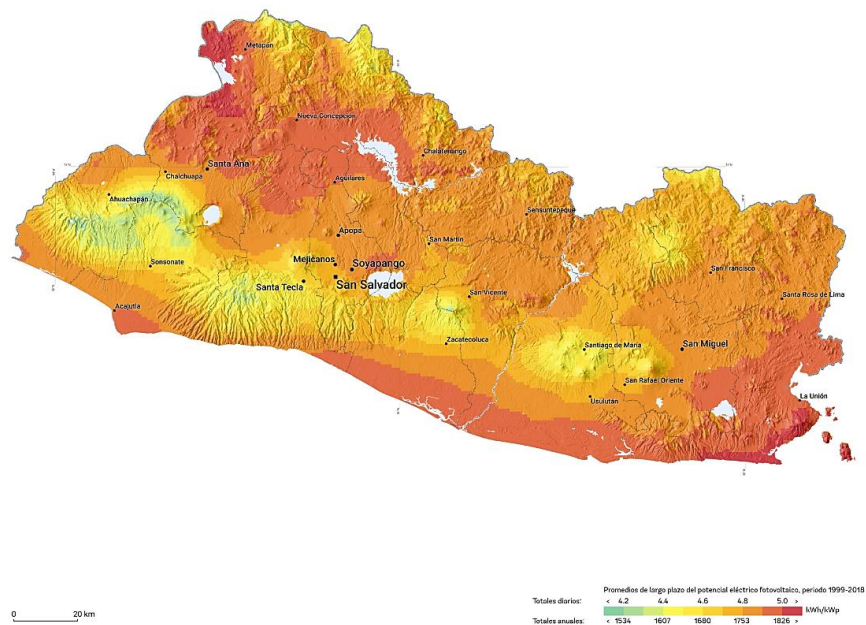


Figura 33. Niveles de irradiación solar en El Salvador¹⁰¹.

Los costos normalizados de energía (US\$/kWh) para diferentes tipos de tecnologías (conectado a red, aislado e híbrido), para potencias hasta 250 hp y operación de 4.5 horas/día, se muestra en la Figura 34.

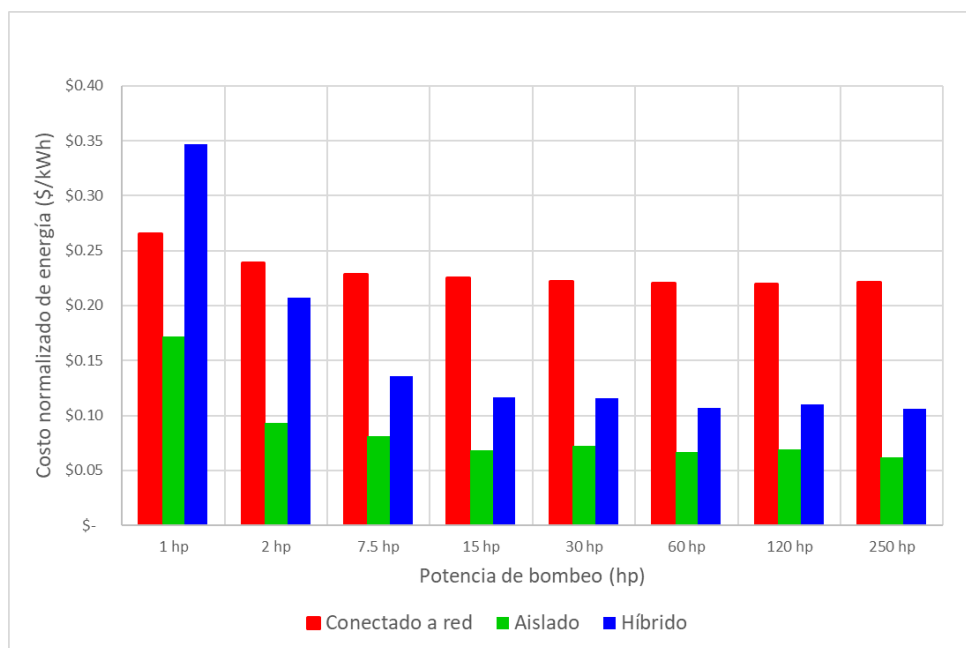


Figura 34. Comparación de costos de instalaciones de sistemas de potencia para bombeo de agua con tecnología híbrida, aislada y conectada a la red, rango de 1 a 20 hp.¹⁰²

¹⁰¹ Fuente: Tomado de Atlas del Banco Mundial (Banco Mundial, 2020)

¹⁰² Fuente: Elaboración propia. Se han usado tarifas eléctricas según Anexo VI para estos cálculos.

Los valores de costo normalizado de energía, en el caso de sistemas híbridos, han sido calculados asumiendo un 80% de energía proveniente del generador fotovoltaico (energía solar).

En la Figura 34 se puede observar cómo el costo normalizado de la energía, en todos los casos, suele ser más alto a medida que el proyecto es más pequeño.

Este fenómeno se presenta porque algunos equipos, como los tableros de control, pueden tener un costo que varía muy poco, independiente del tamaño del proyecto. Luego, el costo de estos componentes con costos casi fijos va teniendo menos peso a medida que se incrementa la potencia del proyecto.

Los datos de la Figura 34 se obtuvieron realizando, usando los datos del Anexo X, asumiendo un tiempo de operación de 4.5 horas/día, y 80% de participación de energía solar en el caso del sistema híbrido. Si la participación del sistema híbrido se mantiene en 80%, y se eleva el número de horas de operación al máximo previsto de 10 horas/día, se obtienen los resultados de la siguiente figura.

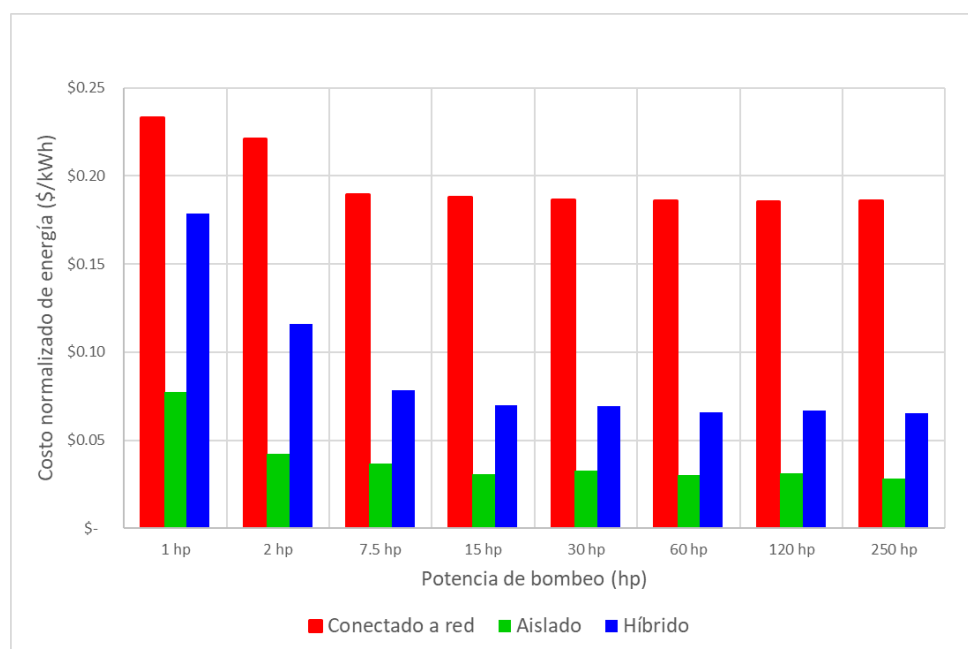


Figura 35. Comparación de costos de instalaciones de sistemas de potencia para bombeo de agua con tecnología híbrida, aislada y conectada a la red, rango de 1 a 250 hp.¹⁰³

Si se toman otras cantidades de horas de operación, asumiendo un 80%¹⁰⁴ de participación del generador fotovoltaico en la mezcla de energías, se obtiene los costos normalizados de la energía (total consumida por el motor eléctrico o carga) de la siguiente tabla:

¹⁰³ Fuente: Elaboración propia.

¹⁰⁴ Este porcentaje se usa para fines referenciales. Valores reales varían cada día, o entre época lluviosa y seca.

Tabla 15. Costos normalizados de energía con diferentes cantidades de horas de operación¹⁰⁵, sistema híbrido, 80% de participación de energía solar.¹⁰⁶

Horas de operación de sistema diaria	Potencia del sistema							
	1 hp	2 hp	7.5 hp	15 hp	30 hp	60 hp	120 hp	250 hp
4 horas	\$0.3833	\$0.2270	\$0.1467	\$0.1257	\$0.1244	\$0.1151	\$0.1180	\$0.1140
4.5 horas	\$0.3466	\$0.2071	\$0.1355	\$0.1167	\$0.1155	\$0.1072	\$0.1098	\$0.1062
5 horas	\$0.3172	\$0.1911	\$0.1265	\$0.1095	\$0.1084	\$0.1009	\$0.1032	\$0.1000
5.5 horas	\$0.2932	\$0.1781	\$0.1192	\$0.1037	\$0.1026	\$0.0957	\$0.0978	\$0.0949
6 horas	\$0.2732	\$0.1672	\$0.1131	\$0.0988	\$0.0978	\$0.0914	\$0.0934	\$0.0907
6.5 horas	\$0.2563	\$0.1580	\$0.1079	\$0.0947	\$0.0937	\$0.0878	\$0.0896	\$0.0871
7 horas	\$0.2417	\$0.1502	\$0.1034	\$0.0911	\$0.0901	\$0.0847	\$0.0863	\$0.0841
7.5 horas	\$0.2292	\$0.1433	\$0.0996	\$0.0880	\$0.0871	\$0.0820	\$0.0835	\$0.0814
8 horas	\$0.2181	\$0.1374	\$0.0962	\$0.0854	\$0.0844	\$0.0796	\$0.0810	\$0.0791
8.5 horas	\$0.2084	\$0.1321	\$0.0933	\$0.0830	\$0.0821	\$0.0775	\$0.0788	\$0.0770
9 horas	\$0.1998	\$0.1274	\$0.0906	\$0.0809	\$0.0800	\$0.0757	\$0.0769	\$0.0752
9.5 horas	\$0.1921	\$0.1232	\$0.0882	\$0.0790	\$0.0781	\$0.0740	\$0.0752	\$0.0736
10 horas	\$0.1851	\$0.1194	\$0.0861	\$0.0773	\$0.0764	\$0.0725	\$0.0736	\$0.0721

Gráficamente, los valores de la Tabla 15 se presentan en la siguiente figura.

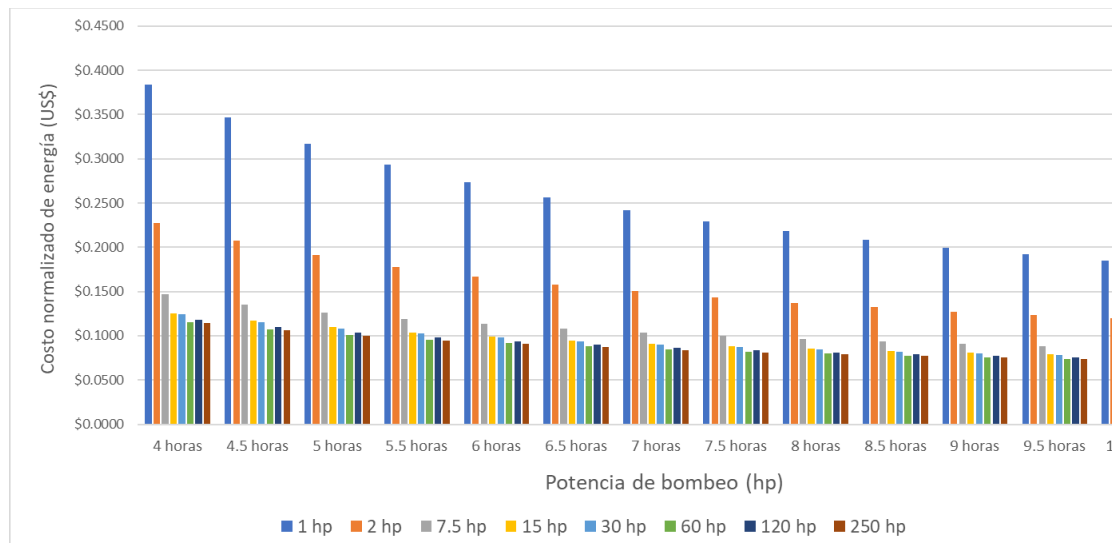


Figura 36. Costo normalizado de la energía en sistemas de bombeo híbridos de diferentes capacidades, desde 4 hasta 10 horas de operación diarias, 80% de participación de energía solar.¹⁰⁷

¹⁰⁵ Se usaron los periodos horarios indicados en Anexo VII y las tarifas de Anexo VI para estos cálculos.

¹⁰⁶ Fuente: Elaboración propia.

¹⁰⁷ Fuente: Elaboración propia.

Luego de analizar la variación en los costos normalizados de energía en función de las horas de operación, con una participación de 80% de energía solar en la mezcla de energía que consume el sistema de bombeo, se procedió a evaluar cómo varía el ahorro, luego de 20 años de operación del sistema, asumiendo un cambio total de los tableros de arranque luego de 10 años de operación, y una degradación de los paneles solares de 1% anual.

Los valores del ahorro acumulado en 20 años se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 16. Ahorros de energía para diferentes potencias de bombeo y diferentes porcentajes de participación de energía solar.¹⁰⁸

Potencia de bombeo (hp)	1	2	7.5	15	30	60	120	250
80% participación solar en año 0	53.8%	44.0%	46.7%	50.5%	48.9%	50.5%	49.6%	52.0%
60% participación solar en año 0	40.4%	33.0%	35.0%	37.9%	36.7%	37.9%	37.2%	39.0%
40% participación solar en año 0	26.9%	22.0%	23.3%	25.3%	24.4%	25.3%	24.8%	26.0%

En la siguiente figura se muestran gráficamente los valores de la Tabla 16.

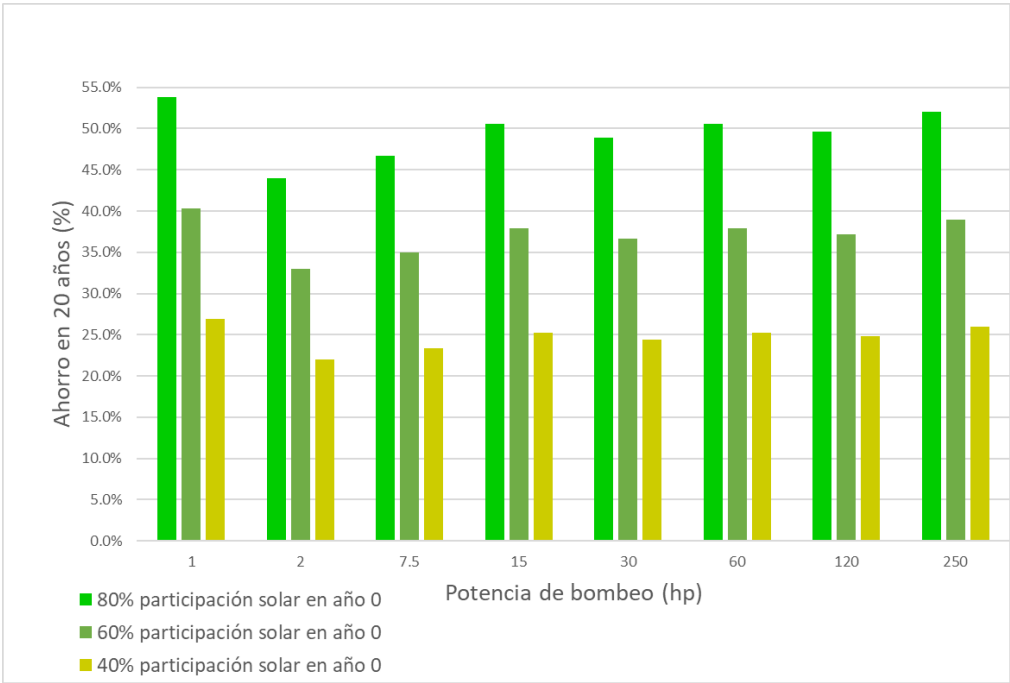


Figura 37. Porcentaje de ahorro luego de 20 años de operación de cada sistema.¹⁰⁹

¹⁰⁸ Fuente: Elaboración propia.

¹⁰⁹ Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 37 se observa cómo el porcentaje de ahorro traído del presente, luego de 20 años de operación, se ve reducido si se reduce la participación de la fuente solar (de menor precio). A su vez, se observa cómo, con los valores usados de costos normalizados de energía fotovoltaicos y de la red, el ahorro acumulado luego de 20 años tiende al 50% para el mayor valor de participación supuestos, que es de 80%¹¹⁰.

ii. Tiempo de recuperación de la inversión.

Empleando diferentes valores de participación de la energía solar¹¹¹, se efectuó un análisis del tiempo de recuperación de la inversión. Los resultados se presentan a continuación:

Tabla 17. Tiempos de recuperación de la inversión (en años), 80% de participación de generador fotovoltaico.¹¹²

Horas días de operación	Potencia del sistema (hp)							
	1.00	2.00	7.50	15.00	30.00	60.00	120.00	250.00
4 horas	7.9	6.9	5.4	4.7	4.5	4.5	4.4	4.2
4.5 horas	7.1	6.1	4.8	4.2	4.0	4.0	3.9	3.7
5 horas	6.3	5.5	4.3	3.8	3.6	3.6	3.5	3.3
5.5 horas	5.8	5.0	3.9	3.4	3.3	3.2	3.2	3.0
6 horas	5.3	4.6	3.6	3.1	3.0	3.0	2.9	2.8
6.5 horas	4.9	4.2	3.3	2.9	2.8	2.7	2.7	2.6
7 horas	4.5	3.9	3.1	2.7	2.6	2.5	2.5	2.4
7.5 horas	4.2	3.7	2.9	2.5	2.4	2.4	2.4	2.2
8 horas	4.0	3.4	2.7	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1
8.5 horas	3.7	3.2	2.5	2.2	2.1	2.1	2.1	2.0
9 horas	3.5	3.1	2.4	2.1	2.0	2.0	2.0	1.9
9.5 horas	3.3	2.9	2.3	2.0	1.9	1.9	1.9	1.8
10 horas	3.2	2.8	2.2	1.9	1.8	1.8	1.8	1.7

Gráficamente, algunos de los valores de la Tabla 17 se muestran en la Figura 38.

¹¹⁰ Este valor fue obtenido de observaciones empíricas en dos sitios muestreados, en base a generadores fotovoltaicos dimensionados de acuerdo a la metodología explicada en el Capítulo 3, y en dos sitios específicos de El Salvador. Diferentes porcentajes de participación pueden obtenerse en otros sitios y con generadores de diferentes dimensiones.

¹¹¹ Para los análisis de tiempo de recuperación de la inversión, se han usado ecuaciones de retorno simple, ya que solamente interesan los tiempos de recuperación cortos, como un indicativo de proyectos con viabilidad. Los tiempos de recuperación largos, serán descartados o inviables en todos los casos, ya sean calculados con retorno simple o compuesto. Cualquier tasa de interés aplicada en tiempos de recuperación compuestos producirá tiempos de recuperación más largos, que en aquellos valores obtenidos con retorno simple.

¹¹² Fuente: Elaboración propia.

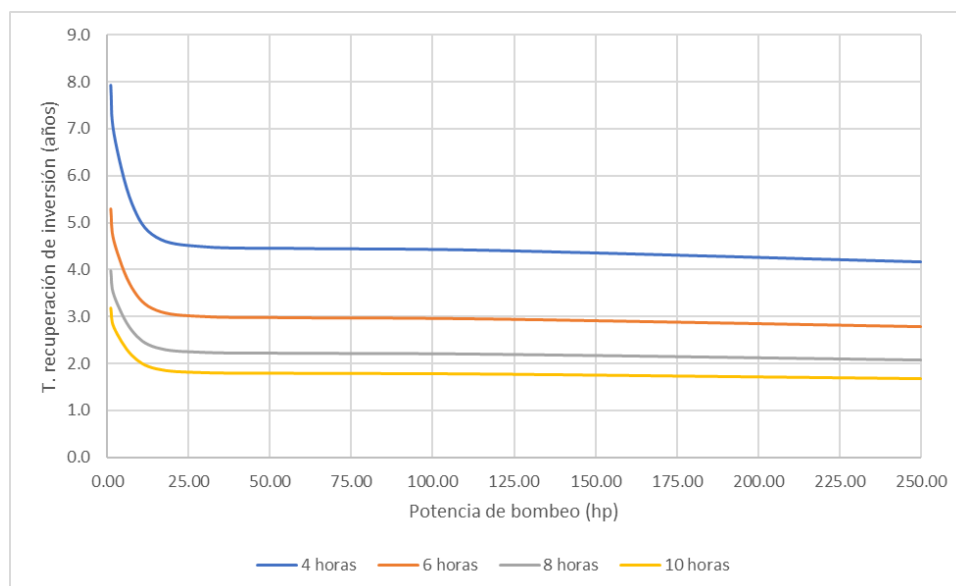


Figura 38. Tiempo de recuperación de inversión, sistemas de bombeo de potencias desde 1 hasta 250 hp, de 4 a 8 horas de bombeo, 80% de participación solar.¹¹³

De la Tabla 17 y Figura 38 se puede observar que los proyectos con más de 7.5 hp resultan atractivos en términos del tiempo de recuperación de la inversión, aún con una operación del sistema de solamente 4 horas diarias. Luego, para bombas por debajo de 7.5 hp, se debe evaluar cada caso, según el número de horas de operación diaria.

Ahora bien, si se realizan los mismos cálculos, cambiando el valor de participación de la energía solar a 60%¹¹⁴, para poder trasladar este diseño a lugares con diferentes niveles de irradiancia, se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 18.

¹¹³ Fuente: Elaboración propia.

¹¹⁴ Si bien se reduce la participación de la energía solar a 60%, se mantiene el costo global de la inversión inicial y de mantenimiento, es decir, se asume que el arreglo fotovoltaico será del mismo tamaño que el sistema capaz de aportar 80% de la energía consumida.

Tabla 18. Tiempos de recuperación de la inversión (en años), 60% de participación de generador fotovoltaico.¹¹⁵

Horas días de operación	Potencia del sistema (hp)							
	1.00	2.00	7.50	15.00	30.00	60.00	120.00	250.00
4 horas	9.4	8.2	6.4	5.6	5.3	5.3	5.2	4.9
4.5 horas	8.5	7.4	5.8	5.0	4.8	4.7	4.7	4.4
5 horas	7.7	6.7	5.2	4.6	4.4	4.3	4.3	4.0
5.5 horas	7.1	6.1	4.8	4.2	4.0	4.0	3.9	3.7
6 horas	6.5	5.7	4.4	3.9	3.7	3.7	3.6	3.4
6.5 horas	6.0	5.3	4.1	3.6	3.4	3.4	3.4	3.2
7 horas	5.6	4.9	3.8	3.3	3.2	3.2	3.1	3.0
7.5 horas	5.3	4.6	3.6	3.1	3.0	3.0	2.9	2.8
8 horas	5.0	4.3	3.4	2.9	2.8	2.8	2.8	2.6
8.5 horas	4.7	4.1	3.2	2.8	2.7	2.6	2.6	2.5
9 horas	4.5	3.9	3.0	2.6	2.5	2.5	2.5	2.3
9.5 horas	4.2	3.7	2.9	2.5	2.4	2.4	2.4	2.2
10 horas	4.2	3.7	2.9	2.5	2.4	2.4	2.4	2.2

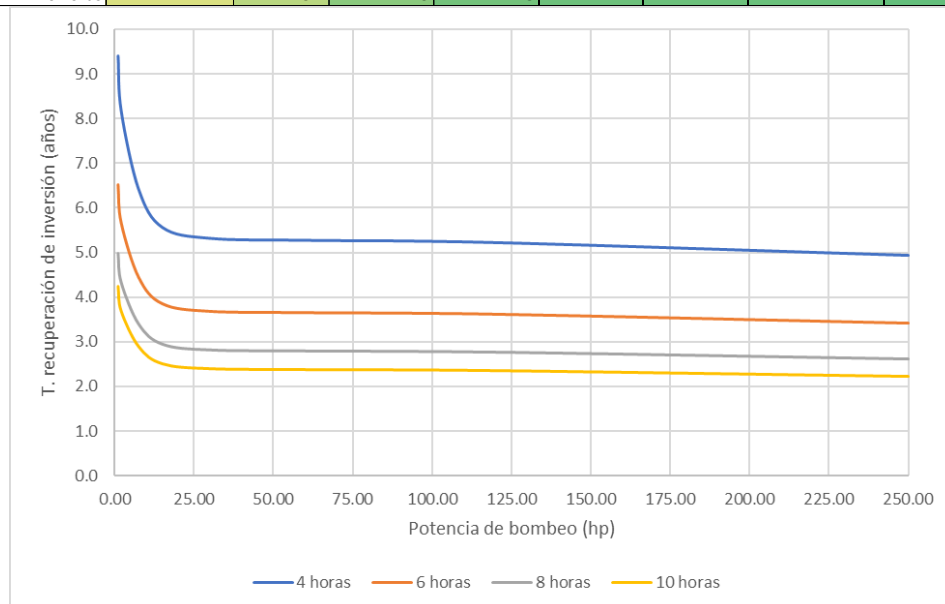


Figura 39. Tiempo de recuperación de inversión, sistemas de bombeo de potencias desde 1 hasta 250 hp, de 4 a 8 horas de bombeo, 60% de participación solar.¹¹⁶

Para el caso de 60% de participación de energía solar, se observa cómo las horas de operación debe ser superior a 6 horas/ día, para que el tiempo de recuperación de la inversión sea aproximado a cuatro años, para sistemas de bombeo por encima de 7.5 hp.

Finalmente, para encontrar los límites del diseño, con los precios actuales, se efectuó el mismo análisis con solamente 40%¹¹⁷ de energía solar. Los tiempos de recuperación de inversión para esos valores se muestran en la Tabla 19.

¹¹⁵ Fuente: Elaboración propia.

¹¹⁶ Fuente: Elaboración propia.

¹¹⁷ Si bien se reduce la participación de la energía solar a 40%, se mantiene el costo global de la inversión inicial y de mantenimiento, es decir, se asume que el arreglo fotovoltaico será del mismo tamaño que el sistema capaz de aportar 80% de la energía consumida.

Tabla 19. Tiempos de recuperación de la inversión (en años), 40% de participación de generador fotovoltaico.¹¹⁸

Horas días de operación	Potencia del sistema (hp)							
	1.00	2.00	7.50	15.00	30.00	60.00	120.00	250.00
4 horas	15.9	13.8	10.8	9.4	9.0	8.9	8.8	8.3
4.5 horas	14.1	12.3	9.6	8.3	8.0	7.9	7.8	7.4
5 horas	12.7	11.0	8.7	7.5	7.2	7.1	7.1	6.7
5.5 horas	11.5	10.0	7.9	6.8	6.5	6.5	6.4	6.1
6 horas	10.6	9.2	7.2	6.3	6.0	5.9	5.9	5.6
6.5 horas	9.8	8.5	6.7	5.8	5.5	5.5	5.4	5.1
7 horas	9.1	7.9	6.2	5.4	5.1	5.1	5.0	4.8
7.5 horas	8.5	7.4	5.8	5.0	4.8	4.7	4.7	4.4
8 horas	7.9	6.9	5.4	4.7	4.5	4.5	4.4	4.2
8.5 horas	7.5	6.5	5.1	4.4	4.2	4.2	4.1	3.9
9 horas	7.1	6.1	4.8	4.2	4.0	4.0	3.9	3.7
9.5 horas	6.7	5.8	4.6	4.0	3.8	3.7	3.7	3.5
10 horas	6.3	5.5	4.3	3.8	3.6	3.6	3.5	3.3

Algunos de los valores de la tabla anterior se han graficado en la Figura 40.

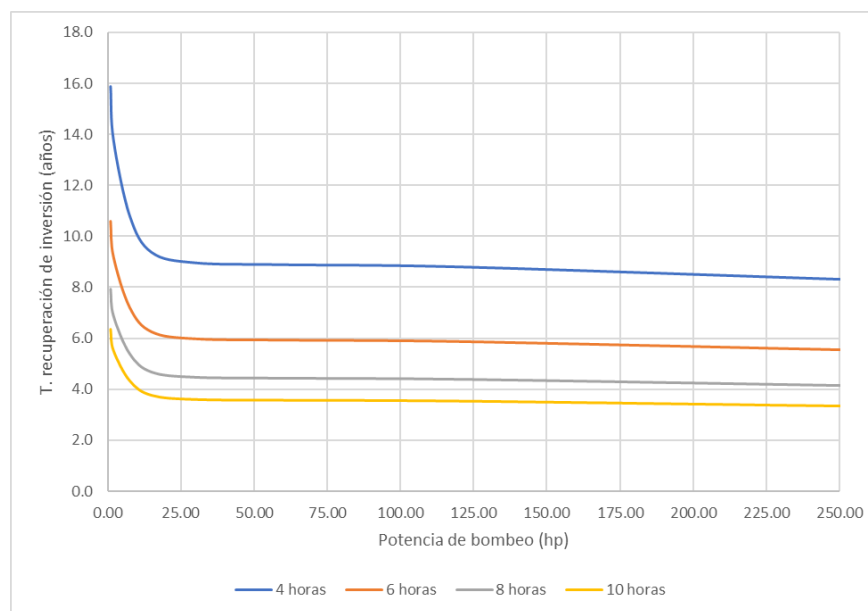


Figura 40. Tiempo de recuperación de inversión, sistemas de bombeo de potencias desde 1 hasta 250 hp, de 4 a 8 horas de bombeo, 40% de participación solar.¹¹⁹

En cuanto la participación de la energía solar se reduce a 40%, el tiempo de recuperación de la inversión hace poco atractivos los proyectos con operación menor a 8 horas/día, o menos de 7.5 hp.

De los resultados presentados en Tabla 18 y Tabla 19, se puede deducir que es posible, para sistemas de bombeo con potencias **superiores a 7.5 hp**, hacer diseños sub-dimensionados en cuanto al tamaño (en potencia pico DC) del arreglo fotovoltaico.

¹¹⁸ Fuente: Elaboración propia.

¹¹⁹ Fuente: Elaboración propia.

Es decir, dependiendo de los niveles de irradiancia de un lugar, no es necesario hacer un dimensionamiento al 100% según la metodología indicada en el Capítulo 3. Así, por ejemplo, si el nivel de irradiancia es alto, y ya se tienen resultados empíricos de un sistema de bombeo geográficamente cercano, se pueden dimensionar generadores fotovoltaicos análogos que solamente aporten 60 o incluso 40% de la energía consumida por el sistema de bombeo, y eso puede producir ahorros entre 35 y 25%, como se muestra en la Figura 37.

iii. Comparación energética de cada sistema.

Antes de realizar una comparación energética, se deben realizar las siguientes consideraciones:

1. Los sistemas conectados a la red e híbridos tendrán niveles de disponibilidad similares. Adicionalmente, la carga tiene -todo el tiempo que esté disponible la fuente de energía- garantizada la potencia suficiente en la fuente para operar a plena potencia. Una carga puede operar, por ejemplo, a plena carga el 100% del tiempo que el servicio eléctrico esté disponible en la zona, lo cual en El Salvador suele ser casi todo el tiempo. Con un diseño especial, un sistema híbrido puede también operar como sistema aislado cuando, por cualquier razón, no hay señal de potencia AC disponible.
2. Los sistemas aislados, alimentados solamente por un arreglo fotovoltaico, son de potencia variable, por tanto, *no siempre la carga opera a plena potencia*. Luego, el rendimiento energético variará según el emplazamiento (niveles de irradiancia, nubosidad típica del lugar) y el tamaño del arreglo fotovoltaico. Si el equipo de bombeo puede trabajar incluso con niveles de irradiancia muy bajos, se puede aproximar el ciclo de trabajo de la bomba según valor de horas solares pico del emplazamiento específico.

Para explicar mejor estos detalles, se presenta la Figura 41¹²⁰ en donde se muestra cómo el consumo de energía en el sistema híbrido y conectado a la red es similar, pues el motor dispone de toda la potencia que requiere. En cambio, en el sistema aislado, con la degradación de los paneles solares, el motor irá disponiendo de menor potencia a medida que pasen los años. En este caso, el arreglo se dimensionó de tal manera que permita ver este efecto.

¹²⁰ Elaboración propia, con datos presentados en Anexo.

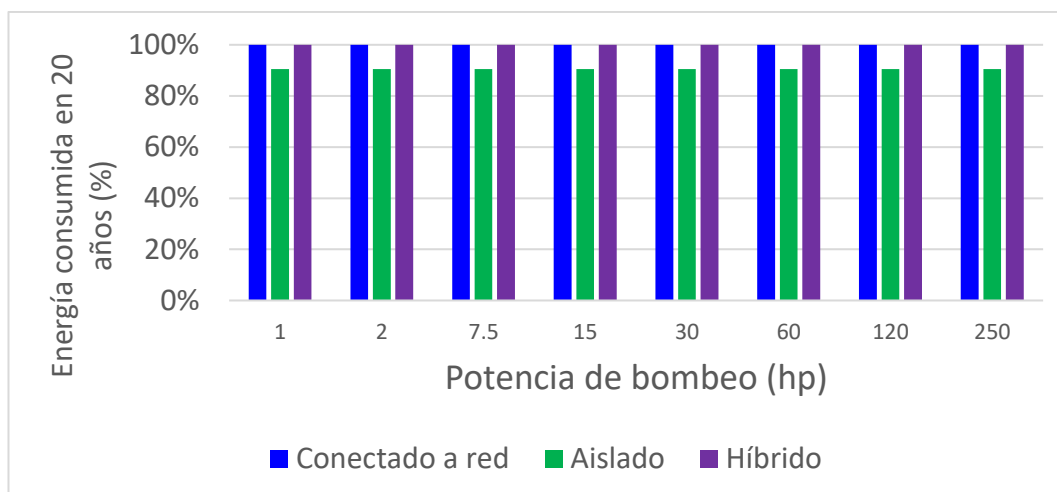


Figura 41. Consumo energético de sistemas de diferentes potencias, tomando la potencia consumida de red como base de referencia.¹²¹

El efecto de menor consumo de energía a lo largo del tiempo con el sistema puramente aislado, también se debe al hecho que en este sistema no se tiene la capacidad de abastecer la bomba a plena potencia cuando baja el nivel de radiación de manera temporal, como sucede cuando pasa una nube por el lugar.

iv. Comparación de características generales de cada sistema.

Luego de evaluar las características de los sistemas presentados en este trabajo de investigación, y de comprender y presentar sus principales características, se pueden resumir las ventajas y desventajas de cada uno, como se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20. Ventajas y desventajas de diferentes tipos de sistemas de alimentación eléctrica.¹²²

Tipo de sistema	Ventajas	Desventajas
Conectado a la red	Alta disponibilidad. Bajo costo de inversión inicial.	Alto costo unitario de energía.
Fotovoltaico aislado	Bajo costo de energía.	Disponibilidad limitada. Alto costo de inversión inicial.
Híbrido	Bajo costo de energía. Alta disponibilidad.	Alto costo de inversión inicial.

Con respecto a la disponibilidad de los sistemas híbridos, cabe destacar que pueden diseñarse y construirse para operar en isla, es decir, si ningún tipo de alimentación de la red.

¹²¹ Fuente: Elaboración propia.

¹²² Fuente: Elaboración propia.

Esto conlleva una ventaja relativa a la disponibilidad aún ante ausencia de energía de la red¹²³, o ante daño de la subestación local, lo cual puede constituir una enorme ventaja y mejora del servicio de abastecimiento de agua, por lo cual los sistemas híbridos con capacidad de operación en isla podrían ser adoptados por empresas de servicios públicos encargadas de la distribución de agua potable, o sistemas de abastecimiento comunitario.

v. Simulaciones de cada sistema.

Se efectuó una simulación de Montecarlo, asignando una distribución de probabilidad uniforme a la variable de entrada, que en este caso es C_{efvn} (costo normalizado de la energía fotovoltaica), y variando su valor desde US\$ 0.06 hasta US\$ 0.24.

Los resultados se presentan en la siguiente imagen.

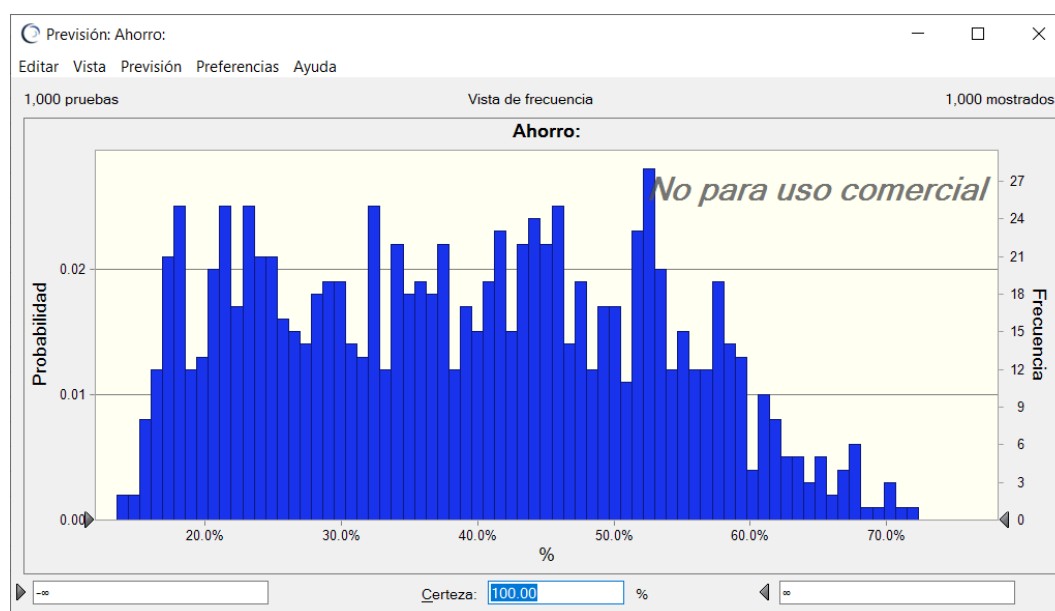


Figura 42. Resultados de simulación de Monte Carlos en costo económico por pagos de energía, con diferentes valores C_{efvn} .¹²⁴

Luego, un análisis de sensibilidad permite identificar que la variable dominante para determinar el costo es el costo normalizado de la energía fotovoltaica, C_{efvn} .

¹²³ Esto está supeditado a las protecciones del variador, pues este equipo debe permitir ser operado solamente con alimentación en el bus DC (sin ningún voltaje en la entrada AC) para poder ofrecer la operación en isla aún ante caída de la alimentación de AC. Algunos modelos o marcas de variadores entrarán en alarma y pararán la operación con ausencia de señal en lado AC. Este tipo de diseños es viable con algunos modelos de inversores, según su firmware, y debe ser revisado minuciosamente. Estos diseños exceden los alcances de esta tesis.

¹²⁴ Fuente: Elaboración propia, con Oracle® Crystal Ball.

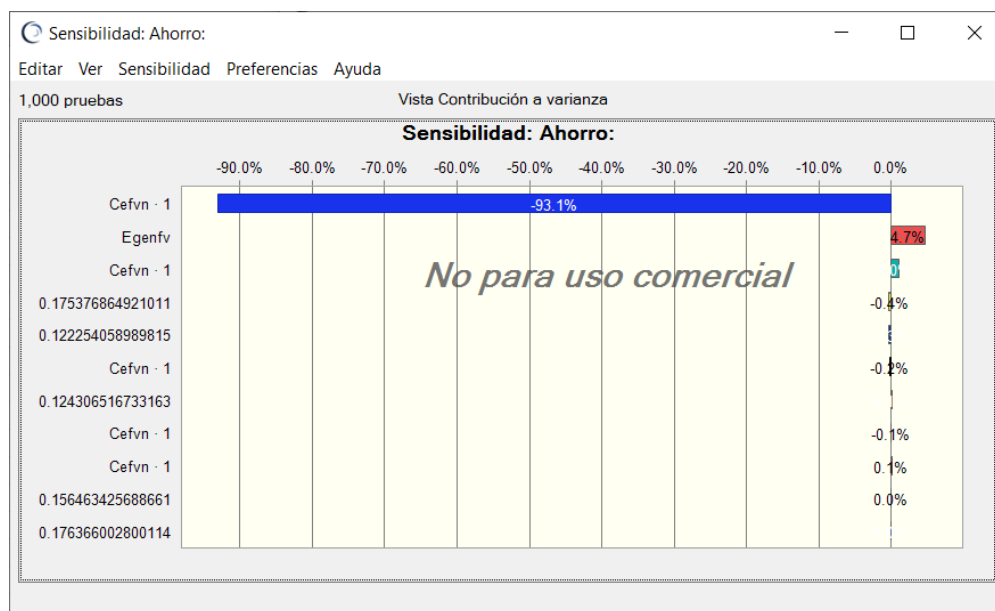


Figura 43. Evaluación de sensibilidad de variables.¹²⁵

De la Figura 42 y Figura 43 se puede observar que, al hacer el análisis usando la ecuación (3.22), la variable más importante es el costo normalizado de la energía fotovoltaica, C_{efvn} .

vi. Resultados de análisis experimental.

Se realizaron dos implementaciones de sistemas híbridos para registrar valores y observar su comportamiento, una de 7.5 hp (para una envasadora de agua, ubicada en el municipio de San Martín) y otra de 30 hp (para una comunidad rural, ubicada en Suchitoto). El esquema funcional de estos sistemas corresponde al ilustrado en la Figura 24.

1. Sistema híbrido de 7.5 hp, en funcionamiento.

Se efectuó la instalación de un sistema de 7.5 hp, para manejar bombas empleadas en envasado de agua.¹²⁶

¹²⁵ Fuente: Elaboración propia, con Crystal Ball.



Figura 44. Tablero AC con variador de frecuencia con alimentación híbrida.¹²⁷



Figura 45. Tablero de control de sistema híbrido de 7.5 hp.

Este proyecto cuenta con su tablero de protecciones y maniobra en DC, que maneja otros dos sistemas híbridos sin capacidad de mezclar energía. Este tablero se muestra en la Figura 46.

En este proyecto, se construyó un bus DC, con el objetivo de compartir la energía solar entre diferentes variadores de frecuencia, algunos de los cuales no tenía capacidad de operación híbrida. Además, se desarrolló una interfaz de monitoreo, implementada a través de un PLC especial que permitió montar un pequeño servidor web, lo que facilita la supervisión remota, ya sea mediante una red local o por Internet, usando una VPN¹²⁸. Esto se presenta en la Figura 47:

¹²⁷ Para este proyecto se empleó un variador de frecuencia de 7.5 hp, de la marca Invertek, modelo P2 Solar.

¹²⁸ Virtual Private Network.

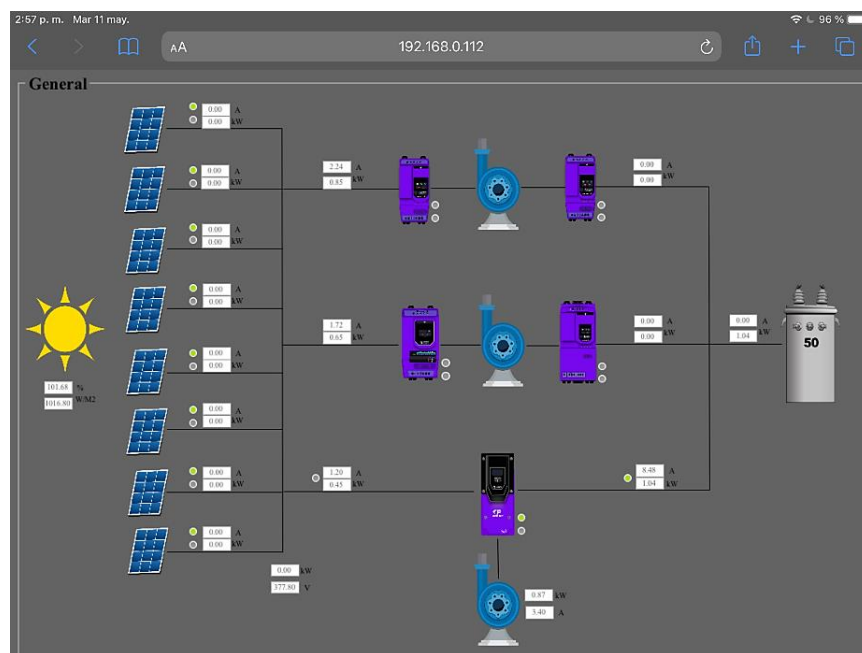


Figura 47. Sistema de monitoreo de aplicación híbrida realizada, con y sin capacidad de hacer mezcla de energía, funcionando en empresa envasadora de agua en El Salvador.

El resultado de la combinación de las dos fuentes de energía en un sistema completamente híbrido, con capacidad de mezclar energías, con potencia nominal de 7.5 hp, se muestra en la Figura 48.

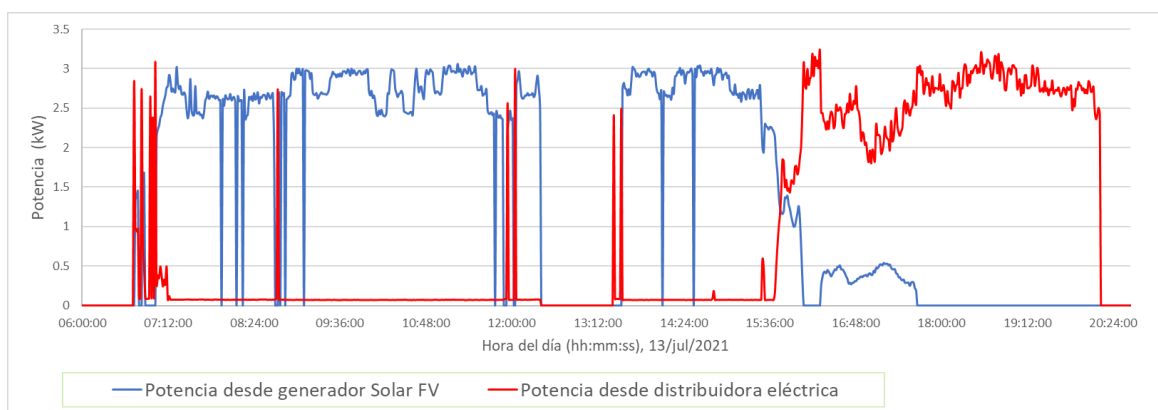


Figura 48. Flujos de potencia entrantes en sistema de 7.5 hp.¹²⁹

En la Figura 48 se observa cómo el sistema arranca principalmente con energía de la red, temprano por la mañana. Luego, pasadas las 7:00 am, el sistema comienza a tomar energía principalmente de la fuente fotovoltaica, y por tiempos significativos, el sistema opera puramente con esta fuente de energía solar. Luego, después de las 3:40 pm, el sistema fotovoltaico reduce su aporte de potencia y la energía de la

¹²⁹ Fuente: Elaboración propia, con datos tomados de proyecto híbrido en San Martín, El Salvador.

distribuidora eléctrica comienza a dominar el aporte de potencia, hasta que eventualmente toda la energía proviene de la red local.

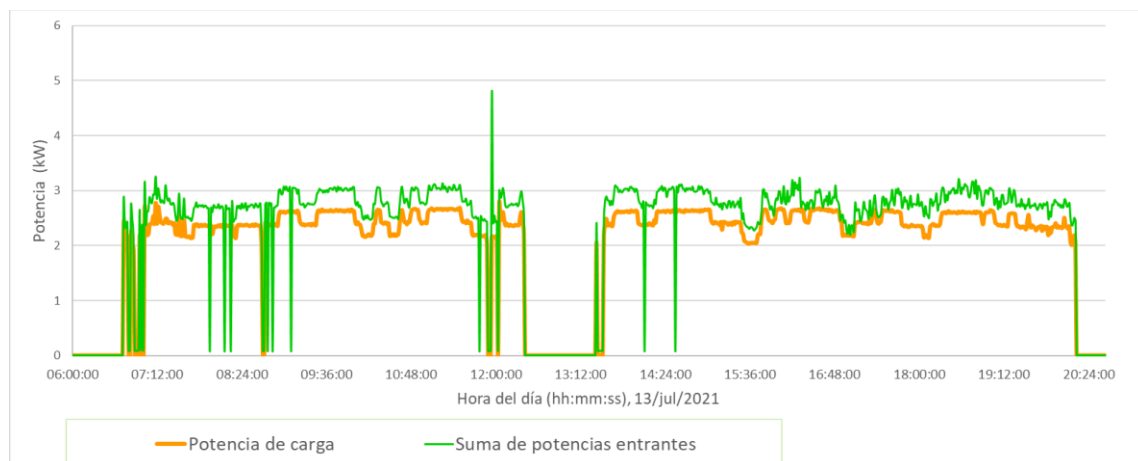


Figura 49. Flujos de potencia a la entrada y a la salida de variador de 7.5 hp.

En la Figura 49 muestra cómo la potencia de entrada total (resultado de sumar la potencia de la distribuidora con la potencia de la fuente fotovoltaica) es superior a la carga por un margen. Esto indica que existe un margen de pérdidas en la conversión de potencia. Si los valores de pérdidas se traducen a porcentajes, tomando como base la energía total entrante, se obtienen los valores de la Figura 50.

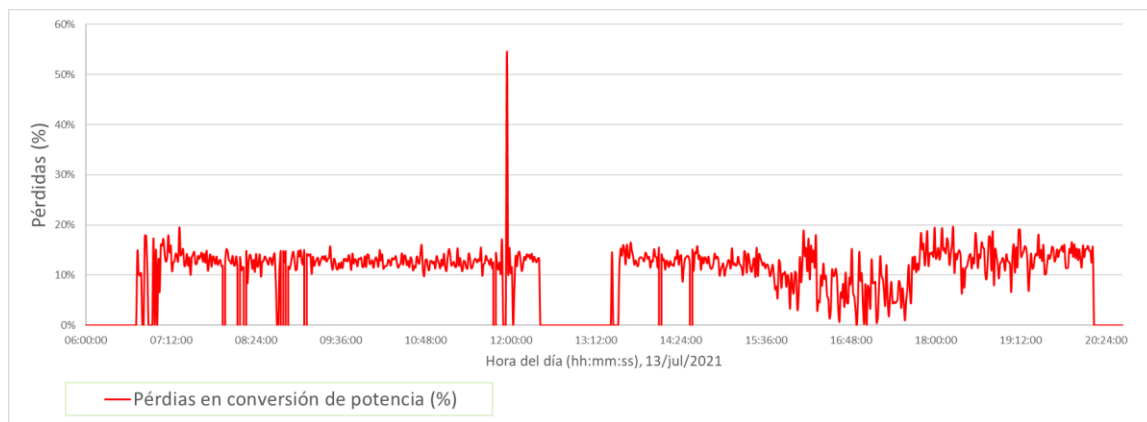


Figura 50. Pérdidas de potencia en sistema de 7.5 hp.¹³⁰

En la Figura 50 se muestra que las pérdidas tienen un valor promedio de 14.0 %, y el percentil 99 de los datos es 18.8 %, lo que corresponde a un valor “promedio de máximo” o máximo persistente en las pérdidas.

¹³⁰ Fuente: Elaboración propia, con datos tomados de proyecto híbrido en San Martín, El Salvador.

Tomando en cuenta solamente las muestras durante las cuales podría tener alguna participación el generador fotovoltaico, para el día muestreado, se obtienen los siguientes datos:

Tabla 21. Tiempo muestreado en sistema híbrido de 7.5 hp.

Hora inicio	Hora fin	Tiempo muestreado (horas:minutos:segundos)
13/7/2021 06:43	13/7/2021 17:37	10:55:23

Los datos de la Tabla 21 corresponden solamente a una fecha, se usa para fines ilustrativos. Notar que los datos pueden variar de un día a otro, o de un sitio a otro, así como de la intermitencia y demanda de potencia de la carga. El comportamiento de cada sistema es algo puramente empírico, y variará en cada caso.

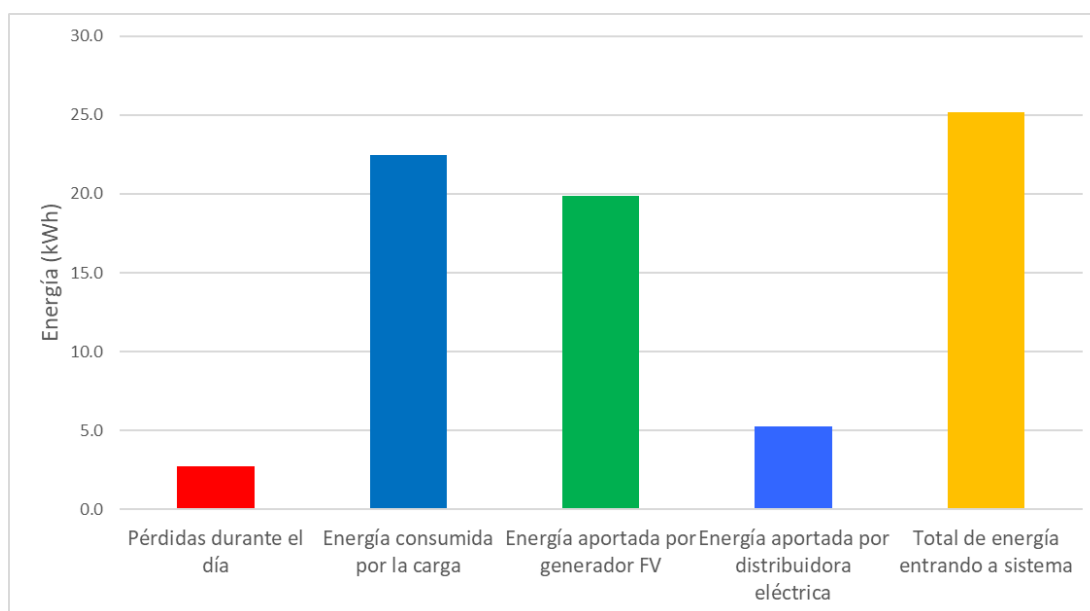


Figura 51. Energía en sistema muestreado de 7.5 hp, híbrido.¹³¹

Si los valores anteriores se trasladan a porcentajes, tomando como base toda la energía entrando al sistema durante el día, se obtienen los datos de la siguiente figura:

¹³¹ Fuente: Elaboración propia, con datos tomados de proyecto híbrido en San Martín, El Salvador.

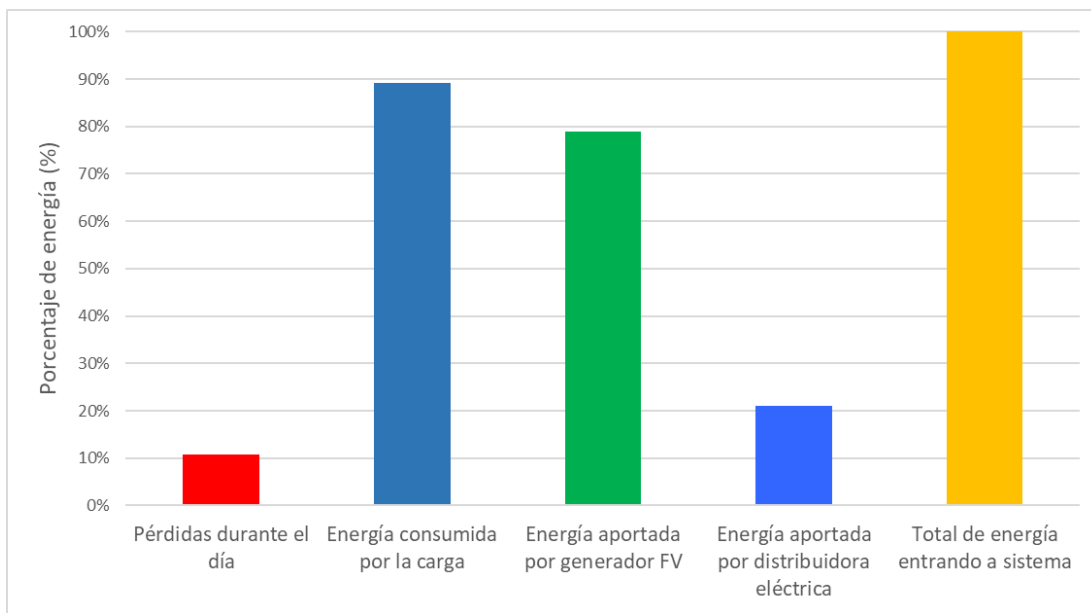


Figura 52. Porcentajes de energía en sistema muestreado de 7.5 hp, híbrido, muestreo de 6:43am a 5:37pm.¹³²

Los flujos de energía también se pueden representar mediante un diagrama de Sankey, como se muestra en la Figura 53.

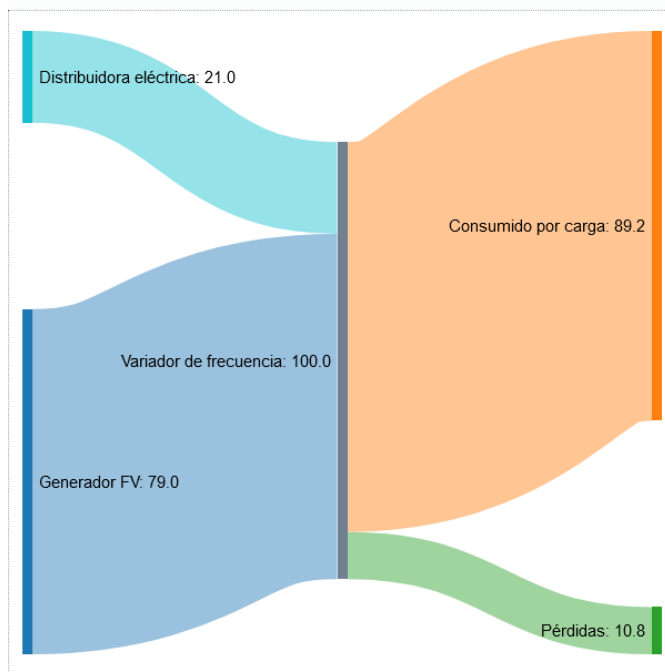


Figura 53. Distribución de la energía, día muestreado en sistema híbrido de 7.5 hp, muestreo de 6:43am a 5:37pm, valores en porcentajes.¹³³

¹³² Fuente: Elaboración propia, con datos tomados de proyecto híbrido en San Martín, El Salvador.

¹³³ Fuente: Elaboración propia, con datos tomados de proyecto híbrido en San Martín, El Salvador.

Si se eliminan los extremos del día, y solamente se muestrea de 7:00am a 5:00pm, es decir, 10 horas, descartando las horas de menos irradiación al inicio y final del día, se obtiene un periodo de muestreo que corresponde a las horas que (de acuerdo a lo observado en la fecha muestreada) pueden tener niveles de irradiación suficiente para que el generador fotovoltaico sea capaz de suministrar (sin nubes) el 100% de energía que demanda el sistema de bombeo.

Tabla 22. Tiempo muestreado en sistema híbrido de 7.5 hp, recortando horas de menor radiación.

Hora inicio	Hora fin	Tiempo muestreado (horas:minutos:segundos)
13/7/2021 07:00	13/7/2021 17:00	10:00:00

Tabla 23. Distribución de la energía entre 7am y 5pm, sistema de 7.5 hp.

	Pérdidas durante el día ¹³⁴	Energía consumida por la carga	Energía aportada por generador FV	Energía aportada por distribuidora eléctrica	Total de energía entrando a sistema
Energía (kWh)	2.5	20.7	19.5	3.7	23.2
Porcentaje (%)	11.0%	89.0%	84.1%	15.9%	100.0%

¹³⁴ Todos los valores presentados, corresponden a un tiempo y día de muestro específicos. Muestras más amplias pueden producir otros resultados. Los valores se presentan para fines referenciales.

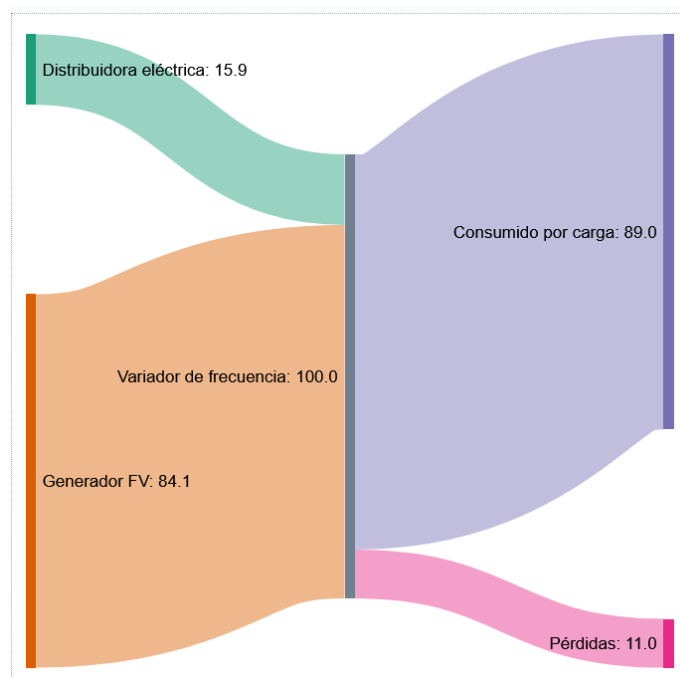


Figura 54. Distribución de la energía, día muestreado en sistema híbrido de 7.5 hp, muestreo de 7am a 5pm, eliminando horario con baja radiación solar.¹³⁵

La Figura 54 muestra, en porcentajes, el valor máximo posible de participación del generador fotovoltaico en el suministro de energía, para el día dado, el cual es 84.1%.

2. Sistema híbrido de 30 hp, en funcionamiento.

Se efectuó una implementación de un sistema de 30 hp híbrido, a 460 V, aprovechando un emplazamiento con pozo, bomba sumergible, subestación y acometida existentes. Este proyecto de suministro comunitario de agua potable se denomina “El Sitio Zapotal”¹³⁶, ubicado en Suchitoto, departamento de Cuscatlán, en El Salvador. En el proyecto se instalaron 96 paneles solares de 540 watts, para un total de 51.84 kWp de capacidad instalada.

Algunas fotografías de las instalaciones realizadas se muestran a continuación:

¹³⁵ Fuente: Elaboración propia, con datos tomados de proyecto híbrido en San Martín, El Salvador.

¹³⁶ Una muestra de la facturación eléctrica del sitio se muestra en Anexo VIII, donde se observa que este sitio recibe subsidio de gobierno en su pago de energía eléctrica, lo cual, si se toma en cuenta la cantidad de proyectos de bombeo comunitario con este beneficio, representa un costo para el estado que podría ser reducido con la masificación de energía solar fotovoltaica en sitio.



Figura 55. Paneles solares del proyecto, 96 páneles de 540 watts, total de 51.84 kWp.

El cuarto eléctrico (Figura 55), con tableros AC, DCM, de control se instalaron junto a un sistema de arranque mediante arrancador suave, desplazando este último.

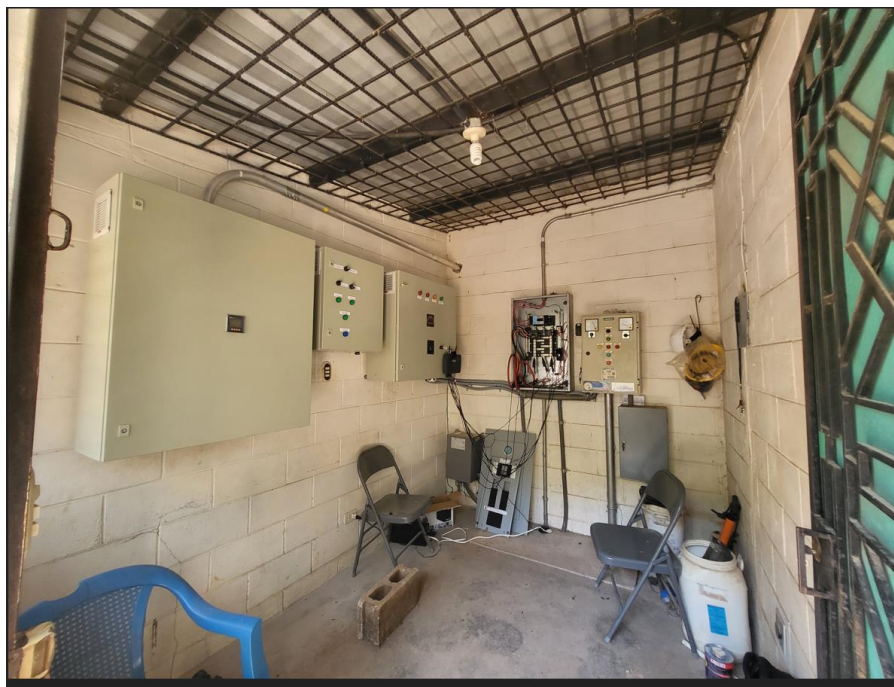


Figura 56. Interior de caseta de bombeo, con tableros de control, AC y otros.

El tablero AC, en el cual se haya el variador de frecuencia y protecciones AC, puede observarse en la Figura 57.

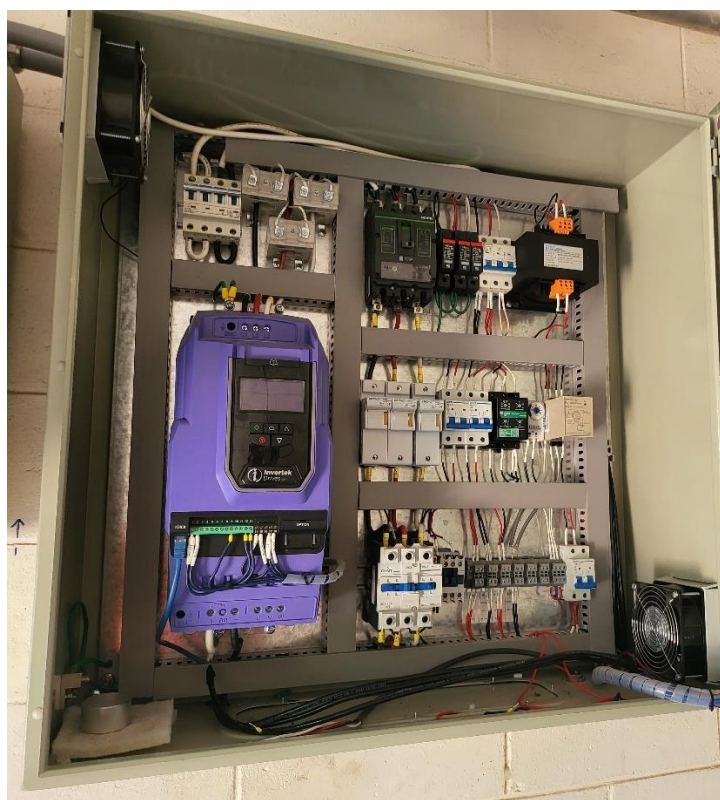


Figura 57. Interior de Tablero de AC, de alimentación y protección de motor con 30 hp de salida, para bombeo de agua.

Por otro lado, el tablero de control, en donde se encuentra el PLC (que permite realizar el monitoreo remoto vía red local o Internet), puede observarse en la Figura 58.

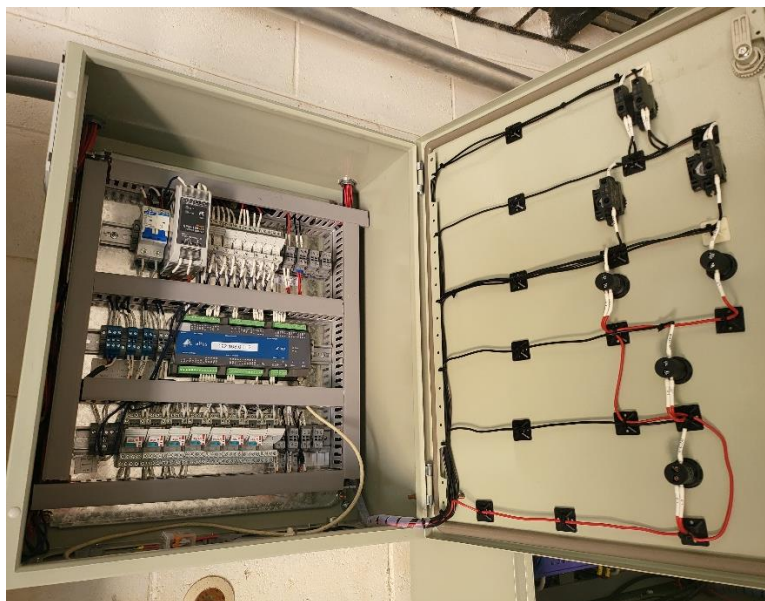


Figura 58. Tablero de control, con PLC¹³⁷ de marca Altus.

Otros componentes esenciales para la seguridad y confiabilidad de la instalación en el largo plazo es el Tablero DC Figura 59. En este tablero se incluyen protecciones específicas para DC, a fin de evitar daños severos o incendios.



Figura 59. Tablero protecciones DC.

¹³⁷ Para este proyecto de bombeo con alimentación híbrida, se empleó un PLC de la marca Altus, modelo XP340.

En las siguientes pueden observarse otros componentes, como el área donde se encuentra el pozo y la placa de datos del motor sumergible usado en el proyecto.



Figura 60. Área pozo en proyecto de 30 hp.

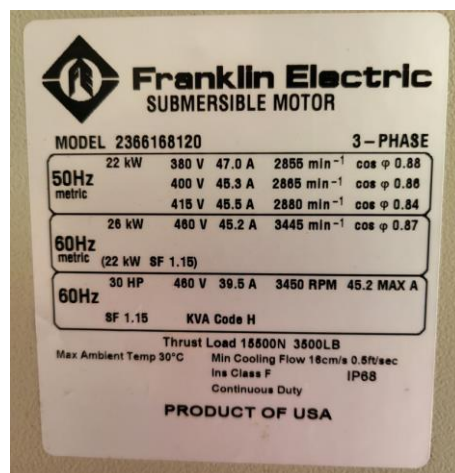


Figura 61. Placa de datos de motor sumergible usado en proyecto.

Los tableros de AC, DC y control, activados y con la bomba funcionando, pueden observarse en la imagen siguiente.



Figura 62. Vista de tableros de AC, DC y control, en proyecto híbrido de 30 hp.

Luego, el sistema ya sea de manera híbrida, con alimentación de la red u operando de manera aislada, se puede hacer trabajar a frecuencias diferentes a la frecuencia natural del sistema.



Figura 63. Protecciones DC en exterior, bajo techo.



*Figura 64. Variador INVERTEK
138 alimentado la carga a frecuencia reducida.*

Se realizaron pruebas iniciales del sistema, operando con la red de la distribuidora eléctrica local. De esta manera se probaron los sistemas, para luego verificar la correcta operación y los niveles de carga eléctrica de la bomba.

La Figura 64 muestra un variador operando a 57 Hertz, lo cual es menor a la frecuencia natural del sistema, que es de 60 Hertz en El Salvador. Esto se traduce en un caudal reducido, pero también en menor demanda de potencia. Este tipo de funcionalidad suele ser útil en algunas aplicaciones de bombeo, así como para la operación en isla.

En la Figura 65 se observa la interfaz de monitoreo diseñada para los sistemas híbridos, como parte de este trabajo de graduación; el caso presentado en la imagen implica solamente un momento en que la energía eléctrica proviene de la red eléctrica local.

¹³⁸ Se empleo un variador **Invertek, modelo P2 Solar** para este proyecto.

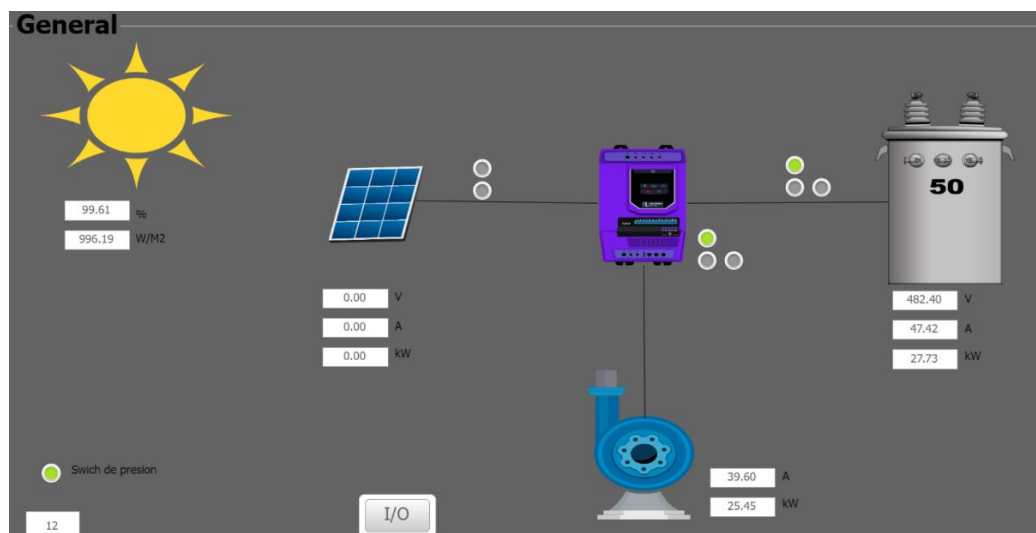


Figura 65. Interfaz de monitoreo de flujos de potencia activa, corrientes y voltajes en sistema con operación exclusiva de distribuidora eléctrica, sistema híbrido de 30 hp.¹³⁹

Más detalles se pueden ver en la Figura 66, en donde se observan lecturas de voltajes, corrientes, distorsión armónica y otras variables eléctricas, para el caso en que solamente hay inyección de potencia del lado de la distribuidora.

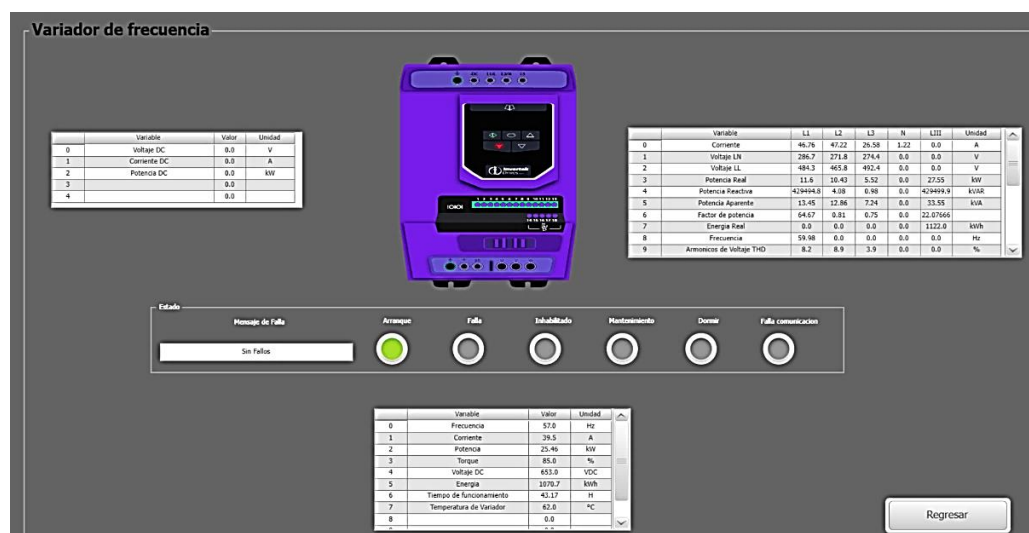


Figura 66. Interfaz de monitoreo durante operación a partir de distribuidora eléctrica, sistema híbrido de 30 hp.¹⁴⁰

¹³⁹ Fuente: Elaboración propia.

¹⁴⁰ Fuente: Elaboración propia, con datos de proyecto de Suchitoto, El Salvador.

Luego, como sistema aislado, solamente con generador fotovoltaico, se observa en Figura 67 a continuación.

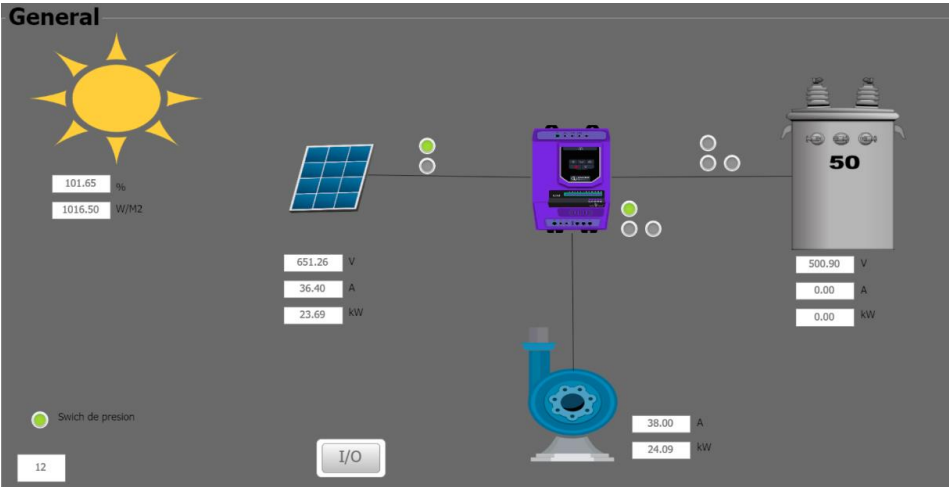


Figura 67. Interfaz de monitoreo con flujos de potencia activa, corrientes y voltajes en sistema con operación exclusiva de fuente solar, sistema híbrido de 30 hp.¹⁴¹

Datos más precisos de una lectura puntual de inyección de potencia solamente del generador fotovoltaico, pueden visualizarse en la Figura 68.

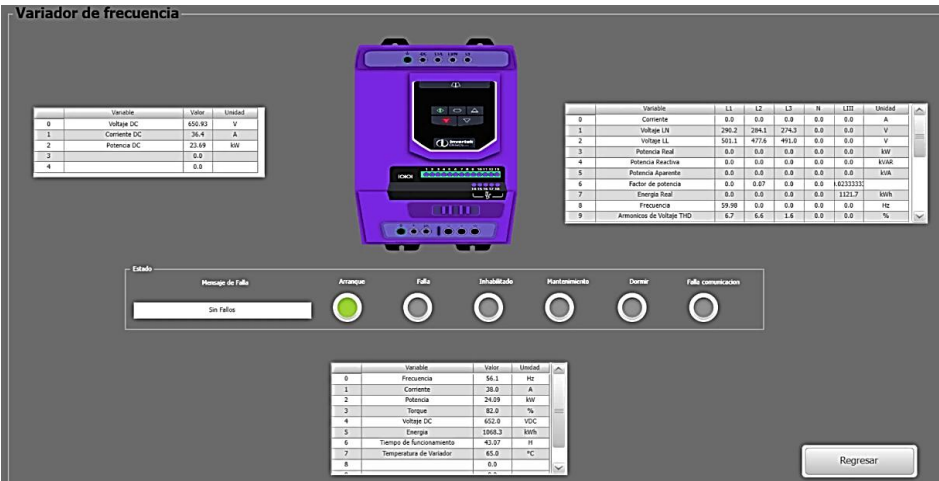


Figura 68. Interfaz de monitoreo durante operación aislada a partir de fuente solar, sistema híbrido de 30 hp.¹⁴²

¹⁴¹ Fuente: Elaboración propia, con datos de proyecto de Suchitoto, El Salvador.

¹⁴² Fuente: Elaboración propia, con datos de proyecto de Suchitoto, El Salvador.

Un esquema con capturas de valores de **operación híbrida** se muestra en la Figura 69:

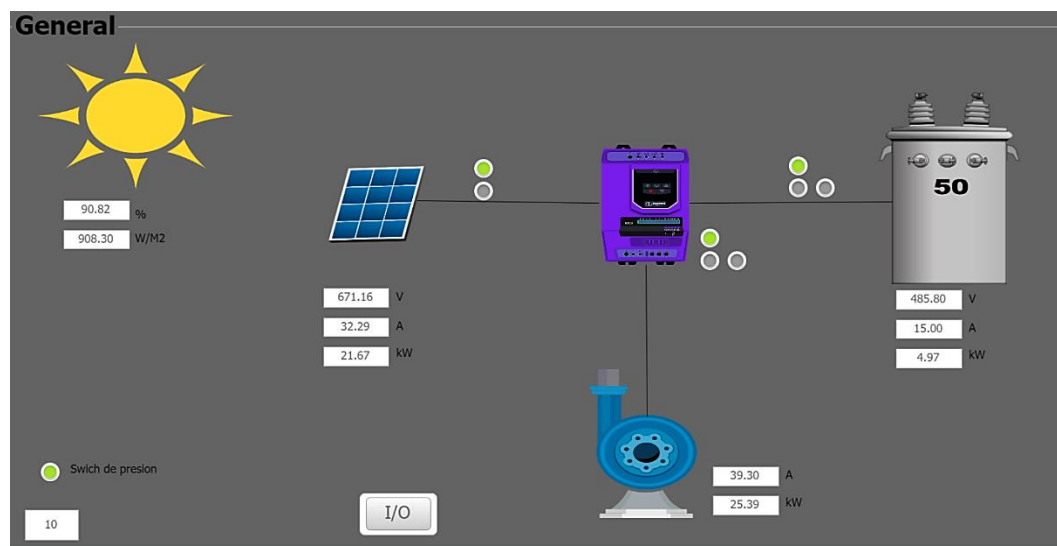


Figura 69. Esquema indicativo de flujos de potencia activa, corrientes y voltajes en sistema con operación híbrida, sistema híbrido de 30 hp.¹⁴³

Valores puntuales, medidos por el variador de frecuencia durante la operación híbrida del sistema de alimentación para bombeo, se muestra en la Figura 70.

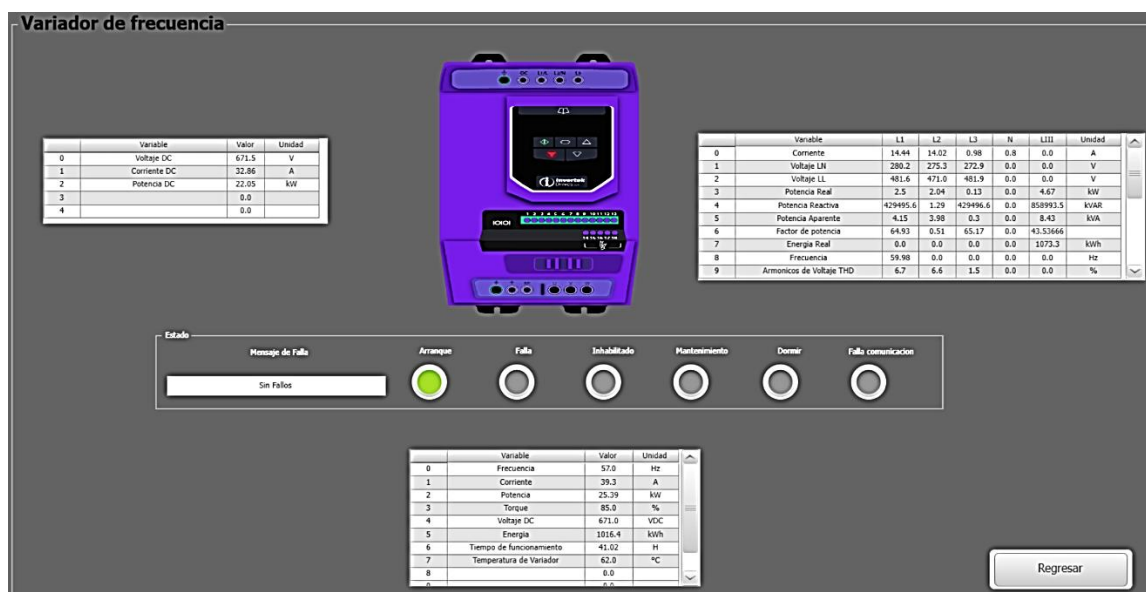


Figura 70. Estado de interfaz de monitoreo, durante operación híbrida, sistema híbrido de 30 hp.¹⁴⁴

¹⁴³ Fuente: Elaboración propia, con datos de proyecto de Suchitoto, El Salvador.

¹⁴⁴ Fuente: Elaboración propia, con datos de proyecto de Suchitoto, El Salvador.

Si se representa los flujos de potencia en las entradas y salidas, para un momento puntual, esto quedará como se muestra en la Figura 71, a continuación.

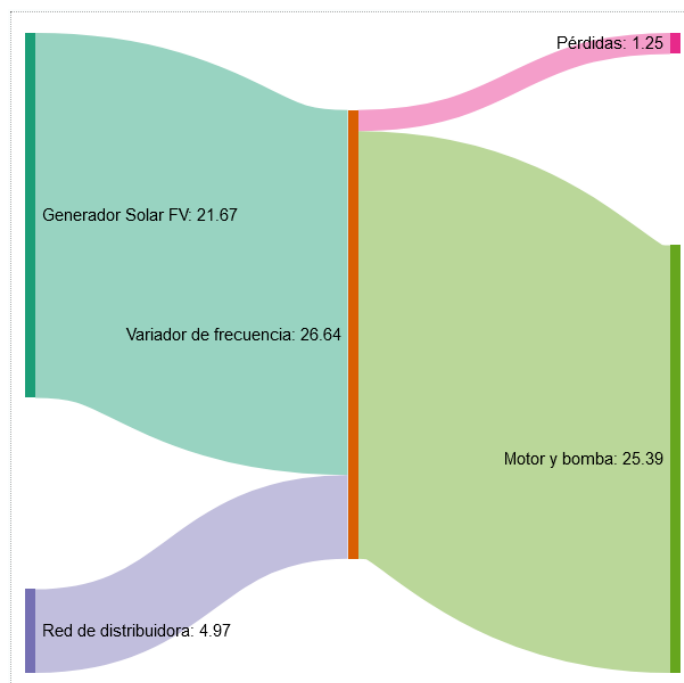


Figura 71. Diagrama de Sankey ilustrando flujos de potencia puntuales, sistema híbrido de 30 hp.¹⁴⁵

Convirtiendo los valores de Figura 71 en porcentajes, se obtienen los valores presentados en la Figura 72.

¹⁴⁵ Fuente: Elaboración propia, con datos de proyecto de Suchitoto, El Salvador.

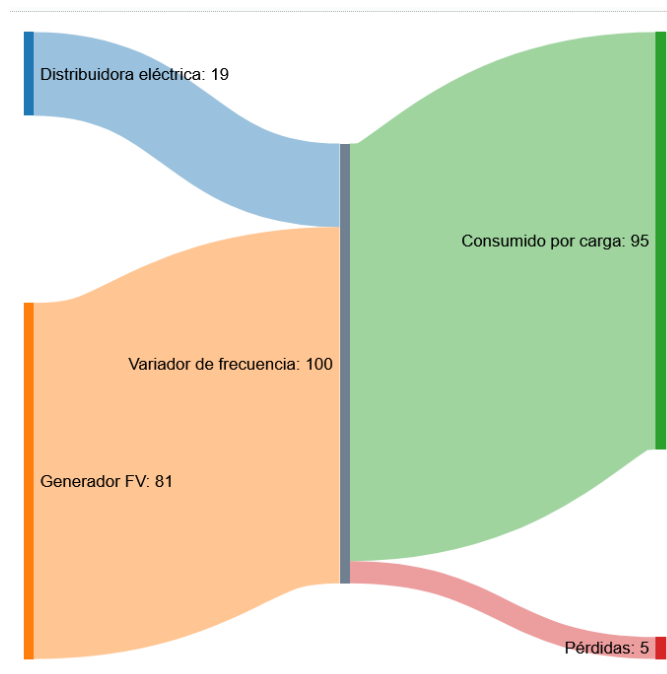


Figura 72. Distribución de la potencia en sistema híbrido de 30 hp, muestra puntual.¹⁴⁶

En la Figura 72 se muestra cómo el sistema de 30 hp presenta menores valores de pérdidas (5%) en términos porcentuales que el sistema de 7.5 hp (11% de pérdidas), observadas en la Figura 54.

vii. Observaciones del capítulo.

Los sistemas híbridos con el diseño propuestos en este trabajo de graduación, mediante variadores de frecuencia, son viables por lo general en potencias arriba de 7.5 hp, y pueden tener tiempos de recuperación inferiores a cinco años, o mucho menos, si los tiempos de utilización son elevados.

El principal componente para determinar que exista ahorro en el largo plazo, es una energía fotovoltaica con un costo normalizado muy por debajo del costo de la energía que vende la distribuidora eléctrica.

El diseño híbrido puede permitir operación en isla¹⁴⁷, lo cual es conveniente en aplicaciones de servicios esenciales, como abastecimiento de agua potable.

Mientras más grande el proyecto, más económicamente atractivo se vuelve.

¹⁴⁶ Fuente: Elaboración propia, con datos de proyecto de Suchitoto, El Salvador.

¹⁴⁷ La operación en isla depende de que el variador de frecuencia permita ser operado sin ningún tipo de entrada de potencia del lado AC. Algunos variadores se alarman y para la operación si no tiene entrada de voltaje en AC.

Conclusiones y Recomendaciones

Los proyectos de bombeo con dos fuentes de alimentación, siendo una fuente la red eléctrica y la otra fuente un generador fotovoltaico, son opciones viables económicamente, siempre que se empleen variadores de frecuencia con características especiales, como acceso a bus DC.

Los tiempos de recuperación de la inversión son atractivos, en muchos casos menores a cinco años, principalmente para proyectos de más de 7.5 hp, y tiempo de uso por arriba de ocho al día. Proyectos que no cumplan con estas características aún podrían ser viables, pero debe examinarse cada caso.

El costo normalizado de la energía, para periodos de evaluación de 20 años, puede producir valores en US\$/kWh por debajo de la mitad del costo de la energía de la red eléctrica local.

Para periodos de evaluación de 20 años¹⁴⁸, los sistemas de bombeo híbridos pueden producir ahorros monetarios que variarán entre 25% y 50% del gasto corriente. Esto se verá en menores pagos de mantenimiento o energía, según el porcentaje de participación de la energía fotovoltaica se acerque a 40 u 80%, respectivamente.

Los valores monetarios aquí presentados, obedecen a una estrategia de presupuestación basada en el uso de materiales y marcas a precios económicos, no de las gamas más altas. Si se seleccionan marcas o productos en los cuartiles de más altos de precios de mercado, o se incrementan los diferenciales de ganancia para los contratistas o proveedores, los costos pueden incrementarse significativamente, perjudicando la viabilidad de algunos proyectos.

Dentro de la estructura de costos de los sistemas aislados e híbridos, los componentes que representa la mayor inversión son los paneles solares fotovoltaicos y sus estructuras de montaje.

Este trabajo de investigación ha permitido realizar un vistazo general sobre sistemas de bombeo de diferentes potencias, sin centrarse en el tipo de motor, tipo de bomba o tipo de aplicación, y permite que se repliquen las implementaciones con muy pocas restricciones, usando partes de instalaciones existentes, incluidos motores de inducción comunes en bombeo. Además, se realizaron dos implementaciones prácticas, en las cuales se pudo confirmar la capacidad de algunos variadores de frecuencia, bajo ciertas condiciones de diseño de su instalación, para efectuar la mezcla de energía proveniente de dos fuentes, una en AC y otra en DC.

Para diseñar, dimensionar e instalar sistemas de alimentación híbrida para bombeo de agua, con criterios de confiabilidad y seguridad, así como para garantizar su funcionamiento y rentabilidad, se requieren conocimientos avanzados de sistemas de bombeo, protecciones

¹⁴⁸ En el análisis económico se ha supuesto que para el año 11 será efectuado un mantenimiento que cubre el cambio total de todos los tableros (eso incluye cableado, protecciones AC, protecciones DC, elementos de control, variador, PLC, etcétera). Esto puede ser ligeramente mayor a lo requerido en la práctica.

eléctricas, electrónica de potencia, señales e instrumentación electrónica, calidad de energía, energía solar, sistemas fotovoltaicos, distribución en corriente directa, facturación eléctrica y programación de controladores lógicos programables.

Para el caso de convertir sistemas existentes a híbridos, se deben revisar las condiciones específicas existentes en el sitio de instalación, tal como la subestación eléctrica, acometida, red de tierra, tablero eléctrico general, además de prestar atención a la calidad del servicio eléctrico en el lugar. También se deben prestar atención a que elementos propios del sistema hidráulico estén en condiciones adecuadas de operación. Lo anterior, con el fin de garantizar la seguridad y durabilidad del nuevo sistema híbrido.

Además de aportar más economía al uso y aprovechamiento de sistemas de bombeo, los sistemas híbridos se pueden diseñar y construir de manera tal que incrementen la disponibilidad del sistema de bombeo, siempre que permitan la operación en isla, es decir, sin depender de la red eléctrica. Esto requiere modificaciones al diseño realizado para esta tesis, y están fuera de nuestros alcances.

Bibliografía

- AAHI. (2020). *Solar Pumping, Electrical Design and Installation of Solar Pumps, Guidelines*. Paris: Action contre la Faim International.
- ABB. (2014). ABB machinery drives, ACS355 Solar pump inverter (+N827). In A. Solar. ABB.
- ABB, S. (2018). LOW VOLTAGE AC DRIVES Solar pump drives 0.37 to 45 kW. In A. Solar, *LOW VOLTAGE AC DRIVES Solar pump drives 0.37 to 45 kW*. ABB.
- Allen-Bradley. (2014). *When to use a Soft Starter or an AC Variable Frequency Drive*. Estambul, Turquía: Allen-Bradley.
- ANDA. (Consultado en 2021). Especificaciones Técnicas para el Suministro de los Componentes Electromecánicos, para los Nuevos Proyectos o para la Rehabilitación de Sistemas Existentes. *Especificaciones Técnicas Electromecánicas*. San Salvador, El Salvador: ANDA.
- AWWA. (1988). *Vertical Turbine Pumps-Line Shaft and Submersible Types*. Denver: American Water Works Association.
- AWWA. (2016). *Horizontal and Vertical Line-Shaft Pumps*. Denver: American Water Works Association.
- AWWA. (2017). *Submersible Vertical Turbine Pumps*. Denver, CO, EEUU: American Water Works Association.
- AWWA. (2021, Junio 28). *American Water Works Association*. Retrieved from AWWA: <https://www.awwa.org/About-Us>
- Banco Mundial. (2020, 05 13). *Global Solar Atlas V2.0*. Retrieved from solargis.com: <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/el-salvador>
- Bradley, J. (2018, 02 2018). *Getting PV to 2¢ a kWh: Panel vs. balance of system costs*. . Retrieved from <https://energynarrative.com>: <https://energynarrative.com/getting-pv-to-2-cents-per-kwh-panel-balance-of-system-costs/>
- c3controls.com. (2021, julio 24). *What Is Pump Control?* Retrieved from www.c3controls.com: <https://www.c3controls.com/white-paper/pump-control/>
- City of Wanneroo. (2020). *Stantard Irrigation Specifications*. City of Wanneroo, Perth, Australia: City of Wanneroo.
- CNE. (2020). *Consumo de energía eléctrica de estaciones de bombeo comunitarias*. San Salvador, El Salvador: Consejo Nacional de Energía.
- Cumbre Pueblos. (2019, junio 24). <https://cumbrepuebloscop20.org/>. Retrieved from https://cumbrepuebloscop20.org: <https://cumbrepuebloscop20.org/energias/solar/sistema-hibrido/>
- Energía para el Futuro. (2015, Noviembre 5). <https://blogs.iadb.org/>. Retrieved from <https://blogs.iadb.org/>: <https://blogs.iadb.org/energia/es/cual-es-la-importancia-de-los-sistemas-hibridos-para-america-latina-y-el-caribe/>
- Franklin-Electric. (2014, diciembre 12). *VFD bypasses and backups: Which should you use?* Retrieved from franklin-controls.com: <https://www.franklin-controls.com/industrial/blog/cat/news/post/vfd/>
- Franklin-Electric. (2015). *Manual AIM: Motores sumergibles, aplicación, instalación y mantenimiento*. Victoria, Australia: franklinwater.com.
- Franklin-Electric. (2019). *Submonitor Connect Manual de instalación y funcionamiento*. Fort Wayne, Indiana, EEUU: FranklinAgua.com.

- Franklin-Electric. (2021). *Vertical Lineshaft Turbine Pumps*. Fort Wayne, Indiana, EEUU, Australia: franklinwater.com.
- Frederick County. (2017). *Design Manual for Water and Sewer Facilities*. Condado de Frederick: Division of Utilities and Solid Waste Management, Condado de Frederick, Maryland, Estados Unidos de América.
- GRUNDFOS. (2021, 10 31). Solar surface pumps. Bjerringbro , Dinamarca: GRUNDFOS.
- GRUNDFOS. (2021, 10 31). SQFlex. *Stay flexible with SQFlex*. Bjerringbro, Dinamarca: Grundfos.
- Guyer, J. P. (2012). *Introduction to Pumping Stations for Water Supply Systems*. California, EEUU: Continuing Education and Development, Inc.
- Hdraulic Institute. (2021, 07 19). <https://www.pumps.org>. Retrieved from American Water Works Association: https://www.pumps.org/HI_Index.aspx
- Hovstadius, G. (1999). *Economical Aspects of Adjustable Speed Drives in Pumping Systems*. College Station, Texas: Energy Systems Laboratory (<http://esl.tamu.edu>).
- IBEE. (2015). *Guía de Aplicación de Soft-Tarter y Variadores de Frecuencia en Bombeo*. Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P, México: IBEE.
- INVERTEK. (2014). Double Edge Modulation PWM Switching. *Material de capacitación pivado* (pp. 1-3). Welshpool, Reino Unido: Invertek.
- INVERTEK. (2016). *Optidrive ODP-2 Manual de Usuario Revisión 2.10*. Welshpool, Powys, United Kingdom: Invertek Drives Ibérica S.L. Retrieved from <https://inverterdrive.com/>.
- INVERTEK. (2019). *AC Variable Speed Drive 0.75 - 250kW / 1 - 350HP 200 - 600V Single and 3 Phase Input*. Welshpool, United Kingdom: Invertek.com.
- INVERTEK SOLAR. (2019). *Optidrive OP2 Solar Pump, AC Variable Speed Drive for Solar Pumping Applications*. Welshpool, Reino Unido: INVERTEK SOLAR.
- IrrigationTutorials.com. (2021, julio 24). *Types of Irrigation Pumps*. Retrieved from Irrigation tutorials: <https://www.irrigationtutorials.com/pumps-page-2-types-of-water-pumps/>
- JA Solar. (2020). *Deep Blue 3.0 550 MBB Half-cell module* . Beijing, RP China: JA Solar.
- JNTECH. (2020). Solar Pump Solution. *System catalog*, 1-15.
- JNTECH Sistemas híbridos. (2022, Marzo 1). *JNTECH Energy*. Retrieved from Solar Water Pump Systems Manufactured By JNTECH: https://www.jntechenergy.com/jntech-solar-pump-system_p23.html?gclid=CjwKCAjwur-SBhB6EiwA5sKtjimHdJ1P-XaKpUcXvJForZkmT6TylvddhB4xlCRLxR-M1gBMQyIeORoCJwUQAvD_BwE
- JONES, P. G. (2008). *Design Pumping Station*. Burlington, MA 01803, USA: Elsevier Inc. .
- LORENTZ. (2022, Marzo 1). *Lorentz*. Retrieved from Lorentz: <https://www.lorentz.de/products-and-technology/products/psk-solar-pumping-systems/>
- Ministry of New and Renewable Energy, India. (2018). *Solar Photovoltaic Water Pumping Systems*. New Delhi: Ministry of New and Renewable Energy, India.
- NFPA. (2018). In NFPA, *Installation of Stationary Pumps for Fire Protection*. Quincy, MA: NFPA.
- NREL. (2020, sep 2). *NREL Learning*. Retrieved from Youtube.com: https://www.youtube.com/watch?v=rbgfPPqHf_Y
- Ohio-Electric-Motors. (2021, 10 31). *DC Motors in Hydraulic Pump Applications*. Retrieved from ohioelectricmotors.com: <https://www.ohioelectricmotors.com/2015/07/dc-motors-in-hydraulic-pump-applications/>

- Roberto Herrera Salcedo. (2013). *Modelado y caracterización de paneles fotovoltaicos*. Chihuahua, Mexico: Centro de Investigación de Materiales Avanzados, S.C.
- Seattle Public Utilities. (2020). In S. P. Utilities, *Design Standards and Guidelines* (p. Capítulo 9). Seattle, Washington, Estados Unidos de América: Seattle Public Utilities.
- SHAKTI PUMPS. (2018, Junio). SOLAR PUMPS DC SURFACE. Pithampur, India: SHAKTI PUMPS.
- Sharma, B. S. (2017). *Intelligent grid interfaced solar water pumping system*. IET Renewable Power Generation, vol. 11, no. 5, 614-624.
- Sherer, T. F. (2021, julio 24). *Above ground or under? How to choose the right agricultural pump*. Retrieved from pumpsandsystems.com: http://digital.pumpsandsystems.com/publication/?i=535478&article_id=3217190&view=articleBrowser&ver=html5
- SIGET. (2017). *NORMA PARA USUARIOS FINALES PRODUCTORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON RECURSOS RENOVABLES*. San Salvador, El Salvador: SIGET.
- SIGET. (2022, 02 25). *Transparencia*. Retrieved from Transparencia: https://www.transparencia.gob.sv/system/documents/documents/000/434/864/original/Terminos_y_Condiciones_Generales_al_Consumidor_Final_del_a%C3%B1o_2021.pdf?1622061830
- SOLCON. (2018). *Digital Soft Starter with Internal Bypass Instructions Manual*. Israel: SOLCON.
- TAIFU. (2021, 10 31). DC Solar Pump. AC / DC Convertible Pump. Zhejiang, China: Taifu.
- VALCO. (2015). *Centrifugal Single Stage Electrical Pumps*. Vicenza: Valco.
- Watercare. (2020). *Standard for Network Water Pump Stations*. Auckland, Nueva Zelanda: Watercare.
- Water-Missions. (2021). *Sistemas de agua mediante energía solar, documento guía para el diseño y la instalación*. Nueva York, EEUU: UNICEF.
- World Bank. (2018). *Solar Pumping: The Basics*. Washington, DC., United States: World Bank Publications.
- Zureks. (2007, Marzo 24). *Señales PWM*. Retrieved from Wikimedia Commons: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1835361>

Anexos

I. Glosario

- Variador de frecuencia: Dispositivo de electrónica de potencia, que regula la velocidad a la que gira un motor trifásico (existen variadores de frecuencia para motores monofásicos pero solo para muy bajas potencias y los motores no tienen que tener capacitor de arranque), la regulación la logra ajustando el voltaje y frecuencia que recibe el motor, la alimentación del variador de frecuencia puede ser trifásica o monofásica (cuando la alimentación es monofásica se duplica la potencia del variador con respecto a la del motor)¹, existen versiones especiales de variadores de frecuencia que pueden ser alimentados con energía de paneles fotovoltaicos, el fabricante solo sugiere que se realice una transferencia manual entre la energía de los paneles fotovoltaicos o energía AC de la distribuidora eléctrica o grupo de electrógenos.
- AC: Corriente alterna.
- DC: Corriente directa.
- Fuente rígida: En aplicaciones de distribución y transmisión eléctrica, es una fuente de potencia eléctrica capaz de fijar el voltaje en su nodo, dentro de un rango amplio de capacidad. Por ejemplo, son fuentes rígidas los transformadores o subestaciones eléctricas, conectados a una red de distribución o transmisión eléctrica.
- Fuente no rígida: Fuente de potencia eléctrica que no es capaz de fijar el voltaje en su nodo, se refiere a nodos de potencia activa – reactiva. Son fuentes no rígidas todos los tipos de generadores eléctricos conectados a redes de distribución (sean solares, a gas, hidroeléctricos, térmicos), ya sean o no capaces de inyectar potencia a la red de distribución o solamente a sus cargas.
- VFD: Variador de frecuencia.
- kWp: kilo-watt pico
- Sistema de alimentación energía eléctrica de la red: es la alimentación de energía eléctrica que se obtiene de una red de distribución eléctrica convencional, en media o baja tensión, de corriente alterna, trifásica o monofásica.
- Sistema conectado a la red, sistema conectado a distribuidora: Es otra forma de referirse a un *Sistema de alimentación energía eléctrica de la red*.
- Sistema de alimentación fotovoltaico aislado: En el contexto de este trabajo de investigación de aplicaciones para bombeo de agua, nos referimos a una instalación eléctrica que incluye paneles solares fotovoltaicos, protecciones DC, cableado, estructura, conectores,

y que no cuenta con controlador solar de punto óptimo de operación, que no cuenta con baterías y que no incluye dispositivos electrónicos.

- Sistema aislado: Es otra forma de referirse a un *Sistema de alimentación fotovoltaico aislado*.
- Sistema de alimentación eléctrica híbrida: es el uso de dos (2) tipos de energía eléctrica al mismo tiempo, la energía de sistemas fotovoltaicos aislados y energía AC de la distribuidora eléctrica o grupo de electrógenos.
- Sistema híbrido: Es un *Sistema de alimentación eléctrica híbrida*.

II. Especificación técnica de ANDA

Los siguientes puntos son las especificaciones técnicas de ANDA sobre los dispositivos obligatorios para la interconexión de proyectos de agua potable.

- **Alto nivel de agua:** esta protección se aplicará para equipos instalados en pozos o cisternas y que tengan que llenar tanques de almacenamiento o cisternas, con el objeto que suspenda la operación cuando éstos se encuentren llenos (tanques o cisternas). El arrancador contará con el dispositivo necesario para realizar esta función.
- **Bajo y alto nivel de agua:** esta protección será aplicable para aquellos equipos que operen en pozos y cisternas. Las protecciones contra alto y bajo nivel se efectuarán por medio de un switch de electrodos integrado por tres electrodos de acero inoxidable, tres cables AWM1056 #18, 600 voltios, un cuerpo LB conduit $\varnothing$ 1/2" conectado a 2 m de coraza LT $\varnothing$ 1/2" con sus conectores rectos y. Estos electrodos se instalarán dentro de su respectivo tubo protector de PVC perforado, cuando se trate de cisternas.

Todas las protecciones deben responder para el arranque y paro de los equipos en las posiciones manual y automático.

Contra las vibraciones del motor (solo para motor de eje hueco tipo vertical). Esta protección será aplicable para motores eléctricos verticales iguales o mayores a 200 HP, para tal efecto el motor deberá traer incorporado un protector por excesiva vibración.

Todas las protecciones deben responder para el arranque y paro de los equipos en las posiciones manual y automático.

Para el sistema de control se podrá incorporar un relé programable, (micro PLC) con el cual se ajustarán los tiempos de control de: pre-lubricación; protecciones de vibración; alto y bajo nivel de cisterna o pozo local; alto y bajo nivel de tanque ó cisterna a distancia; y alguna otra particularidad.

El relé programable no tendrá clave de protección para *accesar* [sic] al programa; además se entregará copia del programa aplicado junto con los documentos del arrancador.

En aplicaciones con arrancadores electrónicos, las protecciones podrán aplicarse en estos dispositivos.

Cuando los fabricantes especifiquen la utilización de fusibles rápidos como en algunos arrancadores electrónicos, estos deberán ser incorporados.

Instalar seccionadores de aislamiento en la utilización de arrancadores electrónicos.

Interruptor de presión: El sistema de paro y arranque de la bomba podrá ser controlado por medio de un interruptor de presión, este interruptor de presión estará monitoreando la presión en la línea de impelencia, ajustándose en campo la presión de paro del equipo de bombeo y presión de arranque del equipo de bombeo, inicialmente se requerirá un rango de 20 PSI mínimo entre paro y arranque, el proceso comenzará una vez recibida la orden de marcha ya sea en modo automático o manual, el PLC contara un tiempo de verificación de presión, en el cual mandara la orden de marcha o de paro al arrancador y por ende al motor

Todas las protecciones deben responder para el arranque y paro de los equipos en las posiciones manual y automático.

Las protecciones por vibración, sobre presión, baja presión, deben incorporar temporizadores que aíslen transitorios en el momento de arranque y paro, o de cualquier otra índole.

III. Costeo de diferentes arrancadores del Capítulo 1.

Tabla 24. Costeo de sistemas de arranque y protección de Capítulo 1.

Cantidad	Equipos o materiales	Contactor	Precio Unitario	Subtotal	Arrancador Suave	Precio Unitario	Subtotal	Variador de frecuencia	Precio Unitario	Subtotal
Protecciones generales										
1	Interrupor termomagnético	50A	\$ 52.95	\$ 52.95		\$ 52.95	\$ 52.95		\$ 52.95	\$ 52.95
3	Portafusible		\$ 4.44	\$ 13.32	x		\$ -	x		\$ -
3	Fusibles		\$ 2.88	\$ 8.64	x		\$ -	35A	\$ 2.88	\$ 8.64
1	Rele bimetalico	17-25A	\$ 14.83	\$ 14.83		\$ 14.83	\$ 14.83		\$ 14.83	\$ 14.83
1	Guardamotor		\$ 34.60	\$ 34.60		\$ 34.60	\$ 34.60		\$ 34.60	\$ 34.60
1	Monitor de nivel de agua	Si		\$ -	x		\$ -	x		\$ 53.96
1	Monitor de voltaje	Si		\$ -	x		\$ 53.96	x		\$ 92.54
1	Electrodos	Si		\$ -	x		\$ -		3	\$ 10.68
3	Supresor de sobrevoltaje	Si	\$ 30.00	\$ 90.00	3	\$ 30.00	\$ 90.00	3	\$ 30.00	\$ 90.00
Tipo de arranque o control										
1	Contactor	50A	\$ 40.00	\$ 40.00		\$ 40.00	\$ 40.00	32A	\$ 40.00	\$ 40.00
1	Contactor	9A	\$ 10.16			\$ 10.16			\$ 10.16	
1	Arrancador suave		\$ -		31A	\$ 504.93	\$ 504.93			\$ -
1	Variador de frecuencia		\$ -			\$ -		7.5hp	\$ 835.00	\$ 835.00
Accesorios										
1	Gabinete	600x400x200mm	\$ 215.00	\$ 215.00	600x400x200mm	\$ 215.00	\$ 215.00	800x600x300mm	\$ 215.00	\$ 215.00
1	Termostato		\$ 9.08	\$ 9.08		\$ 9.08	\$ 9.08	x		\$ -
2	Ventiladores		\$ 59.36	\$ 118.72		\$ 59.36	\$ 118.72	120x120mm	\$ 59.36	\$ 118.72
1	Rejilla plastica		\$ 1.45	\$ 1.45	120x120mm	\$ 1.45	\$ 1.45		\$ 1.45	\$ 1.45
4	Piloto rojo	x		\$ -	x		\$ -	2	\$ 1.50	\$ 6.00
4	Piloto naranja	x		\$ -	x		\$ -	2	\$ 1.50	\$ 6.00
4	Piloto verde	x		\$ -	x		\$ -	4	\$ 1.50	\$ 6.00
1	Maneta de 2 posiciones	x		\$ -	x		\$ -	1	\$ 5.08	\$ 5.08
1	Maneta de 2 posiciones	x		\$ -	x		\$ -	1	\$ 7.95	\$ 7.95
1	Interrupor termomagnético	2A 3p	\$ 8.80	\$ 8.80	2A 3p	\$ 8.80	\$ 8.80	2A 3p	\$ 8.80	\$ 8.80
1	Canaleta ranurada	x		\$ -	x		\$ -	x		\$ -
1	Terminales, etiquetado, otros	x		\$ -	x		\$ -	x		\$ -
1	Accesorios en general		\$ -			\$ -		1	\$ 45.00	\$ 45.00
1	Accesorios en general		\$ -			\$ -		1	\$ 152.98	\$ 152.98
Conductores										
6	THHN	8	\$ 1.37	\$ 8.22	10	\$ 0.83	\$ 4.98	10	\$ 0.83	\$ 4.98
10	TFFN	16	\$ 0.27	\$ 2.70	16	\$ 0.27	\$ 2.70	16	\$ 0.27	\$ 2.70
Total				\$ 618.31	Total		\$ 1,244.54	Total		\$ 1,835.22

IV. Costeo de diferentes arrancadores del Capítulo 2.

- a) Costeo de instalación de sistema fotovoltaico aislado, para bombeo de agua con capacidad de 7.5 hp.

Tabla 25. Costeo de arrancadores de 7.5 hp de Capítulo 2.

Cantidad	Descripción	P. Unitario	Sub-Total	Subtotal
	Paneles solares			\$ 8,750.72
32	Panel fotovoicos, 32 paneles de 405W, 12960 Wpico en total	\$ 204.71	\$ 6,550.72	
1	estructura	2200	\$ 2,200.00	
	Equipos en exterior			\$ 165.79
3	Pares de Conector MC4 2 ENTRADAS 1 SALIDA	\$ 8.67	\$ 26.01	
3	Diodo Solar 20Amp	\$ 6.50	\$ 19.50	
2	Swich solar 1000Vdc, 32A, 4p	\$ 52.69	\$ 105.38	
10	Conector MC4 par	\$ 1.49	\$ 14.90	
	Tablero DC			\$ 1,869.16
1	Gabinete metalico	\$ 315.00	\$ 315.00	
2	Modulo de diodo 25A	\$ 15.17	\$ 30.34	
1	Automato de DC 35A	\$ 28.84	\$ 28.84	
4	Porta fusible DC	\$ 1.84	\$ 7.36	
4	fusible DC 25A	\$ 2.84	\$ 11.36	
1	SUPRESOR DE VOLTAJE DC 500VDC	\$ 27.00	\$ 27.00	
1	Variador de frecuencia 7.5HP P2 invertex	\$ 835.00	\$ 835.00	
3	Automato 2p, 2A	\$ 12.48	\$ 37.44	
3	Supresor de voltaje 240v	\$ 30.00	\$ 90.00	
1	Monitor de nivel (electrosonda)	\$ 92.54	\$ 92.54	
3	Electrodos	\$ 10.68	\$ 32.04	
1	Contactador 9A	\$ 10.16	\$ 10.16	
2	Ventiladores	\$ 59.36	\$ 118.72	
1	Termostato para gabinete	\$ 9.08	\$ 9.08	
5	Canaleta ranurada	\$ 7.00	\$ 35.00	
1	terminales, cinchos plasticos, espiral plastico, etiquetas	\$ 45.00	\$ 45.00	
4	Riel din	\$ 2.45	\$ 9.80	
15	Bornera pequeña	\$ 1.05	\$ 15.75	
8	borneras grandes	\$ 3.40	\$ 27.20	
25	topes	\$ 0.66	\$ 16.50	
1	Accesorios	\$ 50.00	\$ 50.00	
1	Maneta de 2 posiciones	\$ 5.08	\$ 5.08	
1	Maneta de 3 posiciones	\$ 7.95	\$ 7.95	
2	piloto rojo	\$ 1.50	\$ 3.00	
2	piloto naranja	\$ 1.50	\$ 3.00	
4	piloto verde	\$ 1.50	\$ 6.00	
	total		\$ 10,785.67	\$ 10,785.67

V. Costeo de diferentes arrancadores del Capítulo 3.

- a) Costos de un sistema eléctrico conectado a red, para alimentar una estación de bombeo de 30 hp.

Tabla 26. Costeo de sistema para potencia de bombeo 30 hp, conectado a red, Capítulo 3.

Cantidad	Descripción	P. Unitario	Sub-Total
Variador y reactancia			
1	Variador de frecuencia P2 30hp, 460v	\$ 1,625.90	\$ 1,625.90
1	Display de variador de frecuencia	\$ 220.00	\$ 220.00
Gabinete metalico			
1	Gabinete metalico 800x600x400	\$ 250.00	\$ 250.00
Protecciones AC			
1	Breaker 80A	\$ 55.04	\$ 55.04
3	Portafusible	\$ 7.39	\$ 22.17
3	Fusible 70A	\$ 2.46	\$ 7.38
3	Automato 2p, 2A	\$ 12.54	\$ 37.62
3	Supresor de voltaje 480v	\$ 30.00	\$ 90.00
Medicion AC			
1	analizador de red EBC	\$ 300.00	\$ 300.00
1	modulo de comunicaci3n	\$ 40.50	\$ 40.50
3	transformadores de corriente 100/5A	\$ 34.22	\$ 102.66
Reles de proteccion			
1	Monitor de voltaje	\$ 53.96	\$ 53.96
1	Monitor de nivel	\$ 16.40	\$ 16.40
Sensores hidraulicos			
3	Electrodos	\$ 10.68	\$ 32.04
Accesorios			
1	Transformador de voltaje 240/480v 500VA	\$ 138.00	\$ 138.00
1	Contactador 80A	\$ 65.62	\$ 65.62
2	Ventiladores	\$ 36.38	\$ 72.76
1	rejilla mediana	\$ 13.50	\$ 13.50
1	rejilla pequena	\$ 8.18	\$ 8.18
1	Termostato para gabinete	\$ 9.34	\$ 9.34
3	Canaleta ranurada	\$ 15.00	\$ 45.00
1	terminales, cinchos plasticos, espiral plastico, etiquetas	\$ 75.00	\$ 75.00
4	Riel din	\$ 2.45	\$ 9.80
6	Riel stuck	\$ 15.00	\$ 90.00
20	Bornera pequena	\$ 0.85	\$ 17.00
24	topes	\$ 0.66	\$ 15.84
1	Accesorios	\$ 150.00	\$ 150.00
Indicadores y selectores			
2	Maneta de 2 posiciones	\$ 5.08	\$ 10.16
2	Maneta de 3 posiciones	\$ 7.50	\$ 15.00
4	piloto rojo	\$ 1.50	\$ 6.00
1	piloto naranja	\$ 1.50	\$ 1.50
3	piloto verde	\$ 1.50	\$ 4.50
		Total	\$ 3,600.87

b) Costos de un sistema eléctrico aislado para alimentar una estación de bombeo de 30 hp.

Tabla 27. Costeo de sistema para potencia de bombeo 30 hp, aislado, Capítulo 3.

Cantidad	Descripción	P. Unitario	Sub-Total
Paneles solares			
96	Panel fotovoltaico de 540w	\$ 295.00	\$ 28,320.00
Protecciones DC y accesorios solares exterior			
6	Diodo Solar 20Amp	\$ 15.17	\$ 91.02
6	Swich solar 1000Vdc, 32A, 4p	\$ 52.69	\$ 316.14
25	Conector MC4 par	\$ 2.07	\$ 51.75
Variador y reactancia			
1	Variador de frecuencia P2 30hp, 460v	\$ 1,625.90	\$ 1,625.90
1	Display de variador de frecuencia	\$ 220.00	\$ 220.00
Gabinete metalico			
1	Gabinete metalico 800x600x400	\$ 170.31	\$ 170.31
1	Gabinete metalico 800x600x400	\$ 170.31	\$ 170.31
Bus DC			
6	Automato de DC 16A	\$ 28.84	\$ 173.04
6	Modulo de diodo 20A	\$ 15.17	\$ 91.02
12	Porta fusible DC	\$ 4.07	\$ 48.84
12	fusible DC 20A	\$ 2.84	\$ 34.08
1	Barra de cobre 200A	\$ 50.75	\$ 50.75
6	Aislador para Barra de cobre	\$ 2.70	\$ 16.20
12	Terminales de ojo #10	\$ 0.75	\$ 9.00
1	Termoencogible para Barra	\$ 4.10	\$ 4.10
1	Automato DC 63A	\$ 28.84	\$ 28.84
2	fusible DC 63A	\$ 2.84	\$ 5.68
2	Porta fusible DC	\$ 4.07	\$ 8.14
1	SUPRESOR DE VOLTAJE 1000 VDC	\$ 40.12	\$ 40.12
Reles de proteccion			
1	Monitor de nivel	\$ 16.40	\$ 16.40
Sensores hidraulicos			
3	Electrodos	\$ 10.68	\$ 32.04
Accesorios			
2	Ventiladores	\$ 36.38	\$ 72.76
1	rejilla mediana	\$ 13.50	\$ 13.50
1	rejilla pequeña	\$ 8.18	\$ 8.18
1	Termostato para gabinete	\$ 9.34	\$ 9.34
3	Canaleta ranurada	\$ 15.00	\$ 45.00
1	terminales, cinchos plasticos, espiral plastico, etiquetas	\$ 50.00	\$ 50.00
4	Riel din	\$ 2.45	\$ 9.80
6	Riel stuck	\$ 15.00	\$ 90.00
20	Bornera pequeña	\$ 0.85	\$ 17.00
24	topes	\$ 0.66	\$ 15.84
1	Accesorios	\$ 150.00	\$ 150.00
Indicadores y selectores			
2	Maneta de 2 posiciones	\$ 5.08	\$ 10.16
2	Maneta de 3 posiciones	\$ 7.50	\$ 15.00
4	piloto rojo	\$ 1.50	\$ 6.00
1	piloto naranja	\$ 1.50	\$ 1.50
3	piloto verde	\$ 1.50	\$ 4.50
Estructura			
1	estructura	\$ 6,000.00	\$ 6,000.00
Total			\$ 38,042.26

- c) Costos de un sistema eléctrico de alimentación **híbrida**, para alimentar una estación de bombeo de 30 hp.

Tabla 28. Costeo de sistema para potencia de bombeo 30 hp, híbrido, Capítulo 3.

Cantidad	Descripción	P. Unitario	Sub-Total
Paneles solares			
96	Panel fotovoltaico de 540w	\$ 295.00	\$ 28,320.00
Equipos en exterior			
6	Diodo Solar 20Amp	\$ 15.17	\$ 91.02
6	Swich solar 1000Vdc, 32A, 4p	\$ 52.69	\$ 316.14
25	Conector MC4 par	\$ 2.07	\$ 51.75
Tablero DC			
1	Gabinete metalico 800x600x400	\$ 170.31	\$ 170.31
6	Automato de DC 16A	\$ 28.84	\$ 173.04
6	Modulo de diodo 20A	\$ 15.17	\$ 91.02
12	Porta fusible DC	\$ 4.07	\$ 48.84
12	fusible DC 20A	\$ 2.84	\$ 34.08
1	Barra de cobre 200A	\$ 50.75	\$ 50.75
6	Aislador para Barra de cobre	\$ 2.70	\$ 16.20
12	Terminales de ojo #10	\$ 0.75	\$ 9.00
1	Termoencogible para Barra	\$ 4.10	\$ 4.10
1	Diodo de Recuperacion 300 Amp	\$ 50.00	\$ 50.00
1	Disipador de calor	\$ 36.63	\$ 36.63
1	Automato de DC 16A	\$ 28.84	\$ 28.84
1	Automato DC 63A	\$ 28.84	\$ 28.84
2	fusible DC 63A	\$ 2.84	\$ 5.68
2	Porta fusible DC	\$ 4.07	\$ 8.14
1	Contactore 100A DC	\$ 85.75	\$ 85.75
1	SUPRESOR DE VOLTAJE 1000 VDC	\$ 40.12	\$ 40.12
1	transformador de corriente DC 100A	\$ 28.40	\$ 28.40
1	Medidor de voltaje DC 1000V	\$ 133.48	\$ 133.48
1	Medidor de radiacion solar	\$ 307.88	\$ 307.88
Tablero de Control			
1	Fuente de 24v	\$ 111.74	\$ 111.74
1	Automato 2P 6A	\$ 12.54	\$ 12.54
1	PLC altus xp340	\$ 1,408.00	\$ 1,408.00
8	rele de 240v	\$ 6.58	\$ 52.64
8	Base para rele de 240v	\$ 3.50	\$ 28.00
8	rele de 24v	\$ 5.15	\$ 41.20
8	Base para rele de 24v	\$ 3.50	\$ 28.00
1	Gabinete metalico 600x400x250	\$ 88.69	\$ 88.69
Tablero AC			
1	Variador de frecuencia P2 30hp, 460v	\$ 1,625.90	\$ 1,625.90
1	Display de variador de frecuencia	\$ 220.00	\$ 220.00
1	Gabinete metalico 800x600x400	\$ 170.31	\$ 170.31
1	Automato DC 50A	\$ 28.84	\$ 28.84
1	Breaker 80A	\$ 55.04	\$ 55.04
3	Portafusible	\$ 7.39	\$ 22.17
3	Fusible 70A	\$ 2.46	\$ 7.38
3	Automato 2p, 2A	\$ 12.54	\$ 37.62
3	Supresor de voltaje 480v	\$ 30.00	\$ 90.00
1	analizador de red EBC	\$ 300.00	\$ 300.00
1	modulo de comunicaci3n	\$ 40.50	\$ 40.50
3	transformadores de corritente 100/5A	\$ 34.22	\$ 102.66
1	Monitor de voltaje	\$ 53.96	\$ 53.96
1	Monitor de nivel	\$ 16.40	\$ 16.40
3	Electrodos	\$ 10.68	\$ 32.04

3	Electrodos	\$ 10.68	\$ 32.04
1	Transformador de voltaje 240/480v 500VA	\$ 138.00	\$ 138.00
1	Contacto 80A	\$ 65.62	\$ 65.62
2	Ventiladores	\$ 36.38	\$ 72.76
1	rejilla mediana	\$ 13.50	\$ 13.50
1	rejilla pequeña	\$ 8.18	\$ 8.18
1	Termostato para gabinete	\$ 9.34	\$ 9.34
3	Canaleta ranurada	\$ 15.00	\$ 45.00
1	terminales, cinchos plasticos, espiral plastico, etiquetas	\$ 75.00	\$ 75.00
4	Riel din	\$ 2.45	\$ 9.80
6	Riel stuck	\$ 15.00	\$ 90.00
20	Bornera pequeña	\$ 0.85	\$ 17.00
24	topes	\$ 0.66	\$ 15.84
1	Accesorios	\$ 150.00	\$ 150.00
2	Maneta de 2 posiciones	\$ 5.08	\$ 10.16
2	Maneta de 3 posiciones	\$ 7.50	\$ 15.00
4	piloto rojo	\$ 1.50	\$ 6.00
1	piloto naranja	\$ 1.50	\$ 1.50
3	piloto verde	\$ 1.50	\$ 4.50
			\$ -
	Estructura		\$ -
1	estructura de paneles	\$ 6,000.00	\$ 6,000.00
	Total		\$ 41,450.84

d) Costos de materiales para costeo de sistemas desde 1 hasta 250 hp, Capítulo 4.

Tabla 29. Costeo de sistemas de 1 a 250 hp, híbridos, precios de segundo trimestre de 2022.

	Partes solar	Sistemas	Sistemas	Sistemas
hp	potencia total de paneles kW	Conectado a Red	Aislado	Hibrido
1	3.24	\$ 1,039.19	\$ 2,796.66	\$ 5,269.10
2	3.24	\$ 1,039.19	\$ 2,796.66	\$ 5,269.10
7.5	12.96	\$ 1,835.22	\$ 10,785.67	\$ 13,172.47
15	22.68	\$ 2,571.55	\$ 17,403.18	\$ 20,272.62
30	51.84	\$ 3,550.02	\$ 38,042.26	\$ 41,450.84
60	91.2	\$ 5,349.32	\$ 69,116.36	\$ 72,260.32
120	193.8	\$ 8,806.16	\$ 141,188.45	\$ 148,229.95
250	376.2	\$ 21,773.06	\$ 257,221.76	\$ 283,419.43

Tabla 30. Costo unitario en \$/hp de diferentes sistemas, potencias desde 1 hasta 250 hp.

hp	Costo unitario \$/hp		
	Conectado a Red	Aislado	Hibrido
1	\$1,039.19	\$2,796.66	\$5,269.10
2	\$519.60	\$1,398.33	\$2,634.55
7.5	\$244.70	\$1,438.09	\$1,756.33
15	\$171.44	\$1,160.21	\$1,351.51
30	\$118.33	\$1,268.08	\$1,381.69
60	\$89.16	\$1,151.94	\$1,204.34
120	\$73.38	\$1,176.57	\$1,235.25
250	\$87.09	\$1,028.89	\$1,133.68

VI. Tarifas usadas para el estudio.

SUPERINTENDENCIA GENERAL DE ELECTRICIDAD Y TELECOMUNICACIONES

TARIFAS

PRECIOS MAXIMOS PARA EL SUMINISTRO ELECTRICO
VIGENTES A PARTIR DEL 15 DE ABRIL DE 2022 *

I. PEQUEÑAS DEMANDAS (0 < kW ≤ 10)

BAJA TENSION

Uso General								
	CAESS	DELSUR	CLESA	EEO	DEUSEM	EDESAL	B&D	ABRUZZO
Cargo de Comercialización:								
Cargo Fijo US\$/Usuario-m	0.857491	1.002297	0.785781	0.913697	0.831726	2.385494	0.867936	0.926466
Cargo de Energía:								
Cargo Variable US\$/kWh	0.161062	0.163796	0.164480	0.167451	0.166187	0.156757	0.151452	0.168392
Cargo de Distribución:								
Cargo Variable US\$/kWh	0.035283	0.043249	0.041034	0.060678	0.063832	0.062912	0.037519	0.034457

II. MEDIANA DEMANDA (10 < kW ≤ 50)

MEDIA TENSION CON MEDIDOR HORARIO

	CAESS	DEL SUR	CLESA	EEO	DEUSEM	EDESAL	B&D	ABRUZZO
Cargo de Comercialización:								
Cargo Fijo US\$/Usuario-m	0.857491	1.002297	0.785781	0.913697	0.831726	2.385494	0.867936	0.926466
Cargo de Energía:								
Energía en Punta US\$/kWh	0.167846	0.166908	0.175655	0.168721	0.174697	0.166794	0.167549	0.143774
Energía en Resto US\$/kWh	0.139371	0.139308	0.137129	0.138914	0.134329	0.133406	0.137217	0.142078
Energía en Valle US\$/kWh	0.165925	0.166196	0.173486	0.167608	0.174090	0.161871	0.167280	0.138994
Cargo de Distribución:								
Potencia: US\$/kW-mes	7.089464	7.008348	13.097554	17.848802	19.101749	9.695440	10.688800	5.251206

III. GRANDES DEMANDAS (>50 kW)									
MEDIA TENSION CON MEDIDOR HORARIO									
		CAESS	DEL SUR	CLESA	EEO	DEUSEM	EDESAL	B&D	ABRUZZO
Cargo de Comercialización:									
Cargo Fijo	US\$/Usuario-m	12.862377	15.034473	11.786708	13.705455	12.475882	19.641153	17.214672	7.118801
Cargo de Energía:									
Energía en Punta	US\$/kWh	0.167846	0.166908	0.175655	0.168721	0.174697	0.166794	0.167549	0.143774
Energía en Resto	US\$/kWh	0.139371	0.139308	0.137129	0.138914	0.134329	0.133406	0.137217	0.142078
Energía en Valle	US\$/kWh	0.165925	0.166196	0.173486	0.167608	0.174090	0.161871	0.167280	0.138994
Cargo de Distribución:									
Potencia:	US\$/kW-mes	7.089464	7.008348	13.097554	17.848802	19.101749	9.695440	10.688800	5.251206

VII. Periodos de tarifas diferenciadas de energía, aplicables en El Salvador.

Art. 53.- Para los efectos de los suministros con medición horaria, se definen los horarios tarifarios de la siguiente manera:

- a) Punta: de las 18:00 a 22:59 horas;
- b) Resto: de las 05:00 a 17:59 horas; y
- c) Valle: de las 23:00 a 04:59 horas

Tomado de (SIGET, 2022).

VIII. Factura en sitio de instalación de sistema de 30 hp, antes de instalación de sistema de alimentación híbrida.

CLIENTE DIRECCION DE SUMINISTRO: [REDACTED] CARRTE SUCHITOTO REFERENCIA DE DIRECCION: [REDACTED] MEDIDOR ELECTRONICO TETRAFILAR DIRECCION DE COBRO: [REDACTED]		OFICINA COMERCIAL SUCHITOTO CAESS TARIFA: MD6-MT con med Hor. CAESS SEC. RUTA: 2128- 61- 5- 8 MEDIDOR: 96232740 FECHA DE EMISION: 05/04/2022	
No. IDENTIFICACION DE CONTRATO Indique este número cuando se comuniqué con nosotros NIC 0126925 NIS 5114413		PERIODO FACTURADO DESDE: 04/03/2022 HASTA: 04/04/2022 DIAS FACTURADOS: 31 MES FACTURADO: 04/2022 FECHA EMISION: 05/04/2022	
CONSUMO KWH 13,897.59		RESUMEN DE PAGO TOTAL CAESS \$ 825.70 TOTAL OTROS SERVICIOS \$ 0.00 TOTAL ALCALDIA \$ 0.00 TOTAL A PAGAR \$ 825.70	
FECHA DE VENCIMIENTO 18/04/2022		FACTURA SERIE B N° [REDACTED] RECIBIENDO N° 221-3 NIT 9614-171199-0013 GARCIA Gen y David de Energía Eléctrica	
TARIFA APLICADA INICIO: 04/03/2022 04/03/2022 04/03/2022 04/03/2022 FINAL: 04/03/2022 04/03/2022 04/03/2022 04/03/2022 ENERGIA: 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 PUNTA: 0.000000 0.000000 0.000000 0.167045 VALLE: 0.000000 0.167045 0.000000 0.000000 RESTO: 0.000000 0.000000 0.136271 0.000000 DEMANDA: 1.000000 0.000000 0.000000 0.000000		LECTURA TIPOS HORA PUNTA (18-00-01) 0000 HORA VALLE (00-00-01) 0000 HORA RESTO (00-00-01) 0000 DEMANDA FACTOR DE POTENCIA 94.60 94.60 94.60	
DATOS DEL SUMINISTRO Cálculo de consumo: MEDIDOR: 96232740 TIPO: KWH MEDIDA PER TONELAS TONELAS PUNTA: 0.00 KWH: 1.00 TONELAS VALLE: 0.00 KWH: 1.00 TONELAS RESTO: 0.00 KWH: 1.00 TONELAS RESTO: 0.00 KWH: 1.00		CAPACIDAD DEL SUMINISTRO Potencia Demandada: 11.00 KW Demanda facturada: 32.77 KW Capacidad leída: 32.77 Kw	
HISTORIAL DE CONSUMO EN KWH DE LOS ULTIMOS 6 MESES 		CONTINUO 1 2 3 4 5 6 FECHA LECT. 04/03/2022 04/03/2022 04/03/2022 04/03/2022 04/03/2022 04/03/2022 PROMEDIO ULTIMOS 6 MESES EN KWH: 11,831.00	
ALCALDIA TITULAR DE PAGO CUENTA No. NIC NIS MES FACTURADO FECHA DE EMISION RESUMEN DE PAGO DETALLE DE TASAS MUNICIPALES IMPORTE \$ TOTAL ALCALDIA \$		DETALLE DE FACTURACIÓN CONCEPTOS GRAVADOS Costo por tasa municipal por poste Cargo de Distribucion Potencia Cargo de Comercializacion Cargo por Energía Punta Cargo por Energía Valle Cargo por Energía Resto Subsidio Finet IMPORTE \$ 0.35 262.52 0.97 268.83 665.13 1,436.80 -1,778.41 SUBTOTAL 826.21 DETALLE DE CARGOS VARIOS Y OTROS INGRESOS CONCEPTOS GRAVADOS SUBTOTAL 0.00 VENTAS EXENTAS Compensacion por fallas -0.51 TOTAL CAESS (A) 825.70 OTROS SERVICIOS 0.00 TOTAL OTROS SERVICIOS (B) 0.00 TOTAL CAESS + OTROS SERVICIOS (A+B) 825.70 TOTAL A + B + C 825.70	
No. 16SD000U4813913 NIT 9614-171199-0013 FECHA DEL 16/04/2022 AL 16/04/2022		SELO DE PAGO BANCO DE FOMENTO AGROPECUARIO 22 ABR. 2022 AGENCIA AGUILARES CAJERO No. 3	

En cumplimiento a la "Ley contra el lavado de dinero y de activos" y normativa aplicable, será obligatorio para realizar cualquier pago en nuestras oficinas comerciales presentar documento de identificación vigente, legible y en buen estado.
Gracias por tu comprensión

Figura 73. Imagen de factura de un sistema de bombeo de 30 hp, conectado a la red.

IX. Memoria de cálculo dotación de agua potable proyecto ACRASAME - ZP, Cantón Zapotal, Suchitoto, Cuscatlán, El Salvador.

Se efectuó el proceso de diseño de acuerdo a la Figura 12.

Datos Característicos:

Número de Viviendas: 680

Número de Habitantes: 3400

Dotación: 100 litros por día por persona (100 l/(d*p))

i. Demanda de agua.

Se utiliza el método aritmético para estimar la población futura, esta suposición se considera aceptable para poblaciones pequeñas y con crecimiento limitado, como el caso de la comunidad analizada, adicional al hecho que en El Salvador la tasa de crecimiento está tendiendo a cero.

El periodo de diseño será de 20 años y se asumirá una tasa de crecimiento poblacional (lineal o aritmético) del 2% anual.

$$P_f = P_f * (1 + i * n) ; i = 2\%$$

$$P_f = 3400 * (1 + 0.02 * 20)$$

$$P_f = 4760 \text{ habitantes}$$

Cálculo de Caudales de Diseño con población actual

$$Q_{md} = \frac{(\text{Consumo diario por persona} * \text{Cantidad de personas})}{\text{Segundos que hay en un día}}$$

$$Q_{md} = \frac{(100 * 3400)}{86400} = 3.94 \text{ l/s}$$

Usando factores $K_1 = 1.5$ y $K_2 = 2.4$.

$$Q_{maxd} = 3.94 * K_1 = 3.94 * 1.5 = 5.91 \text{ l/s}$$

$$Q_{maxh} = 3.94 * K_2 = 3.94 * 2.4 = 9.46 \text{ l/s}$$

En el sitio, con la bomba y sistema existente, se tienen datos y estimaciones que indican valores de 35 m³/h de agua bombeados, que equivale a 154 GPM; esto se mantiene así durante 14 horas que opera el equipo de bombeo cada día.

ii. Fuente de agua.

En el sitio, en algún momento del pasado, se perforó un pozo profundo para agua potable, además, se realizaron pruebas de aforo. Con estos elementos, los administradores del proyecto de agua, concluyeron que el pozo tiene la suficiente capacidad para abastecer la comunidad, y lo han estado aprovechando por algunos años.

Luego de esto, los líderes comunitarios quieren aprovechar un apoyo financiero recibido de una ONG, para instalar energía solar fotovoltaica y sustituir su sistema de arranque, protección y alimentación, por uno híbrido con la tecnología propuesta en esta tesis.

De acuerdo con esta consideración, se considera que la fuente tiene capacidad suficiente para abastecer la demanda, con lo que se puede continuar con el ejercicio de diseño y cálculos.

iii. Carga dinámica total del sistema y flujo de diseño.

Equipo de bombeo instalado a 90 metros (295.2 pies de columna de agua).

Medición manómetro carga dinámica después del broquel 160 PSI (369.6 pies de columna de agua).

Carga dinámica total en pies es de 664.8.

[illegible]
$$Q_b = \frac{24}{n} * Q_b ; n = 14$$
$$Q_b = \frac{24}{14} * 3.94 = 6.75 \text{ l/s} \equiv 107.05 \text{ GPM}$$
$$Q_{bMax} = \frac{24}{14} * 5.91 = 10.13 \text{ l/s} \equiv 160.58 \text{ GPM}$$

iv. Selección y cálculo de bomba.

$$Potencia\ de\ bomba = BHP = \frac{GPM * CDT}{3960 * Eficiencia} = \frac{150 * 664.8}{3960 * 0.8}$$

$$Potencia\ de\ bomba = BHP = 31.47\ hp$$

Se selecciona una bomba que suministre 150 GPM.

Potencia: 30 hp

Modelo: SP-77-8

Diámetro: 4"

Tipo: Sumergible

Material de construcción: Acero inoxidable

Selección y cálculo de motor con variador de frecuencia

Se seleccionó un motor AC trifásico, debido a que en El Salvador existen muchos distribuidores de ese tipo de motor. Si el motor se dañara y es necesario sustituirlo, aun si la comunidad no cuenta con otro motor en su bodega para uso inmediato, será más fácil y probable hallar un motor de reemplazo en el país y los usuarios experimentarán un tiempo.

Motor:

- Potencia: 30 hp
- Voltaje: 460 V
- Corriente sin factor de servicio: 39.5 A
- Corriente con factor de servicio: 45.2 A

Variador de frecuencia:

Datos de salida:

- Potencia: 30 hp
- Voltaje: 460 V
- Corriente de salida 46 A

Datos de entrada AC:

- Voltaje: 460 V

Datos de entrada DC:

- Voltaje nominal: 651 Vdc
- Voltaje mínimo: 474 Vdc
- Voltaje máximo: 780 Vdc
- Sobrevoltaje DC: 835 Vdc (voltaje máximo soportado por variador de frecuencia en bus DC).

v. Diseño de sistema fotovoltaico

Para obtener la potencia que de kWp de los paneles solares se multiplica la potencia mecánica del motor por dos, que da como:

Potencia pico de paneles = Potencia mecánica del motor * 2¹⁴⁹

Potencia pico de paneles = 22.4 kW * 2

Potencia pico de paneles = 44.8 kWp

El valor de 44.8 kWp es preliminar, es una referencia del valor para comenzar a diseñar.

Para el caso, se seleccionó un panel solar, cuyas características se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 32. Características de panel fotovoltaico a usar en diseño.

Característica	Valor	Unidad
Potencia	540	W
Voc	49.6	V
Vmp	41.64	V
Isc	13.86	A
Imp	12.97	A

Para tener un voltaje DC de los paneles muy cercano al voltaje nominal DC del variador (651 Vdc), se tienen que sumar el Vmp de los paneles solares puestos en serie, teniendo en cuenta el siguiente criterio:

- El voltaje Voc total (de un arreglo serie de paneles) no se acerque ni sobrepase el valor del sobrevoltaje DC del variador (835 Vdc), dando como resultado la siguiente tabla:

¹⁴⁹ El valor de 2.0 es un valor preliminar. Si se cuenta con valores empíricos de una instalación aislada o híbrida en el mismo sitio, se puede usar para optimizar este factor y con ello reducir costos de inversión. De momento, el valor de 2.0 es un valor seguro que, según observaciones hechas para este trabajo de investigación, permitirá incluso a un sistema aislado (y también uno híbrido) operar de manera confiable una cantidad suficiente de tiempo.

Tabla 33. Voltajes para diseño de generador fotovoltaico.

Característica	Valor	Unidad
Paneles en serie	16	U
Voc total ¹⁵⁰ STC	793.6	Voltios
Vmp total	666.24	Voltios

El voltaje de 793.6 Vdc de un arreglo serie de 16 paneles fotovoltaicos, es inferior al voltaje máximo del variador, 835 Vdc. A su vez, este arreglo produce un Vmp de 666.24 Vdc.

Con la cantidad de paneles en serie de 16 ya seleccionada, se tiene que calcular los arreglos en paralelo. Esto se hace dividiendo la potencia pico de paneles entre la potencia total de los 16 paneles, y redondeando el resultado a un número entero, dando como resultado la siguiente tabla:

Tabla 34. Características generales de generador fotovoltaico para sistema de bombeo de 30 hp.

Característica	Valor	Unidad
Potencia de cada panel	540	Wp
Paneles en serie	16	U
Arreglos en paralelo	6	U
Cantidad de paneles	96	U
Potencia total de paneles	51.84	kWp

vi. Verificación del diseño del sistema con respecto a la demanda de agua del proyecto.

Estos valores se calculan mediante software. Se requiere ya sea un programa especializado u hojas de cálculo en Excel.

Conectado a Red:

Para este cálculo, se asume una disponibilidad de la fuente de energía de 100%.

¹⁵⁰ El Voc total y el Vmp total se obtuvieron de la sumatoria de los voltajes Voc y Vmp de cada cadena (de 16 paneles en este caso), que son 49.6 Vdc y 41.64 Vdc (según se indica en Tabla **Error! Main Document Only.**). Se usaron los valores por defecto de la ficha técnica del panel fotovoltaico usado (JA Solar, 2020), que es un valor obtenido con una irradiancia de 1000 W/m² y una temperatura de celda de 25 grados centígrados. Se considera que en este caso que usar los valores por defecto proporciona márgenes seguros de trabajo. Sin embargo, si el sitio de instalación fuera de alta radiación (valores instantáneos arriba de 1000 W/m²) y baja temperatura, el diseñador debe revisar las curvas de trabajo de los paneles para asegurarse de obtener valores de Voc seguros.

En todo caso, en el diseño usado para este trabajo de graduación, se ha empleado una protección contra sobre voltaje y bajo voltaje DC, que desconecta las cadenas de paneles cuando el voltaje que proporcionan está fuera de los márgenes seguros de trabajo.

- Con el sistema conectado a red se bombean 129,360.00 galones al día

Aislado:

Usando valores de radiación solar y las leyes de afinidad en intervalos de 1 minuto, se puede calcular volumen diario que daría si solo estuviera trabajando de forma aislada

- Con el sistema aislado se bombean 31,171.07 galones al día

Hibrido:

Para este caso, se toma en cuenta la disponibilidad de la red.

- Con el sistema hibrido se bombean 129,360.00 galones al día.

X. Datos usados para análisis económico y energético en Capítulo 4.

Tabla 35. Datos para cálculo de \$/hp y multiplicadores en kWp/hp para dimensionamiento de potencia total de arreglos de paneles fotovoltaicos.

	hp	1	2	7.5	15	30	60	120	25
Partes solar	potencia total de paneles kW	3.24	3.24	12.96	22.68	51.84	91.2	193.8	376
	Eficiencia motobomba	70%	76%	78%	81%	83%	84%	86%	88
	Eficiencia de variador	97.50%	97.50%	97.30%	97.20%	98.00%	98.50%	97.90%	98.30
	Eficiencia total	68.25%	74.10%	75.89%	78.73%	81.34%	82.74%	84.19%	86.50
	Potencia de carga (kW)	1.09	2.01	7.37	14.21	27.50	54.08	106.28	215.5
Sistemas	Conectado a Red	\$ 1,039.19	\$ 1,039.19	\$ 1,835.22	\$ 2,571.55	\$ 3,550.02	\$ 5,349.32	\$ 8,806.16	\$ 21,773.0
Sistemas	Aislado	\$ 2,796.66	\$ 2,796.66	\$ 10,785.67	\$ 17,403.18	\$ 38,042.26	\$ 69,116.36	\$ 141,188.45	\$ 257,221.7
Sistemas	Híbrido	\$ 5,269.10	\$ 5,269.10	\$ 13,172.47	\$ 20,272.62	\$ 41,450.84	\$ 72,260.32	\$ 148,229.95	\$ 283,419.4
Conectado a Red	\$/hp	\$ 1,039.19	\$ 519.60	\$ 244.70	\$ 171.44	\$ 118.33	\$ 89.16	\$ 73.38	\$ 87.0
Aislado	\$/hp	\$ 2,796.66	\$ 1,398.33	\$ 1,438.09	\$ 1,160.21	\$ 1,268.08	\$ 1,151.94	\$ 1,176.57	\$ 1,028.8
Híbrido	\$/hp	\$ 5,269.10	\$ 2,634.55	\$ 1,756.33	\$ 1,351.51	\$ 1,381.69	\$ 1,204.34	\$ 1,235.25	\$ 1,133.6
Conectado a Red	\$/kWp	\$ 320.74	\$ 320.74	\$ 141.61	\$ 113.38	\$ 68.48	\$ 58.65	\$ 45.44	\$ 57.8
Aislado	\$/kWp	\$ 863.17	\$ 863.17	\$ 832.23	\$ 767.34	\$ 733.84	\$ 757.85	\$ 728.53	\$ 683.7
Híbrido	\$/kWp	\$ 1,626.27	\$ 1,626.27	\$ 1,016.39	\$ 893.85	\$ 799.59	\$ 792.33	\$ 764.86	\$ 753.3
	Multiplicador kWp/hp	3.24	1.62	1.728	1.512	1.728	1.52	1.615	1.504

Datos de sistemas conectados a la red, diferentes potencias.

Tabla 36. Datos para cálculo de costo normalizado de energía en sistema conectado a red.

Tabla 30: Datos para cálculo de costo normalizado de energía en sistema conectado a red.								
Potencia de bomba (hp)	1	2	7.5	15	30	60	120	250
Potencia de carga (kWac)	1.09	2.01	7.37	14.21	27.50	54.08	106.28	215.51
Costo \$/kWh	\$ 320.74	\$ 320.74	\$ 141.61	\$ 113.38	\$ 68.48	\$ 58.65	\$ 45.44	\$ 57.88
Multiplicador	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Potencia (kWac)	1.5	3	11.25	22.5	45	90	180	375
Inversión inicial	\$ 1,039.19	\$ 1,039.19	\$ 1,835.22	\$ 2,571.55	\$ 3,550.02	\$ 5,349.32	\$ 8,806.16	\$ 21,773.06
Tasa de interés	0	0	0	0	0	0	0	0
Años plazo	20	20	20	20	20	20	20	20
Horas-sol /día	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
Energía diaria (kWh)	4.9	9.1	33.2	63.9	123.8	243.3	478.3	969.8
Días/mes	30.4	30.4	30.4	30.4	30.4	30.4	30.4	30.4
Consumo mensual (kWh)	147.5	271.7	994.8	1918.0	3712.9	7300.2	14348.2	29093.9
Días/año	365	365	365	365	365	365	365	365
Demanda anual (kWh)	1794.6	3305.8	12103.8	23335.1	45173.8	88818.9	174570.0	353975.6
Cambio de tableros a los 10 años: (% de inversión total)	100%	100%	65%	65%	55%	55%	55%	55%
Cambio de variadores a los 10 años, costo en (US\$):	\$ 1,039.19	1039.19	1192.893	1671.5075	1952.511	2942.126	4843.388	11975.183
Energía aprovechada (kWh)	1794.6	3305.8	12103.8	23335.1	45173.8	88818.9	174570.0	353975.6
Ef. Por año	Energía (Wh)	Energía (Wh)	Energía (Wh)	Energía (Wh)	Energía (Wh)	Energía (Wh)	Energía (Wh)	Energía (Wh)
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
100%	1795	3306	12104	23335	45174</			

Datos de sistemas aislados, diferentes potencias.

Tabla 37. Datos para cálculo de costo normalizado de energía en sistema aislado.

Potencia de bomba (hp)	1	2	7.5	15	30	60	120	250
Potencia de carga (kWac)	1.09	2.01	7.37	14.21	27.50	54.08	106.28	215.51
Costo \$/hp	\$ 2,796.66	\$ 1,398.33	\$ 1,438.09	\$ 1,160.21	\$ 1,268.08	\$ 1,151.94	\$ 1,176.57	\$ 1,028.89
Multiplicador	3.24	1.62	1.728	1.512	1.728	1.52	1.615	1.5048
Potencia (kWp)	3.24	3.24	12.96	22.68	51.84	91.2	193.8	376.2
Inversión inicial	\$ 2,796.66	\$ 2,796.66	\$ 10,785.67	\$ 17,403.18	\$ 38,042.26	\$ 69,116.36	\$ 141,188.45	\$ 257,221.76
Tasa de interés	0	0	0	0	0	0	0	0
Años plazo	20	20	20	20	20	20	20	20
Horas-sol /día	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
Energía diaria (kWh)	4.9	9.1	33.2	63.9	123.8	243.3	478.3	969.8
Días/mes	30.4	30.4	30.4	30.4	30.4	30.4	30.4	30.4
Consumo mensual (kWh)	149.5	275.5	1008.7	1944.6	3764.5	7401.6	14547.5	29498.0
Días/año	365	365	365	365	365	365	365	365
Demanda anual (kWh)	1794.6	3305.8	12103.8	23335.1	45173.8	88818.9	174570.0	353975.6
Cambio de variadores a los 10 años: (% de inversión total)	100%	100%	65%	65%	55%	55%	55%	55%
Cambio de inversores a los 10 años, costo en (US\$):	\$ 2,796.66	2796.66	7010.6855	11312.067	20923.243	38013.99793	77653.64836	141471.9661
Energía aprovechada (kWh)	1794.6	3305.8	12103.8	23335.1	45173.8	88818.9	174570.0	353975.6
Ef. Por año	Energía (Wh)	Energía (Wh)	Energía (Wh)	Energía (Wh)	Energía (Wh)	Energía (Wh)	Energía (Wh)	Energía (Wh)
100%	1795	3306	12104	23335	45174	88819	174570	353976
99%	1777	3273	11983	23102	44722	87931	172824	350436
98%	1759	3240	11862	22868	44270	87042	171079	346896
97%	1741	3207	11741	22635	43819	86154	169333	343356
96%	1723	3174	11620	22402	43367	85266	167587	339817
95%	1705	3141	11499	22168	42915	84378	165842	336277
94%	1687	3107	11378	21935	42463	83490	164096	332737
93%	1669	3074	11257	21702	42012	82602	162350	329197
92%	1651	3041	11136	21468	41560	81713	160604	325658
91%	1633	3008	11014	21235	41108	80825	158859	322118
90%	1615	2975	10893	21002	40656	79937	157113	318578
89%	1597	2942	10772	20768	40205	79049	155367	315038
88%	1579	2909	10651	20535	39753	78161	153622	311499
87%	1561	2876	10530	20302	39301	77272	151876	307959
86%	1543	2843	10409	20068	38849	76384	150130	304419
85%	1525	2810	10288	19835	38398	75496	148385	300879
84%	1507	2777	10167	19601	37946	74608	146639	297340
83%	1490	2744	10046	19368	37494	73720	144893	293800
82%	1472	2711	9925	19135	37043	72831	143147	290260
81%	1454	2678	9804	18901	36591	71943	141402	286720
Energía total vida útil (kWh):	32482	59836	219080	422365	817646	1607622	3159717	6406959
Energía total:	32482	59836	219080	422365	817646	1607622	3159717	6406959
Años	20	20	20	20	20	20	20	20
Costo normalizado (\$/kWh)	\$ 0.17220	\$ 0.09348	\$ 0.08123	\$ 0.0680	\$ 0.0721	\$ 0.0666	\$ 0.0693	\$ 0.06223
Potencia de bomba (hp)	1	2	7.5	15	30	60	120	250
Costo normalizado (\$/kWh)	\$ 0.1722	\$ 0.0935	\$ 0.0812	\$ 0.0680	\$ 0.0721	\$ 0.0666	\$ 0.0693	\$ 0.0622

Datos de sistemas híbridos, diferentes potencias.

Tabla 38. Datos para cálculo de costo normalizado de energía en sistema híbrido.

		Multiplicador	3.24	1.62	1.728	1.512	1.728	1.52	1.615	1.5048
		Potencia (kWp)	3.24	3.24	12.96	22.68	51.84	91.2	193.8	376.2
		Inversión inicial	\$ 5,269.10	\$ 5,269.10	\$ 13,172.47	\$ 20,272.62	\$ 41,450.84	\$ 72,260.32	\$ 148,229.95	\$ 283,419.43
		Tasa de interés	0	0	0	0	0	0	0	0
		Años plazo	20	20	20	20	20	20	20	20
Horas de operación										
4.5	Horas de operación de sistema		4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
		Energía diaria (kWh)	4.9	9.1	33.2	63.9	123.8	243.3	478.3	969.8
		Días/mes	30.4	30.4	30.4	30.4	30.4	30.4	30.4	30.4
		Consumo mensual (kWh)	149.5	275.5	1008.7	1944.6	3764.5	7401.6	14547.5	29498.0
		Días/año	365	365	365	365	365	365	365	365
		Demanda anual (kWh)	1794.6	3305.8	12103.8	23335.1	45173.8	88818.9	174570.0	353975.6
		Cambio de variadores a los 10 años: (% de inversión total)	100%	100%	65%	65%	55%	55%	55%	55%
		Cambio de inversores a los 10 años, costo en (US\$):	\$ 5,269.10	5269.1	8562.1055	13177.203	22797.962	39743.17483	81526.47116	155880.6859
Participación solar										
80%		Aporte de generador FV	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%
		Aporte de red	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
		Energía aprovechada (kWh)	1794.6	3305.8	12103.8	23335.1	45173.8	88818.9	174570.0	353975.6
		Ef. Por año	Energía (Wh)	Energía (Wh)	Energía (Wh)	Energía (Wh)	Energía (Wh)	Energía (Wh)	Energía (Wh)	Energía (Wh)
	Solar FV	100%	1435.7	2644.7	9683.1	18668.1	36139.0	71055.1	139656.0	283180.5
	Solar FV	99%	1435.7	2644.7	9683.1	18668.1	36139.0	71055.1	139656.0	283180.5
	Solar FV	98%	1435.7	2644.7	9683.1	18668.1	36139.0	71055.1	139656.0	283180.5
	Solar FV	97%	1435.7	2644.7	9683.1	18668.1	36139.0	71055.1	139656.0	283180.5
	Solar FV	96%	1435.7	2644.7	9683.1	18668.1	36139.0	71055.1	139656.0	283180.5
	Solar FV	95%	1435.7	2644.7	9683.1	18668.1	36139.0	71055.1	139656.0	283180.5
	Solar FV	94%	1435.7	2644.7	9683.1	18668.1	36139.0	71055.1	139656.0	283180.5
	Solar FV	93%	1435.7	2644.7	9683.1	18668.1	36139.0	71055.1	139656.0	283180.5
	Solar FV	92%	1435.7	2644.7	9683.1	18668.1	36139.0	71055.1	139656.0	283180.5
	Solar FV	91%	1435.7	2644.7	9683.1	18668.1	36139.0	71055.1	139656.0	283180.5
	Solar FV	90%	1435.7	2644.7	9683.1	18668.1	36139.0	71055.1	139656.0	283180.5
	Solar FV	89%	1435.7	2644.7	9683.1	18668.1	36139.0	71055.1	139656.0	283180.5
	Solar FV	88%	1435.7	2644.7	9683.1	18668.1	36139.0	71055.1	139656.0	283180.5
	Solar FV	87%	1435.7	2644.7	9683.1	18668.1	36139.0	71055.1	139656.0	283180.5
	Solar FV	86%	1435.7	2644.7	9683.1	18668.1	36139.0	71055.1	139656.0	283180.5
	Solar FV	85%	1435.7	2644.7	9683.1	18668.1	36139.0	71055.1	139656.0	283180.5
	Solar FV	84%	1435.7	2644.7	9683.1	18668.1	36139.0	71055.1	139656.0	283180.5
	Solar FV	83%	1435.7	2644.7	9683.1	18668.1	36139.0	71055.1	139656.0	283180.5
	Solar FV	82%	1435.7	2644.7	9683.1	18668.1	36139.0	71055.1	139656.0	283180.5
	Solar FV	81%	1435.7	2644.7	9683.1	18668.1	36139.0	71055.1	139656.0	283180.5
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red		359	661	2421	4667	9035	17764	34914	70795
	Red									

Valores para cálculo del tiempo de recuperación de la inversión.
Resultados con 80% de participación de energía solar.

Tabla 39. Datos para estimaciones de tiempos de recuperación de inversión simple.
Fuente: Elaboración propia.

Horas año	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760
Horas de uso diario	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
Días en un año	365	365	365	365	365	365	365	365
Horas de uso por año	1642.5	1642.5	1642.5	1642.5	1642.5	1642.5	1642.5	1642.5
Potencia del sistema (hp)	1.00	2.00	7.50	15.00	30.00	60.00	120.00	250.00
Potencia eléctrica del sistema (kW)	1.09	2.01	7.37	14.21	27.50	54.08	106.28	215.5
Costo \$/kWp	\$ 1,626.27	\$ 1,626.27	\$ 1,016.39	\$ 893.85	\$ 799.59	\$ 792.33	\$ 764.86	\$ 753.37
Potencia (kWp)	1.09	2.01	7.37	14.21	27.50	54.08	106.28	215.5
Inversión inicial	\$ 5,269.10	\$ 5,269.10	\$ 13,172.47	\$ 20,272.62	\$ 41,450.84	\$ 72,260.32	\$ 148,229.95	\$ 283,419.43
Costo total normalizado (USD), año 0:	0.19075	0.12248	0.11070	0.09942	0.10213	0.09746	0.09941	0.0939
Ahorro en costo energía durante 20 años	0.0672	0.1050	0.1067	0.1138	0.1086	0.1116	0.1091	0.114
Precio promedio energía durante 20 años	0.2579	0.2275	0.2174	0.2132	0.2108	0.2090	0.2085	0.208
Costo final de operación por año	\$ 342.31	\$ 402.34	\$ 1,363.73	\$ 2,449.55	\$ 5,032.31	\$ 9,604.77	\$ 19,592.93	\$ 38,579.08
Ahorro por año	\$ 120.52	\$ 347.05	\$ 1,291.32	\$ 2,655.58	\$ 4,907.66	\$ 9,909.96	\$ 19,050.56	\$ 40,650.69
Ahorro normalizado (\$/kW instalado)	\$ 110.30	\$ 172.43	\$ 175.23	\$ 186.92	\$ 178.44	\$ 183.26	\$ 179.24	\$ 188.63
Costo por encima del conectado a red \$/kWp	\$ 1,305.53	\$ 1,305.53	\$ 874.79	\$ 780.47	\$ 731.11	\$ 733.67	\$ 719.42	\$ 695.50
Potencia del sistema	1.00	2.00	7.50	15.00	30.00	60.00	120.00	250.00
Retorno simple inversión adicional (años):	11.84	7.57	4.99	4.18	4.10	4.00	4.01	3.69

Tabla 40. Valores calculados de energía consumida en cada sistema, total en 20 años de operación.
Fuente: Elaboración propia.

	Energía (MWh)							
hp	1	2	7.5	15	30	60	120	250
Conectado a red	35.89	66.12	242.08	466.70	903.48	1776.38	3491.40	7079.51
Aislado	32.48	59.84	219.08	422.37	817.65	1607.62	3159.72	6406.96
Híbrido	35.89	66.12	242.08	466.70	903.48	1776.38	3491.40	7079.51
	Energía (%)							
hp	1	2	7.5	15	30	60	120	250
Conectado a red	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Aislado	91%	91%	91%	91%	91%	91%	91%	91%
Híbrido	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%