

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



TESIS:

**Sistema de bombeo fotovoltaico para abastecimiento de agua al
vivero municipal de Huamanga, Huatatas, San Juan Bautista,
Ayacucho**

Para optar el título profesional de:

INGENIERO AGRÍCOLA

PRESENTADO POR:

Bach. Pol Anderson OGOSI SULCA

ASESOR:

Mtro. Carlos Augusto CASTAÑEDA ESQUÉN

AYACUCHO - PERÚ

2026

Dedicatoria

A mis queridos padres ROSELL y DORIS por todo el apoyo y comprensión durante todos estos años,
A mi querida abuela FELÍCITAS MURILLO quien con fuerza y sabiduría me apoyó desde mi niñez y fue un soporte durante mi vida universitaria.

Dedico a todas las personas que aportaron con su grano de arena, de manera incondicional, para que pueda estudiar.

Agradecimiento

A mi alma mater Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga y a mi querida Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola por guiarme en el proceso de mi formación profesional. A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola por haberme transmitido sus conocimientos, y sus experiencias.

A la Municipalidad Provincial de Huamanga, por brindarme el apoyo institucional necesario para el desarrollo de esta investigación. Al equipo técnico del Vivero Municipal de Huamanga, por facilitarme el acceso, la información y el acompañamiento en cada etapa del trabajo.

Agradezco también al residente y al supervisor por su orientación profesional y de manera especial al Ing. Ronal, por los valiosos ánimos y la motivación constante que contribuyeron significativamente a culminar este proyecto.

Resumen

El abastecimiento de agua es un factor fundamental para la producción de plantas en viveros; sin embargo, en el vivero de la Municipalidad Provincial de Huamanga, ubicado en el centro poblado San Antonio de Huatatas, distrito de San Juan Bautista, el riego dependía de un canal de concreto cuyo caudal disminuía durante la época de estiaje, afectando la disponibilidad de agua para la producción de especies frutales, ornamentales y forestales. Frente a esta problemática la presente investigación tuvo como objetivo implementar un sistema de bombeo solar fotovoltaico que garantice un abastecimiento hídrico eficiente y sostenible para el vivero.

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y de nivel aplicativo, estructurada en tres etapas. En la primera se caracterizaron las condiciones climáticas, topográficas, agrológicas e hidrológicas del área de estudio, utilizando información de la plataforma NASA POWER, levantamientos topográficos, aforos del puquial y mediciones de campo. Se determinó una temperatura media anual de 14.8 °C, un mínimo de 4.53 horas solares pico por día y una demanda hídrica máxima de 2.18 m³/día. Asimismo, el análisis de sostenibilidad hídrica confirmó que el puquial dispone de un caudal permanente suficiente para abastecer la demanda del vivero durante la vida útil del proyecto.

En la segunda etapa se diseñó el sistema de bombeo solar fotovoltaico considerando criterios hidráulicos, eléctricos y energéticos. El sistema fue dimensionado para una altura manométrica total de 17.80 m y un caudal de diseño de 0.484 m³/h, seleccionándose una electrobomba periférica MEDAS OB60 de 0.5 HP, tres paneles fotovoltaicos monocristalinos de 180 Wp, un inversor-cargador y una batería de almacenamiento. La validación experimental registró un caudal real de 0.694 m³/h, permitiendo cubrir la demanda diaria del vivero en 3.14 horas, dentro del periodo de menor disponibilidad de radiación solar.

Finalmente, se evaluó el desempeño energético, operativo y económico del sistema fotovoltaico en comparación con un sistema convencional alimentado con corriente alterna. Los resultados evidenciaron una reducción del 27.5 % en el consumo de energía, un incremento del 23.9 % en el caudal bombeado y una disminución de 278.64 kgCO₂/año en las emisiones asociadas al consumo de electricidad. El análisis económico mostró que el sistema fotovoltaico requiere una inversión inicial de S/. 2,953.54, frente a S/. 610.00 del sistema convencional; sin embargo, durante un horizonte de 25 años reduce el costo total acumulado de S/. 23,024.86 a S/. 9,040.62, generando un ahorro de S/. 14,767.78. Asimismo, presentó un Valor Actual Neto (VAN) de S/. 663.36, una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 14.78 % y un periodo de recuperación de 6.61 años, confirmando la viabilidad económica del proyecto.

Se concluye que el sistema de bombeo solar fotovoltaico implementado constituye una alternativa técnicamente viable, energéticamente eficiente, ambientalmente sostenible y económicamente rentable para garantizar el abastecimiento de agua en el vivero municipal de Huamanga. Además, representa una solución replicable para viveros y proyectos agrícolas de la región Ayacucho y de otras zonas andinas con condiciones climáticas e hídricas similares.

Abstract

Water supply is a key factor for plant production in nurseries. However, the nursery of the Provincial Municipality of Huamanga, located in the rural community of San Antonio de Huatatas, San Juan Bautista district, Ayacucho region, relied on manual irrigation through a concrete canal whose flow decreased significantly during the dry season, affecting water availability for the production of fruit, ornamental, and forest species. In response to this problem, this research aimed to implement a photovoltaic solar pumping system to ensure an efficient and sustainable water supply for the municipal nursery.

The research followed a quantitative and applied approach and was carried out in three stages. The first stage consisted of the climatic, topographic, agrological, and hydrological characterization of the study area using NASA POWER data, topographic surveys, spring flow measurements, and field observations. The results showed a mean annual temperature of 14.8 °C, a minimum of 4.53 peak sun hours per day, and a maximum water demand of 2.18 m³/day. In addition, the water sustainability analysis confirmed that the spring provides sufficient permanent flow to meet the nursery water demand throughout the project's service life.

The second stage involved the design of the photovoltaic solar pumping system based on hydraulic, electrical, and energy criteria. The system was designed for a total dynamic head of 17.80 m and a design flow rate of 0.484 m³/h. It included a 0.5 HP MEDAS OB60 peripheral pump, three 180 Wp monocrystalline photovoltaic panels, an inverter-charger, and a storage battery. Field validation recorded an actual flow rate of 0.694 m³/h, enabling the daily water demand to be supplied in 3.14 hours, within the minimum available peak sun hours.

Finally, the energy, operational, and economic performance of the photovoltaic system was evaluated against a conventional alternating current pumping system under the same hydraulic conditions. The photovoltaic system reduced energy consumption by 27.5%, increased the pumping flow rate by 23.9%, and avoided 278.64 kgCO₂/year of carbon dioxide emissions associated with grid

electricity consumption. The economic evaluation showed that, although the photovoltaic system required a higher initial investment (S/. 2,953.54) than the conventional system (S/. 610.00), it reduced the total accumulated cost over a 25-year period from S/. 23,024.86 to S/. 9,040.62, generating savings of S/. 14,767.78. Furthermore, the project achieved a Net Present Value (NPV) of S/. 663.36, an Internal Rate of Return (IRR) of 14.78%, and a payback period of 6.61 years, confirming its economic feasibility.

The implemented photovoltaic solar pumping system proved to be a technically feasible, energy-efficient, environmentally sustainable, and economically profitable solution for ensuring water supply at the Huamanga municipal nursery. Furthermore, it provides a practical reference for the implementation of photovoltaic pumping systems in nurseries and agricultural projects in Ayacucho and other Andean regions with similar climatic and hydrological conditions.

Índice general

Dedicatoria.....	2
Agradecimiento	3
Resumen.....	4
Abstract.....	6
Índice general	8
Índice de tablas.....	11
Índice de figuras	13
Índice de ecuaciones.....	15
Introducción	17
Objetivos	19
Capítulo I	20
Marco teórico.....	20
1.1 Antecedentes	20
1.1.1 Antecedente internacional.....	20
1.1.2 Antecedente nacional	21
1.1.3 Antecedente regional.....	22
1.2 Sistema de energía solar fotovoltaica.....	23
1.2.1 Radiación solar.....	23
1.2.2 Irradiación	24
1.2.3 Insolación	25
1.2.4 Métodos de medición de la radiación solar.....	26
1.2.5 Factores que afectan la energía solar disponible.....	27
1.2.6 Ventajas y desventajas de la energía solar	29
1.3 Sistema fotovoltaico	29
1.3.1 Efecto fotovoltaico.....	30
1.3.2 Módulo fotovoltaico.....	32
1.3.3 Inversor solar.....	35
1.3.4 Equipo de bombeo	36
1.4 Sistema hidráulico	43

1.4.1	Carga estática (Hg).....	43
1.4.2	Carga dinámica	44
1.4.3	Altura Manométrica total (HMT)	46
1.4.4	Aforo volumétrico.....	46
1.5	Requerimiento hídrico del cultivo.....	47
1.5.1	Evapotranspiración del cultivo (ETc)	47
1.5.2	Evapotranspiración de referencia (ETo)	48
1.5.3	Coeficiente de cultivo (Kc).....	48
1.5.4	Caudal requerido	49
1.6	Sistema de conducción	49
1.6.1	Tuberías.....	49
1.6.2	Accesorios hidráulicos	50
1.7	Evaluación económica para el sistema fotovoltaico.....	51
1.7.1	Inversión inicial y costos del sistema.....	51
1.7.2	Valor Actual Neto (VAN).....	51
1.7.3	Tasa Interna de Retorno (TIR)	52
1.7.4	Período de recuperación (Payback).....	53
Capítulo II		54
2. Materiales y métodos		54
2.1	Ubicación.....	54
2.2	Vías de acceso	55
2.3	Material y software.....	56
2.3.1	Materiales en campo	56
2.3.2	Materiales en gabinete	57
2.4	Desarrollo de la investigación	58
2.4.1	Caracterización del área de estudio y demanda hídrica	58
2.4.2	Diseño del sistema de bombeo solar fotovoltaico.....	66
2.4.3	Evaluación del desempeño del sistema de bombeo fotovoltaico.....	79

Capítulo III	91
3. Resultados y discusiones.....	91
3.1 Del objetivo 1: Caracterización del área de estudio y demanda hídrica	91
3.1.1 Caracterización climática.....	91
3.1.2 Discusión de la caracterización climática	96
3.1.3 Caracterización topográfica	97
3.1.4 Discusión de la caracterización topográfico	99
3.1.5 Caracterización agrológica.....	100
3.1.6 Discusión de la caracterización agrológica.....	105
3.1.7 Caracterización hidrológica	106
3.1.8 Discusión de la caracterización hidrológica.....	115
3.2 Del objetivo 2: Diseño del sistema de bombeo solar fotovoltaico	116
3.2.1 Diseño hidráulico del sistema de bombeo.....	116
3.2.2 Discusión del diseño hidráulico del sistema de bombeo.....	124
3.2.3 Diseño del sistema fotovoltaico	125
3.2.4 Discusión del diseño del sistema fotovoltaico	130
3.3 Del objetivo 3: Evaluación del desempeño del sistema de bombeo fotovoltaico.....	131
3.3.1 Evaluación energética	131
3.3.2 Discusión de la evaluación energética	140
3.3.3 Evaluación operativa.....	141
3.3.4 Discusión de la evaluación operativa.....	150
3.3.5 Evaluación económica	151
3.3.6 Discusión de la evaluación económica	159
Conclusiones	160
Recomendaciones	161
Referencias bibliográficas	162
Anexos	165

Índice de tablas

Tabla 1	Criterios de decisión del Valor Actual Neto (VAN)	51
Tabla 2	Criterios de decisión de la Tasa Interna de Retorno (TIR).....	53
Tabla 3	Vía de acceso al vivero de la municipalidad provincial de Huamanga.	55
Tabla 4	Coeficientes de escorrentía por tipo de suelo y vegetación.....	66
Tabla 5	Clasificación del régimen del fluido	68
Tabla 6	Perdidas consideradas del rendimiento del sistema fotovoltaico.....	75
Tabla 7	Resumen estadístico de precipitación mensual 2005 – 2025 (mm)	94
Tabla 8	Resultado de ETo de referencia de la zona de estudio.....	95
Tabla 9	Distribución de parcelas por tipo de cultivo	97
Tabla 10	Datos del perfil topográfico	98
Tabla 11	Caracterización de cultivos por tipo de especie.....	100
Tabla 12	Kc promedio de la palta.....	101
Tabla 13	Kc promedio del geranio	101
Tabla 14	Kc promedio del pino.....	101
Tabla 15	Kc ponderado para los cultivos respecto al área proyectada.....	102
Tabla 16	Demanda hídrica mensual del vivero municipal.....	100
Tabla 17	Resultados del análisis de calidad de agua del puquial	107
Tabla 18	Registros de aforo del puquial en campo	108
Tabla 19	Estimación mensual del caudal del puquial.....	109
Tabla 20	Balance hídrico mensual del vivero municipal.....	110
Tabla 21	Balance de sostenibilidad hídrica del puquial	114
Tabla 22	Variables utilizadas para el caudal de diseño.....	116
Tabla 23	Datos recolectados del tanque respecto al pozo.....	116
Tabla 24	Datos para el cálculo del Hf	117
Tabla 25	Resultado de la pérdida de fricción (hf).....	118
Tabla 26	Accesorios conectados en la línea de impulsión.....	118
Tabla 27	Resultados de la HMT total.....	119
Tabla 28	Especificaciones técnicas de la electrobomba MEDAS OB60.....	120
Tabla 29	Verificación de criterios de selección de la electrobomba	120
Tabla 30	Datos de aforo volumétrico en descarga de la bomba	121
Tabla 31	Datos del aforo volumétrico en llegada al tanque	121
Tabla 32	Resumen de parámetros hidráulicos en campo.....	122
Tabla 33	Puntos para construcción de curva H-Q.....	122
Tabla 34	Especificaciones eléctricas de la electrobomba MEDAS OB60	125
Tabla 35	Energía diaria requerida del sistema fotovoltaico	125

Tabla 36	Especificaciones técnicas del panel implementado	126
Tabla 37	Factores de pérdida adoptados para el sistema fotovoltaico.....	127
Tabla 38	Resumen del dimensionamiento del campo fotovoltaico	128
Tabla 39	Componentes de los sistemas de bombeo evaluados	131
Tabla 40	Voltajes medidos en campo para cada sistema	135
Tabla 41	Caída de tensión en el cableado de cada sistema.....	135
Tabla 42	Variación horaria de la potencia del campo fotovoltaico	136
Tabla 43	Resumen de indicadores energéticos para ambos sistemas.....	139
Tabla 44	Análisis comparativo de indicadores energéticos.....	139
Tabla 45	Aforos volumétricos realizados en cada sistema.	141
Tabla 46	Presión de operación con CA vs SFV	143
Tabla 47	Registro del tiempo de llenado del tanque del SFV	145
Tabla 48	Abatimiento del nivel del pozo con sistema CA	147
Tabla 49	Abatimiento del nivel del pozo con SFV	148
Tabla 50	Análisis comparativo de parámetros operativos	149
Tabla 51	Presupuesto de inversión inicial sistema FV.....	151
Tabla 52	Presupuesto de inversión inicial sistema CA	152
Tabla 53	Vida útil estimada de los componentes del SFV.....	152
Tabla 54	Costos de operación y mantenimiento del sistema CA	153
Tabla 55	Costos de operación y mantenimiento del SFV	154
Tabla 56	Parámetros base para el flujo de caja	154
Tabla 57	Flujo de caja del SFV con un incremento tarifario del 3% anual.....	155
Tabla 58	Resumen de indicadores de rentabilidad	157
Tabla 59	Análisis comparativo económico entre sistemas	158

Índice de figuras

Figura 1 Efectos de la atmósfera sobre la radiación.....	23
Figura 2 Componentes de la radiación solar	24
Figura 3 Irradiancia durante un día despejado.	25
Figura 4 Horas sol pico durante el día	26
Figura 5 Piroheliómetro	26
Figura 6 Piranómetro	27
Figura 7 Generación eléctrica en una celda fotovoltaica.....	30
Figura 8 Efecto fotoeléctrico	31
Figura 9 Panel mono cristalino	33
Figura 10 Panel poli cristalino	33
Figura 11 Trayectoria del sol según la hora del día y la época del año.....	35
Figura 12 Bombeo centrífugo vs bombeo de desplazamiento positivo.....	37
Figura 13 Esquema de una bomba centrífuga superficial.....	38
Figura 14 Bomba centrífuga superficial	38
Figura 15 Curva característica y resistente de una bomba hidráulica	40
Figura 16 Esquema del sistema de bombeo fotovoltaico	41
Figura 17 Grafico funcionamiento de bomba con cielo despejado.....	42
Figura 18 Grafico funcionamiento de bomba con paso de nubes.....	42
Figura 19 Curva generalizada del coeficiente de cultivo	48
Figura 20 Plano de ubicación del vivero municipal de huamanga	55
Figura 21 Vista satelital del acceso del vivero municipal de huamanga	56
Figura 22 Extracción de datos climáticos de NASA POWER	58
Figura 23 Levantamiento de parcelas de cultivo.....	59
Figura 24 Levantamiento del perfil longitudinal del pozo al tanque	60
Figura 25 Agrupación y clasificación de cultivos.....	61
Figura 26 Saturación de los cultivos seleccionados.....	62
Figura 27 Pesaje de los cultivos para posterior evaluación.....	62
Figura 28 Selección de capacidad de la bomba mediante curva H- Q	70
Figura 29 Prueba de aforo en el punto de descarga de la bomba.....	72
Figura 30 Prueba de aforo en el punto de llegada al tanque de almacenamiento.....	73
Figura 31 Variación mensual de temperatura máxima y mínima.....	91
Figura 32 Variación de humedad relativa en el vivero municipal	92
Figura 33 Variación de velocidad de viento en el vivero municipal	93
Figura 34 Variación de la insolación o radiación en el vivero municipal	93
Figura 35 ETo y temperatura mínima mensual obtenida en CROPWAT	95

Figura 36 Plano de distribución de parcelas del vivero municipal.....	97
Figura 37 Perfil de elevación del sistema de bombeo fotovoltaico	99
Figura 38 Variación mensual de la demanda hídrica diaria del vivero.....	105
Figura 39 Sistema de captación del puquial mediante tubería de 4”	106
Figura 40 Pozo de almacenamiento del vivero municipal.....	106
Figura 41 Medición de conductividad eléctrica del agua del puquial.....	107
Figura 42 Aforo del puquial por meses.....	109
Figura 43 Balance hídrico mensual del vivero municipal	111
Figura 44 Comparación del área de recarga con imágenes satelitales 2005 y 2025... 	111
Figura 45 Delimitación del área de recarga hídrica del río Huatatas.....	112
Figura 46 Precipitación anual histórica 2005–2025.....	113
Figura 47 Pendiente del cauce principal de la subcuenca muyurina	113
Figura 48 Red hídrica de la subcuenca Muyurina.....	114
Figura 49 Diferencia de altura del tanque respecto al pozo.....	117
Figura 50 Curva característica H-Q de electrobomba MEDAS OB60	123
Figura 51 Módulo fotovoltaico SunshineSolar MONO HZS-180W	126
Figura 52 Paneles fotovoltaicos modelo SunshineSolar MONO HZS-180W	129
Figura 53 Esquema de funcionamiento del sistema de bombeo fotovoltaico	131
Figura 54 Medición de voltaje durante la bomba apagada con sistema CA	132
Figura 55 Medición de voltaje durante la bomba apagada con SFV	132
Figura 56 Medición de voltaje y corriente al arranque con sistema CA	133
Figura 57 Medición de voltaje y corriente al arranque con sistema SFV.....	133
Figura 58 Variación del voltaje al encendido con ambos sistemas.....	134
Figura 59 Variación de la corriente al encendido con ambos sistemas.....	134
Figura 60 Medición de voltaje DC en bornes del panel fotovoltaico.....	136
Figura 61 Aforo volumétrico en el punto de llegada al tanque con sistema CA	141
Figura 62 Aforo volumétrico en el punto de llegada al tanque con sistema SFV	142
Figura 63 Presión de operación registrada con corriente alterna	143
Figura 64 Presión de operación registrada con SFV	144
Figura 65 Sistema fotovoltaico en operación día despejado	146
Figura 66 Interrupción del sistema por lluvia intensa.....	146
Figura 67 Llenado del tanque con el sistema FV	146
Figura 68 Medición del nivel dinámico del pozo con sistema CA	147
Figura 69 Medición del nivel dinámico del pozo con SFV	148
Figura 70 Comparativa del abatimiento del SFV y AC	149
Figura 71 Ahorro energético y egreso del sistema fotovoltaico por año	156
Figura 72 Flujo de caja acumulado del sistema fotovoltaico durante 25 años.....	157

Índice de ecuaciones

Ecuación 1 Carga dinámica total.....	43
Ecuación 2 Carga estática	44
Ecuación 3 Fórmula de Darcy Weisbach.....	45
Ecuación 4 Perdidas por accesorios	45
Ecuación 5 Cálculo de la altura manométrica total.....	46
Ecuación 6 Formula del caudal de aforo	46
Ecuación 7 Formula de la evapotranspiración de cultivo	47
Ecuación 8 Formula del coeficiente del cultivo	48
Ecuación 9 Formula del caudal requerido para riego	49
Ecuación 10 Formula del valor actual neto	51
Ecuación 11 Formula de la tasa interna de retorno.....	52
Ecuación 12 Periodo de recuperación económico (payback).....	53
Ecuación 13 Fórmula del coeficiente de cultivo ponderado.....	63
Ecuación 14 Demanda bruta de riego	63
Ecuación 15 Recarga subterránea estimada.....	65
Ecuación 16 Formula de caudal de diseño.....	66
Ecuación 17 Condición de velocidad de flujo en tuberías	67
Ecuación 18 Ecuación de continuidad.....	68
Ecuación 19 Fórmula de Reynolds	68
Ecuación 20 Fórmula del factor de fricción.....	69
Ecuación 21 Condición del caudal de bombeo	71
Ecuación 22 Condición de la altura de bombeo máxima	71
Ecuación 23 Margen de seguridad de la bomba.....	71
Ecuación 24 Tiempo de llenado del tanque	74
Ecuación 25 Condición de llenado en horas solares pico	74
Ecuación 26 Potencia eléctrica de la bomba	74
Ecuación 27 Energía eléctrica diaria requerida.....	75
Ecuación 28 Eficiencia de conversión del panel fotovoltaico	76
Ecuación 29 Energía útil del sistema.....	76
Ecuación 30 Potencia fotovoltaica requerida	77
Ecuación 31 Número de paneles	77
Ecuación 32 Potencia total instalada.....	78

Ecuación 33 Capacidad de las baterías requeridas	78
Ecuación 34 Potencia del inversor	79
Ecuación 35 Formula de la caída de tensión.....	81
Ecuación 36 Potencia instantánea del panel	81
Ecuación 37 Fórmula de la energía consumida.....	82
Ecuación 38 Fórmula de la energía específica.....	82
Ecuación 39 Fórmula del rendimiento energético	83
Ecuación 40 Energía hidráulica.....	83
Ecuación 41 Emisiones de dióxido de carbono	84
Ecuación 42 Variación porcentual.....	84
Ecuación 43 Caudal de bombeo promedio	85
Ecuación 44 Altura equivalente de presión	85
Ecuación 45 Tiempo de funcionamiento	86
Ecuación 46 Abatimiento del nivel de agua	86
Ecuación 47 Fórmula de costo total de inversión.....	87
Ecuación 48 Fórmula del costo energético anual	88
Ecuación 49 Fórmula costo total acumulado.....	90

Introducción

El agua constituye un recurso esencial para el desarrollo de las actividades agrícolas, por lo que garantizar su disponibilidad de manera continua y eficiente representa un desafío permanente para los viveros municipales ubicados en las zonas andinas del Perú. En el vivero de la Municipalidad Provincial de Huamanga, localizado en el centro poblado San Antonio de Huatatas, región Ayacucho, el riego se realizaba manualmente utilizando agua proveniente de un canal de concreto, cuyo caudal disminuía considerablemente durante la época de estiaje. Esta situación comprometía el abastecimiento hídrico necesario para la producción de especies frutales, ornamentales y forestales.

Ante esta problemática y considerando que el vivero dispone de suministro eléctrico de la empresa Electrocentro, surgió la necesidad de implementar un sistema de bombeo que permitiera garantizar el abastecimiento de agua durante todo el año. No obstante, el funcionamiento permanente de una electrobomba alimentada con corriente alterna implica un consumo energético que incrementa los costos de operación de la municipalidad. En este contexto, la energía solar fotovoltaica representa una alternativa técnica y económicamente viable, debido a que la región Ayacucho posee un elevado potencial solar, registrando valores superiores a 4.5 kWh/m²/día durante el mes de menor irradiación anual (NASA POWER, 2025).

En los últimos años, los sistemas de bombeo solar fotovoltaico han adquirido mayor relevancia como una solución sostenible para el abastecimiento de agua en zonas rurales y periurbanas. Investigaciones desarrolladas por Pérez (2019) en Ayacucho y Flores (2019) en Junín evidencian que estos sistemas presentan un adecuado desempeño técnico y una mayor competitividad económica frente a los sistemas convencionales alimentados por corriente alterna, especialmente cuando los costos de energía representan una limitación para las instituciones públicas.

En este contexto, la presente investigación tuvo como finalidad implementar un sistema de bombeo solar fotovoltaico para el vivero municipal de Huamanga, aprovechando el caudal permanente de un puquial como fuente de captación. El sistema diseñado permite bombear el agua

hacia un tanque de almacenamiento de 5 m³, desde donde se distribuye de manera controlada para satisfacer la demanda hídrica del vivero, reduciendo la dependencia del canal de riego durante la época de estiaje y minimizando el consumo de energía convencional.

Para alcanzar este propósito, la investigación se desarrolló en tres etapas. En la primera se caracterizaron las condiciones climáticas, topográficas e hidrológicas del área de estudio y se determinó la demanda hídrica del vivero. En la segunda se diseñó el sistema de bombeo solar fotovoltaico considerando criterios hidráulicos y energéticos. Finalmente, en la tercera etapa se evaluó el desempeño energético, operativo y económico del sistema, comparándolo con un sistema convencional de corriente alterna. Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad técnica, energética y económica de la propuesta, además de constituir un referente para la implementación de sistemas de bombeo solar en viveros y proyectos agrícolas de la región Ayacucho y de otras zonas andinas con condiciones similares.

Objetivos

a) Objetivo General

- Implementar un sistema de bombeo solar para riego del vivero de la municipalidad de Huamanga en el centro poblado de San Antonio de Huatatas, región de Ayacucho, que garantice un suministro eficiente y sostenible de agua.

b) Objetivos específicos

1. Caracterizar las condiciones climáticas, topográficas e hidrológicas del vivero de la Municipal Provincial de Huamanga y determinar la demanda hídrica en función del tipo de cultivo, área cultivada y régimen de riego.
2. Diseñar el sistema de bombeo solar fotovoltaico para el riego del vivero de la Municipalidad Provincial de Huamanga, considerando criterios hidráulicos, disponibilidad eléctrica y características técnicas de la fuente de captación.
3. Evaluar el desempeño energético, operativo y económico del sistema de bombeo solar fotovoltaico implementado en el vivero de la Municipalidad Provincial de Huamanga, comparándolo con el funcionamiento del sistema de bombeo operado con corriente alterna.

Capítulo I

Marco teórico

1.1 Antecedentes

1.1.1 Antecedente internacional

Guarín y Ruiz (2022), en su tesis *Diseño de un sistema fotovoltaico de riego para la empresa agrícola Cactus S.A.*, desarrollada en Colombia, diseñaron un sistema fotovoltaico on-grid conformado por 108 paneles solares con capacidad para cubrir un consumo promedio de 161 kWh/día, ajustado mediante un inversor de 50 kW. Entre sus principales hallazgos destacó que el sistema resultó económicamente viable, recuperando la inversión en 8 años y generando utilidades durante los 17 años restantes de vida útil. Asimismo, el estudio evidenció que las condiciones climáticas variables pueden afectar la eficiencia del sistema, recomendando la conexión a un sistema de respaldo energético. Este antecedente aporta al presente estudio el criterio de viabilidad económica mediante indicadores de rentabilidad y la importancia de considerar la variabilidad climática en el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos de bombeo.

Lara (2007) en su tesis *Diseño de un sistema de riego por medio de energía solar*, a través de paneles FV, llevada a cabo en la Universidad Austral de Chile, se utilizó la elevada radiación solar con que cuenta la zona, convirtiendo la energía proveniente del sol, en energía eléctrica, a través de unos paneles denominados fotovoltaico con el objetivo de diseñar un sistema de riego por goteo, mediante paneles solares para el riego de tomates. Concluyó que la instalación de un sistema de riego alimentado por energía solar es viable para cultivos con bajo consumo de agua, como el tomate. Este trabajo destaca la importancia de ajustar el dimensionamiento de los sistemas solares en función de las necesidades específicas del cultivo.

1.1.2 Antecedente nacional

Flores (2019), en su tesis *Diseño de un generador fotovoltaico para riego agrícola en la Región Junín*, diseñó un sistema fotovoltaico para riego agrícola considerando la radiación solar disponible y la demanda energética del sistema de bombeo. El estudio concluyó que la energía fotovoltaica representa una alternativa viable para zonas rurales con acceso limitado a redes eléctricas, permitiendo la implementación de bombas tanto de corriente continua como alterna para elevar agua hacia los cultivos. Además, resaltó la necesidad de dimensionar adecuadamente todos los componentes del sistema módulos solares, regulador, inversor y baterías para asegurar su eficiencia operativa. Este antecedente guarda estrecha relación con la presente investigación en cuanto al proceso de dimensionamiento del campo fotovoltaico y la selección de equipos de bombeo.

Zegarra (2021), en su tesis *Implementación de un sistema fotovoltaico para reducir el consumo de energía convencional en un sistema de riego tecnificado por aspersión en el estadio municipal César Flores Marigorda de Lambayeque*, implementó un sistema de riego solar con 30 paneles de 320 Wp y 24 baterías de almacenamiento para cubrir un consumo mensual de 384.60 kWh. Los datos de irradiación solar, obtenidos del portal NASA POWER con un promedio anual de 5.38 kWh/m²/día, fueron determinantes para el dimensionamiento del sistema. El análisis económico determinó una inversión inicial de S/. 127,892.15 con un período de recuperación de 14 años. Este trabajo aporta al presente estudio la metodología de obtención de datos solares mediante NASA POWER y el proceso de evaluación económica de sistemas fotovoltaicos en instituciones municipales.

1.1.3 Antecedente regional

Pérez (2019), en su tesis *Bombeo de agua del río Alameda con energía solar fotovoltaica para cultivar hortalizas en la comunidad campesina de Totorá, Ayacucho*, diseñó un sistema fotovoltaico para riego en una parcela de 0.3 hectáreas, conformado por 5 paneles solares de 260 Wp y una bomba de 1 HP, logrando un caudal de bombeo de 0.45 l/s y un almacenamiento en reservorio de 16 m³. El estudio demostró la viabilidad económica del sistema con un VAN de S/. 58,767.88 y una TIR de 33.59%, concluyendo que la implementación del sistema fotovoltaico mejora significativamente la productividad agrícola en zonas rurales de Ayacucho. Por su proximidad geográfica y similitud en las condiciones climáticas e hídricas con el área de estudio de la presente investigación, este antecedente constituye la referencia más directa para validar la viabilidad del sistema de bombeo solar fotovoltaico propuesto para el vivero municipal de Huamanga.

1.2 Sistema de energía solar fotovoltaica

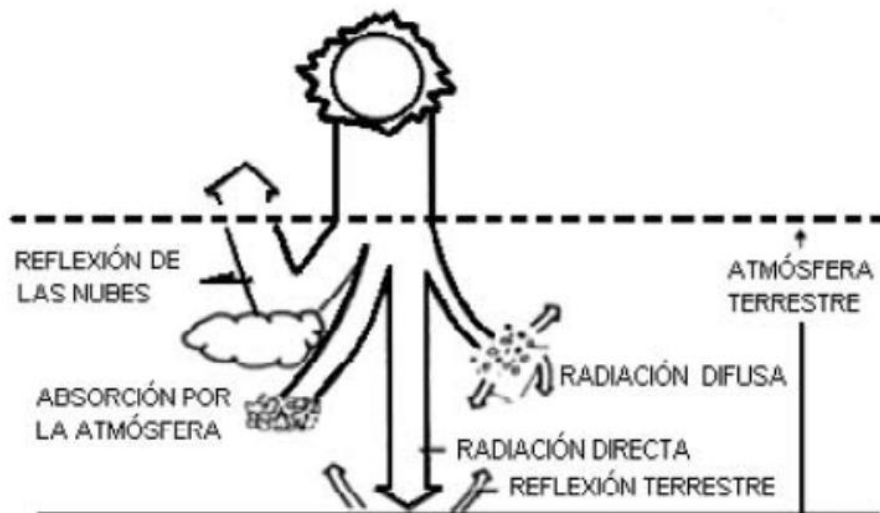
1.2.1 Radiación solar

García (2022) menciona que la radiación solar es la energía emitida por el Sol, pero no toda llega a la superficie terrestre ya que algunos gases en la atmósfera absorben la longitud de ondas más cortas, como los rayos ultravioletas y la radiación incidente se cuantifica mediante la irradiancia, expresada en W/m^2 .

Al atravesar la atmósfera la radiación sufre absorción, dispersión y reflexión mostrada en la Figura 1. El ozono y el vapor de agua absorben parte de la energía, la dispersión hace que la luz se esparza (dando color azul al cielo) y la reflexión principalmente por las nubes ya que devuelve parte de la radiación al espacio, regulando la temperatura del planeta.

Figura 1

Efectos de la atmósfera sobre la radiación



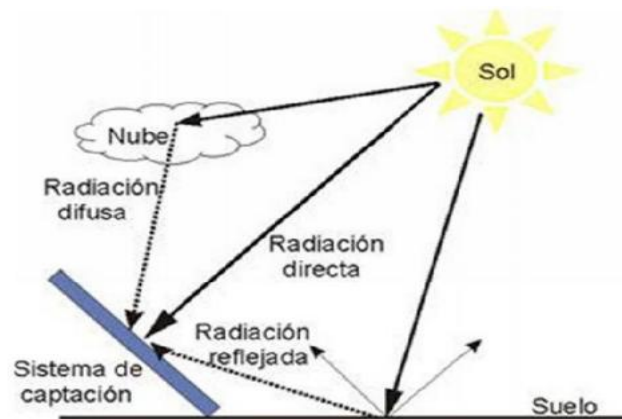
Nota: Lara (2007)

A. Componentes de la radiación solar

Según Zegarra (2021), la radiación solar que llega a la Tierra varía debido a la órbita elíptica del planeta alrededor del Sol. Esta energía se distribuye en un rango de longitudes de onda entre 0.2 y 3.0 μm . Aproximadamente el 50% corresponde al espectro visible (0.39 a 0.77 μm), mientras que el resto se encuentra principalmente en forma de radiación infrarroja con baja proporción ultravioleta.

Asimismo, la radiación global incidente en la superficie como se muestra en la figura 2 y está compuesta por tres elementos: radiación directa, que proviene del Sol y disminuye en días nublados; radiación difusa, originada por la dispersión atmosférica, que representa cerca del 15% en cielos despejados y hasta el 50% en condiciones nubladas; y radiación reflejada, como muestra la Figura 2 en donde la radiación generada por la interacción con superficies terrestres y dependiente de su coeficiente de reflexión (Zegarra, 2021).

Figura 2
Componentes de la radiación solar



Nota: Zegarra (2021)

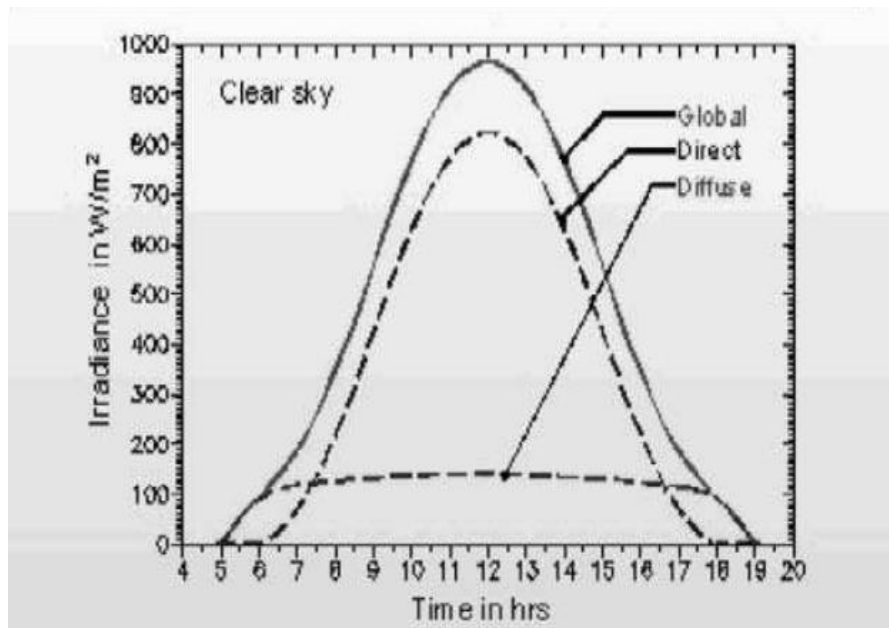
1.2.2 Irradiación

Lara (2007) define la irradiación solar como la cantidad de energía procedente del sol que llega a una superficie en un tiempo determinado, expresada en Wh/m^2 . Su valor varía en función de factores como la hora del día, la estación del año, la latitud geográfica y las condiciones atmosféricas presentes en el momento de la medición.

Asimismo, Lara (2007) señala que el valor de la irradiación varía a lo largo del día, alcanzando un mínimo al amanecer y al atardecer, y un máximo al mediodía cuando el sol se encuentra en su punto más alto sobre el horizonte. Este comportamiento se explica por la inclinación de los rayos solares y la cantidad de atmósfera que deben atravesar antes de llegar a la superficie terrestre. Factores como la nubosidad, la presencia de polvo en suspensión y la estación del año también influyen en la intensidad de la irradiación en diferentes momentos del día, tal como se ilustra en la Figura 3.

Figura 3

Irradiancia durante un día despejado.



Nota: Lara (2007)

1.2.3 Insolación

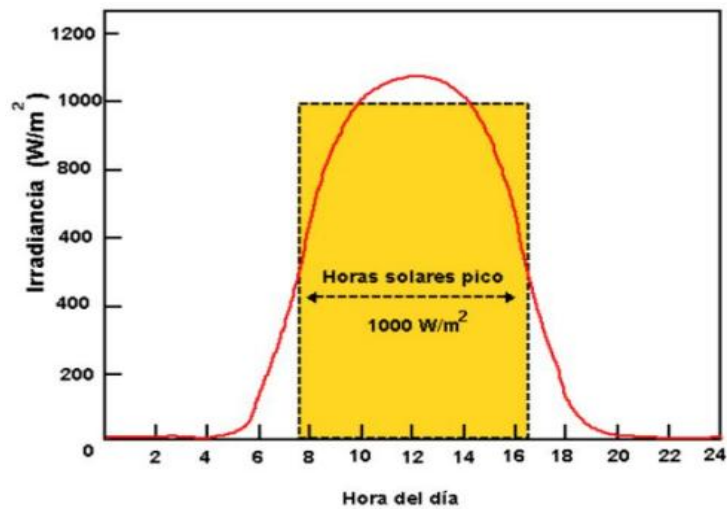
Lara (2007) define la insolación como el total de irradiancia acumulada en un período de tiempo determinado, pudiendo presentarse como energía acumulada por hora, día, estación o año según las necesidades del análisis.

En ese mismo sentido Lara (2007) indica que la insolación puede expresarse en términos de Horas Solares Pico (HSP) mostrada en la Figura 4 en donde una hora solar pico representa la energía recibida durante una hora bajo una irradiancia media de $1,000 \text{ W/m}^2$ como se ilustra en la Figura 4.

Este parámetro resulta importante en el diseño de sistemas fotovoltaicos, dado que la cantidad de energía generada depende directamente de la insolación disponible en el lugar de instalación ya que, a mayor cantidad de horas disponibles, mayor será el tiempo efectivo de operación de la electrobomba y por tanto mayor el volumen de agua bombeado diariamente.

Figura 4

Horas sol pico durante el día



Nota: Flores (2019)

1.2.4 Métodos de medición de la radiación solar

La medición de la radiación solar puede realizarse mediante dos enfoques: la medición directa mediante instrumentos especializados instalados en campo y la medición indirecta mediante modelos matemáticos y datos satelitales. Lara (2007) señala que los métodos directos emplean instrumentos como el piroheliómetro mostrado en la figura 5 que mide exclusivamente la radiación directa del sol mientras que el piranómetro mostrado en la figura 6 registra la radiación solar total incluyendo componentes directa y difusa. Si bien estos instrumentos ofrecen mediciones precisas, requieren instalación permanente en campo y calibración periódica, limitando su aplicación en zonas rurales o de difícil acceso.

Figura 5

Piroheliómetro



Nota: Lara (2007)

Figura 6
Piranómetro



Nota: Lara (2007)

Por otra parte, los métodos indirectos se fundamentan en modelos matemáticos y observaciones satelitales para estimar la radiación solar sin necesidad de equipos especializados.

Zegarra (2021) destaca la plataforma NASA POWER como una herramienta ampliamente utilizada en el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos por su accesibilidad, cobertura global y confiabilidad, proporcionando datos históricos de radiación solar global diaria con resolución mensual para cualquier coordenada geográfica. En la presente investigación se empleó NASA POWER para obtener los valores de Horas Solares Pico (HSP) del área de estudio, parámetro fundamental para el diseño del sistema de bombeo solar fotovoltaico.

1.2.5 Factores que afectan la energía solar disponible

A La ubicación geográfica y latitud

Según Alonso y Chenlo (2014), la latitud influye en la radiación solar y el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos. En zonas cercanas al Ecuador la radiación es más constante durante el año, favoreciendo un mayor rendimiento; en latitudes altas, la radiación disminuye y presenta mayor variación estacional, reduciendo la eficiencia del sistema.

B Condiciones atmosféricas

Alonso y chenlo (2014) destaca que la nubosidad, el polvo y otros factores ambientales pueden reducir la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos. Ya que la nubosidad Disminuye la radiación solar, reduciendo la producción de energía hasta en un 30% en días nublados, mientras que el polvo y la acumulación sobre los paneles bloquea la luz solar, afectando la eficiencia hasta en un 30% sin mantenimiento adecuado.

C Ángulo de inclinación de los paneles solares

Alonso y chenlo (2014) menciona que la inclinación del eje terrestre 23.5° provoca variaciones en la radiación solar a lo largo del año, afectando la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos. Para la variación estacional se sabe que, en verano los días son más largos y la radiación es mayor, mientras que en invierno disminuye, reduciendo la producción de energía.

En cuanto a la Inclinación de los paneles al ajustar el ángulo según la latitud y la estación mejora la captación solar.

D Sombra y obstrucciones

Alonso y chenlo (2014) manifiesta que las sombras de árboles, edificios o polvo reducen la eficiencia de los paneles solares. Incluso una pequeña obstrucción afecta todo el sistema. Para evitar pérdidas, se recomienda una instalación sin obstáculos y el uso de optimizadores de potencia

E Altitud

Alonso y chenlo (2014) menciona que la altitud influye en la radiación solar recibida ya que, a mayor altitud el aire es más limpio y hay menos dispersión, lo que aumenta la eficiencia de los paneles solares. Sin embargo, las bajas temperaturas y condiciones extremas pueden afectar los componentes del sistema.

F Albedo

Alonso y chenlo (2014) informa que es el porcentaje de radiación solar reflejada por una superficie. Valores altos, como en nieve o arena, aumentan la radiación difusa aprovechable por paneles solares. Superficies oscuras, como suelos húmedos o vegetación densa, absorben más calor y reflejan menos. Su impacto varía según el tipo de terreno, la humedad y el ángulo solar, influyendo en la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos.

1.2.6 Ventajas y desventajas de la energía solar

A Ventajas

Perpiñán (2012) señala que la energía solar fotovoltaica es una alternativa sostenible para el ámbito agrícola, debido a que es una fuente renovable y disponible en gran parte del territorio, especialmente en zonas con alta radiación como Ayacucho. Además, al tratarse de un recurso gratuito, permite reducir los costos operativos frente a sistemas convencionales.

Asimismo, su uso contribuye a disminuir las emisiones contaminantes al no depender de combustibles fósiles. Por último, su aplicación en zonas rurales resulta adecuada, ya que permite implementar sistemas de bombeo autónomos en lugares donde el acceso a la red eléctrica es limitado o inexistente.

B Desventajas

Perpiñán (2012) también señala que la energía solar presenta algunas limitaciones que deben considerarse en el diseño de los sistemas. La principal es su carácter variable, ya que la radiación depende de condiciones climáticas como la nubosidad y la estacionalidad, lo que puede afectar el rendimiento, tal como se observó en el mes de febrero.

Asimismo, la eficiencia de los paneles solares es limitada, lo que requiere mayor área de captación para cubrir demandas elevadas. A esto se suma que, aunque los costos han disminuido, la inversión inicial puede ser una restricción. Finalmente, es necesario considerar el manejo de los residuos al final de la vida útil de los equipos para evitar impactos ambientales.

1.3 Sistema fotovoltaico

Farias (2020) menciona que el sistema fotovoltaico permite la transformación de la energía solar en energía eléctrica por medio de paneles fotovoltaicos. Crean una diferencia de voltaje mediante la absorción de luz solar, que al conectar una carga produce una corriente eléctrica que provoca realizar un trabajo en ella. La cantidad de corriente que se produce es proporcional al flujo luminoso que recibe el panel fotovoltaico.

1.3.1 Efecto fotovoltaico

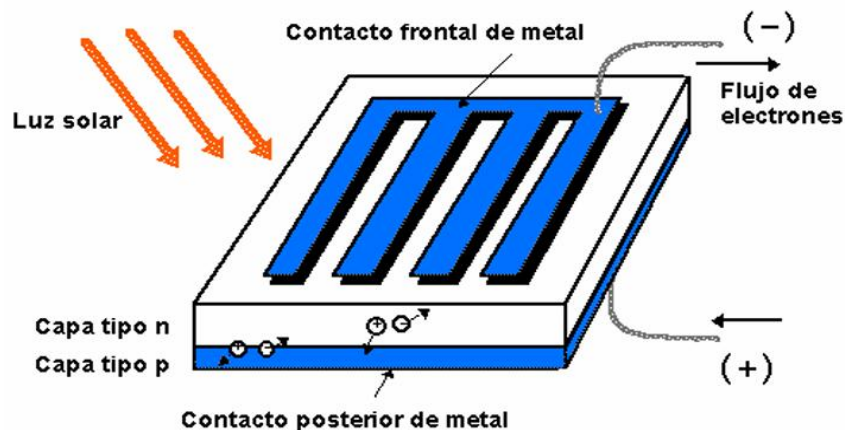
A Célula fotovoltaica

Flores (2019) señala que un panel solar es un dispositivo que transforma la radiación solar en energía eléctrica. Está compuesto principalmente de silicio, un material semiconductor que permite el movimiento de electrones, generando un voltaje que, al interactuar con una carga, produce corriente eléctrica.

B Conversión fotovoltaica

Farias (2020) explica que los materiales semiconductores presentes en la celda convierten la radiación solar en pares de electrones y huecos, los cuales deben separarse para aprovechar la energía generada. Esta separación produce una acumulación de cargas que origina un voltaje medible, conocido como efecto fotovoltaico, como se muestra en la Figura 7. A través de un circuito eléctrico, los electrones se desplazan generando una corriente eléctrica. En condiciones de circuito abierto se obtiene una diferencia de potencial (V_{ca}), mientras que en cortocircuito se genera una corriente (I_{cc}).

Figura 7
Generación eléctrica en una celda fotovoltaica



Nota: Extraído de Sandia National Laboratories (1998)

Farias (2020) describe que una celda solar está formada por la unión de dos capas de materiales semiconductores, una de tipo N y otra de tipo P, provistas de contactos eléctricos en sus extremos. Esta unión genera un campo eléctrico interno que permite convertir la energía solar en energía eléctrica, tal como se muestra en la Figura 7.

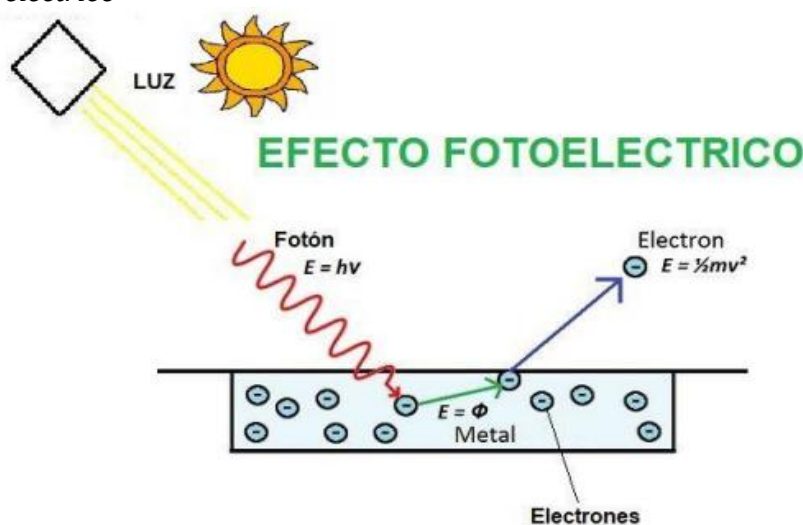
Asimismo, el autor indica que las celdas solares presentan parámetros eléctricos que permiten evaluar su desempeño. Entre ellos, la corriente de cortocircuito (I_{cc}), que corresponde a la máxima corriente generada cuando no existe resistencia externa y depende de la radiación incidente y del área de la celda. El voltaje de circuito abierto (V_{ca}) representa el voltaje máximo sin carga conectada, alcanzando aproximadamente 0.6 V en celdas de silicio cristalino. Finalmente, la potencia máxima (P_m) se obtiene en el punto de operación óptimo, siendo proporcional a la eficiencia de la celda (Farias, 2020).

C Efecto fotoeléctrico

Pérez (2019) menciona que, es el fenómeno en el que ciertos materiales, al ser iluminados con luz de suficiente energía emiten electrones desde su superficie. Esto ocurre cuando los fotones transfieren su energía a los electrones del material, permitiéndoles liberarse. Los electrones expulsados se llaman fotoelectrones, y aunque son iguales a otros electrones su emisión depende directamente de la luz incidente.

Este efecto constituye el fundamento de la tecnología fotovoltaica, ya que en los paneles solares la luz solar genera corriente eléctrica a partir de materiales semiconductores, tal como se muestra en la Figura 8.

Figura 8
Efecto fotoeléctrico



Nota: Pérez (2019)

1.3.2 Módulo fotovoltaico

Farias (2020) señala que las celdas solares son dispositivos que convierten la energía de la radiación electromagnética en electricidad en forma de corriente continua. Dado que cada celda genera un voltaje relativamente bajo, es necesario agrupar varias mediante conexiones en serie y paralelo para alcanzar la potencia requerida por el sistema.

Para proteger las celdas de impactos y condiciones ambientales adversas, estas se encapsulan formando una estructura denominada módulo fotovoltaico. Farias (2020) indica que sus componentes principales son las celdas interconectadas con laminadas entre polímeros para protegerlas de la humedad y el clima, soportadas sobre vidrio templado y una caja de conexiones que conduce la electricidad generada hacia la carga del sistema. Estos módulos pueden interconectarse entre sí para adaptarse a distintas demandas energéticas, constituyendo la unidad básica de cualquier sistema de generación fotovoltaica.

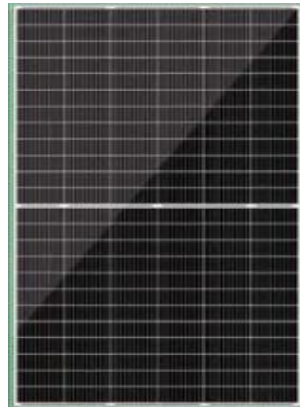
A. Tipos de módulos fotovoltaicos

Sandia National Laboratories (1998) explica que el efecto fotovoltaico ocurre con un material semiconductor convierte la luz solar en electricidad, el silicio es el material más empleado en la fabricación de celdas solares por su disponibilidad, estabilidad y eficiencia en la conversión de energía. Según el tipo de construcción y pureza del material, Guarín y Ruiz (2022) clasifican los módulos fotovoltaicos en tres tipos principales:

A.1 Panel mono cristalino

Sandia National Laboratories (1998) detalla que se fabrica a partir de un único cristal de silicio de alta pureza como muestra la Figura 9 alcanzando eficiencias de hasta 17% y una vida útil de hasta 25 años, siendo el de mayor rendimiento y confiabilidad del mercado.

Figura 9
Panel mono cristalino



Nota: Extraído de Lara (2007)

A.2 Panel poli cristalino

Sandia National Laboratories (1998) menciona que están compuestos por múltiples cristales de silicio, lo que reduce su costo de fabricación como muestra la Figura 10. Su eficiencia llega hasta 15% con una vida útil aproximada de 20 años, constituyendo una opción equilibrada entre costo y rendimiento.

Figura 10
Panel poli cristalino



Nota: extraído de Lara (2007)

B Parámetros de funcionamiento de una celda solar

Perpiñán (2012) señala que los parámetros eléctricos de una celda solar permiten evaluar su rendimiento en la conversión de energía luminosa en electricidad, siendo medidos bajo Condiciones Estándar de Prueba (STC), correspondientes a una irradiancia de $1,000 \text{ W/m}^2$ y temperatura de 25°C . Los principales parámetros son:

B.1 Corriente de cortocircuito (I_{sc})

Es la corriente máxima que genera la celda cuando sus terminales se conectan sin resistencia. Su valor depende directamente de la irradiancia recibida y del área de la celda.

B.2 Voltaje de circuito abierto (V_{oc})

Representa el voltaje máximo que entrega la celda cuando no tiene carga conectada. En celdas de silicio cristalino este valor se aproxima a 0.6 V bajo condiciones estándar.

B.3 Punto de máxima potencia (MPP)

Es el punto óptimo de operación de la celda donde el producto de corriente y voltaje genera la mayor potencia posible. Este punto define la potencia pico (W_p) del módulo fotovoltaico como parámetro fundamental para el dimensionamiento de sistemas de bombeo solar. Finalmente, el factor de forma (FF) mide la calidad eléctrica de la celda, expresando la relación entre la potencia máxima real y el producto teórico de $V_{oc} \times I_{sc}$. Los mejores paneles presentan valores de FF superiores al 78% (Perpiñán, 2012).

C Eficiencia del panel y pérdidas típicas

Perpiñán (2012) define la eficiencia de un panel solar como la relación entre la potencia eléctrica generada y la energía solar incidente sobre su superficie, expresada en porcentaje. Bajo condiciones estándar de prueba, los paneles monocristalinos alcanzan eficiencias de hasta 17%, los policristalinos hasta 15% y los amorfos entre 5% y 10%, siendo este parámetro determinante en la selección del módulo fotovoltaico para cualquier sistema de generación.

Sin embargo, Perpiñán (2012) señala que en condiciones reales la potencia de un sistema fotovoltaico es menor a la nominal debido a diversas pérdidas. Entre ellas destacan las pérdidas por temperatura, que reducen la eficiencia aproximadamente en 0.4% por cada grado Celsius por encima de 25 °C, así como la suciedad y el sombreado en los módulos, que disminuyen la radiación incidente. Adicionalmente, las pérdidas en cableado y conexiones también contribuyen a la reducción de la energía útil del sistema.

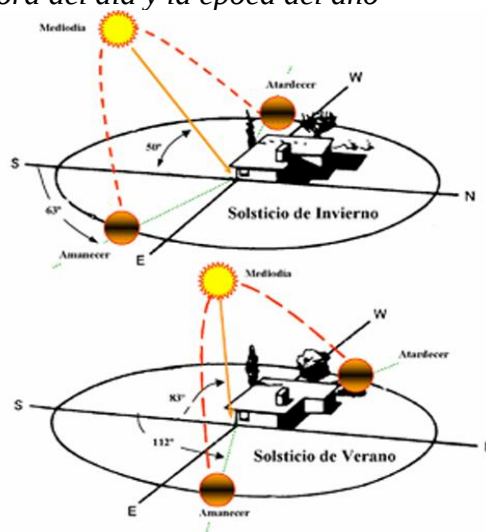
En conjunto estas pérdidas se expresan mediante el factor de rendimiento del sistema (PR), que representa la relación entre la energía real generada y la energía teórica esperada bajo condiciones ideales, con valores típicos entre 0.75 y 0.85 para sistemas fotovoltaicos de bombeo correctamente instalados (Perpiñán, 2012).

D Posición y orientación de los paneles solares

Lara (2007) señala que la orientación de los sistemas fotovoltaicos depende de la latitud del lugar de instalación, ya que su eficiencia está condicionada por la captación de radiación solar. La máxima generación se logra cuando los paneles son perpendiculares a los rayos solares al mediodía; en el hemisferio sur la orientación óptima es hacia el norte para maximizar la energía captada durante el año. En instalaciones fijas, la inclinación debe ajustarse a la latitud del sitio para maximizar la radiación incidente, tal como se ilustra en la Figura 11.

Figura 11

Trayectoria del sol según la hora del día y la época del año



Nota: Tomado de Sandia National Laboratories (1998)

1.3.3 Inversor solar

Perpiñán (2012) define el inversor solar como el dispositivo encargado de convertir la corriente continua generada por los módulos fotovoltaicos en corriente alterna, permitiendo su uso en equipos eléctricos como electrobombas. Este equipo incorpora tecnología de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), la cual optimiza continuamente la operación del sistema para

maximizar la extracción de energía bajo condiciones variables de irradiación. Entre sus principales características se consideran la potencia nominal, la eficiencia de conversión que actualmente supera el 90% y una vida útil aproximada de 10 a 15 años, por lo que su reemplazo debe contemplarse en sistemas de mayor horizonte de operación.

A Tipos de corriente eléctrica

Flores (2019) explica que los tipos de corriente eléctrica se dividen en corriente continua (CC) y corriente alterna (CA), diferenciándose por la forma en que fluye la electricidad.

A.1 La corriente continua

Flores (2019) explica que mantiene un flujo constante de electrones en una única dirección, lo que la hace ideal para sistemas que requieren estabilidad en el suministro eléctrico, como baterías, paneles solares y dispositivos electrónicos. En este tipo de corriente, el voltaje se mantiene constante, lo que garantiza un suministro uniforme de energía.

A.2 La corriente alterna

Para Flores (2019) la corriente alterna se caracteriza por variar periódicamente su dirección y magnitud siguiendo una forma sinusoidal. Es utilizada en sistemas eléctricos domésticos e industriales debido a su eficiencia en la transmisión de energía a largas distancias y a la facilidad para modificar los niveles de tensión mediante transformadores. En sistemas fotovoltaicos, la corriente continua generada por los paneles se convierte en corriente alterna mediante un inversor, lo que permite el funcionamiento de equipos convencionales como electrobombas.

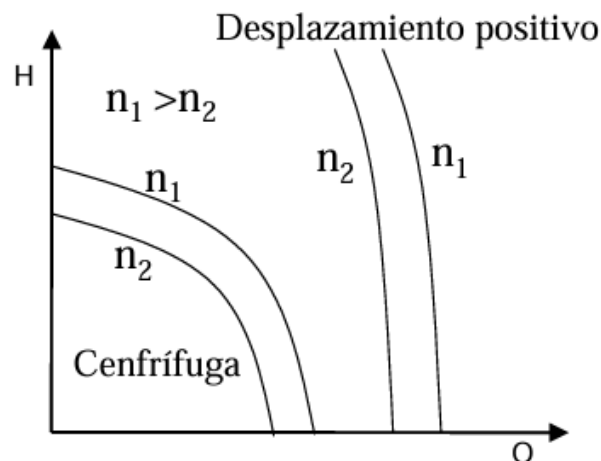
1.3.4 Equipo de bombeo

Perpiñán (2012) define el sistema de bombeo solar fotovoltaico como un conjunto de componentes que utiliza energía solar para elevar y transportar agua desde una fuente hacia un punto de almacenamiento, como una alternativa sostenible frente a sistemas convencionales. En estos sistemas, la energía generada en corriente continua puede emplearse directamente o convertirse en corriente alterna mediante un inversor para alimentar electrobombas.

Perpiñán (2012) señala que los principales tipos de bombas utilizadas son las centrífugas y las de desplazamiento positivo, cuyas características comparativas se ilustran en la Figura 12. Las primeras se emplean para caudales moderados y alturas bajas a medias, mientras que las segundas se utilizan en condiciones de mayor altura y menor caudal.

Figura 12

Bombeo centrífugo vs bombeo de desplazamiento positivo



Nota: Alonso y chenlo (2014)

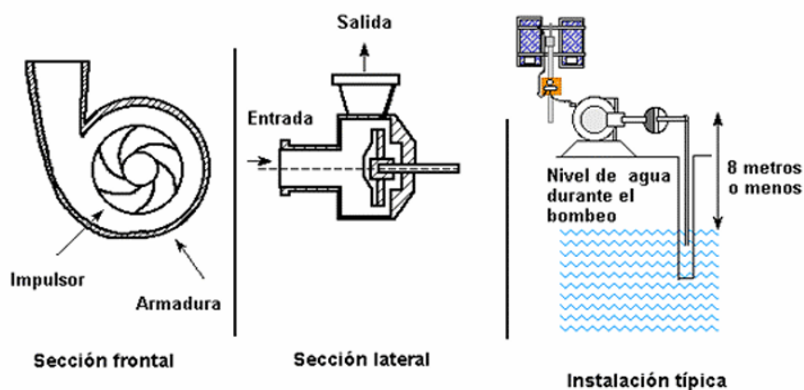
A Tipo de bomba

A.1 Bombas centrífugas periféricas

Alonso y Chenlo (2014) señalan que las bombas centrífugas funcionan mediante un impulso al girar genera fuerza centrífuga para succionar y expulsar el agua en dirección radial, tal como se ilustra en la Figura 13. Este tipo de bomba puede ser sumergible o de superficie, y su rendimiento depende del diseño del impulsor y de la carga dinámica total.

En el caso de las bombas de superficie como muestra la Figura 14, se instalan a nivel del suelo, lo que facilita su mantenimiento; sin embargo, su eficiencia disminuye cuando la profundidad de succión supera aproximadamente los 8 m.

Figura 13
Esquema de una bomba centrífuga superficial



Nota: Alonso y Chenlo (2014)

Figura 14
Bomba centrífuga superficial



Nota: Alonso & chenlo (2014)

A.2 Bombas centrífugas sumergibles

Alonso y Chenlo (2014) menciona que existen diversos tipos de bombas centrífugas sumergibles, diferenciadas por la ubicación de su motor y el número de impulsores. Algunas tienen el motor acoplado directamente a los impulsores, sumergiéndose completamente en el agua. Otras cuentan con un motor ubicado en la superficie, conectado a los impulsores sumergidos mediante un eje de transmisión.

Las bombas sumergibles suelen incorporar varios impulsores, lo que les permite elevar el agua a mayores alturas, razón por la cual también se les conoce como bombas de paso múltiple o de etapas.

B Parámetros de la bomba

Para el adecuado diseño de un sistema de bombeo, es fundamental considerar los principales parámetros que definen el funcionamiento de la bomba, los cuales permiten garantizar un desempeño eficiente acorde a las condiciones del sistema (Alonso y Chenlo, 2014)

B.1 Caudal (Q)

Mott (2015) señala que el caudal representa el volumen de agua que la bomba transporta por unidad de tiempo, expresado comúnmente en L/s o m³/h. En ese sentido una correcta estimación del caudal permite evitar deficiencias o sobredimensionamientos en el sistema.

B.2 Altura de elevación o carga total (HMT).

La altura de elevación corresponde a la energía que la bomba debe suministrar al fluido para trasladarlo desde la fuente hasta el punto de descarga. Esta incluye la altura estática y las pérdidas de carga; por ello, es fundamental en la selección de la bomba, tal como indica (Mott, 2006).

B.3 Potencia hidráulica

Para Mott (2015) la potencia hidráulica es el trabajo útil que realiza la bomba para elevar el agua, dependiendo del caudal y la altura de elevación. Por lo tanto, a mayores requerimientos hidráulicos, mayor será la energía necesaria para el funcionamiento del sistema.

B.4 Potencia eléctrica.

Perpiñán (2015) señala que la potencia eléctrica es la energía requerida por la bomba para operar y está determinada por la potencia hidráulica y la eficiencia del sistema. Para sistemas fotovoltaicos este parámetro es crítico debido a la variabilidad de la radiación solar.

C Curva característica de la bomba

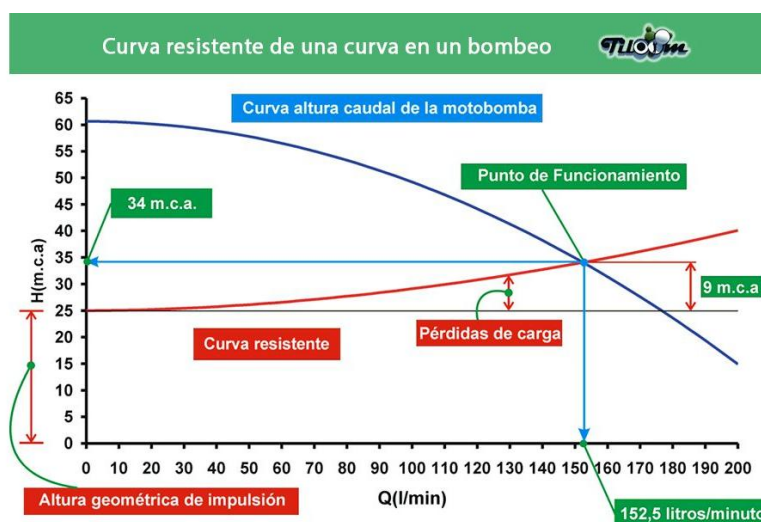
De acuerdo con Mott (2015) la curva característica de la bomba es una herramienta fundamental para analizar su comportamiento hidráulico, ya que permite establecer la relación entre los diferentes parámetros de operación. A través de estas curvas, es posible determinar las condiciones óptimas de funcionamiento y garantizar una adecuada selección del equipo.

C.1 Curva H-Q.

Mott (2015) explica que la curva altura vs caudal (H-Q) representa la relación entre la altura de elevación y el caudal suministrado por la bomba mostrada en la Figura 15. Esta relación es inversamente proporcional, es decir, a medida que el caudal aumenta, la altura disminuye; esta curva es esencial para evaluar el rendimiento de la bomba y su adaptación a las condiciones del sistema.

Figura 15

Curva característica y resistente de una bomba hidráulica



Nota. Adaptado de "Bombeos III: Curva resistente del sistema", por R. Bragado Alcaraz, 2018.

<https://www.tiloom.com/bombeos-iii-curva-resistente-del-sistema/>

C.2 Curva de potencia absorbida.

La curva de potencia absorbida muestra la variación de la potencia requerida por la bomba en función del caudal. Este parámetro permite estimar el consumo energético del equipo durante su operación. Asimismo, su análisis resulta especialmente importante en sistemas fotovoltaicos, donde la disponibilidad de energía es variable, tal como lo indica Perpiñán (2015).

C.3 Curva de eficiencia.

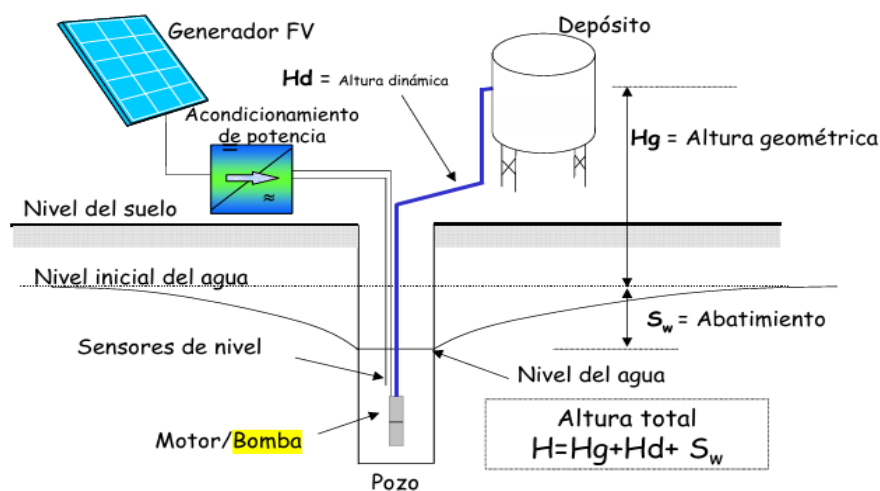
Según Perpiñán (2015) la curva de eficiencia describe el comportamiento del rendimiento de la bomba en función del caudal, por lo general presenta un punto máximo denominado eficiencia óptima, en el cual la bomba opera con el mejor aprovechamiento de la energía y al trabajar cerca de este punto permite reducir pérdidas energéticas y mejorar el desempeño del sistema.

C.4 Punto de operación

El punto de operación se define como la intersección entre la curva característica de la bomba y la curva del sistema tal como se ilustra en la Figura 16. Este punto determina las condiciones reales de funcionamiento en términos de caudal y altura. Por lo tanto, el punto de operación garantiza un funcionamiento estable, evitando problemas como cavitación o bajo rendimiento Perpiñán (2015).

Figura 16

Esquema del sistema de bombeo fotovoltaico



Nota: Extraído de Alonso y Chenlo (2014)

D Eficiencia de bombeo

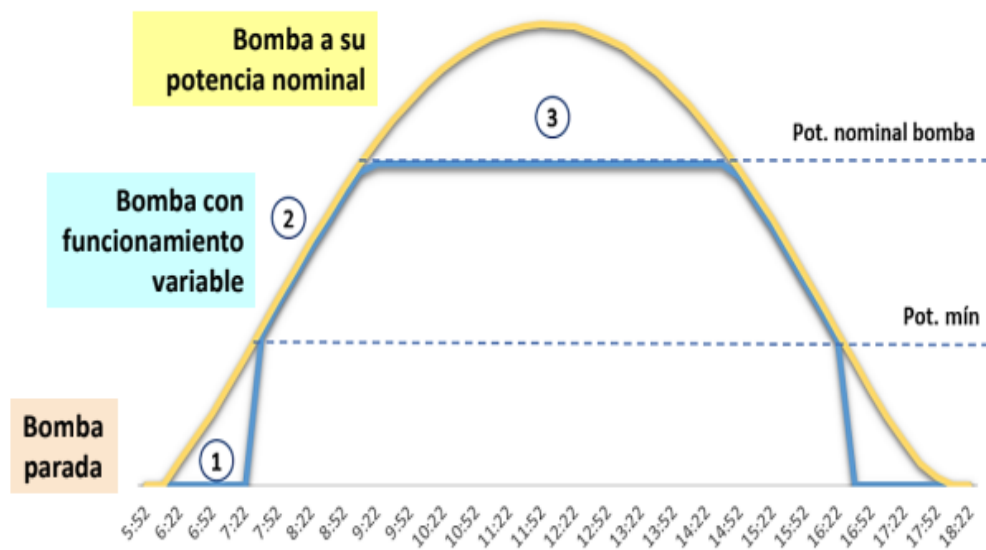
De acuerdo con Perpiñán (2015) la eficiencia de bombeo es un indicador que relaciona la energía útil entregada al fluido con la energía suministrada, permitiendo evaluar el desempeño del sistema. Esta eficiencia depende de factores como las pérdidas hidráulicas, el rendimiento de la bomba y la eficiencia del motor.

En bombas centrífugas, la eficiencia suele variar entre 60 % y 85 %, mientras que el motor eléctrico puede alcanzar valores entre 85 % y 95 %, por lo que la eficiencia global del sistema generalmente es menor al 80 %. Además, este parámetro no es constante ya que depende del punto de operación, siendo óptimo cuando trabaja cerca de su máxima eficiencia Perpiñán (2015).

En sistemas de bombeo fotovoltaico la eficiencia se ve afectada por la variabilidad de la radiación solar como se observa en la Figura 17, bajo condiciones de cielo despejado ya que el funcionamiento de la bomba es más estable, lo que favorece un mejor aprovechamiento energético. Mientras que en la Figura 18 el paso de nubes genera caídas en la energía disponible provocando variaciones en el desempeño de la bomba y por lo tanto en la eficiencia del sistema (Mott, 2006).

Figura 17

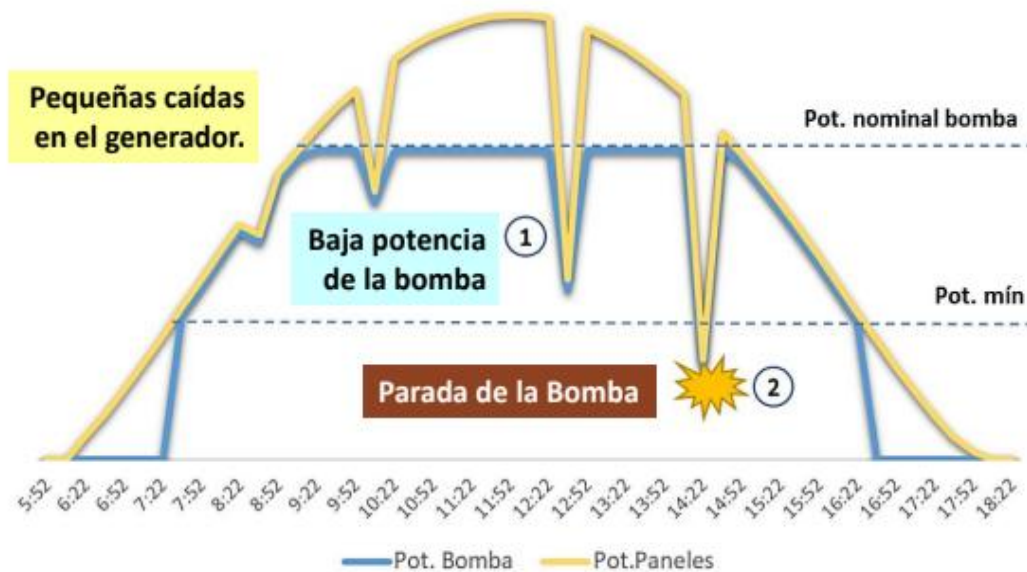
Grafico funcionamiento de bomba con cielo despejado



Nota: Extraído de Arangurí Cayetano (2026)

Figura 18

Grafico funcionamiento de bomba con paso de nubes



Nota: Extraído de Arangurí Cayetano (2026)

1.4 Sistema hidráulico

Sandia National Laboratories (1998) menciona que antes de decidir el tamaño de un sistema de bombeo de agua primero hay que comprender algunos conceptos básicos sobre cómo se mueve el agua en una instalación. El tamaño del sistema depende directamente de la carga dinámica total (CDT) expresada en la Ecuación 1 y de la cantidad de agua que se necesita cada día, a este cálculo se le llama ciclo hidráulico y resulta de la suma de los siguientes componentes:

- **Carga Estática (CE):** La altura que el agua vence sin considerar la resistencia en las tuberías.
- **Carga Dinámica (CD):** La resistencia que el agua enfrenta al moverse por las tuberías y otros elementos del sistema.

Ecuación 1

Carga dinámica total

$$CDT = CE + CD \quad (1)$$

Donde:

CDT : Carga dinámica total

CE : Carga estática (nivel estático + altura de la descarga)

CD : Carga dinámica (abatimiento + fricción)

Nota: Extraído de Lara (2007)

1.4.1 Carga estática (Hg)

Sandia National Laboratories (1998) añade que la carga estática expresada en la Ecuación 2 representa la distancia vertical que el agua recorre desde su nivel inicial en el pozo hasta el punto donde se descarga. Para calcularla, se suman los valores del nivel estático que es la altura del agua en el pozo antes de empezar a bombear y la altura de descarga que es la altura a la que el agua es liberada después de ser bombeada.

Ecuación 2

Carga estática

$$Hg = N_E + A_D \quad (2)$$

Donde:

Hg : Carga estática (m).

N_E : Nivel estático del agua (m).

A_D : Altura de descarga (m).}

Nota: Extraído de Lara (2007)

1.4.2 Carga dinámica

Según Sandia National Laboratories (1998), la carga dinámica corresponde a la resistencia que enfrenta el agua durante su circulación por el sistema hidráulico debido a la fricción y accesorios presentes en la conducción.

A Pérdidas por fricción (H_f)

Sandia National Laboratories (1998) explica que los fabricantes han elaborado tablas que muestran el porcentaje de pérdida de presión debido a la fricción en las tuberías, estas pérdidas dependen del caudal, el diámetro y material de la tubería o bien se calculan mediante la ecuación de Darcy-Weisbach, presentada en la Ecuación 3, los factores que afectan las pérdidas por fricción son los siguientes:

- Longitud y diámetro de la tubería: Tuberías más largas y de menor diámetro tienen mayores pérdidas.
- Rugosidad del material: Materiales más rugosos (como el hierro fundido) aumentan las pérdidas.
- Régimen del flujo: Flujo turbulento genera mayores pérdidas que el flujo laminar.

Ecuación 3

Fórmula de Darcy Weisbach

$$h_f = f \times \frac{L}{D} \times \frac{V^2}{2g} \quad (3)$$

Donde:

H_f: Pérdida por fricción (m).

f: Coeficiente de fricción (depende de la rugosidad relativa y el régimen de flujo).

L: Longitud de la tubería (m).

D: Diámetro interno de la tubería (m).

V: Velocidad promedio del flujo (m/s).

Nota: Extraído de Arangurí Cayetano (2026)

B Pérdidas por accesorios (h_a)

Según Sandia National Laboratories (1998), las pérdidas por accesorios corresponden a la energía que pierde el flujo de agua debido a la presencia de elementos hidráulicos como válvulas, codos, tee y conexiones instaladas en el sistema de conducción, estas pérdidas pueden calcularse mediante la Ecuación 4:

Ecuación 4

Pérdidas por accesorios

$$H_a = \sum_1^n \left(K \times \frac{v^2}{2g} \right) \quad (4)$$

Donde:

H_a: pérdidas por accesorios totales (m)

K: coeficiente de pérdida del accesorio

v: velocidad del flujo (m²/s)

g: gravedad (9.81 m/s²)

Nota: Extraído de Arangurí Cayetano (2026)

1.4.3 *Altura Manométrica total (HMT)*

Según Sandia National Laboratories (1998), la altura manométrica total calculada mediante la Ecuación 5, representa la carga total que la bomba debe vencer para transportar el agua desde el punto de succión hasta el punto de descarga venciendo la altura geométrica, pérdidas por fricción, accesorios y la presión requerida en el punto de entrega.

Ecuación 5

Cálculo de la altura manométrica total

$$HMT = Hg + Hf + Ha \quad (5)$$

Donde:

HMT: Altura manométrica total (m).

Hg: Altura geométrica o diferencia de nivel entre la fuente y el punto de descarga (m).

Hf: Pérdidas de carga por fricción en tuberías (m).

Ha: Pérdidas de carga ocasionadas por accesorios del sistema hidráulico (m).

Nota: Extraído de Arangurí Cayetano (2026)

1.4.4 *Aforo volumétrico*

Según Flores (2019) el aforo volumétrico expresado en la Ecuación 6, consiste en determinar el caudal a partir del volumen recolectado en un intervalo de tiempo determinado. Es ampliamente utilizado para mediciones de caudales pequeños como en sistemas de riego y abastecimiento.

Ecuación 6

Formula del caudal de aforo

$$Q = \frac{V}{t} \quad (6)$$

Donde:

Q: Caudal de agua (m³/s o L/s).

V: Volumen recolectado (m³ o L).

t: Tiempo de recolección (s).

Nota: Extraído de Mott (2015)

Flores (2019) distingue los siguientes métodos de aforo

- **Aforo volumétrico:** Consiste en medir directamente el volumen de agua recolectado en un recipiente durante un tiempo determinado.
- **Aforo mediante estructuras hidráulicas:** Emplea dispositivos calibrados, como vertederos y canaletas, para estimar el caudal circulante.

1.5 Requerimiento hídrico del cultivo

Según la FAO (2006), el requerimiento hídrico del cultivo corresponde a la cantidad de agua necesaria para compensar las pérdidas ocasionadas por evapotranspiración durante el crecimiento y desarrollo de la planta. Este requerimiento varía en función de las condiciones climáticas, tipo de cultivo, etapa fenológica y características del suelo, siendo un parámetro fundamental para la planificación y manejo eficiente del riego agrícola.

1.5.1 Evapotranspiración del cultivo (ET_c)

Según FAO (2006), la evapotranspiración del cultivo (ET_c), expresada en la Ecuación 7, representa la demanda real de agua de un cultivo, considerando sus características específicas y su etapa de desarrollo. Este parámetro integra las condiciones climáticas mediante la evapotranspiración de referencia (ET_o) y las características del cultivo a través del coeficiente de cultivo (K_c), cuya relación se define como el producto entre ambas variables.

Ecuación 7

Formula de la evapotranspiración de cultivo

$$ET_c = ET_o \times K_c \quad (7)$$

Donde:

ET_c : Evapotranspiración del cultivo (mm/día)

ET_o : Evapotranspiración de referencia (mm/día)

K_c : Coeficiente de cultivo (adimensional)

Nota: Extraído de FAO (2006)

1.5.2 Evapotranspiración de referencia (ET_o)

Según FAO (2006), la evapotranspiración de referencia representa la pérdida de agua de una superficie de cultivo, determinada por variables climáticas como temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento, base para el cálculo de las necesidades hídricas del cultivo.

1.5.3 Coeficiente de cultivo (K_c)

Según FAO (2006) el coeficiente de cultivo (K_c), expresado en la Ecuación 8, es un factor adimensional que relaciona la evapotranspiración del cultivo (ET_c) con la evapotranspiración de referencia (ET_o), variando según el tipo de cultivo, etapa fenológica y condiciones de manejo agrícola tal como se ilustra en la Figura 19.

Ecuación 8

Formula del coeficiente del cultivo

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (8)$$

Donde:

K_c: Coeficiente de cultivo (adimensional)

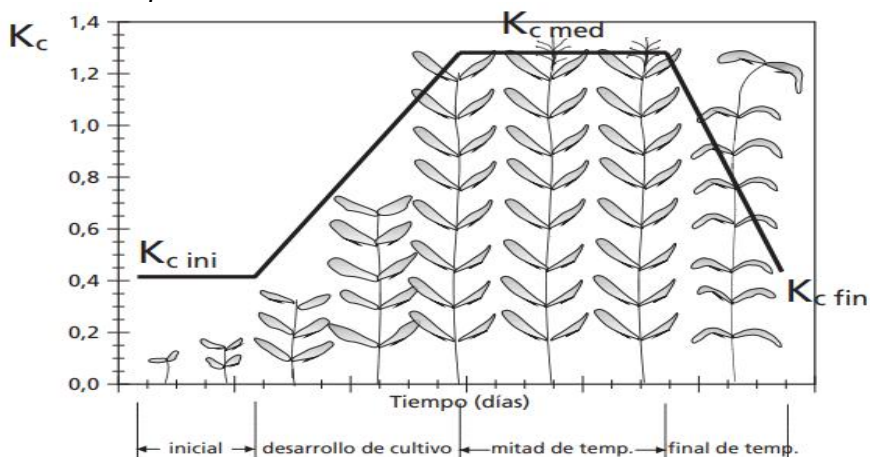
ET_c: Evapotranspiración del cultivo (mm/día)

ET_o: Evapotranspiración de referencia (mm/día)

Nota: Extraído de FAO (2006)

Figura 19

Curva generalizada del coeficiente de cultivo



Nota. Adaptado de *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*, por Food and Agriculture Organization (FAO), 2006.

1.5.4 Caudal requerido

Según FAO (2006), el caudal requerido, expresado en la Ecuación 9, es el flujo de agua necesario para satisfacer la demanda hídrica del cultivo durante el periodo de riego establecido, permitiendo el dimensionamiento del sistema de bombeo. Este parámetro se obtiene a partir del volumen de agua requerido por el cultivo, derivado de la evapotranspiración del cultivo (ETc), y el tiempo de operación del sistema.

Ecuación 9

Formula del caudal requerido para riego

$$Q = \frac{Vr}{tr} \quad (9)$$

Donde:

Q: Caudal requerido (L/s o m³/s).

Vr: Volumen de agua requerido por el cultivo (m³).

tr: Tiempo de riego o tiempo de operación (s).

Nota: Elaboración propia basada en la FAO (2006)

1.6 Sistema de conducción

1.6.1 Tuberías

Alonso y Chenlo (2014) señalan que las tuberías en un sistema de bombeo fotovoltaico permiten transportar el agua desde la fuente hasta el punto de almacenamiento o distribución, asegurando un flujo continuo. Por ello, su diseño debe orientarse a reducir pérdidas de presión y mejorar el rendimiento del sistema. En este sentido, Mott (2015) destaca que las tuberías influyen directamente en las pérdidas de carga y en la eficiencia hidráulica y según su función dentro del sistema, se clasifican en:

Tubería de succión

Conduce el agua desde la fuente hacia la bomba, por lo que debe garantizar un flujo continuo y libre de aire. Un diseño adecuado resulta fundamental para evitar pérdidas de carga excesivas y prevenir fenómenos como la cavitación, los cuales pueden afectar el rendimiento y la vida útil de la bomba (Mott, 2006).

Tubería de impulsión

Transporta el agua desde la bomba hacia el tanque de almacenamiento o sistema de distribución, soportando la presión generada durante el proceso de bombeo. En este caso, las pérdidas de carga adquieren mayor relevancia debido a las condiciones de presión del flujo (Mott, 2006).

Red de distribución

Se encarga de transportar el agua desde el punto de almacenamiento hacia las áreas de consumo o riego, asegurando una distribución uniforme del recurso hídrico. Su diseño debe permitir un suministro eficiente, evitando pérdidas innecesarias y favoreciendo un uso adecuado del agua (Alonso y Chenlo, 2014).

1.6.2 Accesorios hidráulicos

Mott (2015) señala que los accesorios hidráulicos son elementos complementarios del sistema de conducción que permiten controlar, dirigir y regular el flujo del agua dentro de las tuberías. Entre los principales se encuentran codos, válvulas, uniones y tee, cada uno de los cuales introduce una resistencia adicional al flujo, generando pérdidas de carga localizadas que deben considerarse en el diseño hidráulico. Estas pérdidas se expresan en términos de una longitud equivalente de tubería recta o mediante coeficientes de resistencia, los cuales varían según el tipo y geometría del accesorio.

Asimismo, las válvulas y demás accesorios hidráulicos influyen en la presión y velocidad del fluido. Por ello, la adecuada selección e instalación de estos elementos resulta fundamental para reducir pérdidas innecesarias y optimizar el rendimiento del sistema de bombeo (Mott, 2006).

1.7 Evaluación económica para el sistema fotovoltaico

Sapag Chain y Sapag Chain (2014) señalan que la evaluación económica de un proyecto permite determinar su viabilidad financiera mediante el análisis de los flujos de caja, los cuales representan las entradas y salidas de dinero a lo largo de la vida útil del sistema.

1.7.1 Inversión inicial y costos del sistema

Sapag Chain y Sapag Chain (2014) señalan que la inversión inicial corresponde al desembolso necesario para poner en marcha un proyecto, incluyendo adquisición de equipos, instalación y costos asociados, además de los costos de operación y mantenimiento durante la vida útil del sistema. En sistemas fotovoltaicos, esta inversión comprende módulos solares, inversor, sistema de bombeo, estructuras de soporte y accesorios hidráulicos.

1.7.2 Valor Actual Neto (VAN)

Para Sapag Chain y Sapag Chain (2014) el Valor Actual Neto expresado en la Ecuación 10, permite saber si un proyecto es rentable al traer los flujos de caja futuros a valor presente, usando una tasa de descuento que representa el costo de oportunidad del capital. Según los criterios de la Tabla 1, si el VAN es positivo el proyecto es rentable, si es cero solo se recupera la inversión, y si es negativo no conviene ejecutarlo.

Tabla 1

Criterios de decisión del Valor Actual Neto (VAN)

Resultado	Interpretación
$VAN > 0$	Proyecto económicamente viable
$VAN = 0$	Proyecto en punto de equilibrio
$VAN < 0$	Proyecto no viable

Nota. Adaptado de Sapag Chain y Sapag Chain (2014).

Ecuación 10

Formula del valor actual neto

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+r)^t} \quad (10)$$

Donde:

VAN:	Valor Actual Neto (S/.)
I_0 :	Inversión inicial (S/.)
F_t :	Flujo de caja en el período t (S/.)
r:	Tasa de descuento (%)
n:	Vida útil del proyecto (años)
t:	Período de tiempo (años)

Nota. Adaptado de Sapag Chain y Sapag Chain (2014).

1.7.3 Tasa Interna de Retorno (TIR)

La Tasa Interna de Retorno (TIR), formulada en la Ecuación 11, corresponde a la tasa de descuento que anula el VAN y expresa la rentabilidad real del proyecto en términos porcentuales; conforme al criterio de la Tabla 2, el proyecto resulta rentable cuando la TIR supera la tasa mínima aceptable, y al igual que el VAN, contempla el valor del dinero en el tiempo sobre la totalidad de los flujos de caja (Sapag Chain & Sapag Chain, 2014).

Ecuación 11

Formula de la tasa interna de retorno

$$0 = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1 + TIR)^t} \quad (11)$$

Donde:

TIR:	Tasa Interna de Retorno (%)
I_0 :	Inversión inicial (S/.)
F_t :	Flujo de caja en el período t (S/.)
n:	Vida útil del proyecto (años)
t:	Período de tiempo (años)

Nota. Adaptado de Sapag Chain y Sapag Chain (2014).

Tabla 2*Criterios de decisión de la Tasa Interna de Retorno (TIR)*

Resultado	Interpretación
TIR > tasa descuento	Proyecto rentable
TIR < tasa descuento	Proyecto no rentable

Nota. Adaptado de Sapag Chain y Sapag Chain (2014).

1.7.4 Período de recuperación (Payback)

Sapag Chain y Sapag Chain (2014) señalan que el período de recuperación o Payback, expresado en la Ecuación 12, es un indicador que determina el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial a partir de los flujos de caja generados por el proyecto.

Este método evalúa la liquidez del proyecto, considerando que, a menor período de recuperación, mayor es la rapidez con que se obtiene retorno sobre la inversión. Sin embargo, presenta limitaciones al no considerar el valor del dinero en el tiempo ni los beneficios generados tras el período de recuperación, por lo que se emplea como indicador complementario al VAN y la TIR (Sapag Chain & Sapag Chain, 2014).

Ecuación 12

Periodo de recuperación económico (payback)

$$Payback = \frac{I_0}{F_{anual}} \quad (12)$$

Donde:

Payback: Período de recuperación (años)

I_0 : Inversión inicial (S/.)

F_{anual} : Flujo de caja anual promedio (soles/año)

Nota. Adaptado de Sapag Chain y Sapag Chain (2014).

Capítulo II

Materiales y métodos

2.1 Ubicación

Ubicación geográfica

El área de estudio se encuentra ubicada en el Perú, en el departamento de Ayacucho, provincia de Huamanga, distrito de San Juan Bautista ubicadas en las siguientes coordenadas UTM WGS-84 zona 18 L:

- Este : 587461.7715
- Norte : 8542707.5536
- Latitud : 2648

Ubicación política

Políticamente, el área de estudio se ubica en el centro poblado San Antonio de Huatatas, perteneciente al distrito de San Juan Bautista, provincia de Huamanga y departamento de Ayacucho.

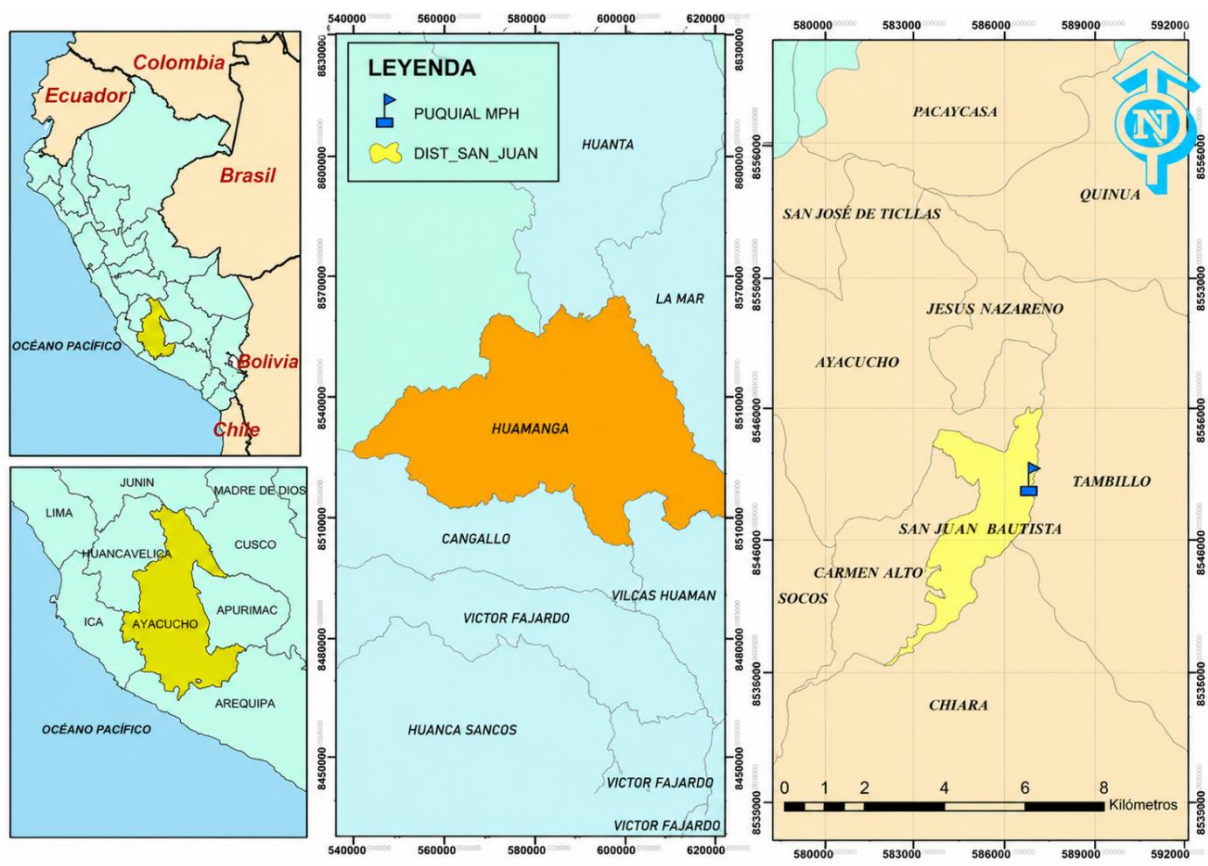
- Departamento : Ayacucho
- Provincia : Huamanga
- Distrito : San Juan Bautista

La Figura 20 muestra la ubicación del vivero municipal de Huamanga dentro del ámbito político-administrativo del área de estudio.

Ubicación hidrográfica

- Vertiente hidrográfica : Atlántico
- Cuenca : Rio Cachi
- Subcuenca : Rio Muyurina
- Extracción : Puquial

Figura 20
 Plano de ubicación del vivero municipal de huamanga



2.2 Vías de acceso

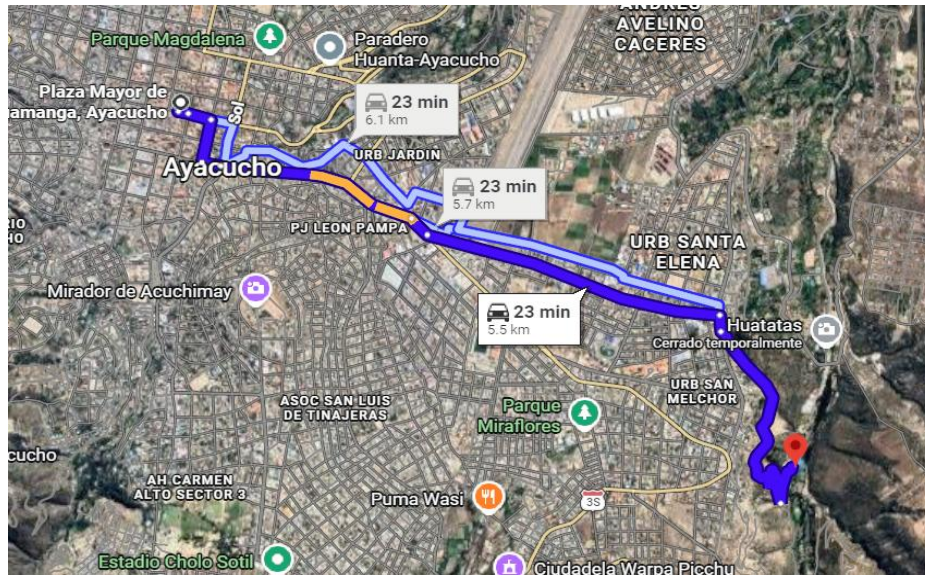
El acceso al área de estudio se realiza mediante vías terrestres, partiendo desde la ciudad de Ayacucho hasta el distrito de San Juan Bautista por carretera asfaltada, con ingreso directo a la zona del proyecto a través de trocha carrozable hacia el paradero de la ruta 1 en la Urbanización Santa Elena, tal como se detalla en la Tabla 3. Esta accesibilidad facilita el traslado de materiales, equipos y personal requerido para la implementación del sistema y lo detalla la Figura 21.

Tabla 3
 Vía de acceso al vivero de la municipalidad provincial de Huamanga.

Tramo	Distancia (km)	Tiempo (min)	Tipo	Estado
Huamanga – Paradero 1	4.7	25	Asfaltado	Bueno
Paradero 1 - Vivero	1.8	10	Trocha	Malo
Total	6.5	35		

Figura 21

Vista satelital del acceso del vivero municipal de huamanga



2.3 Material y software

Para el desarrollo del presente proyecto se utilizaron los siguientes materiales organizados según su función:

2.3.1 Materiales en campo

Equipos del sistema de bombeo fotovoltaico

- 3 paneles fotovoltaicos modelo SunshineSolar MONO HZS-180W
- Electrobomba centrífuga MEDAS OB60 (0.5 HP, 220V AC)
- Inversor-cargador MUST Solar 3,000W
- Tanque de almacenamiento Rotoplas (5 m³)

Materiales del sistema hidráulico

- Tubería PVC 1 pulgada
- Accesorios hidráulicos: válvula check, codos 90°, tee, válvula de paso, manómetro, uniones

Equipos topográficos

- Estación total Leica modelo TS06
- Flexómetro de 5m
- Prismas

Materiales de medición y ensayo

- Balanza digital
- Baldes de volumen conocido
- Wincha métrica de 5 m
- Manguera de 3/4 pulgada
- Cronómetro
- Libreta de campo
- Pinza amperimétrica
- Multímetro digital Fluke 87V

2.3.2 *Materiales en gabinete*

- Cropwat (FAO) para el cálculo de ETo y demanda hídrica
- Nasa Power para obtención de datos climáticos históricos
- AutoCAD Civil 3D dibujo topográfico y perfiles
- ArcGIS para el análisis geomorfológico de la microcuenca
- Microsoft Excel para el procesamiento de datos y análisis estadístico
- Google Earth para delimitar del área de recarga

La investigación se inició con una fase de gabinete orientada a la recopilación y procesamiento de información climática, hidráulica y energética, necesaria para el diseño del sistema de bombeo fotovoltaico. Posteriormente se realizaron trabajos de campo para la obtención de datos como aforo, levantamiento topográfico y verificación de condiciones del área de estudio. Con la información recopilada se procesa y analiza mediante herramientas computacionales, permitiendo el dimensionamiento y evaluación técnica y económica del sistema propuesto.

2.4 Desarrollo de la investigación

2.4.1 Caracterización del área de estudio y demanda hídrica

A Caracterización climática

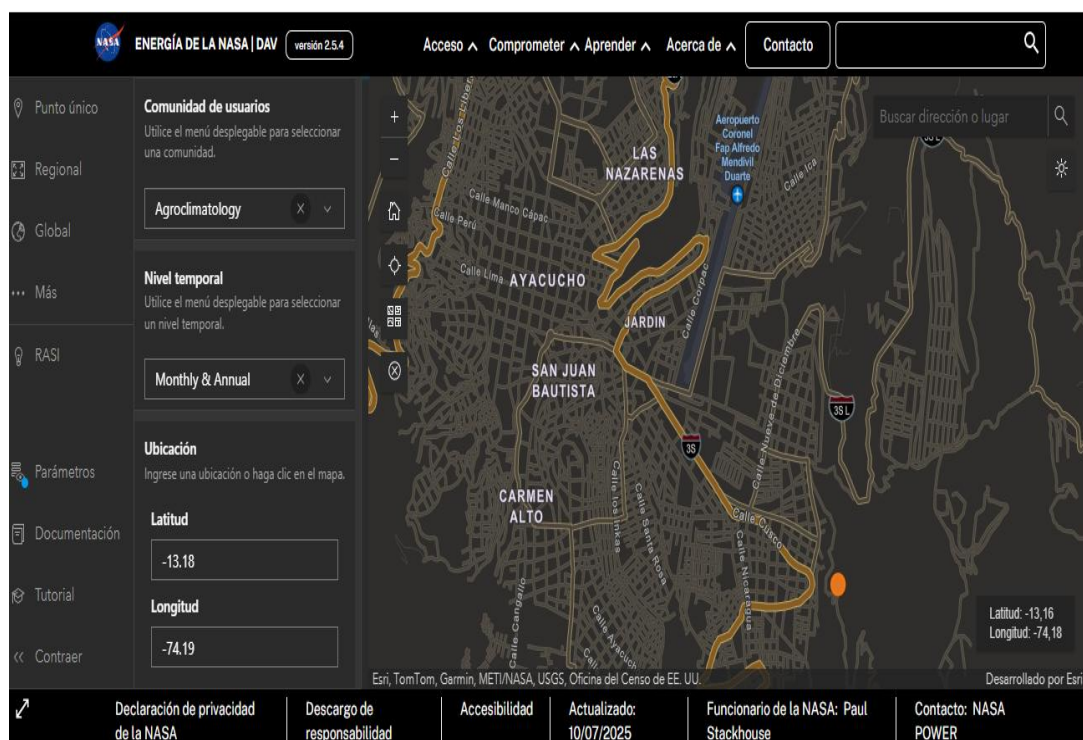
El estudio climático permitió caracterizar las condiciones ambientales del área de estudio y obtener los parámetros necesarios para el diseño del sistema de bombeo fotovoltaico y la estimación de la demanda hídrica del vivero.

A.1 Obtención de datos climáticos

Los datos meteorológicos se obtuvieron de la plataforma NASA POWER (2025), con un registro histórico de diez años, considerando temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, precipitación y radiación solar en promedios mensuales para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o). Como se muestra en la Figura 22, el área de estudio fue georreferenciada directamente en la plataforma para extraer los datos correspondientes.

Figura 22

Extracción de datos climáticos de NASA POWER



Nota: Plataforma NASA POWER utilizada para la obtención de datos climáticos. Adaptado de NASA POWER (2025).

A.2 Cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET₀)

La ET₀ se estimará mediante el programa Cropwat aplicando el método de Penman-Monteith, recomendado por la FAO (2006) lo cual permite obtener valores confiables para el área de estudio. El cálculo de la ET₀ tiene como finalidad principal determinar la demanda hídrica de los cultivos del vivero, los valores de ET₀ por cada mes junto al coeficiente de cultivo (K_c) de cada especie del vivero, permitirá determinar el requerimiento real de agua.

B Caracterización topográfica

La caracterización topográfica tuvo como finalidad determinar las condiciones del terreno del vivero para definir el trazo del sistema de bombeo, calcular la altura manométrica total (HMT) y establecer la ubicación óptima de los componentes del sistema.

B.1 Área y distribución de parcelas

Se realizó el reconocimiento del terreno identificando los puntos clave para la ubicación del sistema de captación, impulsión y almacenamiento. La estación total se instaló en puntos estratégicos que garantizaran visibilidad entre estaciones, tal como se muestra en la Figura 23.

Figura 23

Levantamiento de parcelas de cultivo



Las coordenadas UTM se obtuvieron mediante GPS y estación total Leica TS06, usando puntos de referencia, permitiendo georreferenciar el levantamiento e integrar los datos al plano para la elaboración de los planos finales. Todo el proceso fue documentado fotográficamente en campo, registrando la ubicación de equipos, puntos de interés y condiciones del terreno como se aprecia en las Figuras 24. Los puntos de control con sus coordenadas, alturas y observaciones, así como el croquis de referencia del área trabajada, se presentan en el Anexo 2.

Figura 24

Levantamiento del perfil longitudinal del pozo al tanque



B.2 Elaboración del perfil topográfico para impulsión

El perfil topográfico se elaboró para determinar la variación de elevaciones a lo largo del tramo de conducción, identificando la diferencia de altura entre el punto de captación y el tanque de almacenamiento, así como las pendientes del terreno necesarias para el diseño del sistema de impulsión. Los datos obtenidos fueron procesados en AutoCAD Civil 3D para la generación del perfil, cuyos planos se presentan en el Anexo 2.

C Caracterización agrológica

Éste estudio permitirá identificar y clasificar las especies vegetales cultivadas en el vivero municipal con el fin de determinar sus requerimientos hídricos y condiciones de manejo agronómico para el diseño del sistema de riego.

C.1 Clasificación de cultivos y delimitación de parcelas de cultivo

Se agruparon en las categorías de frutales, ornamentales y forestales como se aprecia en la Figura 25, esto nos permitirá distribuir el área de cultivo para cada grupo de especie así mismo se selecciona el cultivo a evaluar mostrado en la Tabla 4.

Figura 25

Agrupación y clasificación de cultivos



C.2 Determinación del coeficiente de cultivo (K_c)

Las bolsas de palta, geranio y pino fueron saturadas hasta su máxima capacidad de retención hídrica, registrando el peso inicial de cada muestra. Las plantas se ubicaron en el vivero bajo techo de malla con ventilación natural y sin exposición directa a precipitación. La diferencia de peso entre mediciones representó la pérdida de agua por evapotranspiración del cultivo (ET_c), permitiendo estimar el K_c mediante la Ecuación 8 del marco teórico. Este procedimiento sigue los lineamientos metodológicos de FAO (2006) para la determinación del coeficiente de cultivo en condiciones de campo. En las Figuras 26 y 27 se muestra el proceso de saturación y pesaje de las muestras respectivamente.

Figura 26
Saturación de los cultivos seleccionados



Figura 27
Pesaje de los cultivos para posterior evaluación



C.3 Determinación de evapotranspiración del cultivo (ET_c)

Para conocer el consumo hídrico de los cultivos del vivero municipal, se tomaron en cuenta sus características agronómicas y la evapotranspiración de referencia de la zona previamente calculada. La ET_c se obtuvo multiplicando la ET_o por el coeficiente del cultivo (K_c) de cada especie vegetal, conforme a lo planteado en la Ecuación 7 del marco teórico FAO (2006).

C.4 Cédula de cultivo

La cédula de cultivo se elaboró clasificando las especies y midiendo las áreas en campo, con las tres especies predominantes del vivero en etapa de germinación. Con esto se organizó la demanda hídrica por cultivo y se definieron los requerimientos de agua del sistema de riego.

Ecuación 13

Fórmula del coeficiente de cultivo ponderado

$$Kc_{pond} = \frac{\sum(Kc_1 \times A_1)}{A_{total}} \quad (13)$$

Donde:

Kc_{pond} : Coeficiente de cultivo ponderado

Kc_1 : Coeficiente de cultivo de cada especie

A_1 : Área de cada especie (m²)

A_{total} : Área total (m²)

Nota: Extraído de FAO (2006) y Pérez (2019)

C.5 Cálculo de la demanda hídrica

Al tratarse de un vivero con cobertura superior, no se consideró el aporte de la precipitación en el cálculo de la demanda hídrica. Se adoptó una eficiencia de aplicación del 85 % como criterio de diseño, tomando como referencia los valores indicativos de la FAO (2006) donde detalla que para riego por aspersión 75 % y para riego por goteo 90 %.

Ecuación 14

Demanda bruta de riego

$$Db = \frac{Dn}{Ea} \quad (14)$$

Donde:

Db : Demanda bruta de agua

Dn : Demanda neta del cultivo

Ea : Eficiencia de aplicación del sistema de riego

Nota: Extraído de FAO (2006)

D Caracterización hidrológica

D.1 Reconocimiento de la fuente de captación

La fuente de captación corresponde a un puquial ubicado en el área de estudio, cuyo caudal es conducido mediante una tubería de 4" hacia un pozo de almacenamiento. Se verificó la continuidad del flujo y las condiciones físicas de la fuente mediante visita de campo cuyos registros se presentan en el Anexo 4. Adicionalmente, se tomó una muestra de agua y se remitió a Multiservicios Agrolab para verificar su aptitud para el riego de los cultivos del vivero (2026).

D.2 Oferta hídrica del puquial

El caudal disponible se determinó mediante aforo volumétrico en campo durante el periodo junio 2025 a febrero 2026. Para completar la serie anual, los meses sin medición directa fueron estimados aplicando el promedio del periodo aforado, sustentado mediante regresión lineal. Los registros de aforo se presentan en el Anexo 4.

D.3 Balance hídrico

El balance hídrico se realizó contrastando la oferta hídrica del puquial, obtenida de los registros de aforo del informe técnico de campo, con la demanda hídrica del vivero municipal determinada a partir de la evapotranspiración del cultivo (Etc.) y la eficiencia de aplicación del sistema de riego tecnificado, siguiendo los lineamientos de FAO (2006). Este análisis permitió verificar si el caudal disponible cubre los requerimientos hídricos de los cultivos y confirmar la viabilidad del sistema de bombeo fotovoltaico.

D.4 Análisis de sostenibilidad hídrica del puquial

Se evaluó la sostenibilidad hídrica del puquial para un horizonte de 20 años mediante la estimación de la recarga subterránea de la zona de aporte y su comparación con el volumen extraído anualmente por el sistema de bombeo.

Delimitación del área de recarga

Se delimitó el área de recarga mediante análisis de imágenes satelitales históricas del periodo 2005 al 2025 en Google Earth, verificando la estabilidad de la cobertura vegetal durante los últimos 20 años. El área se obtuvo directamente de la herramienta de medición de Google Earth.

Precipitación confiable

Se obtuvieron datos de precipitación mensual del periodo 2005 al 2025 de NASA POWER (2025). La precipitación confiable se determinó al 75% de probabilidad de excedencia, adoptando el escenario más desfavorable.

Estimación de la recarga y balance de sostenibilidad

El coeficiente de escorrentía se seleccionó en función del tipo de vegetación, pendiente y textura del suelo de la zona de recarga, conforme a la Tabla 4 presentada por Villón Béjar (2002). La recarga subterránea anual se estimó aplicando la Ecuación 15, el balance de sostenibilidad se obtuvo comparando la recarga estimada con la extracción anual del puquial para un horizonte de 20 años. El registro detallado del procedimiento se presenta en el Anexo 4.

Ecuación 15

Recarga subterránea estimada

$$R = A \times P_{75\%} \times C \quad (15)$$

Donde:

R : Recarga subterránea anual ($\text{m}^3/\text{año}$)

A : Área de recarga delimitada (m^2)

$P_{75\%}$: Precipitación confiable al 75% de probabilidad ($\text{m}/\text{año}$)

C : Coeficiente de escorrentía (adimensional)

Nota: Extraído de Villón Béjar (2002)

Tabla 4*Coefficientes de escorrentía por tipo de suelo y vegetación*

Tipo de vegetación	Pendiente (%)	Franco arenosa	Franco arcillo limoso Franco limosa	Arcillosa
Forestal	0 – 5	0.10	0.30	0.40
	5 – 10	0.25	0.35	0.50
	10 – 30	0.30	0.50	0.60
Praderas	0 – 5	0.10	0.30	0.40
	5 – 10	0.15	0.35	0.55
	10 – 30	0.20	0.40	0.60
Terrenos cultivados	0 – 5	0.30	0.50	0.60
	5 – 10	0.40	0.60	0.70
	10 – 30	0.50	0.70	0.80

Nota. Adaptado de Manual de Conservación del Suelo y del Agua (Colegio de Postgraduados, 1977, como se citó en Villón Béjar, 2002).

2.4.2 Diseño del sistema de bombeo solar fotovoltaico

A Diseño hidráulico del sistema de bombeo

A.1 Determinar el caudal requerido

El caudal de diseño se determinó a partir de la demanda hídrica máxima diaria y las HSP mínimas disponibles, adoptando el mes de mayor demanda y el valor mínimo de HSP como escenario desfavorable, criterio recomendado por Perpiñán (2012), aplicando la Ecuación 16.

Ecuación 16

Formula de caudal de diseño

$$Q = \frac{DHD}{HSP} \quad (16)$$

Donde:

Q: Caudal requerido (m³/h)

DHD: Demanda hídrica diaria requerido por los cultivos (m³/día)

HSP: Horas Sol Pico disponibles por día (h/día)

Nota: Extraído de Lara (2007)

A.2 *Altura manométrica total (HMT)*

La HMT refleja el esfuerzo real de la bomba para elevar el agua desde el puquial hasta el tanque. Se determinó considerando la altura geométrica mediante la Ecuación 2, las pérdidas por fricción mediante la Ecuación 3 y las pérdidas por accesorios mediante la Ecuación 4, integrándose en la Ecuación 5.

Determinación de la altura geométrica de elevación (Hg)

La altura geométrica se obtuvo a partir del levantamiento topográfico realizado en campo con la estación total Leica TS06 determinándose la diferencia de nivel entre la cota del puquial y la cota del tanque de almacenamiento aplicando la Ecuación 2 presentada en el marco teórico.

Cálculo de pérdidas por fricción (Hf)

Para determinar las pérdidas de carga por fricción en la tubería de impulsión se siguió el procedimiento detallado a continuación:

a. Selección de diámetro de tubería

El diámetro de la tubería se seleccionó bajo el criterio de velocidad del flujo estableciendo un rango recomendado entre 0.6 y 2.5 m/s según Mott (2015) expresado en la Ecuación 17.

Ecuación 17

Condición de velocidad de flujo en tuberías

$$0.6 \leq v \leq 2.5 \text{ m/s} \quad (17)$$

Donde:

v: Velocidad del flujo (m/s)

b. velocidad del fluido

Con el diámetro comercial seleccionado y el caudal de diseño obtenido previamente se estimó la velocidad del flujo mediante la ecuación de continuidad para sección circular propuesta por Mott (2015) en la Ecuación 18.

Ecuación 18

Ecuación de continuidad

$$V = \frac{4Q}{\pi \times D^2} \quad (18)$$

Donde:

Q: Caudal requerido (m³/s)

Pi: Constante

D: Diámetro interno de la tubería (m)

Nota: Extraído de Mott (2015)

c. Número de Reynolds (Re)

Permite identificar el régimen de flujo en la tubería según Mott (2015) mediante la Ecuación 19 y su clasificación se determinó conforme a la Tabla 5.

Ecuación 19

Fórmula de Reynolds

$$Re = \frac{V \times D}{\nu} \quad (19)$$

Donde:

Re: Número de Reynolds (adimensional)

V: Velocidad del flujo (m/s)

D: Diámetro interno de la tubería (m)

ν : Viscosidad cinemática del agua (1x10⁻⁶ m²/s a 20°C)

Nota: Extraído de Mott (2015)

Tabla 5

Clasificación del régimen del fluido

Condición	Régimen
Re < 2,000	Laminar
2,000 ≤ Re ≤ 4,000	Transición
Re > 4,000	Turbulento

Nota. Adaptado de Mott, R. L. (2015). *Mecánica de fluidos* (7.^a ed.).

d. Factor de Fricción (f)

Con el régimen de flujo identificado se determinó el factor de fricción mediante la ecuación de Swamee-Jain citada por Mott (2015) en la Ecuación 20.

Ecuación 20

Fórmula del factor de fricción

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3.7 D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (20)$$

Donde:

- f: Factor de fricción (adimensional)
- ε : Rugosidad absoluta de la tubería (mm)
- D: Diámetro interno de la tubería (m)
- Re: Número de Reynolds (adimensional)

Nota: Extraído de Mott (2015)

e. Pérdidas por Fricción (Hf)

Con el factor de fricción determinado en el paso anterior las pérdidas de carga por fricción en la tubería de impulsión se calcularon aplicando la ecuación de Darcy-Weisbach presentada en el marco teórico mediante la Ecuación 3.

Cálculo de pérdidas localizadas (Ha)

Para determinar las pérdidas de carga generadas por los accesorios hidráulicos del sistema como codos tee válvulas y uniones se identificaron los coeficientes de pérdida correspondientes a cada elemento instalado en la tubería de impulsión. Dichos valores fueron sumados y expresados en metros de columna de agua (m.c.a) aplicando la Ecuación 4 descrita en el marco teórico.:

Cálculo de la altura manométrica total (HMT)

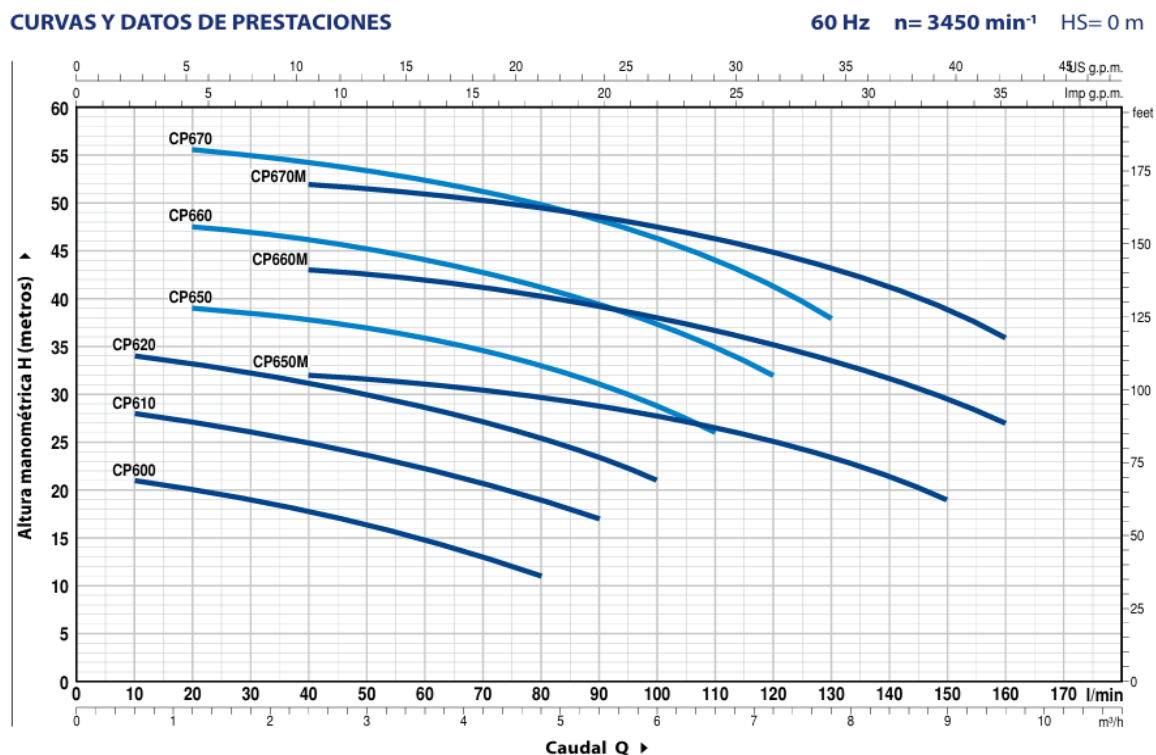
Con los componentes del sistema hidráulico determinados, se calculó la HMT integrando la altura geométrica, las pérdidas por fricción y por accesorios mediante la Ecuación 5, constituyendo el parámetro definitivo para la selección de la bomba.

A.3 Selección de la bomba

La selección de la electrobomba se realizó tomando como base los parámetros hidráulicos previamente calculados: el caudal de diseño y la altura manométrica total (HMT). Con estos valores se ingresó a la curva característica H-Q del fabricante localizando el punto donde el sistema opera y eligiendo la bomba que mejor se ajuste a ese punto como se muestra en la Figura 28.

Sin embargo, al no disponer de la curva característica H-Q oficial de la electrobomba MEDAS modelo OB60 la curva H-Q adaptada se utilizó únicamente como referencia gráfica del comportamiento hidráulico, mientras que la selección de la electrobomba se sustentó verificando el cumplimiento de dos criterios mínimos a partir de los datos de la ficha técnica del equipo.

Figura 28
Selección de capacidad de la bomba mediante curva H- Q



Nota. Adaptado de Pedrollo (2024).

Criterio 1: Caudal

Se verificó que la bomba sea capaz de impulsar el caudal requerido por el sistema de bombeo mediante la Ecuación 21.

Ecuación 21*Condición del caudal de bombeo*

$$Q_{bomba} \geq Q_{diseño} \quad (21)$$

Donde:

Q_{bomba} : Caudal nominal de la bomba según ficha técnica (m³/h)

$Q_{diseño}$: Caudal mínimo de diseño calculado (m³/h)

Criterio 2: Altura manométrica

Se verificó que la altura máxima de la bomba supere la HMT del sistema con la Ecuación 22.

Ecuación 22*Condición de la altura de bombeo máxima*

$$H_{max} \geq HMT \quad (22)$$

Donde:

H_{max} : Altura manométrica máxima de la bomba según ficha técnica (m)

HMT: Altura manométrica total del sistema calculada (m)

El cumplimiento de ambos criterios garantiza que la electrobomba puede abastecer el caudal requerido venciendo la carga hidráulica total del sistema. Adicionalmente se verificó el margen de seguridad entre la altura máxima de la bomba y la HMT calculada mediante la Ecuación 23.

Ecuación 23*Margen de seguridad de la bomba*

$$MS = \frac{H_{max} - HMT}{HMT} \times 100 \quad (23)$$

Donde:

Ms: Margen de seguridad (%)

H_{max} : Altura manométrica máxima de la bomba según ficha técnica (m)

HMT: Altura manométrica total del sistema calculada (m)

Nota: Elaboración propia, basada en Lara (2007)

A.4 Determinación en campo del Punto de Operación del Sistema de Bombeo

Con la finalidad de conocer el comportamiento real de la bomba instalada se realizaron dos pruebas de aforo volumétrico bajo condiciones distintas de carga hidráulica registrando el tiempo necesario para llenar un recipiente de volumen conocido. El caudal de cada prueba se determinó aplicando la Ecuación 6 descrita en el marco teórico.

Prueba 1: Aforo en descarga de la bomba

Se aforó el caudal con el sistema operando únicamente con los accesorios instalados y la altura de succión sin incluir la manguera de impulsión ni la altura geométrica hacia el tanque de almacenamiento como se ilustra en la Figura 29. Esta condición representa la carga hidráulica mínima del sistema permitiendo obtener el caudal máximo que puede entregar la bomba determinado mediante la Ecuación 6 descrita en el marco teórico según Flores (2019).

Figura 29

Prueba de aforo en el punto de descarga de la bomba



Prueba 2: Aforo en llegada al tanque

Con el sistema operando en condiciones reales completas se realizó el aforo volumétrico en el punto de llegada al tanque de almacenamiento tal como se ilustra en la Figura 30. El caudal se determinó registrando el tiempo necesario para llenar un recipiente de volumen conocido aplicando la Ecuación 6 definida en el marco teórico según Flores (2019). A diferencia de la prueba 1 en esta

ocasión la electrobomba opera venciendo la carga hidráulica total equivalente a la HMT calculada previamente incorporando todas las resistencias hidráulicas presentes en la instalación por lo que el caudal obtenido representa el valor más real y representativo del desempeño del sistema bajo condiciones normales de operación.

Con los caudales obtenidos en ambas pruebas se construyó la curva H-Q del sistema graficando los puntos experimentales medidos en campo ya que al no contar con la curva característica oficial del fabricante para las condiciones específicas de instalación esta curva representa la única referencia real del comportamiento hidráulico del sistema. La intersección de esta curva con la curva de la bomba define el punto de operación real del conjunto bomba-tubería es decir las condiciones exactas de caudal y altura bajo las cuales opera el sistema en campo determinado.

Figura 30

Prueba de aforo en el punto de llegada al tanque de almacenamiento



A.5 Tiempo de llenado del tanque de almacenamiento

Con el caudal real medido en campo se determinó el tiempo necesario para llenar el tanque de almacenamiento con la finalidad de verificar que el sistema pueda completar el llenado dentro de las horas solares pico (HSP) disponibles en la zona garantizando así la autonomía diaria del sistema de bombeo solar. El tiempo de llenado se calculó mediante la Ecuación 24

Ecuación 24

Tiempo de llenado del tanque

$$t_{llenado} = \frac{V_{tanque}}{Q_{real}} \quad (24)$$

Donde:

$t_{llenado}$: Tiempo de llenado del tanque de almacenamiento (h)

V_{tanque} : Volumen del tanque de almacenamiento (m³)

Q_{real} : Caudal real medido en campo (m³/h)

Nota: Elaboración propia, basada en Mott (2015)

Para que el sistema opere correctamente dentro de la disponibilidad energética solar se verificó el cumplimiento de la siguiente condición mediante la Ecuación 25.

Ecuación 25

Condición de llenado en horas solares pico

$$HSP \geq t_{llenado} \quad (25)$$

Donde:

HSP: Horas solares pico mínimas disponibles (h/día)

$t_{llenado}$: Tiempo de llenado del tanque de almacenamiento (h)

Nota: Extraído de Arangurí Cayetano (2026)

B Diseño del sistema fotovoltaico

B.1 Determinación de la potencia eléctrica de la bomba

Se determinó mediante la Ecuación 26, convirtiendo la potencia nominal de HP a watts.

Ecuación 26

Potencia eléctrica de la bomba

$$Pe = P_{HP} \times 746 \quad (26)$$

Donde:

Pe: Potencia eléctrica de la bomba (W)

P_{HP} : Potencia nominal de la bomba (HP)

Nota: Extraído de Arangurí Cayetano (2026)

B.2 Determinación de la energía diaria requerida

La energía eléctrica diaria requerida se determinó aplicando la Ecuación 27, multiplicando la potencia eléctrica de la electrobomba por el tiempo de operación diaria necesario para cubrir la demanda hídrica del vivero.

Ecuación 27

Energía eléctrica diaria requerida

$$E_{elec} = P_e \times t \quad (27)$$

Donde:

E_{elec} : Energía eléctrica diaria requerida (kWh/día)

P_e : Potencia eléctrica de la bomba (W)

t : Tiempo de operación diaria (h/día)

Nota: Extraído de Arangurí Cayetano (2026)

B.3 Determinación de la energía útil del sistema fotovoltaico

Se adoptaron las HSP mínimas del mes crítico de febrero como escenario de diseño. El factor de rendimiento global y la eficiencia de conversión del panel fotovoltaico, presentados en la Tabla 6, se determinaron mediante la Ecuación 28 y se emplearon en la Ecuación 29 para calcular la energía útil del sistema.

Tabla 6

Perdidas consideradas del rendimiento del sistema fotovoltaico

Pérdida	Causa	Valor típico
Temperatura	Paneles se calientan y pierden eficiencia	0.93-0.95
Suciedad y polvo	Reduce la radiación que llega al panel	0.95-0.97
Sombreado parcial	Obstáculos que bloquean la radiación	0.97-0.99
Cableado DC	Resistencia en conductores	0.97-0.98
Inversor-cargador	Conversión DC/AC	0.85-0.92
Baterías de arranque	Almacenamiento y descarga	0.80-0.85

Nota. Adaptado de Lorenzo (1994), Perpiñán (2012) y Arangurí (2026)

Eficiencia del panel fotovoltaico

La eficiencia de conversión del panel fotovoltaico representa la fracción de energía solar incidente que el panel convierte en energía eléctrica, determinada mediante la Ecuación 28.

Ecuación 28

Eficiencia de conversión del panel fotovoltaico

$$n_{panel} = \frac{P_{nominal}}{A_{panel} \times STC} \times 100 \quad (28)$$

Donde:

n_{panel} : Eficiencia de conversión del panel (%)

$P_{nominal}$: Potencia nominal del panel (W)

A_{panel} : Área del panel (m²)

STC: Condiciones Estándar de Prueba 1000 W/m²

Nota: Extraído de Arangurí Cayetano (2026)

Ecuación 29

Energía útil del sistema

$$E_{\text{útil}} = HSP \times n_{\text{sistema}} \times n_{\text{panel}} \quad (29)$$

Donde:

$E_{\text{útil}}$: Energía útil (kWh/kWp·día)

HSP: Horas solares pico mínimas del mes crítico (h/día)

n_{sistema} : Factor de rendimiento del sistema FV que considera pérdidas por suciedad, temperatura y sombreado

Nota: Extraído de Zegarra (2021)

B.4 Dimensionamiento del campo fotovoltaico

Con la energía diaria requerida y la energía útil generada por el sistema fotovoltaico se procederá al dimensionamiento del campo fotovoltaico mediante el siguiente procedimiento:

Cálculo de la potencia fotovoltaica requerida

La potencia del campo fotovoltaico necesaria para abastecer el sistema de bombeo se determinó aplicando la Ecuación 30.

Ecuación 30

Potencia fotovoltaica requerida

$$P_{FV} = \frac{E_{elec}}{E_{\acute{u}til}} \quad (30)$$

Donde:

P_{FV} : Potencia del campo fotovoltaico requerida (kwp)

E_{elec} : Energía que necesita el sistema de bombeo por día (kWh/día)

$E_{\acute{u}til}$: Energía útil por cada panel instalado (kWh/kWp·día)

Nota: Extraído de Arangurí Cayetano (2026)

Cálculo del número de paneles (N)

Con la potencia fotovoltaica requerida se determinó el número de paneles mediante la Ecuación 31, redondeando el resultado al entero superior para garantizar que la potencia instalada sea igual o mayor a la requerida con la Ecuación 32.

Ecuación 31

Número de paneles

$$N = \frac{P_{FV}}{P_{panel}} \quad (31)$$

Donde:

N: Número de paneles solares requeridos

P_{FV} : Potencia del campo fotovoltaico requerida (kwp)

P_{panel} : Potencia nominal del panel a usar (kw)

Nota: Extraído de Arangurí Cayetano (2026)

Ecuación 32

Potencia total instalada

$$P_{FV(instalada)} = N \times P_{panel} \quad (32)$$

Donde:

$P_{FV(instalada)}$: Potencia del campo fotovoltaico instalada

N: Número de paneles solares requeridos

P_{panel} : Potencia nominal del panel a usar (kw)

Nota: Extraído de Arangurí Cayetano (2026)

B.5 Dimensionamiento del sistema de almacenamiento y conversión

Chenlo Romero (2014) y Sandia National Laboratories (1998) indican que estos componentes deben dimensionarse en función de la energía diaria requerida, la autonomía del sistema y la potencia de la electrobomba, garantizando el suministro continuo durante las horas de menor radiación solar.

Banco de baterías

Su capacidad se determinó mediante la Ecuación 33, considerando la energía diaria requerida, los días de autonomía y la profundidad de descarga admisible con valores de 0.50 para baterías de arranque automotriz y 0.80 para baterías de gel conforme a Arangurí (2026) y Chenlo Romero (2014).

Ecuación 33

Capacidad de las baterías requeridas

$$C_{bat} = \frac{E_{Diaria} \times D_{autonomia}}{V_{sistema} \times DOD} \quad (33)$$

Donde:

C_{bat} : Capacidad del banco de baterías (Ah)

E_{Diaria} : Energía eléctrica diaria requerida (Wh/día)

$D_{autonomia}$: Días de autonomía (días)

$V_{sistema}$: Tensión del sistema (V)

DOD : Profundidad de descarga

Nota: Extraído de Chenlo Romero (2014)

Inversor-cargador

La potencia de este componente se seleccionó aplicando la Ecuación 34, garantizando que su capacidad supere la potencia eléctrica de la electrobomba incluyendo un factor de seguridad.

Ecuación 34

Potencia del inversor

$$P_{inversor} \geq P_e \times F_{seg} \quad (34)$$

Donde:

$P_{inversor}$: Potencia del inversor (W)

P_e : Potencia eléctrica de la bomba (W)

F_{seg} : Factor de seguridad

Nota: Extraído de Chenlo Romero (2014)

2.4.3 Evaluación del desempeño del sistema de bombeo fotovoltaico

A Evaluación energética

La evaluación energética comprendió la identificación de las fuentes energéticas y el análisis comparativo del consumo y desempeño de dos sistemas de bombeo operando bajo condiciones hidráulicas equivalentes con la misma electrobomba centrífuga MEDAS OB60 de 0.5 HP garantizando una comparación objetiva.

A.1 Identificación de los sistemas y fuentes energéticas

Se evaluaron dos sistemas de bombeo bajo condiciones hidráulicas idénticas:

Sistema 1: Bombeo solar fotovoltaico (SFV)

Alimentado por paneles solares conectados a un inversor solar marca MUST que convierte la corriente continua generada por los paneles a corriente alterna para alimentar la electrobomba siendo la radiación solar la fuente energética principal.

Sistema 2: Bombeo con corriente alterna (CA)

Alimentado directamente desde la red eléctrica convencional del vivero municipal operando bajo las mismas condiciones hidráulicas que el Sistema 1.

Para la medición y registro de datos en campo se utilizaron los siguientes instrumentos: un multímetro digital Fluke 87V para la medición de voltaje, una pinza amperimétrica para el registro de corriente, una cinta métrica para la medición de niveles de agua, un cronómetro para el control del tiempo de operación, y una cámara fotográfica para el respaldo visual de cada medición. En cada prueba se registró el valor del instrumento junto con la hora visible del dispositivo móvil como evidencia del trabajo de campo.

A.2 Medición y determinación de los parámetros eléctricos

Para la evaluación eléctrica del sistema de bombeo fotovoltaico se ejecutaron dos pruebas de campo utilizando un multímetro digital Fluke 87V y una pinza amperimétrica. Las mediciones se realizaron directamente en el vivero de la municipalidad de huamanga.

Prueba 1: Arranque de la bomba y caída de tensión CA vs SFV

Se evaluó el comportamiento eléctrico de la electrobomba durante el arranque y operación, registrando voltaje, corriente con el multímetro Fluke 87V y pinza amperimétrica en los intervalos de 0 s, 30 s, 5 min y 10 min para ambos sistemas. La caída de tensión se determinó mediante la Ecuación 35 y se verificó el cumplimiento del límite de 3% establecido por el CNE (2006).

Sistema CA con cable de 100 m de extensión

Con el multímetro en modo voltaje AC, se registró la tensión en el punto de entrada del cable extensión y en los bornes de la electrobomba en cuatro momentos: reposo, arranque (0 s), 30 s, 5 min y 10 min de operación. La corriente fue registrada simultáneamente con la pinza amperimétrica en cada intervalo. La caída de tensión se determinó aplicando la Ecuación 35 y se verificó el cumplimiento del límite normativo del CNE (2006).

Sistema SFV con cable 1 m del inversor a las baterías

Con la bomba conectada al inversor MUST del sistema fotovoltaico, se repitió el mismo procedimiento registrando voltaje AC en bornes del inversor y en bornes de la bomba. La caída de tensión se calculó mediante la Ecuación 35.

Ecuación 35

Formula de la caída de tensión

$$\Delta V = V_{entrada} - V_{bornes} \quad (35)$$

Donde:

ΔV : Caída de tensión (V)

$V_{entrada}$: Voltaje medido al inicio del cable (V)

V_{bornes} : Voltaje medido en los bornes de la bomba (V)

Nota: Extraído de Perpiñán Lamigueiro (2012)

Prueba 2: Variación horaria de la potencia del panel solar

Se registró la potencia generada por los paneles fotovoltaicos cada hora a partir de las 09:00 y las 14:00 horas, con el multímetro en modo voltaje DC en los bornes del panel y la pinza amperimétrica en el cable hacia el controlador. La potencia se determinó con la Ecuación 36, en cada intervalo se anotaron las condiciones climáticas observadas para contextualizar las variaciones de potencia registradas a lo largo de la jornada.

Ecuación 36

Potencia instantánea del panel

$$P = V \times I \quad (36)$$

Donde:

P : Potencia eléctrica (W)

V_{panel} : Voltaje medido (V)

I_{panel} : Corriente medida (A)

Nota: Extraído de Arangurí Cayetano (2026)

A.3 Cálculo de indicadores energéticos

Con la finalidad de comparar el desempeño energético de ambos sistemas se determinaron cuatro indicadores que permiten evaluar el comportamiento de cada uno.

Energía consumida

La energía consumida diaria por el sistema de bombeo se calculó mediante la Ecuación 37 relacionando la potencia eléctrica real con el tiempo de funcionamiento diario.

Ecuación 37

Fórmula de la energía consumida

$$E = P_e \times t \quad (37)$$

Donde:

E: Energía consumida (kWh)

P_e : Potencia eléctrica real (kW)

t: Tiempo de funcionamiento diario (h)

Nota: Extraído de Arangurí Cayetano (2026)

Energía específica por volumen bombeado

La energía específica permite conocer el consumo energético por unidad de volumen bombeado siendo un indicador clave para comparar la eficiencia entre ambos sistemas calculada mediante la Ecuación 38.

Ecuación 38

Fórmula de la energía específica

$$E_e = \frac{E}{V_b} \quad (38)$$

Donde:

E_e : Energía específica (kWh/m³)

E: Energía consumida (kWh)

V_b : Volumen de agua bombeado (m³)

Nota: Extraído de Arangurí Cayetano (2026)

Rendimiento energético del sistema

El rendimiento energético expresa la relación entre la energía convertida en trabajo hidráulico útil y la energía eléctrica consumida por el sistema permitiendo comparar la eficiencia real de ambas fuentes energéticas mediante la Ecuación 39.

Ecuación 39

Fórmula del rendimiento energético

$$n = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{consumida}}} \times 100 \quad (39)$$

Dónde:

H: Rendimiento energético (%)

$E_{\text{útil}}$: Energía hidráulica útil (kWh)

$E_{\text{consumida}}$: Energía eléctrica consumida (kWh)

Nota: Extraído de Arangurí Cayetano (2026)

La energía hidráulica útil se calculó en función del volumen bombeado la altura manométrica total y las propiedades físicas del agua mediante la Ecuación 40.

Ecuación 40

Energía hidráulica

$$E_h = \frac{\rho \times g \times V \times HMT}{3\,600\,000} \quad (40)$$

Dónde:

E_h : Energía hidráulica útil (kWh)

ρ : Densidad del agua (1,000 kg/m³)

V : Volumen bombeado (m³)

HMT : Altura manométrica total (m)

Nota: Extraído de Arangurí Cayetano (2026)

Emisiones de CO₂

Las emisiones de CO₂ se determinaron según el consumo energético de cada sistema mediante la Ecuación 41. Para el sistema CA se aplicó el factor de emisión del SEIN (MINEM, 2023), mientras que para el sistema FV se asumieron emisiones nulas al operar con energía solar.

Ecuación 41

Emisiones de dióxido de carbono

$$CO_2 = E \times FE \quad (41)$$

Donde:

CO₂: Emisiones de dióxido de carbono (kg CO₂/día)

E: Energía consumida (kWh/día)

FE: Factor de emisión de la red eléctrica 0.4727 kg CO₂/kWh (MINEM, 2023)

Nota: Extraído de CNE (2006) y MINEM (2023)

A.4 Análisis comparativo

Los indicadores energéticos de ambos sistemas se organizaron en tablas comparativas tomando como referencia el sistema de corriente alterna. La diferencia porcentual de cada indicador se calculó mediante la Ecuación 42 permitiendo cuantificar el desempeño relativo del sistema fotovoltaico frente al sistema convencional.

Ecuación 42

Variación porcentual

$$\Delta = \frac{I_{CA} - I_{FV}}{I_{CA}} \times 100 \quad (42)$$

Donde:

Δ : Variación porcentual entre sistemas (%)

I_{CA} : Valor del indicador en sistema con corriente alterna

I_{FV} : Valor del indicador en sistema fotovoltaico

B Evaluación operativa

B.1 Medición del caudal de bombeo

Se determinó mediante aforo volumétrico en el punto de llegada al tanque de almacenamiento, realizando cinco mediciones del tiempo de llenado de un volumen conocido con cronómetro para cada sistema (CA y SFV), aplicando la Ecuación 6 del marco teórico en cada medición. El caudal promedio de las cinco mediciones de cada sistema se obtuvo mediante la Ecuación 43.

Ecuación 43

Caudal de bombeo promedio

$$Q_{promedio} = \frac{\sum Q}{n} \quad (43)$$

Donde:

$Q_{promedio}$: Caudal promedio (m³/s)

$\sum Q$: Sumatoria de caudales aforado (m³)

n: Número de mediciones

B.2 Medición de la presión de operación

Se midió con un manómetro en la línea de impulsión, tomando el valor estable de cada sistema una vez en funcionamiento normal. Con la Ecuación 44 se convirtió este valor a metros de columna de agua, para poder comparar ambos sistemas.

Ecuación 44

Altura equivalente de presión

$$H = \frac{P}{\rho \times g} \quad (44)$$

Donde:

H: Altura equivalente de presión (m)

P: Presión medida (Pa)

ρ : Densidad del agua (1000 kg/m³)

g: Gravedad (9.81 m/s²)

B.3 Tiempo de funcionamiento

Se registró el tiempo necesario para cubrir el volumen diario requerido, anotando la hora de inicio y finalización del bombeo para cada sistema. Para el sistema fotovoltaico el registro se realizó durante cinco días consecutivos en el mes crítico de menor radiación solar. Para el sistema CA el tiempo de funcionamiento se determinó a partir del caudal real y el volumen diario requerido, aplicando la Ecuación 45.

Ecuación 45

Tiempo de funcionamiento

$$t = \frac{V}{Q} \quad (45)$$

Donde:

t : Tiempo de bombeo requerido (h)

V : Volumen diario requerido (m^3)

Q : Caudal real del sistema (m^3/h)

B.4 Medición del abatimiento del nivel de agua en el pozo

Se midió la variación del nivel de agua en el pozo durante el bombeo para ambos sistemas, con el fin de verificar que el nivel dinámico no descendiera hasta la tubería de succión, ubicada a 0.20 m del fondo. Antes de encender la bomba, se registró el nivel estático midiendo con wincha métrica desde la boca del pozo hasta la superficie del agua. Una vez iniciado el bombeo, se tomaron lecturas del nivel dinámico en diferentes minutos de operación. El abatimiento se determinó como la diferencia entre el nivel dinámico y el nivel estático, conforme a la Ecuación 46.

Ecuación 46

Abatimiento del nivel de agua

$$S = N_d - N_e \quad (46)$$

Donde:

S: Abatimiento (m)

N_d : Nivel dinámico medido durante el bombeo (m)

N_e : Nivel estático medido durante el bombeo (m)

B.5 Análisis comparativo operativo

Los parámetros operativos obtenidos en campo se organizaron en tablas comparativas tomando como referencia el sistema de corriente alterna (CA). La variación porcentual de cada parámetro se calculó mediante la Ecuación 40, permitiendo establecer el desempeño operativo relativo del sistema fotovoltaico frente al sistema convencional.

C Evaluación económica

C.1 Presupuesto de inversión inicial

Para determinar la inversión inicial de cada sistema se identificaron todos los componentes incluyendo equipos materiales e instalación cuyos costos fueron recopilados mediante cotizaciones en el mercado local y nacional. El costo total de inversión se calculó mediante la Ecuación 47.

Ecuación 47

Fórmula de costo total de inversión

$$C_{inversión} = \sum_{i=1}^n (C_i \times N_i) \quad (47)$$

Donde:

$C_{inversión}$: Costo total de inversión (S/.)

C_i : Costo unitario del componente i (S/.)

N_i : Cantidad del componente i

n: Número total de componentes

Nota: Extraído de Sapag Chain y Sapag Chain (2014)

C.2 Costos de operación y mantenimiento anual

Los costos anuales de operación y mantenimiento se determinaron para cada sistema considerando los gastos recurrentes asociados a su funcionamiento durante la vida útil del proyecto.

Costo energético anual del sistema de CA:

Por su dependencia de la red eléctrica convencional el sistema CA genera un costo energético anual calculado a partir de la energía consumida diariamente y la tarifa vigente de Electrocentro para la zona del vivero municipal mediante la Ecuación 48.

Ecuación 48

Fórmula del costo energético anual

$$C_{energía} = E_{diaria} \times T_e \times 365 \quad (48)$$

Donde:

$C_{energía}$: Costo energético anual (soles /año)

E_{diaria} : Energía consumida diaria (kWh/día)

T_e : Tarifa eléctrica (soles /kWh)

Costo energético anual del sistema FV

Al operar con energía solar el sistema FV no incurre en costo energético durante su etapa de operación por lo que su costo energético anual es nulo.

Costo de mantenimiento anual:

Para ambos sistemas se estimó el costo anual de mantenimiento considerando actividades preventivas como limpieza, revisión de conexiones y reemplazo de componentes menores, conforme a los criterios establecidos por Sandia National Laboratories (1998) para sistemas de bombeo solar de pequeña escala.

C.3 Indicador de rentabilidad

Para evaluar la viabilidad económica del sistema fotovoltaico frente al sistema de corriente alterna se calcularon el Valor Actual Neto (VAN) la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Período de

Recuperación de la Inversión (Payback) indicadores ampliamente utilizados en la evaluación de proyectos de energía renovable según Sapag & Sapag (2008). Para ello se elaboró un flujo de caja proyectado a lo largo de la vida útil del sistema considerando la inversión inicial el ahorro anual por energía eléctrica y los costos de mantenimiento como egresos.

Valor Actual Neto (VAN)

El VAN se calculó aplicando la Ecuación 10 del marco teórico sobre el flujo de caja proyectado con una tasa de descuento establecida en función del costo de oportunidad del capital. Según Sapag & Sapag (2008) un VAN positivo indica que el proyecto genera valor por encima de la inversión requerida confirmando su viabilidad económica.

Tasa interna de retorno (TIR)

La TIR se determinó aplicando la Ecuación 11 del marco teórico utilizando los mismos flujos de caja del VAN obteniéndose la tasa que iguala a cero el valor actual neto del proyecto. De acuerdo con Baca Urbina (2013) una TIR superior a la tasa de descuento adoptada confirma la rentabilidad del proyecto siendo un criterio complementario al VAN para la toma de decisiones.

Período de Recuperación (Payback)

El Payback se calculó aplicando la Ecuación 12 del marco teórico determinando el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial a partir de los ahorros generados anualmente por el sistema fotovoltaico frente al sistema de corriente alterna.

C.4 Análisis comparativo económico

Con los indicadores de rentabilidad obtenidos se realizó el análisis económico comparativo entre ambos sistemas desde tres perspectivas: inversión inicial requerida costos de operación durante la vida útil y rentabilidad económica generada. El costo total acumulado de cada sistema durante su vida útil se determinó mediante la Ecuación 49.

Ecuación 49

Fórmula costo total acumulado

$$C_{total} = C_{inversión} + (C_{operación} \times n) \quad (49)$$

Donde:

C_{total} : Costo total acumulado durante la vida útil (S/.)

$C_{inversión}$: Inversión inicial (S/.)

$C_{operación}$: Costo de operación y mantenimiento anual (S/. /año)

n : Vida útil del proyecto (años)

Nota: Extraído de Sapag Chain y Sapag Chain (2014)

Los resultados serán organizados en tablas comparativas permitiendo identificar el sistema más conveniente económicamente para el vivero municipal de Huamanga, considerando tanto el corto como el largo plazo.

Capítulo III

Resultados y discusiones

3.1 Del objetivo 1: Caracterización del área de estudio y demanda hídrica

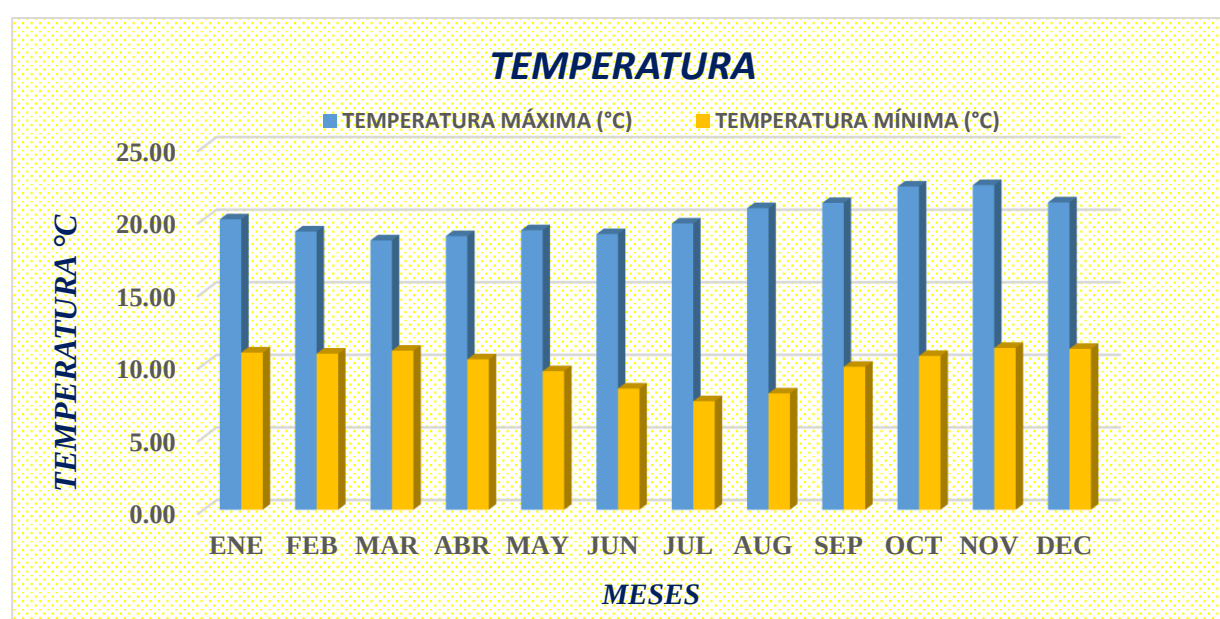
3.1.1 Caracterización climática

La caracterización climática se realizó con el análisis de datos históricos proporcionados por la plataforma NASA POWER, correspondiente al periodo 2010–2023 presentados en el anexo N°1

Temperatura

La Figura 31 muestra la variación mensual de la temperatura máxima y mínima en la zona de estudio según datos de NASA POWER (2025). La temperatura máxima varía entre 18.55 °C y 22.36 °C con su valor más alto en noviembre, mes donde el inicio de la temporada de lluvias favorece mayor nubosidad y regula el calor diurno. La temperatura mínima oscila entre 7.47 °C y 11.14 °C, con su valor más bajo en julio, periodo de estiaje donde la ausencia de nubosidad incrementa la pérdida de calor nocturno.

Figura 31
Variación mensual de temperatura máxima y mínima

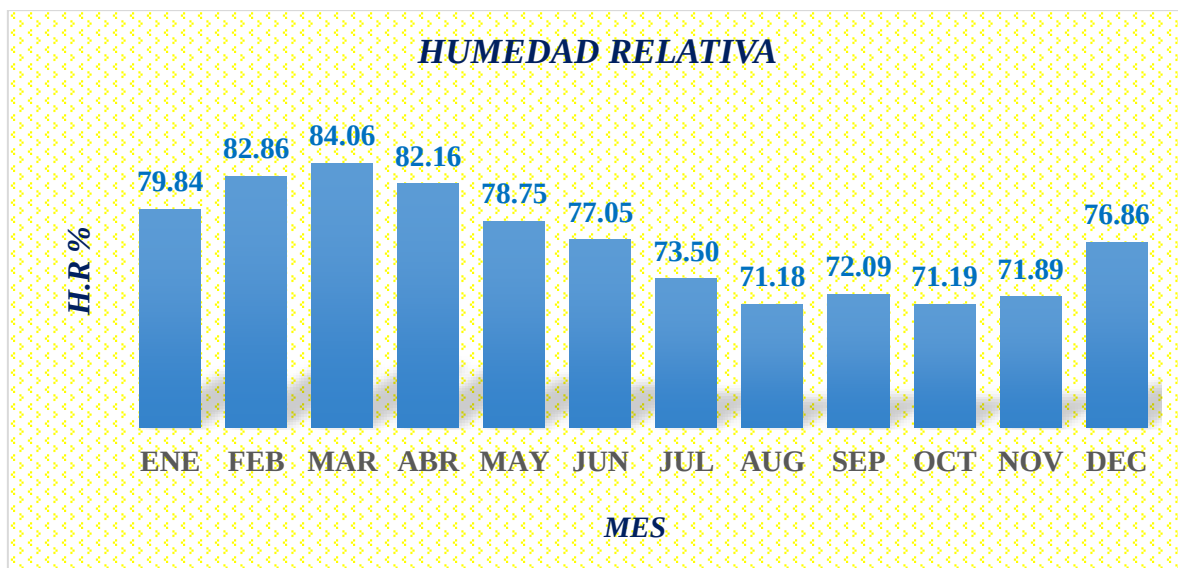


Nota. Datos obtenidos de la plataforma NASA POWER (2025), periodo 2010 – 2023. Elaboración propia.

Humedad relativa (H.R)

La Figura 32 presenta la variación mensual de la humedad relativa en la zona de estudio según datos de NASA POWER (2025). Los valores oscilan entre 71.18% y 84.06%, con su valor más alto en marzo, mes asociado al periodo de lluvias, y el más bajo en octubre, época de estiaje donde las precipitaciones disminuyen considerablemente. Este comportamiento influye directamente en la evapotranspiración del cultivo y en la demanda hídrica del vivero.

Figura 32
Variación de humedad relativa en el vivero municipal



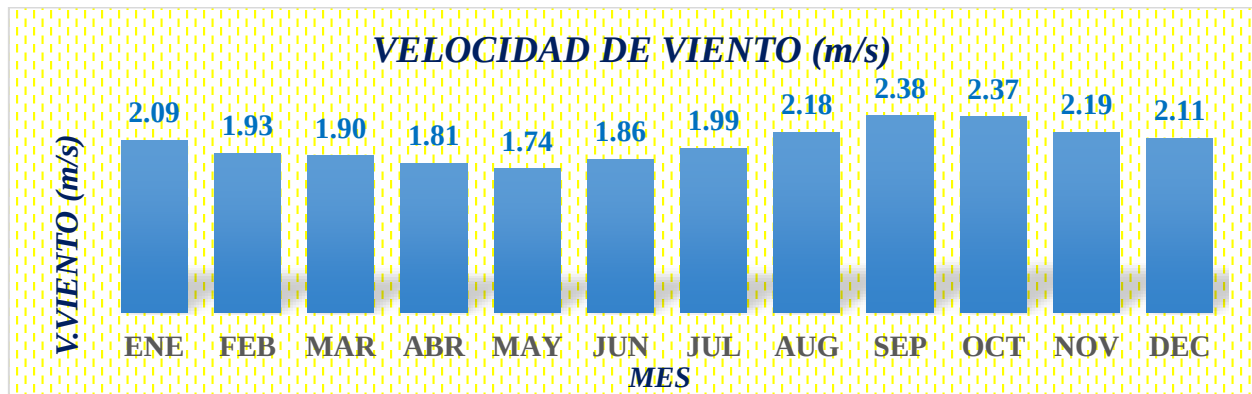
Nota. Datos obtenidos de la plataforma NASA POWER (2025), periodo 2010 – 2023. Elaboración propia.

Velocidad de viento

La Figura 33 presenta la variación mensual de la velocidad del viento en la zona de estudio según datos de NASA POWER (2025). Los valores oscilan entre 1.74 m/s y 2.38 m/s, con su valor más bajo en mayo y el más alto en septiembre, mes en que los vientos se intensifican por el inicio de la temporada de primavera. Estos valores reflejan una velocidad de viento moderada y relativamente estable durante el año, un parámetro importante en el cálculo de la evapotranspiración de referencia.

Figura 33

Variación de velocidad de viento en el vivero municipal



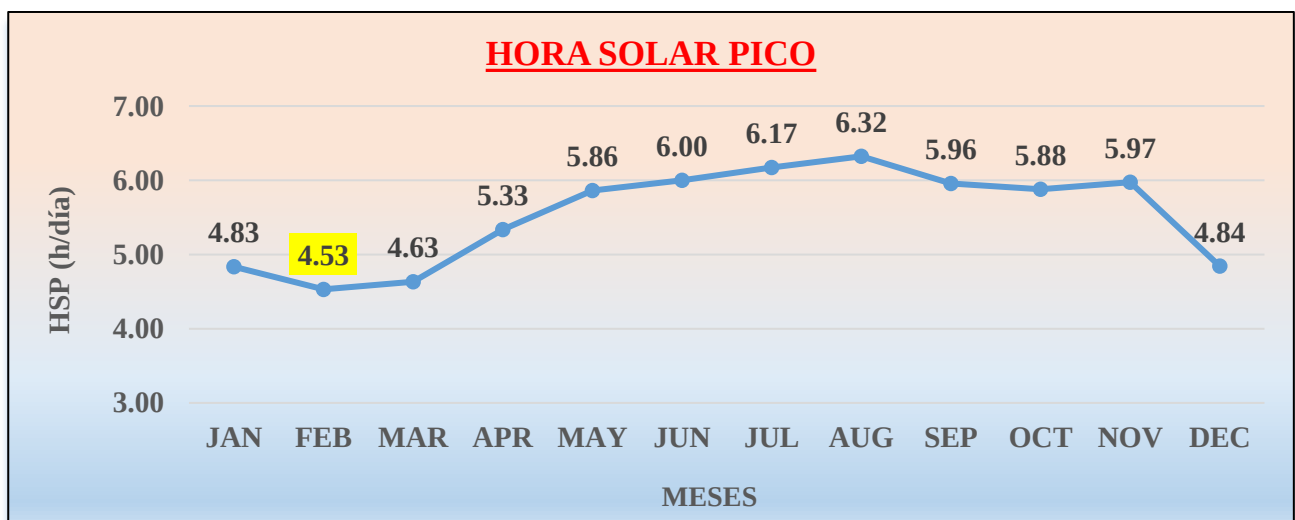
Nota. Datos obtenidos de la plataforma NASA POWER (2025), periodo 2010 – 2023. Elaboración propia.

Radiación

La Figura 34 muestra la variación mensual de la radiación solar incidente en la zona de estudio. Los valores oscilan entre 4.53 kWh/m²/día en febrero y 6.32 kWh/m²/día en agosto, lo que evidencia mayor disponibilidad de energía solar en los meses de invierno y primavera por la reducción de la cobertura nubosa propia de la época seca en Ayacucho. Los meses de verano registran valores menores asociados a la mayor presencia de nubes durante la temporada de lluvias. Este comportamiento favorece al sistema fotovoltaico ya que los meses de mayor demanda hídrica del vivero coinciden con una adecuada disponibilidad de radiación solar.

Figura 34

Variación de la insolación o radiación en el vivero municipal



Precipitación

La precipitación mensual se obtuvo de NASA POWER (2025) para el periodo 2005–2025, con estadísticos presentados en la Tabla 7, la precipitación total anual varió entre 506.48 mm (2020) y 1,029.54 mm (2011), con promedio de 728.77 mm/año y una precipitación confiable al 75% de 535.87 mm/año, empleada en el análisis de sostenibilidad hídrica del puquial (sección 3.1.4). El detalle mensual y el cálculo de la precipitación efectiva se presentan en el Anexo 1.

Tabla 7

Resumen estadístico de precipitación mensual 2005 – 2025 (mm)

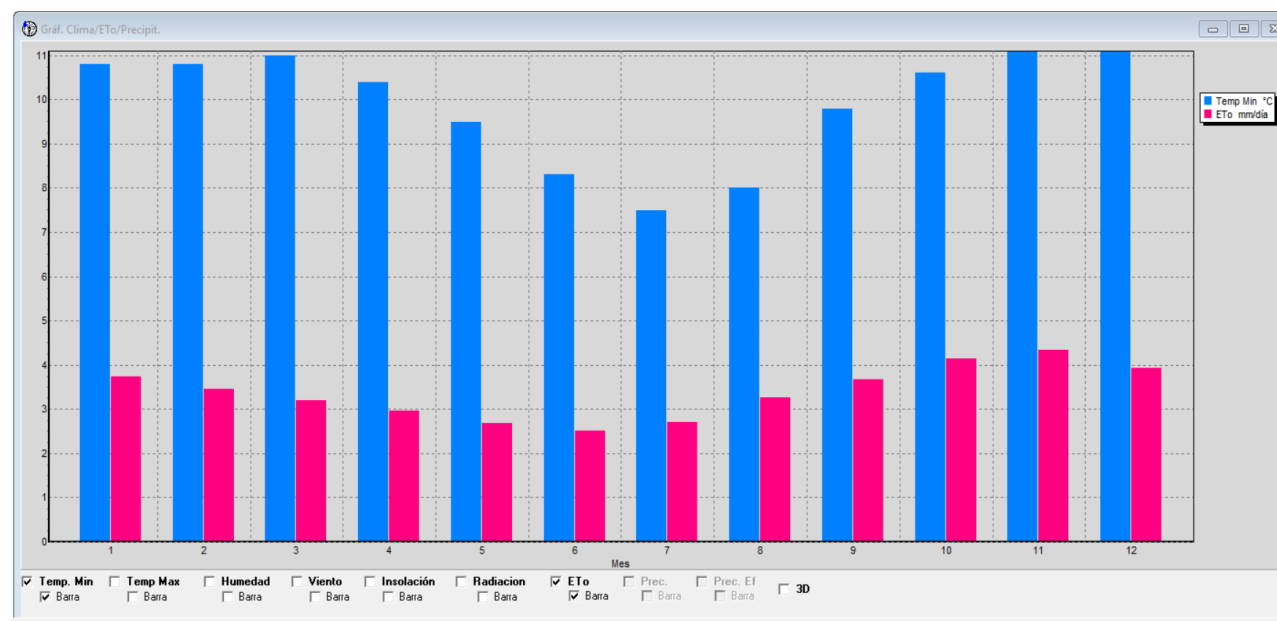
Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total anual
Promedio	120.4	133.9	122.6	46.7	21.6	5.1	9.1	17.9	26.4	58.4	57.4	109.3	728.8
Máximo	169.3	248.9	182.0	88.5	38.8	12.0	25.4	54.6	49.5	107.0	110.4	179.5	1029.5
Mínimo	78.4	80.6	76.6	14.1	7.1	0.9	0.2	1.2	14.4	10.2	17.4	44.6	506.5
PP 75%	108.2	115.6	96.5	33.5	17.9	3.1	2.5	6.3	7.0	39.1	35.6	70.8	535.9

Nota. La tabla completa del 2005–2025 se presenta en el Anexo 1. Elaboración propia (2025).

Cálculo de la evapotranspiración de referencia (Eto)

La Tabla 8 presenta los resultados mensuales de la evapotranspiración de referencia, calculados mediante el método de Penman-Monteith en el software CROPWAT, empleando las variables climáticas obtenidas de NASA POWER (2025). Los valores mensuales oscilan entre 2.79 mm/día en junio y 4.44 mm/día en septiembre, con un promedio anual de 3.73 mm/día. Como se observa en la Figura 35, los valores más bajos coinciden con los meses de invierno, donde la menor temperatura y mayor humedad relativa reducen la demanda evapotranspirativa, mientras que los valores más altos se presentan en primavera, impulsados por la mayor radiación solar y velocidad del viento registradas en la zona.

Figura 35
ETo y temperatura mínima mensual obtenida en CROPWAT



Nota. Gráfico generado en CROPWAT mediante el método de Penman-Monteith.

Tabla 8
Resultado de ETo de referencia de la zona de estudio

Mes	Temp Min °C	Temp Max °C	Humedad %	Viento (km/día)	Insolación (horas)	Rad MJ/m²/día	Eto mm/día
ENE	10.8	20	80	181	4.8	17.7	3.37
FEB	10.8	19.2	83	167	4.5	17.1	3.14
MAR	11	18.6	84	164	4.6	16.5	2.94
ABR	10.4	18.9	82	156	5.3	16	2.82
MAY	9.5	19.3	79	151	5.9	15.1	2.65
JUN	8.3	19	77	161	6	14.3	2.51
JUL	7.5	19.7	74	172	6.2	14.9	2.7
AGO	8	20.8	71	189	6.3	16.6	3.18
SET	9.8	21.1	72	206	6	17.9	3.51
OCT	10.6	22.3	71	205	5.9	18.9	3.87
NOV	11.1	22.4	72	189	6	19.4	3.96
DIC	11.1	21.2	77	182	4.8	17.7	3.54
Promedio	9.91	20.21	76.83	176.92	5.53	16.84	3.18

Nota. Datos obtenidos de NASA POWER (2025).

3.1.2 *Discusión de la caracterización climática*

Los resultados de la evapotranspiración de referencia obtenidos mediante el método de Penman-Monteith en CROPWAT muestran un comportamiento coherente con las variables climáticas registradas en la zona de estudio. El valor promedio anual de 3.18 mm/día representa la evapotranspiración de referencia calculada para las condiciones climáticas del área de estudio, la cual fue estimada mediante el método recomendado por la FAO (2006), al integrar variables como temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar. Para la obtención de estas variables se empleó la base de datos NASA POWER, metodología que también fue utilizada por Arangurí (2024) y Zegarra (2021), respaldando su aplicación en investigaciones relacionadas con el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos.

En cuanto al recurso solar, Pérez (2019) reportó un valor de 4.92 HSP obtenido a partir del Atlas de Energía Solar del Perú, mientras que en la presente investigación se determinó un valor mínimo de 4.53 HSP utilizando datos de NASA POWER. Aunque ambos estudios emplearon fuentes de información diferentes para la estimación de la radiación solar, los valores obtenidos evidencian un potencial solar favorable para el diseño de sistemas de bombeo fotovoltaico.

La relación observada entre la temperatura mínima y la ETo confirma que los meses de invierno, con temperaturas mínimas de hasta 7.47 °C, generan una menor demanda hídrica, en comparación a los meses de primavera, donde la temperatura y radiación solar se incrementan, la ETo alcanza sus valores más altos. Este comportamiento es determinante para la planificación del riego, ya que permite identificar los meses críticos de mayor demanda hídrica del vivero municipal.

3.1.3 Caracterización topográfica

Se obtuvieron un total de 293 puntos topográficos distribuidos en toda el área del vivero en coordenadas UTM, incluyendo el puquial como fuente de captación, el tanque elevado, zonas de cultivo y caminos de acceso mostrados en el Anexo No 2

A Área y distribución de parcelas

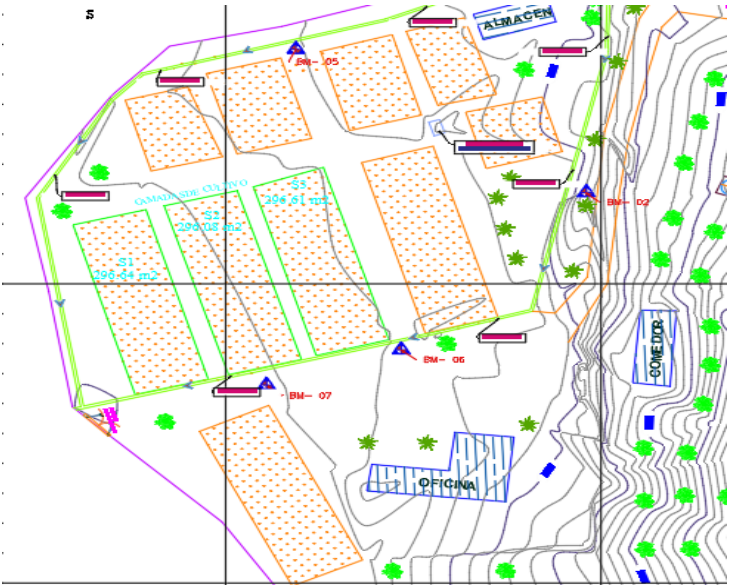
Se realizó en cuatro pabellones del vivero municipal, cada uno conformado por 18 camas de cultivo de 1×10 m, correspondientes al área asignada por la Municipalidad Provincial de Huamanga para la implementación del sistema de bombeo fotovoltaico. Como se observa en la Tabla 9 y la Figura 36, el área total de estudio es de 720 m², distribuida entre las tres especies vegetales evaluadas.

Tabla 9
Distribución de parcelas por tipo de cultivo

Tipo de planta	Especie	Área (m ²)	Porcentaje
Ornamental	Palta (<i>Persea americana</i>)	360.00	50.00%
Frutal	Geranio (<i>Pelargonium</i>)	180.00	25.00%
Forestal	Pino (<i>Pinus radiata</i>)	180.00	25.00%
Total		720.00	100%

Nota. Datos obtenidos del levantamiento topográfico de campo.

Figura 36
Plano de distribución de parcelas del vivero municipal



B Perfil topográfico de impulsión

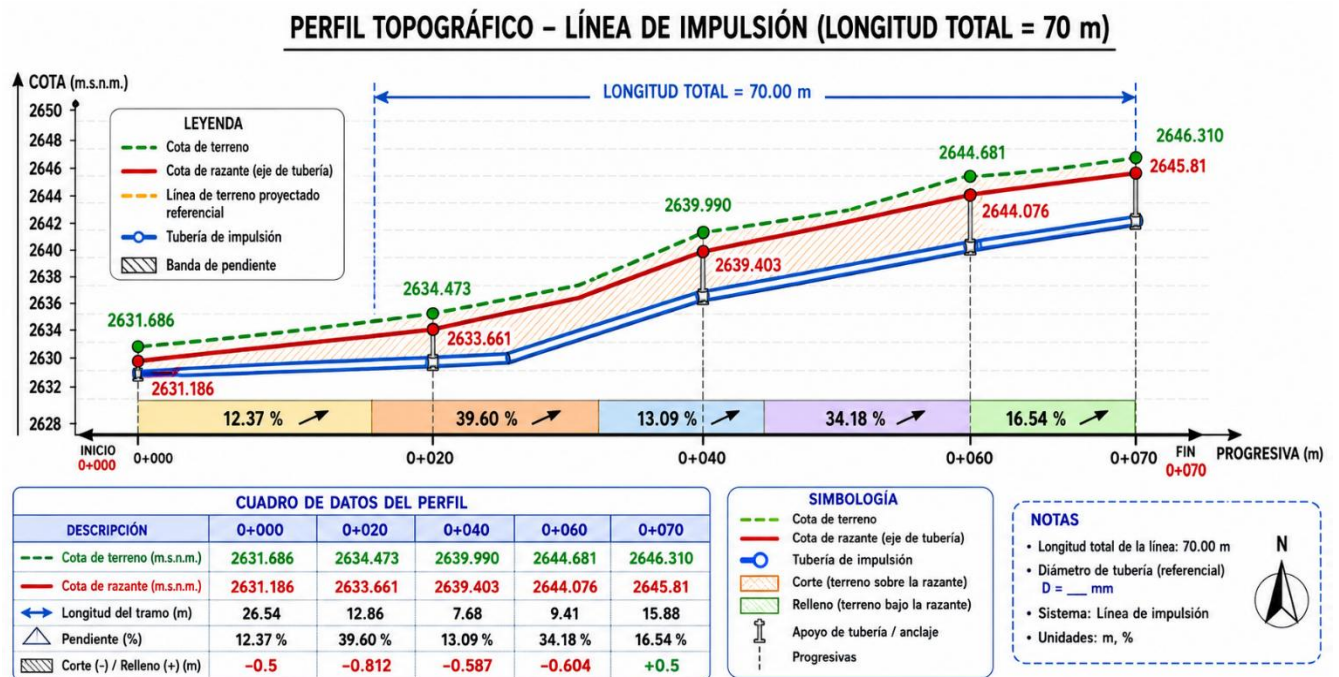
Como se observa en la Tabla 10, el perfil topográfico del tramo de impulsión comprende una longitud total de 70 m, con una cota inicial de 2631.686 msnm y una cota final de 2646.310 msnm, resultando una diferencia de elevación de 14.62 m. Se identificaron pendientes variables entre 12.37% y 39.60%, evidenciando tramos de fuerte inclinación, tal como se aprecia en la Figura 37. Para el dimensionamiento del equipo de bombeo, esta diferencia de elevación constituye la altura geométrica base del sistema, a la cual se adicionan las pérdidas de carga para determinar la altura manométrica total mediante la Ecuación 5 planteada en el marco teórico. Esta condición fue verificada durante la instalación del sistema en campo, confirmando que el equipo opera satisfactoriamente independientemente de las pendientes del tramo. Los planos y secciones transversales del perfil se presentan en el Anexo 2.

Tabla 10
Datos del perfil topográfico

Progresiva	0+000	0+020	0+040	0+060	0+070
Cota de terreno	2631.686	2634.473	2639.990	2644.681	2646.310
Longitud	26.54	12.86	7.68	9.41	15.88
pendiente	12.37%	39.60%	13.09%	34.18%	16.54%
Cota de razante	2631.186	2633.661	2639.403	2644.076	2645.81
Corte (-) relleno (+)	-0.5	-0.812	-0.587	-0.604	0.5

Nota. Datos obtenidos del levantamiento topográfico de campo.

Figura 37
Perfil de elevación del sistema de bombeo fotovoltaico



3.1.4 Discusión de la caracterización topográfico

Los resultados del levantamiento topográfico permitieron caracterizar el área de estudio y obtener los parámetros requeridos para el diseño del sistema de bombeo fotovoltaico, el área total de estudio es de 720 m², superficie considerada para el dimensionamiento del sistema de riego. Pérez (2019) también realizó el levantamiento topográfico mediante una estación total para obtener el perfil del terreno y los parámetros empleados en el diseño del sistema de bombeo fotovoltaico, mientras que Arangurí (2024) señala que el estudio topográfico constituye una etapa fundamental para determinar la altura de bombeo y establecer las condiciones hidráulicas del sistema.

El perfil topográfico del tramo de impulsión presentó una diferencia de elevación de 14.62 m en una longitud de 70 m, con pendientes entre 12.37 % y 39.60 %. Estos resultados permitieron calcular la altura geométrica para determinar la altura manométrica total utilizada en la selección del equipo de bombeo, tal como señala Arangurí (2024), quien indica que el estudio topográfico permite establecer la altura de bombeo requerida para el dimensionamiento hidráulico del sistema. Los planos y secciones transversales se presentan en el Anexo 2 como respaldo del levantamiento topográfico.

3.1.5 Caracterización agrológica

A.1 Clasificación de cultivos y delimitación de parcelas de cultivo

La Tabla 11 presenta la caracterización morfológica de las tres especies evaluadas en el vivero municipal, con un área total de 720 m². El geranio predomina en superficie ocupando el 50.00% del área total, siendo el cultivo ornamental de mayor presencia en el vivero. Estas características permitieron determinar cuánta agua necesita cada planta y cómo distribuir los emisores de riego de acuerdo al tamaño y tipo de cada especie.

Tabla 11

Caracterización de cultivos por tipo de especie

Tipo de planta	Altura (cm)	Diámetro de copa (cm)	Área de bolsa (m ²)	Área de cultivo (m ²)	Porcentaje
Ornamental	17	14.33	0.0050	360.00	50.00%
Frutal	22.7	17.67	0.0079	180.00	25.00%
Forestal	24.9	5.10	0.0033	180.00	25.00%

Nota. Datos obtenidos del levantamiento de campo.

A.2 Determinación del coeficiente de cultivo k_c

Las Tablas 12, 13 y 14 presentan los resultados del coeficiente de cultivo determinado experimentalmente para las tres especies del vivero municipal, las cuales fueron seleccionadas por representar la mayor predominancia y demanda hídrica. Cabe señalar que los valores obtenidos corresponden a la etapa de germinación, ya que el vivero produce plantones hasta esa fase para su posterior distribución a diferentes municipios de la región.

La palta registró un K_c promedio de 0.60, el geranio de 0.56 y el pino de 0.46, siendo la palta la especie con mayor demanda evapotranspirativa, lo cual es coherente con su condición de cultivo frutal en etapa inicial de desarrollo.

Tabla 12*Kc promedio de la palta*

PLANTA	Peso inicial Wo (gr)	Peso final Wf(gr)	Eto (mm/día)	Etc (mm/día)	KC
Palta 1	2766.67	2754.33	2.51	1.57	0.63
Palta 2	2542.00	2530.67	2.51	1.44	0.57
Palta 3	2592.33	2580.33	2.51	1.53	0.61
<i>kc promedio de la palta</i>					0.60

Nota. Datos obtenidos del pesaje experimental en campo.**Tabla 13***Kc promedio del geranio*

PLANTA	Peso inicial Wo (gr)	Peso final Wf(gr)	Eto (mm/día)	Etc (mm/día)	KC
Geranio 1	854.33	845.33	2.51	1.79	0.71
Geranio 2	931.67	922.33	2.51	1.86	0.74
Geranio 3	832.67	824.00	2.51	1.72	0.69
<i>kc promedio del geranio</i>					0.71

Nota. Datos obtenidos del pesaje experimental en campo.**Tabla 14***Kc promedio del pino*

PLANTA	Peso inicial Wo (gr)	Peso final Wf(gr)	Eto (mm/día)	Etc (mm/día)	KC
Pino 1	636.00	632.00	2.51	1.21	0.48
Pino 2	615.67	610.33	2.51	1.61	0.64
Pino 3	643.00	638.00	2.51	1.51	0.60
<i>kc promedio de pino</i>					0.57

Nota. Datos obtenidos del pesaje experimental en campo.

A.3 Cédula de cultivo

Las tres especies del vivero municipal se producen de forma continua a lo largo del año, respondiendo a la demanda permanente de plantones por parte de las municipalidades de la región. A partir de los coeficientes de cultivo determinados experimentalmente mostrado en el Anexo 3, se calculó el Kc ponderado mediante la Ecuación 13, obteniendo un valor constante de 0.65 para todos los meses, lo cual refleja que las plantas se encuentran en etapa de germinación durante todo el periodo de evaluación.

Tabla 15

Kc ponderado para los cultivos respecto al área proyectada

CULTIVOS	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Geranio	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71
Palta	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
Pino	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57
kc												
ponderado	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65

A.4 Demanda hídrica del cultivo

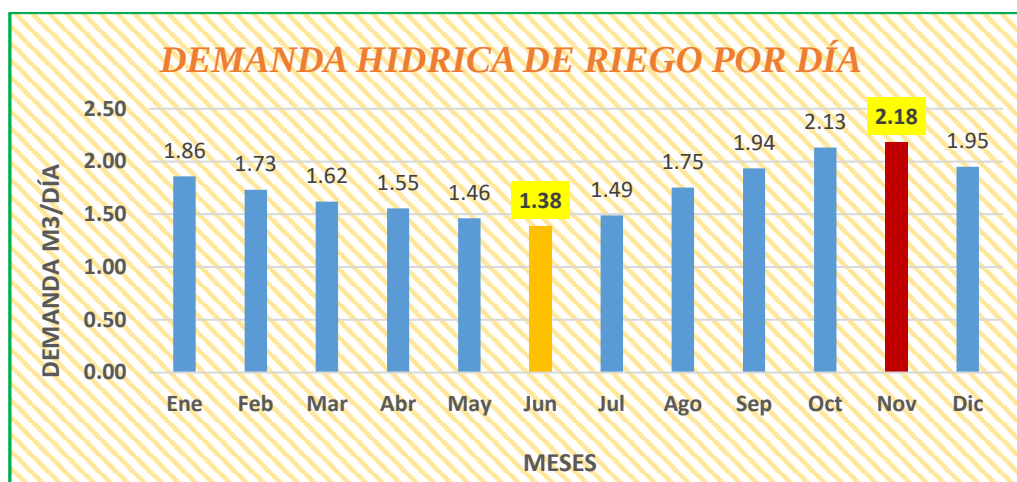
La demanda hídrica mensual se determinó a partir de la ETc de cada especie vegetal del vivero municipal. Si bien actualmente el riego se realiza mediante encharcamiento, el presente estudio plantea la implementación de un sistema de riego tecnificado, por lo que se adoptó una eficiencia de aplicación del 85%, valor referencial recomendado por FAO (1998) para este tipo de sistemas. Como se observa en la Tabla 16 y las Figura 38, la demanda total diaria oscila entre 1.79 m³/día en junio y 3.08 m³/día en noviembre, siendo este último el mes crítico de mayor requerimiento hídrico. El cálculo detallado se presenta en el Anexo 3.

Tabla 16*Demanda hídrica mensual del vivero municipal*

Descripcion	Unidad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Días de mes	días	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Eto	mm/dia	3.37	3.14	2.94	2.82	2.65	2.51	2.7	3.18	3.51	3.87	3.96	3.54
Kc Ponderado	0	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
Uso Consultivo Etc	mm/dia	2.19	2.04	1.91	1.84	1.72	1.63	1.76	2.07	2.28	2.52	2.58	2.30
Precipitacion Efectiva diaria	mm/dia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Necesidades Netas del Cultivo	mm/dia	2.19	2.04	1.91	1.84	1.72	1.63	1.76	2.07	2.28	2.52	2.58	2.30
Necesidad de Riego Neto Volumen	m3/ha	21.93	20.44	19.14	18.35	17.25	16.34	17.57	20.70	22.84	25.19	25.77	23.04
Eficiencia de Aplicación riego por Aspersión	%	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
Necesidades Totales de cultivo	mm/dia	2.58	2.40	2.25	2.16	2.03	1.92	2.07	2.43	2.69	2.96	3.03	2.71
Necesidades Totales de cultivo	m3/dia	25.80	24.04	22.51	21.59	20.29	19.22	20.67	24.35	26.88	29.63	30.32	27.11
Area de Riego	ha	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072
Demanda Total unitario - Mensual	m3/ha/mes	799.9	673.2	697.8	647.7	629.0	576.5	640.9	754.8	806.2	918.6	909.6	840.2
Demanda Total - Mensual	m3/mes	57.60	48.47	50.25	46.64	45.29	41.51	46.14	54.35	58.05	66.14	65.50	60.50
Demanda Total - Diaria	m3/Día	1.86	1.73	1.62	1.55	1.46	1.38	1.49	1.75	1.94	2.13	2.18	1.95

Figura 38

Variación mensual de la demanda hídrica diaria del vivero



Nota. Elaboración propia. En amarillo el mes de menor demanda y en rojo el mes crítico

3.1.6 Discusión de la caracterización agrológica

La caracterización agrológica permitió establecer los parámetros para el dimensionamiento del sistema de bombeo fotovoltaico. Las especies evaluadas permanecieron en etapa de germinación durante el periodo de estudio, obteniéndose un K_c ponderado de 0.65, valor comprendido dentro del rango recomendado por la FAO (2006) para cultivos en etapa inicial. El coeficiente de cultivo fue determinado mediante el método gravimétrico, a partir de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) obtenida por el pesaje periódico de las muestras.

La demanda hídrica muestra variación mensual relacionada con la ET_o , alcanzando 2.18 $m^3/día$ en noviembre y 1.38 $m^3/día$ en junio, consistente con Vázquez et al. (2017), quienes indican que la demanda hídrica responde a las variaciones de temperatura y radiación solar.

Para estimar la demanda bruta de agua se adoptó una eficiencia de aplicación del 85 % como criterio de diseño. La FAO (1998) reporta valores indicativos de eficiencia de 75 % para riego por aspersión y 90 % para riego por goteo, por lo que el valor considerado en la presente investigación se encuentra dentro de dicho intervalo.

3.1.7 Caracterización hidrológica

A Reconocimiento de la fuente de captación

La Figura 39 muestra el sistema de captación del puquial, cuyo caudal es conducido mediante una tubería de 4" hacia el pozo de almacenamiento ubicado a 2 metros de la fuente, tal como se aprecia en la Figura 40. Las dimensiones del pozo se detallan en el Anexo 4 al igual que el análisis físico-químico del agua cuyos resultados principales se presentan en la Tabla 17 y la figura 41.

Figura 39

Sistema de captación del puquial mediante tubería de 4"



Nota. Registro fotográfico de campo.

Figura 40

Pozo de almacenamiento del vivero municipal



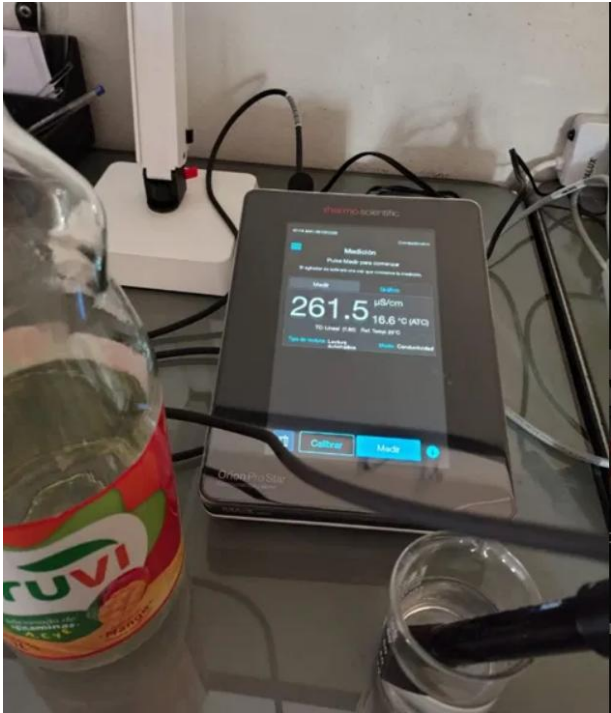
Nota. Registro fotográfico de campo.

Tabla 17
Resultados del análisis de calidad de agua del puquial

Parámetro	Valor	Unidad
pH	6.66	
Conductividad eléctrica	261.50	µS/cm
RAS	1.68	
Sales solubles totales	167.40	ppm
Clasificación	C2-S1*	

Nota. Análisis realizado por Multiservicios Agrolab (2026). Informe completo en Anexo 4

Figura 41
Medición de conductividad eléctrica del agua del puquial



Nota. Equipo Thermo Scientific Orion Pro Star, registrando: 261.5 µS/cm.en el Laboratorio Multiservicios Agrolab

Según la Tabla 17 el agua presenta clasificación C2-S1*, correspondiente a salinidad media y bajo riesgo de sodio, siendo apta para el riego de los cultivos del vivero sin restricciones significativas según Agrolab (2026). Dicho lugar donde se realizó éste análisis y concluye que la calidad del agua es compatible con la operación del sistema de bombeo instalado.

B Determinación de la oferta hídrica

Oferta hídrica del puquial

La Tabla 18 presenta los registros de aforo del puquial obtenidos en campo durante el periodo junio 2025 a febrero 2026, con un caudal que oscila entre 9.64 m³/día en agosto y 10.99 m³/día en febrero, registrando un promedio de 10.40 m³/día. Como se observa en la Figura 46, se aplicó regresión lineal a los datos aforados obteniendo un $R^2 = 0.6081$, indicando que el caudal se mantiene relativamente estable durante el periodo de medición sin una tendencia definida.

Tabla 18

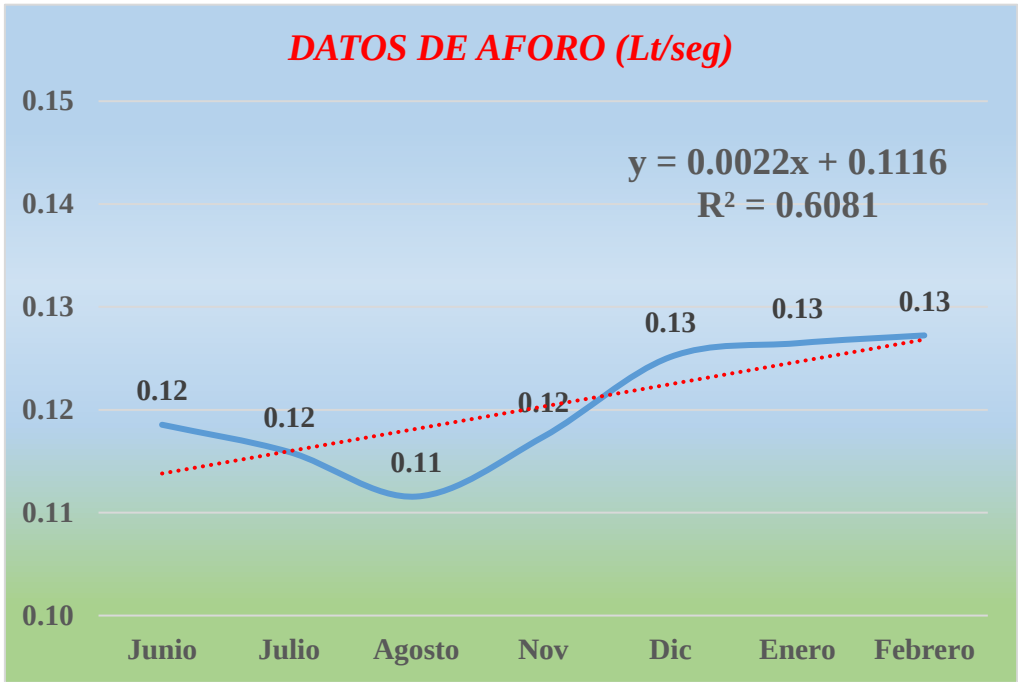
Registros de aforo del puquial en campo

MESES	Q (L/seg)	Q (m ³ /día)
Junio	0.12	10.24
Julio	0.12	10.01
Agosto	0.11	9.64
Nov	0.12	10.14
Dic	0.13	10.81
Enero	0.13	10.93
Febrero	0.13	10.99
Promedio	0.12	10.40

Nota. Datos obtenidos mediante aforo volumétrico de campo, periodo junio 2025 - febrero 2026.

Dado que el periodo de aforo comprende siete meses, los meses sin medición directa fueron completados con el caudal promedio de 10.40 m³/día, criterio respaldado por el comportamiento estable del caudal observado en campo. La variación entre el valor mínimo de 9.64 m³/día y el máximo de 10.99 m³/día representa el 13.0% respecto al promedio, confirmando la estabilidad del caudal durante el periodo de medición, tal como se presenta en la Tabla 19.

Figura 42
Aforo del puquial por meses



Nota. Elaboración propia. R²=0.6081 evidencia estabilidad del caudal durante el periodo de medición.

Tabla 19
Estimación mensual del caudal del puquial

MESES	Q (L/seg)	Q (m3/día)
Enero	0.13	10.93
Febrero	0.13	10.99
Marzo	0.12	10.40
Abril	0.12	10.40
Mayo	0.12	10.40
Junio	0.12	10.24
Julio	0.12	10.01
Agosto	0.11	9.64
Setiembre	0.12	10.40
Octubre	0.12	10.40
Noviembre	0.12	10.14
Diciembre	0.13	10.81

Nota. Elaboración propia. Valores estimados basados en el promedio del periodo de aforo Jun 2025 - Feb 2026.

C Balance hídrico

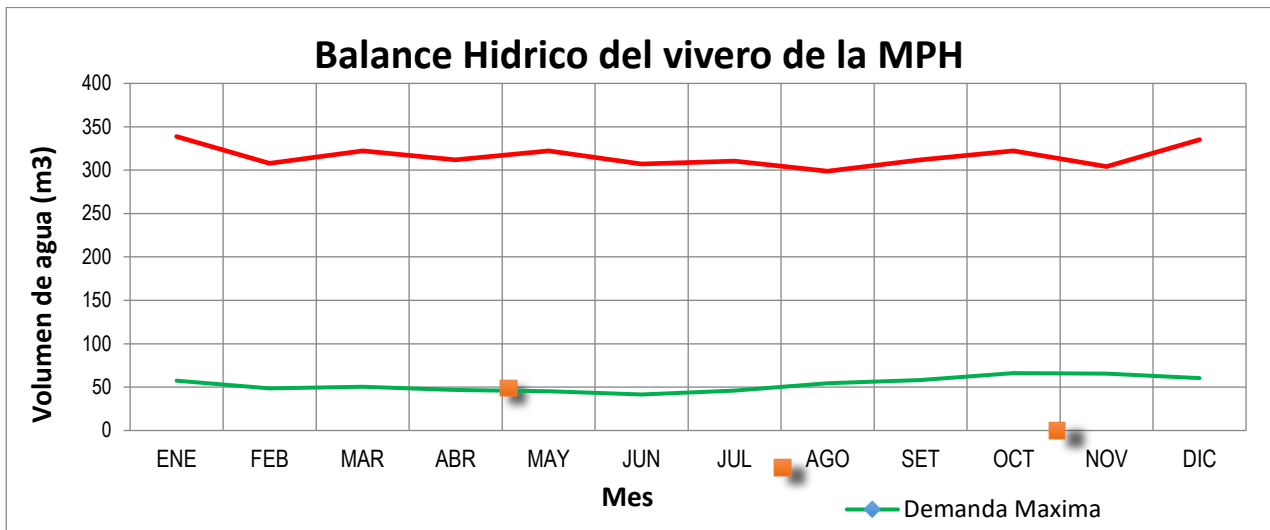
La Tabla 20 presenta la comparación mensual entre la oferta hídrica del puquial y la demanda hídrica del vivero municipal. Como se observa en la Figura 43, la oferta supera a la demanda durante todos los meses del año, confirmando la viabilidad hídrica del sistema de bombeo fotovoltaico. El mes más crítico es noviembre, donde la demanda alcanza 65.50 m³/mes frente a una oferta de 304.23 m³/mes, resultando un balance positivo de 238.74 m³/mes en el mes más desfavorable.

Tabla 20
Balance hídrico mensual del vivero municipal

Mes	Demanda (m ³ /mes)	Oferta (m ³ /mes)	Balance (m ³ /mes)	Demanda diaria (m ³ /día)
Enero	57.60	338.75	281.16	1.86
Febrero	48.47	307.80	259.33	1.73
Marzo	50.25	322.26	272.02	1.62
Abril	46.64	311.87	265.23	1.55
Mayo	45.29	322.26	276.97	1.46
Junio	41.51	307.28	265.77	1.38
Julio	46.14	310.44	264.29	1.49
Agosto	54.35	298.82	244.47	1.75
Setiembre	58.05	311.87	253.81	1.94
Octubre	66.14	322.26	256.12	2.13
Noviembre	65.50	304.23	238.74	2.18
Diciembre	60.50	335.15	274.65	1.95

Nota. Oferta hídrica obtenida de aforos del puquial. Demanda calculada en base a Kc medidos en campo y área de 720 m². Elaboración propia (2025).

Figura 43
Balance hídrico mensual del vivero municipal



Nota. Elaboración propia. La oferta supera a la demanda durante todos los meses del año.

D Análisis de sostenibilidad hídrica del puquial

Delimitación del área de recarga

Con imágenes satelitales de Google Earth se compararon entre los años 2005 y 2025 mostrado en la Figura 44 donde evidencia que la cobertura vegetal se mantuvo estable, sin degradación que comprometa la continuidad del puquial así mismo se delimitó el área de recarga del puquial en la franja del margen del río Huatatas, obteniendo una extensión de 39,000 m² mostrado en la Figura 45.

Figura 44
Comparación del área de recarga con imágenes satelitales 2005 y 2025

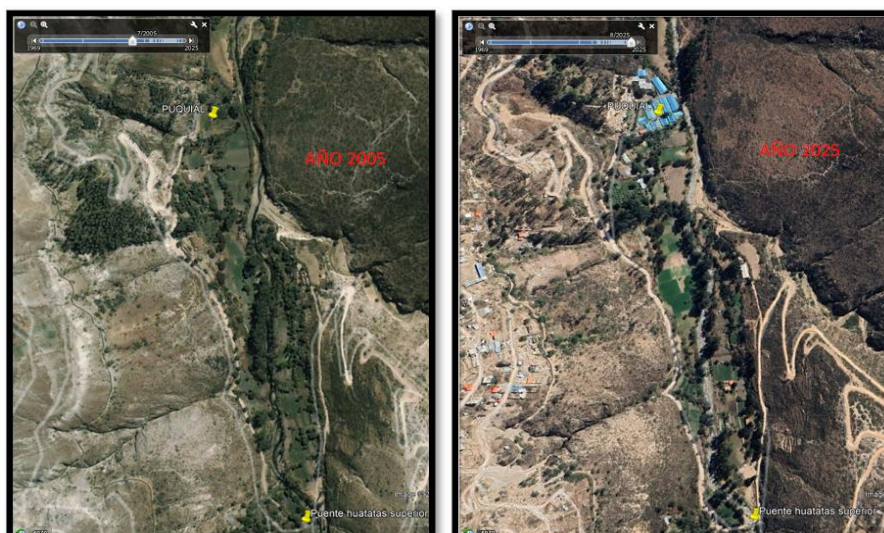


Figura 45
Delimitación del área de recarga hídrica del río Huatatas

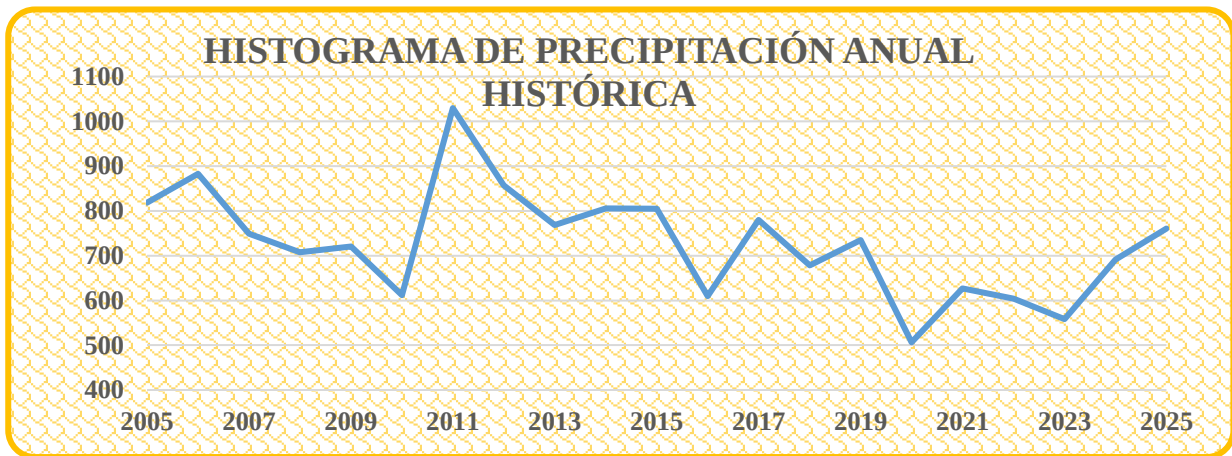


Nota. Polígono de recarga delimitado mediante Google Earth (2025). Área total: 39,000 m². La línea azul representa el río Huatatas.

Precipitación confiable

A partir de los datos de precipitación mensual del periodo 2005–2025 obtenidos de NASA POWER (2025), se determinó la precipitación confiable al 75% de probabilidad de excedencia, adoptando el escenario más desfavorable de disponibilidad hídrica. Como se observa en la Figura 46, la precipitación total anual histórica presenta variaciones entre 506.48 mm/año (2020) y 1,029.54 mm/año (2011), obteniéndose una precipitación confiable al 75% de 535.87 mm/año. Los datos detallados y el procedimiento estadístico se presentan en el Anexo 4.

Figura 46
Precipitación anual histórica 2005–2025

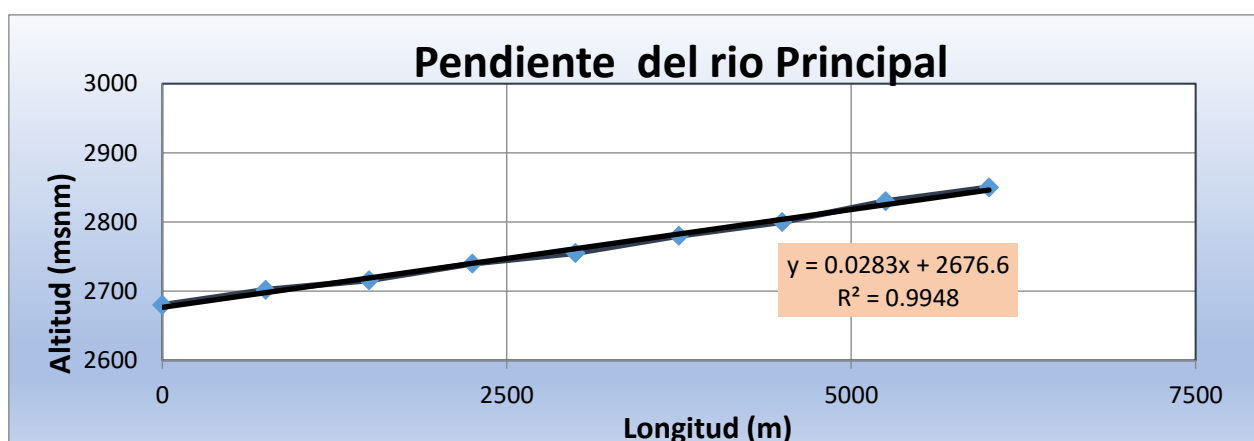


Nota. Datos obtenidos de NASA POWER (2025). Elaboración propia (2025).

Estimación de la recarga y balance de sostenibilidad

Con la pendiente del cauce principal de 2.83% mostrada en la Figura 47 y sustentada en el Anexo 4, cobertura de terreno cultivado y con textura franco arenosa, se adoptó $C = 0.30$ conforme a la Tabla 5 de valores del coeficiente de escorrentía Villón Béjar (2002). La recarga anual se estimó aplicando la Ecuación 15 y se comparó con la extracción anual del puquial para verificar la sostenibilidad a 20 años.

Figura 47
Pendiente del cauce principal de la subcuenca muyurina



Nota. Elaboración propia mediante ArcGIS (2025). Pendiente calculada por el método de regresión lineal: 2.83%.

$$R = 39,000 \times 0.536 \times 0.30$$

$$R = 6,269.68 \text{ m}^3/\text{año}$$

Los resultados del balance de sostenibilidad se presentan en la Tabla 21

Tabla 21

Balance de sostenibilidad hídrica del puquial

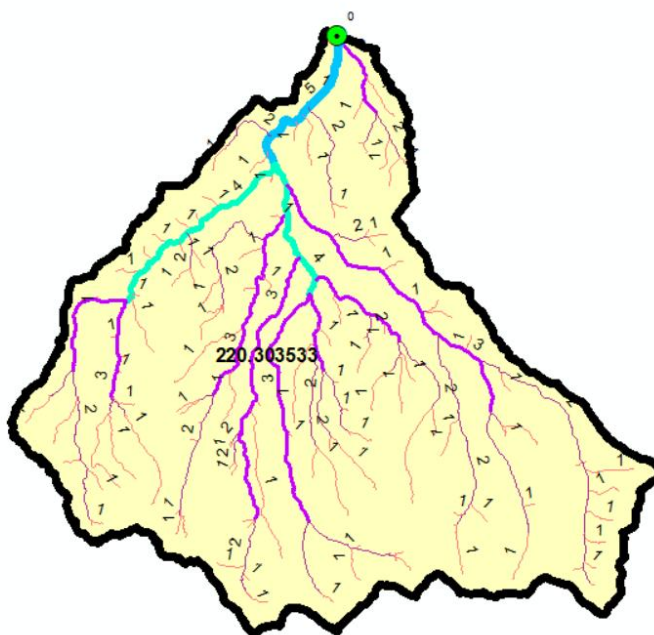
Parámetro	Valor	Unidad
Área de recarga	39,000	m ²
Precipitación confiable (75%)	535.87	mm/año
Coeficiente de escorrentía (C)	0.30	
Recarga estimada anual	6,269.68	m ³ /año
Extracción anual del puquial	795.70	m ³ /año
Relación recarga/extracción	7.88	
Balance acumulado 20 años	+109,479.58	m ³

Nota. Extracción anual calculada con la demanda máxima diaria de 2.18m³/día correspondiente al mes más crítico de noviembre.

La Tabla 21 muestra que la recarga supera la extracción en 7.88 veces, con un balance positivo de +109,479.58 m³ a 20 años, confirmando la sostenibilidad hídrica del puquial durante toda la vida útil del proyecto. La Figura 48 muestra la subcuenca muyurina del río Huatatas con un área de aporte de 220.30 km², garantizando la continuidad del flujo que alimenta el puquial.

Figura 48

Red hídrica de la subcuenca Muyurina



Nota. Elaboración propia con ArcGIS10.8 donde el área de la subcuenca es 220.30 km²

3.1.8 *Discusión de la caracterización hidrológica*

Los resultados de la caracterización hidrológica demuestran que el puquial dispone de un caudal suficiente para abastecer la demanda hídrica del vivero durante el periodo evaluado junio de 2025 a febrero de 2026, registrándose valores entre 9.90 y 10.91 m³/día, con una variación de 13.0 % respecto al promedio, lo que evidencia un comportamiento estable de la fuente de captación.

El balance hídrico mensual confirma que la oferta hídrica del puquial supera ampliamente la demanda del vivero durante los doce meses del año, con un superávit mínimo de 238.74 m³/mes registrado en noviembre, mes de mayor requerimiento hídrico con una demanda diaria de 2.18 m³/día. Esta diferencia garantiza que el sistema de bombeo pueda operar de manera continua y segura sin riesgo de desabastecimiento incluso considerando posibles variaciones estacionales del caudal no registradas durante el periodo de aforo.

El análisis de sostenibilidad hídrica fue evaluado mediante la estimación de la recarga subterránea aplicando la metodología propuesta por Villón Béjar (2012), donde se confirma que el puquial mantendrá su disponibilidad durante toda la vida útil del proyecto. La recarga estimada de 6,269.68 m³/año supera la extracción anual de 795.70 m³/año en 7.88 veces, resultando un balance positivo acumulado de +109,479.58 m³ a 20 años. La estabilidad de la zona de recarga verificada mediante imágenes satelitales 2005–2025 refuerza esta conclusión descartando procesos de degradación que pudieran comprometer la continuidad del puquial.

La estabilidad del caudal observada, respaldada por los registros del informe técnico de campo presentados en el Anexo 4, constituye un fundamento sólido para el dimensionamiento del sistema de bombeo, tomando como caudal de diseño el valor mínimo registrado de 9.90 m³/día correspondiente al mes de agosto.

3.2 Del objetivo 2: Diseño del sistema de bombeo solar fotovoltaico

3.2.1 Diseño hidráulico del sistema de bombeo

A Determinación del caudal de diseño

Se determinó tomando la demanda hídrica máxima diaria del vivero y las horas solares pico mínimas del año obtenidas de NASA POWER (2025). valores presentados en la Tabla 22 y aplicando la Ecuación 15 se obtiene lo siguiente:

Tabla 22

Variables utilizadas para el caudal de diseño

Parámetro	Valor
Demanda hídrica máxima diaria	2.18 m ³ /día
Horas solares pico mínimas	4.5 h/día

Nota: Elaboración propia con datos de Nasa Power

$$Q_{diseño} = \frac{2.18/día}{4.5 h/días}$$

$$Q_{diseño} = 0.484 m^3/h$$

$$Q_{diseño} = 0.13 l/s$$

B Altura manométrica total (HMT)

B.1 Determinación de la altura geodésica (Hg)

Con los datos topográficos obtenidos y mostrados en la Tabla 23 se aplica la Ecuación 2 del marco teórico donde se obtuvo una altura geodésica de 17.05 m tal y se ilustra en la Figura 49.

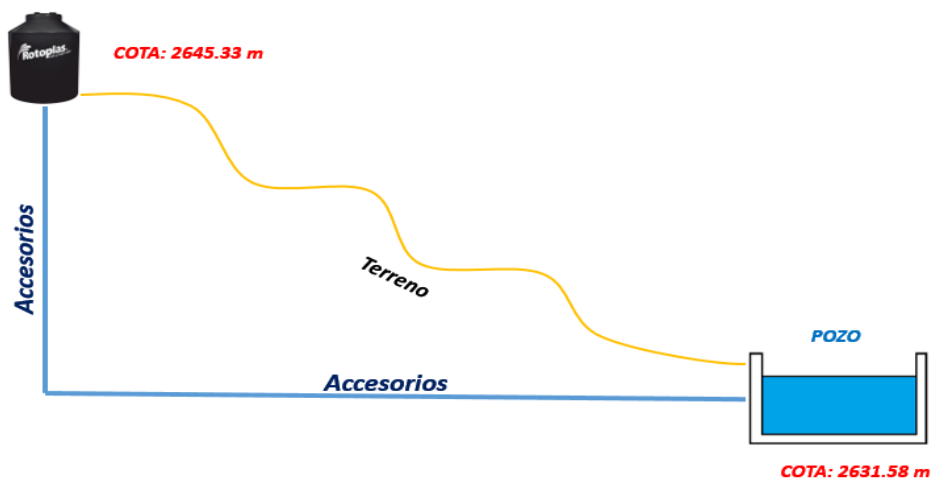
Tabla 23

Datos recolectados del tanque respecto al pozo

Componente	Valor (m)
Cota del tanque	2645.33
Cota de captación (puquial)	2631.58
Altura del nivel de agua en tanque	1.80
Profundidad del pozo	1.50

Nota. Elaboración propia.

Figura 49
Diferencia de altura del tanque respecto al pozo



- Nota. Elaboración propia.

Aplicando la Ecuación 2 de la metodología se obtuvo:

$$H_g = (2645.33 + 1.80) - (2631.58 - 1.50)$$

$$H_g = 17.05 \text{ m}$$

B.2 Determinación de pérdidas por fricción

Con los parámetros de la tubería PVC clase 10 de 3/4" con diámetro interno de 22 mm y longitud total de 70 m presentados en la Tabla 24 y sustentados en el Anexo 5 se calcularon las pérdidas por fricción aplicando la Ecuación 3 de Darcy-Weisbach del marco teórico obteniéndose los resultados en la Tabla 17.

Tabla 24
Datos para el cálculo del H_f

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Caudal de diseño	Q	0.00013	m ³ /s
Diámetro interno	D	22	mm
Longitud de tubería	L	70	m
Rugosidad	e	0.0015	mm
Gravedad	g	9.81	m/s ²

Nota. Elaboración propia.

Tabla 25*Resultado de la pérdida de fricción (hf)*

Diámetro (pulg)	Diámetro interno (m)	V (m/s)	Re	f	Hf (m)
¾"	0.022	0.35	7619.83	0.034	0.66

Nota. Elaboración propia.

De acuerdo con la Tabla 25 la velocidad del flujo en la tubería PVC de ¾ con 0.34 m/s valor inferior al rango recomendado de 0.6 a 2.5 m/s establecido en la Ecuación 17. Sin embargo, esta condición se considera aceptable dado que la línea de impulsión es corta (70 m) y el agua captada del puquial presenta baja presencia de sólidos en suspensión reduciendo significativamente el riesgo de sedimentación en la tubería.

B.3 Determinación de pérdidas por accesorios (Ha)

Los accesorios instalados en la línea de impulsión representan una fuente adicional de pérdida de carga que debe considerarse en el cálculo de la HMT. Con los coeficientes K identificados para cada accesorio presentados en la Tabla 26 se aplicó la Ecuación 4 del marco teórico obteniéndose una pérdida total por accesorios de 0.050 m valor que confirma una influencia mínima en la carga hidráulica total del sistema.

Tabla 26*Accesorios conectados en la línea de impulsión*

Accesorio	Und	K
Válvula check con canastilla (succión)	1	2.5
Codo 90°	2	0.90
Tee (para purgar)	1	0.1
Válvula de retención (antirretorno)	1	2.5
Llave de paso	1	5
Manómetro	1	2.5
TOTAL K		14.50

Nota: Elaboración propia

Aplicando la Ecuación 4 del marco teórico se obtuvo:

$$H_a = \sum_1^n (K \times \frac{v^2}{2g})$$

$$H_a = 14.50 \times \frac{0.35^2}{2 \times 9.81}$$

$$H_a = 0.09 \text{ m}$$

Cálculo final de HMT

Con los tres componentes determinados previamente se calculó la altura manométrica total del sistema aplicando la Ecuación 5 del marco teórico cuyos resultados se resumen en la Tabla 27.

Tabla 27

Resultados de la HMT total

Componente	Símbolo	Valor (m)	Porcentaje (%)
Altura geométrica	Hg	17.05	95.8
Pérdidas por fricción	Hf	0.66	3.7
Pérdidas por accesorios	Ha	0.09	0.5
HMT total	HMT	17.80	100

Nota: Elaboración propia

Como se observa en la Tabla 27 la altura geométrica representa el componente dominante con el 95.8% de la HMT total confirmando que las pérdidas por fricción y accesorios son mínimas debido a la corta longitud de la tubería y los pocos accesorios instalados.

C Selección de la bomba

Con la altura manométrica total de 17.80 m y el caudal de diseño de 0.484 m³/h determinados previamente, se procedió a la selección de la electrobomba. La selección se sustentó verificando el cumplimiento de los criterios de caudal y altura manométrica establecidos en las Ecuaciones 21 y 22 de la metodología, con las especificaciones técnicas de la electrobomba MEDAS OB60 presentadas en la Tabla 28

Tabla 28*Especificaciones técnicas de la electrobomba MEDAS OB60*

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Modelo		Medas OB60	
Potencia	P	0.5	HP
Caudal máximo	Q (bomba)	1.92	m ³ /h
Altura manométrica máxima	H (Max)	25	m
Tensión		220	V
Frecuencia		60	Hz

Nota. Datos obtenidos de placa del equipo instalado. Elaboración propia (2025)

Aplicando la Ecuación 21 de la metodología se obtuvo:

$$1.92 \text{ m}^3/\text{h} \geq 0.484 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (cumple)}$$

Aplicando la Ecuación 22 de la metodología se obtuvo:

$$25 \text{ m} \geq 17.80 \text{ m} \text{ (cumple)}$$

Ambos criterios se cumplen satisfactoriamente confirmando que la electrobomba MEDAS OB60 puede abastecer el caudal requerido venciendo la carga hidráulica total con un margen de seguridad del 40.4%, calculado mediante la Ecuación 23 cuyos resultados se resumen en la Tabla 29.

$$MS = \frac{25 - 17.80}{17.80} \times 100$$

$$MS = 40.4\%$$

Tabla 29*Verificación de criterios de selección de la electrobomba*

Criterio	Requerido	Ficha técnica	¿Cumple?
Caudal (m ³ /h)	0.484	1.92	si
Altura manométrica (m)	17.80	25.00	si
Margen de seguridad (%)		40.4	si

Nota. Elaboración propia (2025).

C.1 Determinación en campo del punto de operación del sistema de bombeo

Prueba 1: Aforo en descarga de la bomba

Se realizó el aforo volumétrico en el punto de descarga de la electrobomba con todos los accesorios instalados, sin incluir la manguera de impulsión ni la altura geométrica al tanque, tal como se muestra en la Figura 29. Aplicando la Ecuación 6, la Ecuación 18 y la Ecuación 4 de la metodología con los datos de la Tabla 23, se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la Tabla 30.

Tabla 30

Datos de aforo volumétrico en descarga de la bomba

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Volumen del recipiente	V	0.020	m ³
Tiempo de llenado	t	42.10	s
Altura de succión	H suc	2.65	m

Nota. Elaboración propia (2025).

Prueba 2: Aforo en llegada al tanque

Punto de operación

Se realizó el aforo volumétrico en el punto de llegada al tanque de almacenamiento con el sistema operando en condiciones reales completas, venciendo la HMT total del sistema, tal como se muestra en la Figura 30. Aplicando la Ecuación 6, la Ecuación 18 y la Ecuación 4 de la metodología con los datos de la Tabla 31 se obtuvieron resultados mostrados en la Tabla 32.

Tabla 31

Datos del aforo volumétrico en llegada al tanque

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Volumen del recipiente aforador	V	0.004	m ³
Tiempo de llenado registrado	t	20.77	s
Altura de impulsión total	H	17.80	m

Nota. Elaboración propia (2025).

Tabla 32*Resumen de parámetros hidráulicos en campo*

Parámetro	Prueba 1 (descarga)	Prueba 2 (tanque)
Volumen aforado (m ³)	0.020	0.004
Tiempo de llenado (s)	42.10	20.77
Caudal Q (m ³ /h)	1.71	0.694
Velocidad V (m/s)	1.25	0.507
Pérdida accesorios H _a (m)	1.15	0.19
Altura total H (m)	2.65	17.80

Nota. Elaboración propia (2025).

El caudal real obtenido en campo con el sistema fotovoltaico SFV permite verificar el cumplimiento del criterio 1 establecido en la Ecuación 21 de la metodología:

$$Q_{bomba} \geq Q_{diseño}$$

$$0.694 \text{ m}^3/\text{h} \geq 0.484 \text{ m}^3/\text{h}$$

A partir de los dos aforos realizados en campo con el sistema SFV, combinados con los datos de la ficha técnica de la electrobomba, se determinó el punto de operación real del sistema mediante la Ecuación 24 de la metodología:

$$P_{operacion} = (0.694 \text{ m}^3/\text{h}, 17.80\text{m})$$

Con los puntos determinados se construyó la curva característica H-Q de la electrobomba MEDAS OB60 operando con el sistema SFV, presentada en la Tabla 33 y graficada en la Figura 50.

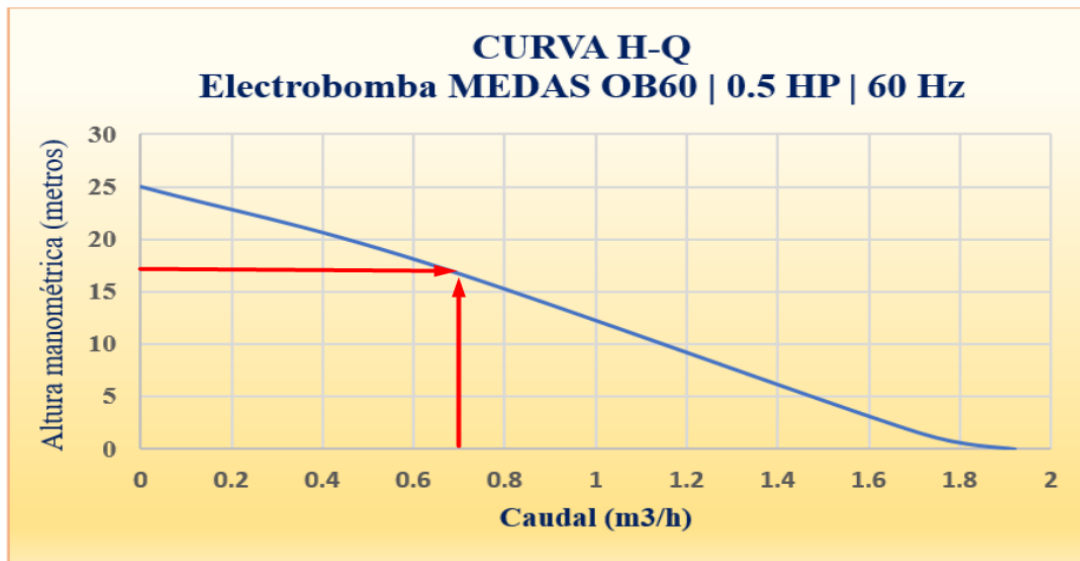
Tabla 33*Puntos para construcción de curva H-Q*

Punto	Origen	Q (m ³ /h)	H (m)
1	Altura máxima de bombeo	0.00	25.00
2	Aforo 2 en el tanque	0.694	17.80
3	Aforo 1 en la bomba	1.71	2.74
4	Caudal máximo de bombeo	1.92	0.00

Nota. Elaboración propia (2025).

Figura 50

Curva característica H-Q de electrobomba MEDAS OB60



La Figura 50 presenta la curva característica H-Q donde se identifica el punto de operación real del sistema con un caudal de 0.694 m³/h a una altura de 17.80 m, confirmando que la bomba opera satisfactoriamente venciendo la carga hidráulica total del sistema con un margen de seguridad de 40.4% respecto a su altura máxima de 25.00 m.

C.2 Tiempo de llenado del tanque de almacenamiento

Con el caudal real del sistema SFV de 0.694 m³/h se calculó el tiempo efectivo de bombeo necesario para cubrir el volumen diario requerido de 2.18 m³, mediante la Ecuación 25:

$$t_{\text{llenado}} = \frac{2.18}{0.694}$$

$$t_{\text{llenado}} = 3.14 \text{ horas}$$

Verificando mediante la Ecuación 26, el sistema completa el llenado en 3.14 horas, dentro de las 4.50 horas solares pico del mes crítico, confirmando la viabilidad operativa del sistema fotovoltaico.

$$HSP \geq t_{\text{llenado}}$$

$$4.5 \text{ horas} \geq 3.14 \text{ horas}$$

3.2.2 *Discusión del diseño hidráulico del sistema de bombeo*

El caudal de diseño de 0.484 m³/h se determinó a partir de la demanda hídrica máxima del vivero de 2.18 m³/día y de las horas solares pico mínimas con 4.50 h/día, considerando el escenario de menor disponibilidad de radiación solar. Este criterio de dimensionamiento coincide con el empleado por Pérez (2019), quien también estableció el caudal de diseño en función de la demanda de agua y del recurso solar disponible para el periodo crítico. Asimismo, Sandia National Laboratories (1998) recomienda realizar el dimensionamiento considerando el mes de menor radiación solar para asegurar el abastecimiento de agua durante el año.

La altura manométrica total de 17.80 m estuvo conformada principalmente por la altura geodésica, que representó el 95.8 % de la carga total, mientras que las pérdidas por fricción tuvieron una participación menor. Este resultado indica que la diferencia de nivel entre la captación y el punto de descarga tuvo mayor influencia en el dimensionamiento hidráulico del sistema. De igual manera Martínez Farias (2020) consideró la determinación de la carga dinámica total como criterio para la selección de la bomba, integrando la altura estática y las pérdidas hidráulicas del sistema, procedimiento que también fue aplicado en la presente investigación.

Los aforos realizados en campo registraron un caudal real de 0.694 m³/h, superior al caudal de diseño de 0.484 m³/h, verificando satisfactoriamente la Ecuación 21. El tiempo de llenado de 3.14 horas se mantuvo dentro de las 4.50 horas solares pico mínimas disponibles, verificado mediante la Ecuación 26, confirmando que el sistema puede cubrir la demanda hídrica diaria del vivero dentro de la jornada solar disponible.

3.2.3 Diseño del sistema fotovoltaico

A Determinación de la potencia eléctrica de la bomba

Según la bomba se registró una potencia nominal de 0.5 HP, valor que fue convertido a watts aplicando la Ecuación 26 de la metodología los resultados presentados en la Tabla 34.

Tabla 34

Especificaciones eléctricas de la electrobomba MEDAS OB60

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Potencia nominal	P	0.5	HP
Potencia eléctrica	Pe	373	W
Potencia eléctrica	Pe	0.373	kW
Tensión	V	220	V
Frecuencia	f	60	Hz

Nota. Datos obtenidos de placa del equipo instalado. Elaboración propia (2025).

La potencia eléctrica de 0.373 kW representa la demanda energética real del sistema de bombeo, este valor permite el dimensionamiento del campo fotovoltaico y ser capaces de generar la energía suficiente para alimentar la electrobomba durante el tiempo de operación diaria establecido.

B Cálculo de la energía diaria requerida

Con la potencia eléctrica de la electrobomba de 0.373 kW y el tiempo de operación de 3.14 h/día, se aplicó la Ecuación 27, obteniéndose los resultados presentados en la Tabla 35.

Tabla 35

Energía diaria requerida del sistema fotovoltaico

Parámetro	Valor	Unidad
Potencia eléctrica de la bomba	0.373	kW
Tiempo de operación	3.14	h/día
Energía eléctrica diaria requerida	1.171	kWh/día

Determinación de la energía útil del sistema fotovoltaico

Las especificaciones técnicas del panel fotovoltaico instalado se obtuvieron directamente de la etiqueta del fabricante como muestra en la Tabla 36 y evidenciadas en la Figura 51.

Tabla 36

Especificaciones técnicas del panel implementado

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Potencia nominal	P_nominal	180	W
Voltaje máxima potencia	Vmp	19.49	V
Corriente máxima potencia	Imp	9.24	A
Voltaje circuito abierto	Voc	23.39	V
Corriente cortocircuito	Isc	20	A
Largo	-	1.50	m
Ancho	-	0.68	m
Área	A_panel	1.02	m ²

Nota. Datos obtenidos de la etiqueta del panel fotovoltaico instalado.

Figura 51

Módulo fotovoltaico SunshineSolar MONO HZS-180W



Aplicando la Ecuación 28 se obtiene la eficiencia de este módulo fotovoltaico

$$n_{panel} = \frac{180}{1.02 \times 1000} \times 100$$

$$n_{panel} = 17.65 \%$$

Esta eficiencia de conversión del panel de 17.65% representa la fracción de energía solar convertida en electricidad bajo condiciones estándar, valor aplicado en la potencia nominal del panel y no multiplicado con el factor de rendimiento global, dado que ambos operan en cadenas energéticas diferentes según Arangurí (2026).

Tabla 37

Factores de pérdida adoptados para el sistema fotovoltaico

Pérdida	Factor adoptado
Temperatura	0.94
Suciedad y polvo	0.96
Sombreado parcial	0.96
Cableado DC	0.96
Inversor-cargador	0.90
Baterías de auto	0.70
PR	0.52

Nota. Adaptado de Lorenzo (1994), Perpiñán (2012) y Arangurí (2026)

El factor de rendimiento global se obtuvo multiplicando todos los factores de pérdida:

$$\eta_{sistema} = 0.94 \times 0.96 \times 0.96 \times 0.96 \times 0.90 \times 0.70$$

$$\eta_{sistema} = 0.52$$

Aplicando la Ecuación 29, resulta que cada kWp instalado el sistema fotovoltaico genera 2.36 kWh/día en el mes crítico de febrero, valor que incorpora las pérdidas operativas del sistema y representa la energía útil disponible para alimentar la electrobomba.

$$E_{\acute{u}til} = 4.53 \times 0.52$$

$$E_{\acute{u}til} = 2.36 \text{ kWh/kWp/día}$$

C Dimensionamiento del campo fotovoltaico

C.1 Cálculo de la potencia fotovoltaica requerida

Con la energía diaria requerida y la energía útil se calculó la potencia fotovoltaica requerida aplicando la Ecuación 30.

$$P_{FV} = \frac{1.17}{2.36}$$

$$P_{FV} = 497.11 \text{ Wp}$$

C.2 Cálculo del número de paneles (N)

Con la potencia fotovoltaica requerida de 495.76 Wp y seleccionando el panel comercial disponible SunshineSolar MONO HZS-180W, se determinó el número de paneles mediante la Ecuación 31 mostrados en la Tabla 38.

$$N = \frac{497.11}{180}$$

$$N = 2.76 \text{ paneles}$$

Se adoptaron 3 paneles tal como muestra la Figura 52 para garantizar la carga completa dentro de la jornada solar disponible y mantener un margen de seguridad ante variaciones climáticas.

Tabla 38
Resumen del dimensionamiento del campo fotovoltaico

Parámetro	Valor	Unidad
Energía diaria requerida	1.171	kWh/día
Energía útil por kWp	2.36	kWh/kWp·día
Potencia FV requerida	495.76	Wp
Potencia de panel seleccionado	180	Wp
Número de paneles	3	unidades
Potencia FV instalada	540	Wp

Nota. Elaboración propia (2025).

Figura 52

Paneles fotovoltaicos modelo SunshineSolar MONO HZS-180W



D Dimensionamiento del sistema de almacenamiento y conversión

D.1 Banco de baterías

Aplicando la Ecuación 33, autonomía de 1 día, tensión del sistema de 24 V y una profundidad de descarga DOD de 0.50 para baterías de arranque automotriz (Arangurí, 2026), se obtuvo:

$$C_{bat} = \frac{1171 \times 1}{24 \times 0.5}$$

$$C_{bat} = 97.58 \text{ Ah}$$

Se adoptó un banco de 4 baterías de 12V y 50Ah en configuración 2S-2P, obteniendo una capacidad de 100Ah a 24V, superior a la requerida de 97.58 Ah. Para futuras implementaciones con baterías de gel, Chenlo Romero (2014) recomienda una profundidad de descarga de DOD = 0.80

D.2 Inversor-cargador

Aplicando la Ecuación 34 con la potencia eléctrica de la bomba de 373W obtenida en la Ecuación 26 y factor de seguridad de 1.20 se obtiene:

$$P_{inversor} = 373 \times 1.20$$

$$P_{inversor} = 447.60 \text{ W}$$

Se utilizó un inversor-cargador MUST de 3000 W, cuya potencia supera los 447.60 W requeridos y permite cubrir la corriente de arranque del motor eléctrico, la cual puede ser de 2 a 3 veces la corriente nominal (Chapman, 2012). El equipo fue utilizado en calidad de préstamo

3.2.4 *Discusión del diseño del sistema fotovoltaico*

La energía diaria requerida de 1.171 kWh/día se determinó a partir de la potencia de la electrobomba y del tiempo de operación de 3.14 h/día, utilizando como base los resultados obtenidos en el diseño hidráulico. Este procedimiento fue desarrollado de manera similar por Flores (2019) y Martínez Farías (2020), quienes estimaron la demanda energética del sistema de bombeo antes de dimensionar el generador fotovoltaico. Asimismo, Sandia National Laboratories (1998) señala que la estimación de la demanda energética constituye el punto de partida para el diseño de sistemas de bombeo fotovoltaico.

La energía útil de 2.36 kWh/kWp·día se determinó adoptando un PR = 0.52, incorporando pérdidas por temperatura, suciedad, sombreado, cableado, inversor-cargador y baterías de arranque automotriz usadas. Si bien Lorenzo (1994) y Perpiñán (2012) señalan que el factor de rendimiento global oscila entre 0.75 y 0.85 para sistemas fotovoltaicos convencionales, Arangurí (2026) establece que para sistemas autónomos con baterías el PR típico es de 0.60-0.75, reduciéndose en el presente caso por el uso de baterías de arranque automotriz usadas en lugar de baterías de ciclo profundo, lo que incrementa las pérdidas de almacenamiento y justifica el valor adoptado.

El dimensionamiento final resultó en una potencia instalada de 540 Wp, mediante tres paneles SunshineSolar MONO HZS-180W, superior a la potencia requerida de 497.11 Wp. De manera similar, Lara Yévenes (2007) y Flores (2019) seleccionaron una potencia fotovoltaica instalada igual o superior a la calculada para cubrir la demanda energética del sistema de bombeo. En la presente investigación, esta configuración permitió disponer de un margen de generación respecto a la demanda energética estimada.

3.3 Del objetivo 3: Evaluación del desempeño del sistema de bombeo fotovoltaico

3.3.1 Evaluación energética

A Identificación de los sistemas y fuentes energéticas

Se compararon dos sistemas de bombeo bajo las mismas condiciones hidráulicas, con una carga hidráulica total de 17.80 m y un volumen diario requerido de 2.18 m³, empleando en ambos la electrobomba MEDAS OB60 de 0.5 HP, cuyos componentes se detallan en la Tabla 39.

Tabla 39

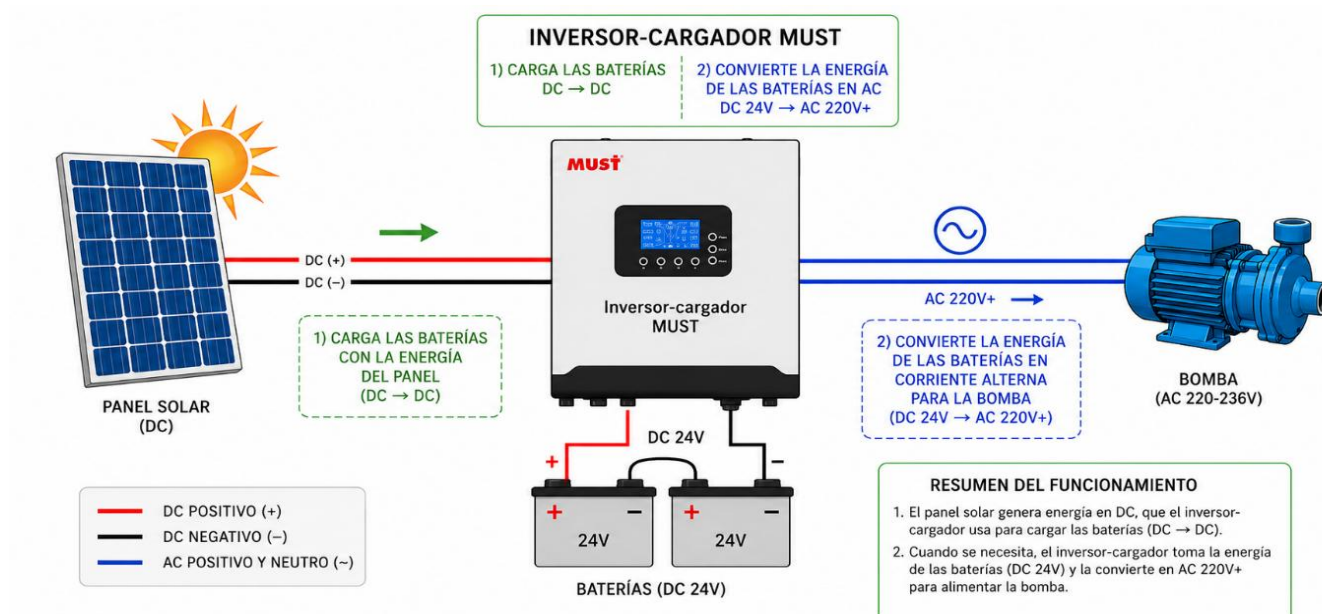
Componentes de los sistemas de bombeo evaluados

Componente	Sistema FV	Sistema CA
Electrobomba	MEDAS OB60 (0.5 HP)	MEDAS OB60 (0.5 HP)
Fuente energética	Paneles solares 540 Wp	Red eléctrica
Equipo de conversión	Inversor-cargador MUST	
Banco de baterías	4 baterías 12V/50Ah (2S-2P)	
Longitud de cable	1 m	100 m
Tensión de operación	236.4 V AC	226 V AC

Nota. Elaboración propia (2025).

Figura 53

Esquema de funcionamiento del sistema de bombeo fotovoltaico



Nota. Elaboración propia (2025).

Como se observa en la Figura 53 el inversor-cargador MUST cumple dos funciones: carga las baterías con la energía generada por los paneles (DC a DC) y convierte la energía almacenada en el banco de baterías de 24 V de corriente continua a corriente alterna de aproximadamente 220–236 V para alimentar la electrobomba.

B Medición y determinación de los parámetros eléctricos

Prueba 1: Arranque de la bomba y caída de tensión CA vs. SFV

Las Figuras 54 y 55 muestran la medición de voltaje en reposo para el sistema CA y SFV respectivamente, registrando 226 V y 236.4 V previo al arranque de la electrobomba. Las Figuras 56 y 57 evidencian la medición de voltaje y corriente durante el arranque de ambos sistemas.

Figura 54

Medición de voltaje durante la bomba apagada con sistema CA



Figura 55

Medición de voltaje durante la bomba apagada con SFV



Figura 56

Medición de voltaje y corriente al arranque con sistema CA



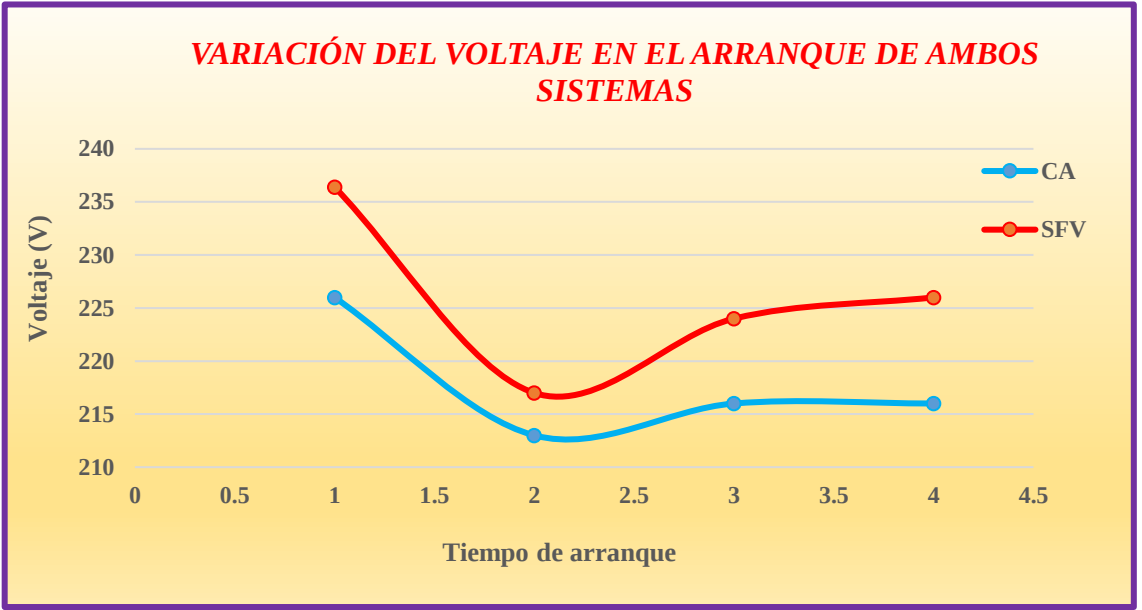
Figura 57

Medición de voltaje y corriente al arranque con sistema SFV



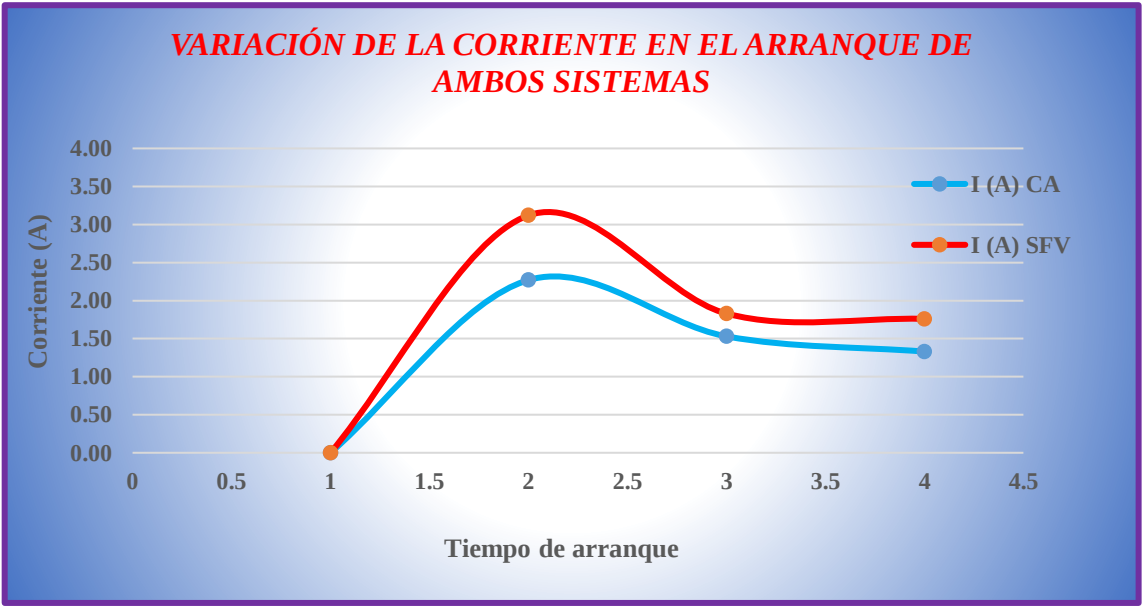
Aplicando la Ecuación 36, las Figuras 58 y 59 presentan la variación del voltaje y corriente durante el arranque de ambos sistemas, cuyos valores se resumen en la Tabla 40, evidenciando el pico de corriente inicial y la estabilización progresiva hasta el régimen permanente. Aplicando la Ecuación 35 se determinó la caída de tensión para cada sistema, presentada en la Tabla 41

Figura 58
Variación del voltaje al encendido con ambos sistemas



Nota. Valores obtenidos de mediciones en campo mediante multímetro digital Fluke 87V. Elaboración propia (2025).

Figura 59
Variación de la corriente al encendido con ambos sistemas



Nota. Valores obtenidos de mediciones en campo mediante pinza amperimétrica. Elaboración propia (2025).

Tabla 40*Voltajes medidos en campo para cada sistema*

Momento	Sistema	V (V)	I (A)	P = V×I (W)
Reposo	CA	226	0	0
Arranque (t = 0 s)	CA	213	2.27	483.51
30 s	CA	216	1.53	330.48
5 min	CA	216	1.33	287.28
10 min	CA	217	1.29	279.93
Reposo	SFV	236.4	0	0
Arranque (t = 0 s)	SFV	217	3.12	677.04
30 s	SFV	224	1.83	409.92
5 min	SFV	226	1.76	397.76
10 min	SFV	226	1.76	397.76

Nota. Datos obtenidos con multímetro digital Fluke 87V y pinza amperimétrica en campo.

En la Tabla 41 ambos sistemas cumplen con el límite normativo de $\Delta V\% \leq 3\%$ (CNE, 2006).

La caída de tensión para el sistema CA es de 0.88% y resulta ser 3.47 veces mayor que la del sistema SFV con 0.25%, diferencia atribuida a la mayor longitud del cable de 100 m del sistema convencional (Mott, 2015).

Tabla 41*Caída de tensión en el cableado de cada sistema*

Parámetro	CA (cable 100 m)	SFV (cable 1 m)
V entrada (V)	228	236.4
V bornes bomba (V)	226	235.8
ΔV	2	0.6
$\Delta V\%$	0.88%	0.25%
CNE $\leq 3\%$	Cumple	Cumple

Nota. Elaboración propia (2025).

Prueba 2: Variación horaria de la potencia del campo fotovoltaico

Se registró la potencia del campo fotovoltaico de 540 Wp entre las 09:00 y las 12:00 horas del mes crítico de febrero midiendo voltaje DC en bornes del panel como muestra la Figura 60 y corriente con pinza amperimétrica en el cable de entrada al inversor-cargador MUST, aplicando la Ecuación 36 se presentan los resultados en la Tabla 42.

Figura 60

Medición de voltaje DC en bornes del panel fotovoltaico



Nota. Multímetro digital Fluke 87V en modo DC. Elaboración propia (2025).

Tabla 42

Variación horaria de la potencia del campo fotovoltaico

Hora	V panel DC (V)	I panel (A)	P = V×I (W)	Condición climática
09:00	54.23	1.21	65.58	Despejado
09:30	57.88	1.68	97.10	Despejado
10:00	61.35	2.14	131.18	Despejado
10:30	64.12	2.48	158.97	Despejado
11:00	63.41	2.31	146.45	Parcialmente nublado
11:30	59.74	1.74	103.88	Nublado
12:00	65.28	2.61	170.17	Despejado
12:08	—	—	—	Baterías agotadas bomba detenida

Nota. Datos obtenidos en bornes del panel fotovoltaico mediante multímetro digital Fluke 87V y pinza amperimétrica.

La Tabla 42 muestra que la potencia del campo fotovoltaico alcanzó su valor máximo de 170.17 W a las 12:00 horas, deteniéndose el sistema a las 12:08 horas por agotamiento de las baterías de arranque automotriz, cuya capacidad real es inferior a la nominal por tratarse de unidades usadas.

C Cálculo de indicadores energéticos

Con el tiempo de operación diaria establecido de 3.14 h/día y los parámetros operativos del sistema se determinaron los indicadores energéticos de ambos sistemas de bombeo.

C.1 Energía consumida

Con los tiempos de operación determinados previamente de 4.33 h/día para el sistema CA y 3.14 h/día para el sistema SFV y aplicando la Ecuación 37:

Sistema CA:

$$E_{CA} = 0.373 \times 4.33 = 1.615 \text{ kWh/día}$$

Sistema SFV:

$$E_{SFV} = 0.373 \times 3.14 = 1.171 \text{ kWh/día}$$

C.2 Energía específica por volumen bombeado

Aplicando la Ecuación 38 de la metodología se obtuvo:

Sistema CA:

$$Ee_{CA} = \frac{1.615}{2.425} = 0.666 \text{ kWh/m}^3$$

Sistema SFV:

$$Ee_{SFV} = \frac{1.171}{2.179} = 0.537 \text{ kWh/m}^3$$

El sistema SFV requiere 0.129 kWh menos por metro cúbico bombeado respecto al sistema CA, resultado coherente con su mayor caudal de bombeo.

C.3 Energía hidráulica útil

Aplicando la Ecuación 40 de la metodología se determinó la energía hidráulica útil

Sistema CA:

$$E_{\text{útil}} = \frac{1000 \times 9.81 \times 2.425 \times 17.80}{3\,600\,000}$$

$$E_{\text{útil}} = 0.1176 \text{ kWh}$$

Sistema SFV:

$$E_{\text{útil}} = \frac{1000 \times 9.81 \times 2.179 \times 17.80}{3\,600\,000}$$

$$E_{\text{útil}} = 0.1057 \text{ kWh}$$

Aplicando la Ecuación 39 de la metodología se determinó la eficiencia:

Sistema CA:

$$n = \frac{0.1176}{1.615} \times 100$$

$$n = 7.28\%$$

Sistema SFV:

$$n = \frac{0.1057}{1.171} \times 100$$

$$n = 9.03\%$$

El rendimiento del sistema SFV fue 1.75% superior al CA, resultado coherente con su mayor voltaje de operación que genera mayor caudal de bombeo con menor tiempo de operación.

C.4 Emisiones de CO₂

Aplicando la Ecuación 41 de la metodología:

Sistema CA:

$$CO_{2CA} = 1.615 \times 0.4727$$

$$CO_{2CA} = 0.763 \text{ KgCO}_2/\text{día}$$

Sistema FV:

$$CO_{2SFV} = 0 \text{ KgCO}_2/\text{día}$$

El sistema fotovoltaico no genera emisiones de CO₂ al operar exclusivamente con energía solar, evitando 278.64 kgCO₂/año respecto al sistema convencional.

D Análisis comparativo

La Tabla 43 resume los indicadores para ambos sistemas y la variación porcentual de cada indicador es determinada mediante la Ecuación 42 se presenta en la Tabla 44.

Tabla 43

Resumen de indicadores energéticos para ambos sistemas

Indicador	Sistema CA	Sistema SFV
Tiempo de operación (h/día)	4.33	3.14
Volumen bombeado (m ³ /día)	2.425	2.179
Energía consumida (kWh/día)	1.615	1.171
Energía específica (kWh/m ³)	0.666	0.537
Energía hidráulica útil (kWh)	0.118	0.106
Rendimiento energético (%)	7.28	9.03
Emisiones CO ₂ (kg/día)	0.763	0.000

Nota: Elaboración propia (2025).

Tabla 44

Análisis comparativo de indicadores energéticos

Indicador	Δ (%)
Tiempo de operación (h/día)	-27.5
Volumen bombeado (m ³ /día)	-10.1
Energía consumida (kWh/día)	-27.5
Energía específica (kWh/m ³)	-19.4
Energía hidráulica útil (kWh)	-10.2
Rendimiento energético (%)	+24.0
Emisiones CO ₂ (kg/día)	-100.0

Nota. Δ (%) calculado respecto al sistema CA como referencia. Elaboración propia (2025).

El sistema SFV consumió 27.5% menos energía y presentó un rendimiento energético 24% superior al CA, siendo las emisiones de CO₂ la diferencia más significativa con una reducción del 100% equivalente a 278.64 kgCO₂/año.

3.3.2 *Discusión de la evaluación energética*

El sistema fotovoltaico consumió 27.5 % menos energía (1.171 frente a 1.615 kWh/día) y presentó un rendimiento energético superior (9.03 % frente a 7.28 %) respecto al sistema alimentado por corriente alterna. Estos resultados evidencian un mejor desempeño energético del sistema fotovoltaico bajo las condiciones evaluadas. De manera similar, Martínez Farías (2020) evaluó el desempeño de un sistema de bombeo solar mediante mediciones experimentales, considerando la interacción entre el sistema hidráulico y el sistema fotovoltaico. Asimismo, Sandia National Laboratories (1998) señala que el rendimiento energético depende del adecuado acoplamiento entre la demanda hidráulica y la capacidad de generación del sistema fotovoltaico.

El rendimiento global obtenido en ambos sistemas refleja las pérdidas presentes durante la conversión de energía eléctrica en energía hidráulica útil. De manera similar, Guarín Castro y Ruiz Avendaño (2022) compararon la energía consumida y la energía generada como parte de la evaluación del sistema fotovoltaico, verificando el comportamiento energético del diseño implementado. En la presente investigación, las diferencias observadas entre ambos sistemas responden a las características de operación de cada fuente de alimentación. Mott (2015) indica que el rendimiento del conjunto motor-bomba está influenciado por las pérdidas propias de sus componentes y por sus condiciones de funcionamiento.

La diferencia más significativa entre ambos sistemas radica en las emisiones de CO₂, donde el sistema FV eliminó completamente las emisiones operativas evitando 278.64 kgCO₂/año respecto al sistema convencional. Según el factor de emisión del SEIN publicado por MINEM (2023), cada kWh consumido de la red eléctrica genera 0.4727 kgCO₂, lo que convierte al sistema fotovoltaico en una alternativa de energía limpia que contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Perpiñán (2012) refuerza esta conclusión señalando que la energía solar constituye una alternativa sostenible para el abastecimiento hídrico en zonas rurales con acceso limitado a la red eléctrica convencional.

3.3.3 Evaluación operativa

A Medición del caudal de bombeo

Se realizaron cinco aforos volumétricos en el punto de llegada al tanque como muestra la Figura 61 y 62 para cada sistema durante su operación cuyos datos registrados se presentan en la Tabla 45.

Tabla 45

Aforos volumétricos realizados en cada sistema.

Medición	tiempo CA (s)	tiempo FV (s)
1	25.66	20.77
2	25.80	20.90
3	25.50	20.65
4	25.90	20.85
5	25.70	20.70
Promedio	25.71	20.77

Nota. Volumen aforado = 0.004 m³. Elaboración propia (2025).

Figura 61

Aforo volumétrico en el punto de llegada al tanque con sistema CA



Nota. Volumen aforado: 0.004 m³ cuyos datos de tiempo se muestran en la pizarra acrílica.

Figura 62

Aforo volumétrico en el punto de llegada al tanque con sistema SFV



Nota. Volumen aforado: 0.004 m³ cuyos datos de tiempo se muestran en la pizarra acrílica.

Con los tiempos promedio registrados y aplicando las Ecuaciones 6 se obtuvo:

Sistema CA:

$$Q_{CA} = \frac{0.004}{25.71}$$

$$Q_{CA} = 0.560 \text{ m}^3/\text{h}$$

Sistema FV:

$$Q_{FV} = \frac{0.004}{20.77}$$

$$Q_{FV} = 0.694 \text{ m}^3/\text{h}$$

El sistema fotovoltaico entregó un caudal 23.9% superior al sistema CA, diferencia coherente con el mayor voltaje de operación del sistema SFV (226 V vs 216 V) registrado en la Prueba 1. Las Figuras 57 y 58 muestran el registro fotográfico del aforo volumétrico realizado en campo para cada sistema.

B Medición de la presión de operación

La presión de operación de ambos sistemas se registró con el manómetro instalado en la línea de impulsión antes del tramo final de manguera hacia el tanque de almacenamiento tal como se aprecia en las Figuras 63 y 64. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 46 y aplicando la Ecuación 44 de la metodología se obtuvo la altura equivalente de presión para cada sistema:

Tabla 46

Presión de operación con CA vs SFV

<i>Sistema</i>	<i>Presión (bar)</i>	<i>Altura de presión (m.c.a.)</i>
<i>Sistema CA</i>	<i>1.2</i>	<i>12.23</i>
<i>Sistema FV</i>	<i>1.0</i>	<i>10.19</i>

Nota. Elaboración propia (2025).

Figura 63

Presión de operación registrada con corriente alterna



Figura 64
Presión de operación registrada con SFV



Los valores son inferiores a la HMT de 17.80 m dado que la medición se realizó antes del tramo final de manguera donde aún no se produjeron las pérdidas por fricción y accesorios. El sistema CA registró una presión 0.2 bar superior al SFV, equivalente a 2.04 m.c.a., coherente con la curva H-Q de la bomba donde a mayor caudal corresponde menor presión según Mott (2015).

C Tiempo de funcionamiento

C.1 Sistema con corriente alterna (CA)

Aplicando la Ecuación 45 de la metodología con el caudal real medido y el volumen diario requerido para el mes crítico de noviembre con un tiempo de funcionamiento constante de:

$$t_{CA} = \frac{2.18}{0.56}$$

$$t_{CA} = 3.89 \text{ horas}$$

Al ser una fuente continua y estable, este tiempo se mantiene constante en cualquier día del año independientemente de las condiciones climáticas, a diferencia del sistema fotovoltaico.

C.2 Sistema fotovoltaico (FV)

Aplicando la Ecuación 45 con el caudal real de 0.694 m³/h y el volumen diario requerido de 2.18 m³ correspondiente al mes crítico de noviembre resulta de 3.14 horas. Pero debido a que el funcionamiento del sistema FV depende directamente de la radiación solar se realizó un registro cronométrico durante cinco días consecutivos presentado en la Tabla 47.

Tabla 47

Registro del tiempo de llenado del tanque del SFV

Día	Fecha	Vol. bombeado (m ³)	T. inicio	T. fin	T. real (h)	Observación
1	16/02/25	2.18	09:00	12:11	3.18	Cielo despejado. Volumen completado.
2	17/02/25	1.27	09:00	10:49	1.83	Lluvia intensa desde las 10:47. Baterías agotadas. Volumen no completado.
3	18/02/25	2.18	09:00	12:22	3.37	Nubosidad parcial con dos interrupciones de ~15 min. Volumen completado con retraso.
4	19/02/25	1.80	09:00	11:35	2.59	Nubosidad persistente redujo recarga de baterías. Volumen no completado.
5	20/02/25	2.18	09:00	12:05	3.08	Cielo despejado. Volumen completado en tiempo óptimo.
Promedio		1.92			2.81	

Nota. Elaboración propia (2025).

Los días 1, 3 y 5 completaron 2.18 m³ entre 3.08 y 3.37 horas; los días 2 y 4 la lluvia y nubosidad interrumpieron el sistema antes de cubrir la demanda, registrando un promedio general de 1.92 m³ en 2.81 horas. Las Figuras 65, 66 y 67 evidencian las condiciones operativas en campo. El caudal promedio de 0.686 m³/h confirma que los 540 Wp instalados son suficientes para alimentar la electrobomba bajo condiciones normales de radiación.

Figura 65
Sistema fotovoltaico en operación día despejado



Figura 66
Interrupción del sistema por lluvia intensa



Figura 67
Llenado del tanque con el sistema FV



D Medición del abatimiento

El nivel del agua en el pozo se registra con wincha métrica durante el bombeo de ambos sistemas, verificando que el nivel dinámico no descendiera hasta la válvula check tipo canasta que se encarga de la succión ubicada a 0.20 m del fondo, tal como se muestra en la Figura 68 y 69 donde los resultados se presentan en las Tablas 48 y 49 y se compara en la Figura 70.

Tabla 48

Abatimiento del nivel del pozo con sistema CA

Tiempo (min)	Hora	Distancia borde (m)	Nivel agua (m)	Observación
0	09:00	0.15	1.15	Inicio bombeo
10	09:10	0.19	1.11	Operación normal
30	09:30	0.26	1.04	Operación normal
60	10:00	0.37	0.93	Operación normal
90	10:30	0.48	0.82	Operación normal
120	11:00	0.59	0.71	Operación normal
150	11:30	0.70	0.60	Operación normal
180	12:00	0.81	0.49	Operación normal
210	12:30	0.92	0.38	Operación normal
240	13:00	1.03	0.27	Nivel crítico (precaución)
260	13:20	1.10	0.20	Detener bomba

Nota. Descenso medido con wincha métrica con nivel límite de 0.20 m, así mismo el nivel límite corresponde a la profundidad de la válvula check tipo canasta instalada.

Figura 68

Medición del nivel dinámico del pozo con sistema CA



Tabla 49
Abatimiento del nivel del pozo con SFV

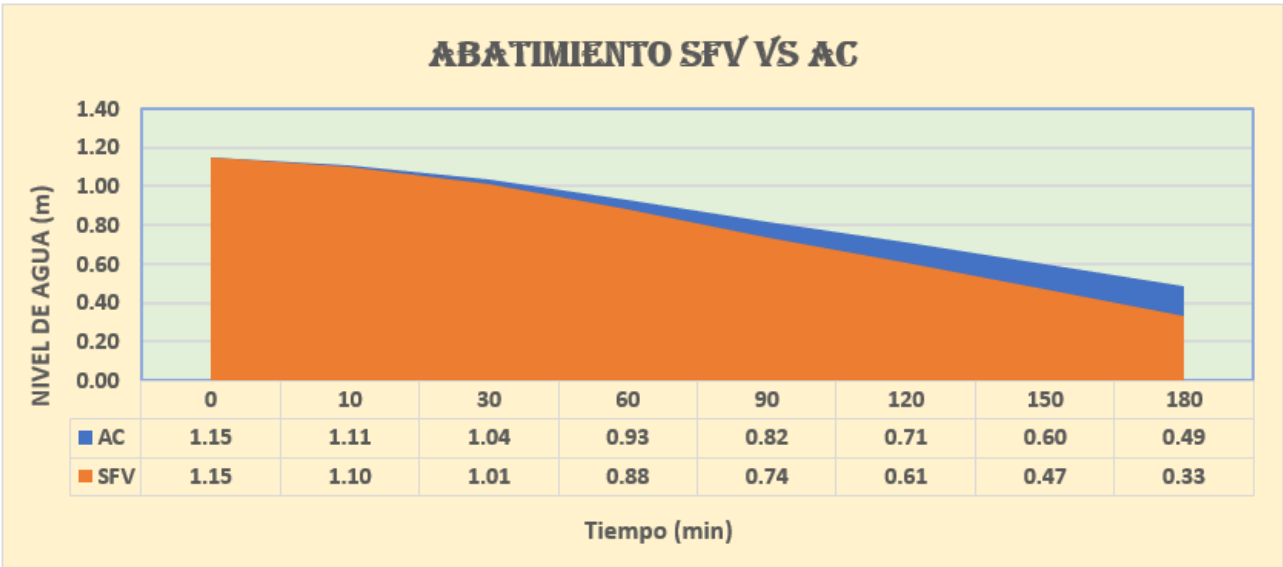
Tiempo (min)	Hora	Distancia borde (m)	Nivel agua (m)	Observación
0	09:00	0.15	1.15	Inicio bombeo
10	09:10	0.20	1.10	Operación normal
30	09:30	0.29	1.01	Operación normal
60	10:00	0.42	0.88	Operación normal
90	10:30	0.56	0.74	Operación normal
120	11:00	0.69	0.61	Operación normal
150	11:30	0.83	0.47	Operación normal
180	12:00	0.97	0.33	Baterías agotadas detener bomba

Nota. Descenso medido con wincha métrica. Sistema detenido por agotamiento de baterías antes de alcanzar el nivel límite de 0.20 m. Elaboración propia (2025).

Figura 69
Medición del nivel dinámico del pozo con SFV



Figura 70
Comparativa del abatimiento del SFV y AC



E Análisis comparativo operativo

Aplicando la Ecuación 42 de la metodología se determinó la variación porcentual de los parámetros operativos entre ambos sistemas presentados en la Tabla 50, cabe precisar que las labores de purgado e instalaciones previas a las pruebas garantizaron el correcto funcionamiento de ambos sistemas durante la evaluación.

Tabla 50
Análisis comparativo de parámetros operativos

Parámetro	Sistema CA	Sistema SFV	Δ (%)
Caudal promedio (m³/h)	0.560	0.694	+23.9
Presión de operación (bar)	1.2	1.0	-16.7
Tiempo para cubrir demanda (h/día)	3.89	3.14	-19.3
Abatimiento máximo (m)	0.95	0.82	-13.7

Nota. Δ (%) calculado respecto al sistema CA como referencia. Elaboración propia (2025).

3.3.4 *Discusión de la evaluación operativa*

El sistema fotovoltaico registró un caudal de 0.694 m³/h, superior al obtenido con el sistema alimentado por corriente alterna (0.560 m³/h). Asimismo, el sistema de corriente alterna presentó una presión de operación ligeramente mayor (1.2 frente a 1.0 bar). Estas diferencias reflejan el comportamiento operativo de ambos sistemas bajo las condiciones de evaluación. De manera similar, Martínez Farías (2020) verificó experimentalmente el desempeño de un sistema de bombeo solar mediante mediciones de caudal y condiciones de operación, mientras que Mott (2015) señala que el punto de funcionamiento de una bomba depende de la interacción entre la curva característica de la bomba y las condiciones hidráulicas del sistema.

Durante la evaluación, el sistema de corriente alterna mantuvo un funcionamiento continuo durante 3.89 horas para cubrir la demanda diaria de agua. En el sistema fotovoltaico se observaron variaciones en el tiempo de bombeo asociadas a las condiciones de radiación solar durante los días de evaluación. No obstante, en los cinco días analizados el sistema logró abastecer la demanda diaria del vivero (2.18 m³) en tiempos comprendidos entre 3.08 y 3.37 horas, evidenciando un funcionamiento adecuado bajo las condiciones climáticas registradas. De manera similar, Lara Yévenes (2007) y Guarín Castro y Ruiz Avendaño (2022) reportan que el desempeño operativo de los sistemas de bombeo fotovoltaico depende de la disponibilidad del recurso solar durante su funcionamiento.

3.3.5 Evaluación económica

Para la evaluación económica se consideró una configuración comercial optimizada del sistema fotovoltaico. Si bien durante la implementación experimental se utilizó un inversor-cargador MUST de 3000 W, para el análisis económico se seleccionó un inversor-cargador MUST de 800 W/12 V y una batería gel de 12 V y 100 Ah, por ser componentes técnicamente suficientes para los requerimientos energéticos de la electrobomba de 0.5 HP y representar una alternativa de menor costo de inversión. Las especificaciones técnicas de los equipos considerados se presentan en el Anexo 7.

A Presupuesto de inversión inicial

Se determinó a partir de cotizaciones del mercado nacional considerando los componentes correctamente dimensionados según el Objetivo 2 con un inversor MUST 800W/12V y batería gel CSBattery 12V/100Ah así diferenciándose de los equipos de prueba utilizados en el Objetivo 3.

A.1 Sistema Fotovoltáico (FV)

Los componentes y costos del SFV se presentan en la Tabla 51, la batería gel CSBattery 12V/100Ah con vida útil de 12 a 15 años según ficha técnica, como se muestra en la Figura 71 y 72.

Tabla 51
Presupuesto de inversión inicial sistema FV

Componente	Und	Cant	C. unitario (S/.)	C. total (S/.)
Paneles SunshineSolar MONO HZS-180W	und	3	300.00	900.00
Inversor-cargador MUST Solar 800W/12V	und	1	810.54	810.54
Batería gel CSBattery 12V/100Ah	und	1	583.00	583.00
Electrobomba periférica 0.5 HP	und	1	160.00	160.00
Accesorios hidráulicos	glb	1	150.00	150.00
Cableado eléctrico	glb	1	50.00	50.00
Mano de obra instalación	glb	1	300.00	300.00
TOTAL				S/. 2,953.54

Nota. Precios de cotización en mercado. Elaboración propia (2025).

A.2 Sistema con Corriente Alterna (CA)

Los componentes y costos del sistema CA se presentan en la Tabla 52.

Tabla 52

Presupuesto de inversión inicial sistema CA

Componente	Und	Cant	C. unitario (S/.)	C. total (S/.)
Electrobomba periférica 0.5 HP	und	1	160.00	160.00
Accesorios hidráulicos	glb	1	150.00	150.00
Cable extensión 100m	und	1	100.00	100.00
Mano de obra instalación	glb	1	200.00	200.00
TOTAL				S/. 610.00

Nota. Precios según cotización del mercado local (2025)

La inversión inicial del SFV es de S/. 2,953.54 superando a la del sistema CA de S/. 610.00 en S/. 2,343.54, diferencia atribuida principalmente al costo de los paneles solares, inversor-cargador y batería de gel. Esta mayor inversión se compensa con la eliminación del costo energético durante los 25 años de vida útil del proyecto.

B Costos de operación y mantenimiento anual

La vida útil del proyecto se estableció en 25 años, conforme a lo establecido por Chenlo Romero (2014), quien señala que los paneles fotovoltaicos monocristalinos garantizan al menos el 80% de su potencia nominal durante ese periodo. Los años de vida útil estimada de cada componente adoptados para la proyección económica se presentan en la Tabla 53

Tabla 53

Vida útil estimada de los componentes del SFV

Componente	Vida útil estimada
Paneles solares	25 años
Inversor-cargador	10 años
Electrobomba periférica	5 años
Baterías de gel	10 años

Nota. Adaptado de Chenlo Romero (2014) y Sandia National Laboratories (1998) datos extraídos de Fichas técnicas de los componentes en Anexo 7.

B.1 Sistema con Corriente Alterna (CA)

Con la energía consumida de 1.615 kWh/día y la tarifa eléctrica de S/. 0.8894/kWh, valor registrado en el recibo de consumo del vivero municipal mostrada en el Anexo 7, aplicando la Ecuación 48 se obtiene.

$$C_{energía} = 1.615 \times 0.8894 \times 365$$

$$C_{energía} = S/. 524.28 /año$$

Consideró un incremento anual del 3% se expresa de la siguiente manera:

$$C_{energía} = S/. 524.28 \times (1.03)^{n-1}$$

Adicionalmente se consideró un costo de mantenimiento anual de S/. 100.00 correspondiente a actividades de revisión, limpieza y reemplazo de componentes menores según (Sandia National Laboratories, 1998) y los costos se resumen en la Tabla 54.

Tabla 54

Costos de operación y mantenimiento del sistema CA

Concepto	Costo	Observación
Costo energético	S/. 524.28	Anual durante 25 años
Mantenimiento preventivo	S/. 100.00	Anual durante 25 años
Reemplazo electrobomba MEDAS OB60	S/. 160.00	Cada 5 años
Total anual base	S/. 624.28	

Nota. Elaboración propia (2025).

B.2 Sistema Fotovoltaico (FV)

Al operar exclusivamente con energía solar el sistema FV no genera costo energético anual considerándose únicamente un mantenimiento preventivo de S/. 100.00/año correspondiente a limpieza de paneles, revisión de conexiones y verificación del inversor-cargador (Sandia National Laboratories, 1998), cuyos costos se resumen en la Tabla 55. Frente al costo operativo del sistema CA de S/. 624.28/año, el sistema FV representa un ahorro anual de S/. 524.28, que constituye el beneficio económico base para el cálculo de los indicadores de rentabilidad.

Tabla 55*Costos de operación y mantenimiento del SFV*

Concepto	Costo	Observación
Mantenimiento preventivo	S/. 100.00	Anual durante 25 años
Reemplazo electrobomba periférica 0.5 HP	S/. 160.00	Cada 5 años
Reemplazo inversor-cargador MUST 800W	S/. 810.54	Cada 10 años
Reemplazo batería gel CSBattery 12V/100Ah	S/. 583.00	Cada 10 años
Total anual base	S/. 100.00	Sin considerar reemplazos

Nota. Elaboración propia (2025).**C Indicador de rentabilidad**

Para determinar los indicadores de rentabilidad se construyó el flujo de caja del sistema fotovoltaico a lo largo de los 25 años de vida útil del proyecto, considerando la inversión inicial, el ahorro energético anual como beneficio y los costos de mantenimiento y reemplazos programados como egresos. Los parámetros base se presentan en la Tabla 56

Tabla 56*Parámetros base para el flujo de caja*

Parámetro	Valor
Inversión inicial FV	S/. 2,953.54
Inversión inicial CA	S/. 610.00
Ahorro energético anual base	S/. 524.28
Costo mantenimiento anual FV	S/. 100.00
Flujo de caja anual neto base	S/. 424.28
Incremento tarifario anual	3%
Tasa de descuento	12%
Vida útil	25 años

Nota. Tasa de descuento adoptada conforme a la Directiva General del Sistema Nacional de Inversión Pública del MEF (2011), que establece una tasa social de descuento nominal del 12% para evaluaciones a precios corrientes

El flujo de caja proyectado a 25 años se presenta en la Tabla 57 incluyendo los reemplazos programados según la Tabla 53. El comportamiento anual del ahorro energético y egresos del sistema se muestran en la Figura 71.

Tabla 57

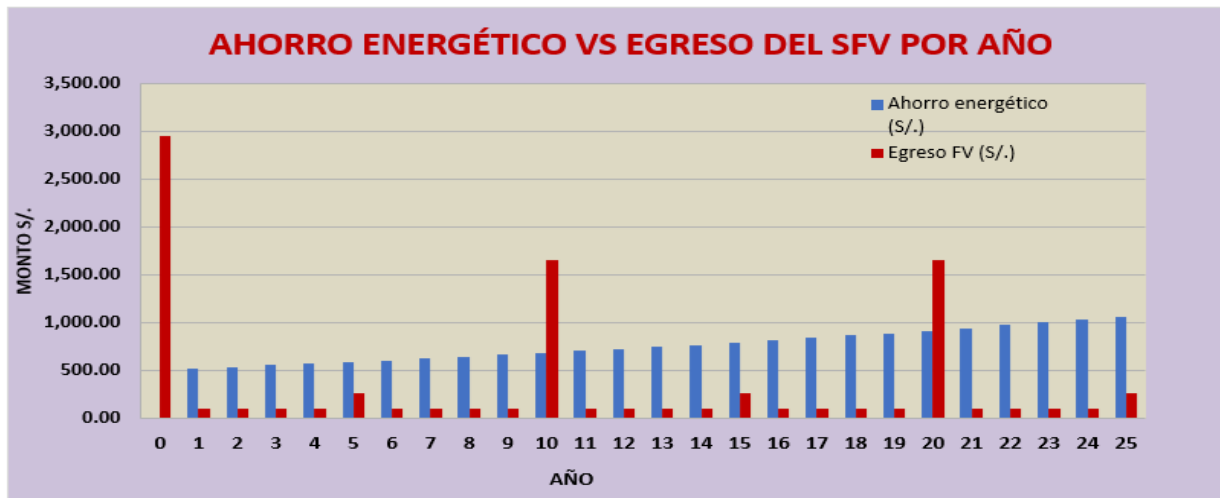
Flujo de caja del SFV con un incremento tarifario del 3% anual

Año	Tarifa (S/./kWh)	Ahorro energético (S/.)	Egreso (S/.)	FV	Flujo neto (S/.)	Flujo acumulado (S/.)
0	—	—	2,953.54		-2,953.54	-2,953.54
1	0.8894	524.28	100.00		424.28	-2,529.26
2	0.9161	540.01	100.00		440.01	-2,089.25
3	0.9436	556.21	100.00		456.21	-1,633.04
4	0.9719	572.89	100.00		472.89	-1,160.15
5	1.0010	590.08	260.00		330.08	-830.07
6	1.0311	607.78	100.00		507.78	-322.29
7	1.0620	626.02	100.00		526.02	203.73
8	1.0938	644.80	100.00		544.80	748.53
9	1.1267	664.14	100.00		564.14	1,312.67
10	1.1605	684.07	1,653.54		-969.47	343.20
11	1.1953	704.59	100.00		604.59	947.79
12	1.2311	725.73	100.00		625.73	1,573.52
13	1.2681	747.50	100.00		647.50	2,221.02
14	1.3061	769.92	100.00		669.92	2,890.94
15	1.3453	793.02	260.00		533.02	3,423.96
16	1.3857	816.81	100.00		716.81	4,140.77
17	1.4272	841.32	100.00		741.32	4,882.09
18	1.4700	866.55	100.00		766.55	5,648.64
19	1.5141	892.55	100.00		792.55	6,441.19
20	1.5596	919.33	1,653.54		-734.21	5,706.98
21	1.6064	946.91	100.00		846.91	6,553.89
22	1.6545	975.32	100.00		875.32	7,429.21
23	1.7042	1,004.57	100.00		904.57	8,333.78
24	1.7553	1,034.71	100.00		934.71	9,268.49
25	1.8080	1,065.75	260.00		805.75	10,074.24

Nota. Inversión neta = diferencia entre inversión FV (S/. 2,953.54) y CA (S/. 610.00). Ahorro energético con incremento tarifario del 3% anual.

Figura 71

Ahorro energético y egreso del sistema fotovoltaico por año



A partir del flujo de caja proyectado a 25 años presentado en la Tabla 57, se calcularon los indicadores de rentabilidad en el siguiente orden:

C.1 Valor Actual Neto (VAN)

Aplicando la Ecuación. 10 con tasa de descuento del 12% y vida útil de 25 años:

$$VAN = -2,953.54 + \sum_{t=1}^{25} \frac{F_t}{(1 + 0.12)^t}$$

$$VAN = 663.36$$

Conforme a los criterios de decisión establecidos en la Tabla 1, el VAN positivo de S/. 663.36 indica que el proyecto es económicamente viable, dado que los beneficios económicos descontados superan la inversión inicial durante el horizonte de evaluación de 25 años.

C.2 Tasa interna de retorno (TIR)

Con la Ecuación 11 mediante un proceso iterativo hasta encontrar la tasa que hace el VAN igual a cero se obtiene.

$$TIR = 14.78 \%$$

Conforme a los criterios de la Tabla 2, la TIR de 14.78 % supera la tasa de descuento del 12%, confirmando que el proyecto genera una rentabilidad superior al costo de oportunidad del capital y ratificando su viabilidad económica.

C.3 Período de Recuperación

Del flujo de caja acumulado se observa que entre el año 6 y 7 el flujo pasa de -S/. 322.29 a +S/. 203.73. Para determinar se aplicó la Ecuación 12:

$$Payback = 6 + \frac{322.29}{526.02}$$

$$Payback = 6.61 \text{ años}$$

Se obtuvo un periodo de recuperación de 6.61 equivalente a 6 años y 7 meses, como se observa en la Figura 72, el flujo acumulado se vuelve positivo, confirmando la recuperación de la inversión inicial. Este período representa el 26.4 % de la vida útil del proyecto e indica que los 18 años y 5 meses restantes que el sistema opera generando beneficios netos sin costo energético. Los principales indicadores de rentabilidad se resumen en la Tabla 58.

Figura 72

Flujo de caja acumulado del sistema fotovoltaico durante 25 años

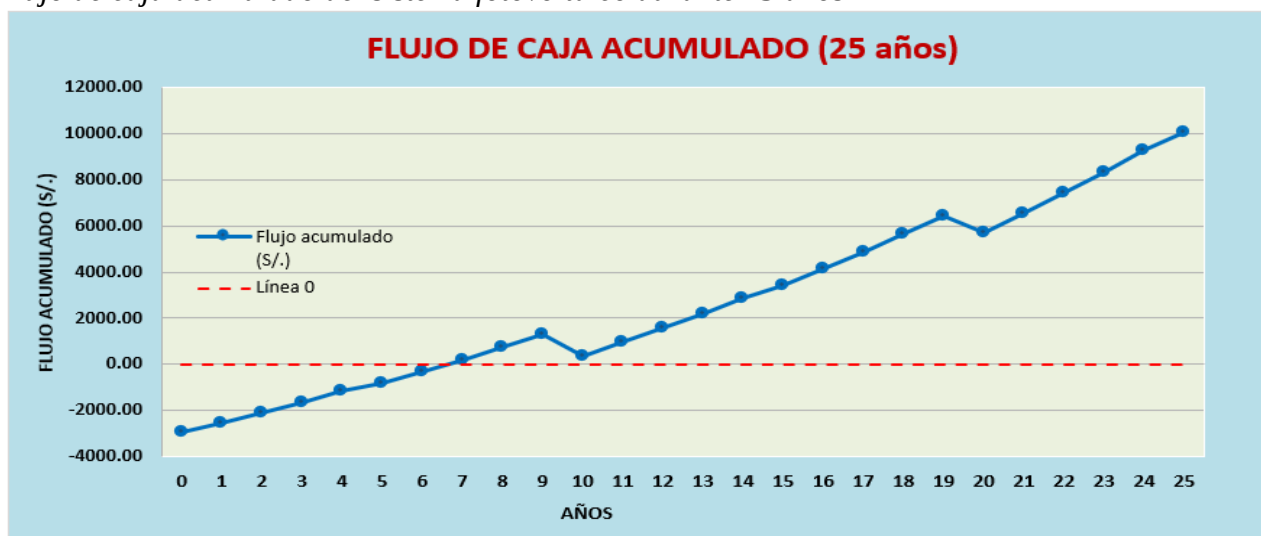


Tabla 58

Resumen de indicadores de rentabilidad

Indicador	Valor	Criterio	Interpretación
VAN	S/. 663.36	> 0	Proyecto económicamente viable
TIR	14.78 %	> 12%	Proyecto rentable
Payback	6.61 años	< 25 años	Inversión recuperada en 6 años y 7 meses

Nota. Elaboración propia (2025).

D Análisis comparativo económico

Con los indicadores económicos obtenidos se realizó la comparación entre ambos sistemas durante los 25 años de vida útil del proyecto. Los resultados se presentan en la Tabla 59

Tabla 59

Análisis comparativo económico entre sistemas

Parámetro	Sistema CA	Sistema FV
Inversión inicial (S/.)	610.00	2,953.54
Costo energético año 1 (S/.)	524.28	0.00
Costo mantenimiento anual (S/.)	100.00	100.00
Costo total acumulado 25 años (S/.)	23,024.86	9,040.62
Ahorro generado 25 años (S/.)	—	14,767.78
VAN (S/.)	—	663.36
TIR (%)	—	14.78
Periodo de recuperación (años)	—	6.61

Nota. Costo total CA incluye energía con incremento del 3% anual, mantenimiento y reemplazos de bomba.

El sistema fotovoltaico requiere una mayor inversión inicial de S/. 2,953.54 mientras que el sistema convencional de S/. 610.00; sin embargo, durante los 25 años de evaluación presenta un menor costo total acumulado de S/. 9,040.62, generando un ahorro económico de S/. 14,767.78. Además, los indicadores financieros obtenidos VAN = S/. 663.36, TIR = 14.78 % y período de recuperación con 6.61 años (6 años con 7 meses) confirman la viabilidad económica del proyecto, al presentar un VAN positivo, una TIR superior a la tasa de descuento del 12 % y recuperar la inversión dentro de la vida útil del sistema.

3.3.6 *Discusión de la evaluación económica*

Los resultados obtenidos demuestran que el sistema fotovoltaico constituye una alternativa económicamente viable para el abastecimiento de agua de riego. A pesar de requerir una inversión inicial de S/. 2,953.54, el proyecto obtuvo un VAN de S/. 663.36, una TIR de 14.78 %, superior a la tasa de descuento del 12 %, y un período de recuperación de 6.61 años, lo que evidencia que la inversión es recuperable y genera beneficios económicos durante la vida útil del sistema.

Estos resultados coinciden con Pérez (2019), quien concluyó que la implementación de sistemas de bombeo fotovoltaico para riego agrícola es económicamente rentable debido a que el mayor costo inicial se compensa con la reducción de los costos de operación y mantenimiento. Al igual que en la presente investigación, el autor obtuvo indicadores financieros favorables que respaldan la viabilidad económica del uso de energía solar para el bombeo de agua. No obstante, las diferencias entre los indicadores financieros de ambos estudios responden a las características particulares de cada proyecto, como la capacidad del sistema, la demanda hídrica, la potencia de la bomba y los costos de implementación.

De igual manera Zegarra (2021) obtuvo un VAN de S/. 24,952.54 y un período de recuperación de 14 años, confirmando también la viabilidad económica de un sistema fotovoltaico. Sin embargo, dichos valores corresponden a un proyecto de mayor escala, con una inversión aproximada de S/. 127,892.15, significativamente superior a la de la presente investigación. Esta diferencia explica que, en el caso del vivero municipal, la inversión se recupere en un menor tiempo, manteniendo resultados económicos favorables.

La comparación con ambos antecedentes confirma que la rentabilidad de un sistema fotovoltaico depende principalmente de las condiciones propias de cada proyecto, como la demanda de agua, la capacidad de los equipos y la inversión requerida. No obstante, los resultados coinciden en que el aprovechamiento de la energía solar reduce los costos de operación y constituye una alternativa económica y sostenible para sistemas de bombeo de agua destinados al riego.

Conclusiones

Conclusión objetivo específico 1:

Se caracterizaron las condiciones climáticas, topográficas e hidrológicas del vivero municipal de Huamanga, determinándose una demanda hídrica máxima de $2.18 \text{ m}^3/\text{día}$ en el mes de noviembre, calculada a partir de coeficientes de cultivo medidos experimentalmente en campo. La oferta hídrica del puquial con caudal mínimo de $9.90 \text{ m}^3/\text{día}$ garantiza el abastecimiento continuo durante todo el año, con un superávit mínimo de $238.74 \text{ m}^3/\text{mes}$ confirmado mediante el balance hídrico mensual. El análisis de sostenibilidad hídrica determinó una relación recarga/extracción de 7.88 y un balance positivo acumulado de $+109,479.58 \text{ m}^3$ a 20 años, confirmando la viabilidad del recurso hídrico durante toda la vida útil del proyecto.

Conclusión objetivo específico 2:

Se diseñó el sistema de bombeo fotovoltaico con caudal de diseño de $0.484 \text{ m}^3/\text{h}$ y HMT de 17.80 m. La electrobomba MEDAS OB60 de 0.5 HP entregó un caudal real de $0.694 \text{ m}^3/\text{h}$, cubriendo 2.18 m^3 en 3.14 horas dentro de las 4.53 HSP disponibles. El campo fotovoltaico comprende tres paneles SunshineSolar MONO HZS-180W 540 Wp, utilizándose un inversor-cargador MUST 3,000W en calidad de préstamo durante la prueba; para implementación definitiva se recomienda el MUST 800W/12V con batería gel CSBattery 12V/100Ah según el dimensionamiento del Objetivo 2.

Conclusión objetivo específico 3:

La evaluación comparativa demostró que el sistema fotovoltaico (SFV) presentó un mejor desempeño energético, operativo y económico que el sistema de corriente alterna (CA). El SFV registró un menor consumo energético, un mayor rendimiento, evitó la emisión de $278.64 \text{ kgCO}_2/\text{año}$ y suministró un caudal de $0.694 \text{ m}^3/\text{h}$, superior al sistema convencional ($0.560 \text{ m}^3/\text{h}$). Asimismo, el análisis económico confirmó su viabilidad al obtener un VAN de S/. 663.36, una TIR de 14.78 % y un período de recuperación de la inversión de 6 años y 7 meses, respaldando su implementación para el riego del vivero municipal.

Conclusión general:

La implementación del sistema de bombeo solar fotovoltaico en el vivero municipal de Huamanga garantiza un suministro hídrico eficiente y sostenible, demostrando ser técnicamente viable, operativamente funcional y económicamente rentable frente al sistema convencional de corriente alterna, constituyendo una alternativa de energía limpia replicable en proyectos similares de la región Ayacucho.

Recomendaciones

1. Sustituir las baterías de arranque automotriz utilizadas durante la evaluación por 2 baterías de gel CSBattery 12V/100Ah conectadas en serie, obteniendo 24V/100Ah con una vida útil de 12-15 años, lo que permitirá extender la autonomía del sistema más allá de las 3.14 horas actuales y garantizar el abastecimiento completo en días con nubosidad o lluvia.
2. Implementar un sistema de monitoreo remoto mediante datalogger o aplicación móvil conectada al inversor-cargador MUST, para registrar en tiempo real los parámetros de generación solar, estado de baterías y caudal de bombeo, facilitando el mantenimiento preventivo del sistema.
3. Replicar el sistema de bombeo fotovoltaico en otros viveros municipales de la región Ayacucho con condiciones similares de recurso hídrico y solar, aprovechando la experiencia adquirida en el presente proyecto como modelo de referencia técnica y económica.
4. Realizar el mantenimiento preventivo del campo fotovoltaico cada 3 meses, incluyendo limpieza de paneles, revisión de conexiones eléctricas y verificación del estado de las baterías, para mantener el rendimiento del sistema dentro del rango de diseño.
5. Ampliar el área de riego del vivero municipal incorporando los meses de mayor oferta hídrica del puquial, dado que la relación recarga/extracción de 7.88 indica una disponibilidad hídrica significativamente superior a la demanda actual de 2.18 m³/día.

Referencias bibliográficas

- Agrolab, M. (2026). *Análisis de agua N° 1151047 Puquial Vivero MPH*. Peru, Ayacucho.
- Arangurí Cayetano, D. J. (2026). *Dimensionamiento de sistema de bombeo solar fotovoltaico para riego*. Chimbote: ECAP Ingeniería SRL.
- Baca Urbina, G. (2013). *Evaluación de proyectos*. México: McGraw-Hill.
- Bragado Alcaraz, R. (2 de Febrero de 2018). *Tiloom*. Obtenido de <https://www.tiloom.com/bombeos-iii-curva-resistente-del-sistema/>
- Chapman, S. J. (2012). *Máquinas eléctricas*. McGraw-Hill.
- Chenlo Romero, F. (2014). *Sistema de bombeo fotovoltaico*. Madrid: EOI Escuela de Organización Industrial. Obtenido de <https://www.eoi.es/sites/default/files/savia/documents/componente45332.pdf>
- CNE. (2006). *Código Nacional de Electricidad Utilización*. Lima: Ministerio de Energía y Minas. Obtenido de <https://www.pqsperu.com/Descargas/Normas%20Legales/CNE.pdf>
- FAO. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Obtenido de <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>
- Farias, C. A. (2020). *Diseño de sistema de bombeo a base de energía solar para suministro de agua*. Veracruz. Obtenido de https://www.uv.mx/veracruz/miaplicada/files/2021/07/Tesis_Carlos-Alberto-Martinez-Farias.pdf
- Flores, M. H. (2019). *Diseño de un generador fotovoltaico para riego (tesis para título, universidad nacional del centro del Perú)*. repositorio. Obtenido de <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/5376>
- García, k. H. (2022). *Diseño de un sistema de riego automático bajo la metodología penman monteith para reducir el dispendio hídrico en vilcacoto*. Huancayo. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12894/8322>

- Guarín, W. E., & Ruiz, J. J. (2022). *Diseño de un sistema fotovoltaico de riego para la empresa agrícola Cactus S.A (tesis título, Universidad Antonio Nariño)*. repositorio digital. Obtenido de https://repositorio.uan.edu.co/bitstream/123456789/6803/3/TIG_WilverGuarin_JorgeRuiz_IEM.pdf
- Lara, F. A. (2007). *Diseño de un sistema de riego por medio de energía (tesis título, universidad austral de chile)*. repositorio. Obtenido de <https://www.academia.edu/download/48736696/bmfcl318d.pdf>
- Lorenzo Pigueiras, E. (1994). *Electricidad Solar: Ingeniería de los sistemas fotovoltaicos*. Madrid: PROGENSA.
- MEF. (2011). *Directiva General del Sistema Nacional de Inversión Pública*. Lima: Ministerio de Economía y Finanzas.
- MINEM. (2023). *Factor de emisión de CO₂ del SEIN*. Lima: Ministerio de Energía y Minas.
- Mott, R. L. (2015). *Mecánica de fluidos*. México: Pearson Educación.
- NASA POWER. (2025). *POWER Data Access Viewer*. Obtenido de <https://power.larc.nasa.gov/>
- Pérez, M. O. (2019). *bombeo de agua del río alameda con energía solar fotovoltaica para cultivar hortalizas en la comunidad campesina de totora – jesús nazareno - huamanga – ayacucho(tesis para título, universidad nacional san cristobal de huamanga)*. Obtenido de <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/3598>
- Perpiñán Lamigueiro, O. (2012). *Energía Solar Fotovoltaica*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Obtenido de <https://oscarperpinan.github.io/esf/>
- Sandia National Laboratories. (1998). *Guía de Bombeo de Agua*. 109. Obtenido de <https://ecotec.unam.mx/wp-content/uploads/Guia-Bombeo-Agua-Energia-Fotovoltaica-Vol1-Libro-de-consulta.pdf>

- Sapag Chain, N., & Sapag Chain, R. (2014). *Preparación y evaluación de proyectos*. Santiago de Chile: McGraw-Hill.
- Vásquez, A., Vásquez, I., Vásquez, C., & Cañamero, M. (2017). *Fundamentos de la ingeniería de riegos*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina. Obtenido de <https://www.casadelriegoecuador.com/wp-content/uploads/2020/09/Ingenier%C3%ADa-de-Riegos-ABSALON.pdf>
- Villón Béjar, M. (2002). *Hidrología*. Peru, Lima. Obtenido de https://www.academia.edu/94279341/HIDROLOG%C3%8DA_ESTADISTICA_M%C3%A1ximo_Vill%C3%B3n_B%C3%A9jar
- Zegarra, J. c. (2021). *implementación de un sistema fotovoltaico para reducir el consumo de energía convencional en un sistema de riego tecnificado por aspersión en el estadio municipal César Flores Marigorda de Lambayeque (tesis para título, universidad Pedro Ruiz Gallo)*. repositorio. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12893/9879>

Anexos

- Anexo 1:** Caracterización climática
- Anexo 2:** Caracterización topográfica
- Anexo 3:** Caracterización hidrológica
- Anexo 4:** Caracterización agrológica
- Anexo 5:** Cálculo de pérdidas por fricción y accesorios
- Anexo 6:** Determinación del punto de operación de la bomba
- Anexo 7:** Fichas técnicas de componentes del sistema fotovoltaico

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS
Bach. POL ANDERSON OGOSI SULCA
R.D. N° 338-2026-UNSCH-FCA-D

En la ciudad de Ayacucho, a los siete días del mes de agosto del año dos mil veintiséis, siendo las once horas, se reunieron en el auditorio de la Facultad de Ciencias Agrarias, bajo la presidencia del Dr. Felipe Escobar Ramírez Decano de la Facultad de Ciencias Agrarias; los miembros del jurado conformado por el M.Sc. Federico Quicaño Suárez, Mtro. Carlos Augusto Castañeda Esquén como asesor, Mtro. José Antonio Luna Guerra y el Ing. John Samuel Cazorla Orihuela; actuando como secretario de actas el Mtro. Rodolfo Alca Mendoza, para recibir la sustentación de la Tesis titulado: **Sistema de bombeo fotovoltaico para abastecimiento de agua al vivero municipal de Huamanga, Huatatas, San Juan Bautista, Ayacucho**, para obtener el Título Profesional de Ingeniero Agrícola, presentado por el Bachiller **POL ANDERSON OGOSI SULCA**.

El señor Decano previa verificación de los documentos exigidos solicitó se proceda con la sustentación y posterior defensa de la tesis en un periodo de cuarenta y cinco minutos de acuerdo al reglamento de grados y títulos vigente. Terminado la exposición, los miembros del Jurado, formularon sus preguntas, aclaraciones y/o observaciones correspondientes. Luego se invitó a los miembros del jurado pasar a otra aula para la deliberación y calificación del trabajo de tesis, teniendo el siguiente resultado:

Jurado evaluador	Exposición	Respuestas a las preguntas	Generación de conocimiento	Promedio
M.Sc. Federico Quicaño Suárez	15	16	16	16
Mtro. Carlos Augusto Castañeda Esquén	17	17	17	17
Mtro. José Antonio Luna Guerra	18	17	18	18
Ing. John Samuel Cazorla Orihuela	16	14	16	15
PROMEDIO GENERAL				17

Acto seguido se invita a la sustentante y público en general para dar a conocer el resultado final. Firman el acta.


.....
M.Sc. Federico Quicaño Suárez
Presidente


.....
Mtro. Carlos Augusto Castañeda Esquén
Asesor


.....
Mtro. José Antonio Luna Guerra
Jurado


.....
Ing. John Samuel Cazorla Orihuela
Jurado


.....
Mtro. Rodolfo Alca Mendoza
Secretario Docente

CONSTANCIA DE CONTROL DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE TESIS

El que suscribe, miembro de la comisión de docentes instructores responsables de operativizar, verificar, garantizar y controlar la originalidad de los trabajos de **TESIS** de la Facultad de Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, autorizado por R.D N°213-2025-UNSCH-FCA-D; hace constar que el trabajo titulado;

Sistema de bombeo fotovoltaico para abastecimiento de agua al vivero municipal de Huamanga, Huatatas, San Juan Bautista, Ayacucho

Autor : Pol Anderson OGOSI SULCA
Asesor : Carlos Augusto CASTAÑEDA ESQUÉN

Ha sido sometido al control de originalidad mediante el software TURNITIN UNSCH, acorde al Reglamento de originalidad de trabajos de tesis, aprobando mediante de RCU N°039-2021-UNSCH-CU, arrojando un resultado de seis por ciento (**6 %**) de índice de similitud, realizado con **depósito de trabajo estándar**.

En consecuencia, se otorga la presente Constancia de Originalidad para los fines pertinentes.

Nota: Se adjunta el resultado con identificador de la entrega: 3012546483.

Ayacucho, 14 de agosto de 2026



.....
Sandra del Aguila Rios
Ph. D. en Recursos Hídricos
E.P. Ingeniería Agrícola
Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga

Sistema de bombeo fotovoltaico para abastecimiento de agua al vivero municipal de Huamanga, Huatatas, San Juan Bautista, Ayacucho

por Pol Anderson Ogoši Sulca

Sistema de bombeo fotovoltaico para abastecimiento de agua al vivero municipal de Huamanga, Huatatas, San Juan Bautista, Ayacucho

INFORME DE ORIGINALIDAD

6%	7%	3%	2%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
2	repositorio.continental.edu.pe Fuente de Internet	<1%
3	repositorio.upa.edu.pe Fuente de Internet	<1%
4	www.uv.mx Fuente de Internet	<1%
5	pt.scribd.com Fuente de Internet	<1%
6	idoc.pub Fuente de Internet	<1%
7	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.uancv.edu.pe Fuente de Internet	<1%
9	repositorio.usm.cl Fuente de Internet	<1%
10	livrosdeamor.com.br Fuente de Internet	<1%
11	Sanca Benique, Oscar Fredy. "Sistema de bombeo de agua potable usando energía solar fotovoltaica con el software Franklin Electric en la comunidad de Villacucho, Azangaro 2024", Universidad Nacional del Altiplano de Puno (Peru) Publicación	<1%
12	idoc.tips Fuente de Internet	<1%
13	repositorio.utc.edu.ec Fuente de Internet	<1%
14	repositorio.unan.edu.ni Fuente de Internet	

		<1 %
15	dspace.ucacue.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
16	dspace.unl.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
17	Submitted to Universidad Manuela Beltrán Virtual Trabajo del estudiante	<1 %
18	doku.pub Fuente de Internet	<1 %
19	fdocuments.ec Fuente de Internet	<1 %
20	repositorio.untumbes.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
21	qdoc.tips Fuente de Internet	<1 %
22	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
23	repositorio.umsa.bo Fuente de Internet	<1 %
24	repositorio.unheval.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
25	upc.aws.openrepository.com Fuente de Internet	<1 %
26	Charaja Villalta, Abdon. "Evapotranspiración de los cultivos papa, quínua y alfalfa estimados mediante métodos empíricos aplicados a la cuenca del lago Titicaca peruano.", Universidad Nacional del Altiplano de Puno (Peru) Publicación	<1 %
27	biblior.url.edu.gt Fuente de Internet	<1 %
28	pe.micodigopostal.info Fuente de Internet	<1 %
29	CONSORCIO FICHTNER GMBH & CO. KG - CONSULTORIA Y DIRECCION DE PROYECTOS - CYDEP S.A.S.. "DIA del Proyecto Relleno Sanitario para el Distrito de Pozuzo, Provincia de Oxapampa, Departamento de Pasco-IGA0000132", R.D. N° 484-2014/DSB/DIGESA/SA, 2020 Publicación	<1 %

30	Submitted to Universidad Continental	<1 %
	Trabajo del estudiante	
31	Submitted to Universidad Tecnológica Centroamericana UNITEC	<1 %
	Trabajo del estudiante	
32	repositorio.comillas.edu	<1 %
	Fuente de Internet	
33	repositorio.uade.edu.ar	<1 %
	Fuente de Internet	
34	J. Torres, J. Churata, H. R. Hurtado, V. Sarmiento et al. "Innovación y Evaluación de Sistemas Fotovoltaicos: un enfoque en Brasil y Perú", Editora Cientifica Digital, 2025	<1 %
	Publicación	
35	Submitted to Universidad Autonoma de Chile	<1 %
	Trabajo del estudiante	
36	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga	<1 %
	Trabajo del estudiante	
37	alicia.concytec.gob.pe	<1 %
	Fuente de Internet	
38	biblioteca.puntoedu.edu.ar	<1 %
	Fuente de Internet	

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias

< 30 words

Excluir bibliografía

Activo

Sistema de bombeo fotovoltaico para abastecimiento de agua al vivero municipal de Huamanga, Huatatas, San Juan Bautista, Ayacucho

Photovoltaic pumping system for water supply to the municipal nursery of Huamanga, Huatatas, San Juan Bautista, Ayacucho

Pol Anderson Ogozi Sulca: pol.ogosi.21@unsch.edu.pe

Carlos Augusto Castañeda Esquen: carlos.castaneda@unsch.edu.pe

Área de investigación: Ciencias Agrícolas

Línea de investigación: Agricultura, Energías renovables

RESUMEN

El abastecimiento de agua es importante para la producción de plantas en viveros, pero durante el estiaje la disminución del caudal puede afectar el riego. Esta investigación tuvo como objetivo implementar un sistema de bombeo solar fotovoltaico para abastecer de agua al vivero municipal de Huamanga, ubicado en Huatatas, San Juan Bautista, Ayacucho. El estudio tuvo un enfoque cuantitativo y nivel aplicativo. Primero se evaluaron las condiciones climáticas, topográficas, agrológicas e hidrológicas y se determinó la demanda de agua. Luego se diseñó el sistema de bombeo y finalmente se comparó su desempeño con un sistema convencional de corriente alterna. La demanda máxima fue de 2.18 m³/día y se contó con 4.53 horas solares pico mínimas por día. El sistema fue diseñado para un caudal de 0.484 m³/h y una altura manométrica total de 17.80 m. En las pruebas alcanzó un caudal de 0.694 m³/h y cubrió la demanda diaria en 3.14 horas. El consumo de energía fue de 1.171 kWh/día,

27.5 % menor que el sistema convencional, y el rendimiento fue de 9.03 % frente a 7.28 %. Además, permitió evitar 278.64 kgCO₂/año. La evaluación económica obtuvo un VAN de S/. 663.36, una TIR de 14.78 % y un periodo de recuperación de 6.61 años. Los resultados muestran que el sistema fotovoltaico es una alternativa viable para el abastecimiento de agua del vivero municipal.

Palabras clave: bombeo fotovoltaico, energía solar, riego, vivero municipal, demanda hídrica.

ABSTRACT

Water supply is important for plant production in nurseries, but during the dry season, reduced flow can affect irrigation. This research aimed to implement a photovoltaic solar pumping system to supply water to the municipal nursery of Huamanga, located in Huatatas, San Juan Bautista, Ayacucho. The study used a quantitative approach and an applied level. First, the climatic, topographic, agrological, and hydrological conditions were evaluated and water demand was determined. Then, the

pumping system was designed and its performance was compared with a conventional alternating-current system. The maximum water demand was 2.18 m³/day, with a minimum availability of 4.53 peak sun hours per day. The system was designed for a flow rate of 0.484 m³/h and a total dynamic head of 17.80 m. During field tests, it reached a flow rate of 0.694 m³/h and supplied the daily demand in 3.14 hours. Energy consumption was 1.171 kWh/day, 27.5% lower than the conventional system, while efficiency reached 9.03% compared with 7.28%. In addition, the system avoided 278.64 kgCO₂/year. The economic evaluation obtained an NPV of S/. 663.36, an IRR of 14.78%, and a payback period of 6.61 years. The results show that the photovoltaic system is a viable alternative for water supply in the municipal nursery.

Keywords: photovoltaic pumping, solar energy, irrigation, municipal nursery, water demand.

I. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso necesario para la producción de plantas en viveros. Sin embargo, en épocas de estiaje la disminución del caudal puede afectar el riego y el desarrollo de las plantas. En el vivero municipal de Huamanga, ubicado en Huatatas, San Juan Bautista, Ayacucho, el abastecimiento de agua dependía de un canal cuyo caudal disminuía durante este periodo.

El uso de energía solar para el bombeo de agua representa una alternativa para reducir el consumo de energía convencional. En Ayacucho, Pérez (2019) evaluó un sistema de bombeo con energía solar fotovoltaica para atender la demanda de agua de cultivos hortícolas, demostrando la aplicación de esta tecnología en condiciones locales.

En el área de estudio se identificó un puquial como fuente de captación y se evaluaron las condiciones climáticas, hidráulicas y de demanda de agua necesarias para el diseño del sistema. La demanda máxima del vivero fue de 2.18 m³/día y la disponibilidad mínima de radiación correspondió a 4.53 horas solares pico por día. Además, el balance hídrico mostró que la oferta del puquial superó la demanda durante todos los meses del año.

Por ello, el objetivo de la investigación fue implementar un sistema de bombeo fotovoltaico para abastecer de agua al vivero municipal de Huamanga, mediante la caracterización del área de estudio, la determinación de la demanda hídrica, el diseño del sistema de bombeo y la evaluación de su desempeño energético, operativo y económico frente a un sistema convencional de corriente alterna.

II. METODOLOGÍA

La investigación tuvo un enfoque cuantitativo y nivel aplicativo. Se desarrolló en el vivero municipal de Huamanga, ubicado en Huatatas, distrito de San Juan Bautista, Ayacucho. El

estudio se organizó en tres etapas de acuerdo con los objetivos planteados.

2.1 Caracterización del área de estudio y determinación de la demanda hídrica

Se realizó la caracterización climática, topográfica, agrológica e hidrológica del área de estudio. Para la información climática se utilizaron datos de NASA POWER y el cálculo de la evapotranspiración de referencia se realizó mediante el método de Penman-Monteith en CROPWAT. Se determinaron los coeficientes de cultivo y la demanda hídrica de las especies del vivero. Asimismo, se realizó el aforo de la fuente de agua y el balance entre la oferta y la demanda para evaluar su disponibilidad.



2.2 Diseño del sistema de bombeo solar fotovoltaico

Se realizó el diseño hidráulico considerando la demanda de agua, el caudal requerido, la altura de bombeo y las pérdidas de carga del sistema. Posteriormente se seleccionaron la electrobomba y los componentes del sistema fotovoltaico de acuerdo con los requerimientos hidráulicos y energéticos. Para el diseño se utilizaron herramientas de cálculo y

procesamiento de datos, complementadas con el levantamiento topográfico y las mediciones realizadas en campo.



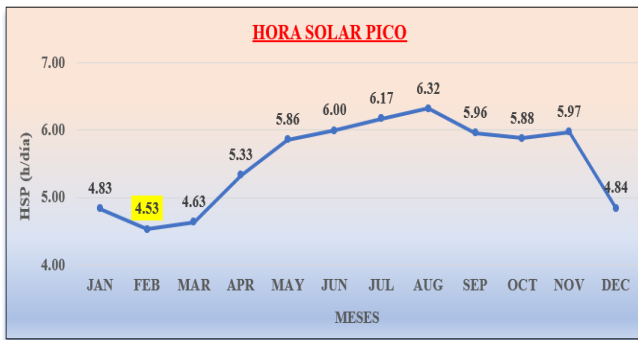
2.3 Evaluación del desempeño del sistema de bombeo

Se realizaron pruebas de funcionamiento del sistema de bombeo fotovoltaico y del sistema convencional de corriente alterna. La evaluación comprendió tres aspectos: energético, operativo y económico. Se compararon los parámetros de funcionamiento de ambos sistemas y se determinaron los indicadores económicos mediante la inversión inicial, costos de operación, VAN, TIR y periodo de recuperación.

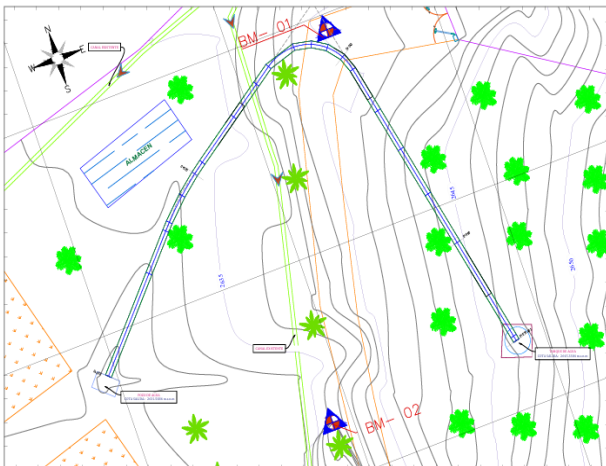
III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Caracterización del área de estudio y demanda hídrica

La caracterización climática mostró condiciones adecuadas para el uso de energía solar. La evapotranspiración de referencia promedio fue de 3.18 mm/día y las horas solares pico mínimas alcanzaron 4.53 h/día. La demanda hídrica presentó variación mensual, con un máximo de 2.18 m³/día en noviembre y un mínimo de 1.38 m³/día en junio.



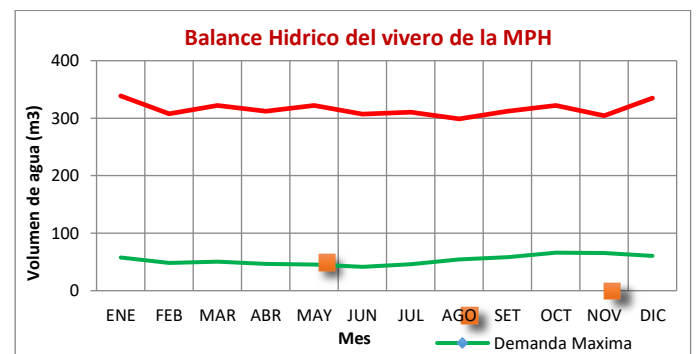
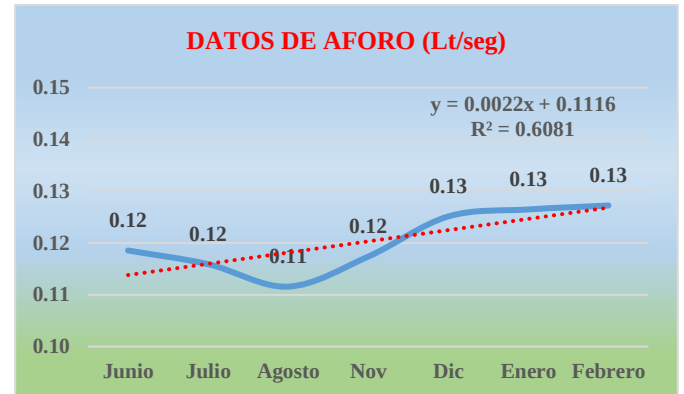
El levantamiento topográfico permitió determinar una diferencia de elevación de 14.62 m en un tramo de impulsión de 70 m, con pendientes entre 12.37 % y 39.60 %. Estos resultados fueron necesarios para definir la altura de bombeo del sistema.



En la caracterización agrológica se evaluaron las especies del vivero y sus requerimientos hídricos mediante los coeficientes de cultivo. El Kc ponderado permitió estimar la demanda de agua considerando la distribución de las áreas cultivadas.

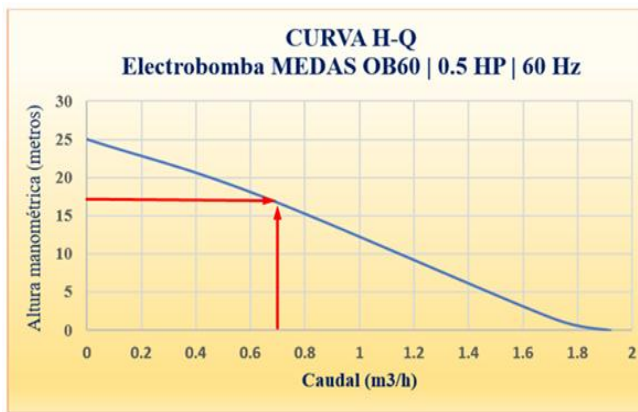
Respecto a la fuente de agua, el puquial presentó caudales entre 9.90 y 10.91 m³/día durante el periodo evaluado. El balance hídrico mostró que la oferta superó la demanda durante todo el año, con un superávit mínimo de 238.74 m³/mes en noviembre. Además, la

recarga estimada fue de 6,269.68 m³/año, superior a la extracción anual de 795.70 m³, obteniéndose un balance positivo para el horizonte evaluado.



3.2 Diseño del sistema de bombeo solar fotovoltaico

El caudal de diseño fue de 0.484 m³/h, obtenido a partir de la demanda máxima y las horas solares pico mínimas. La altura manométrica total fue de 17.80 m, compuesta principalmente por la altura geométrica de 17.05 m, mientras que las pérdidas por fricción y accesorios fueron de 0.66 m y 0.09 m, respectivamente.



Para el bombeo se seleccionó una electrobomba MEDAS OB60 de 0.5 HP, cuya capacidad máxima de caudal y altura permitió cumplir con los requerimientos calculados. El sistema fotovoltaico quedó conformado por tres módulos de 180 Wp, alcanzando una potencia instalada de 540 Wp.

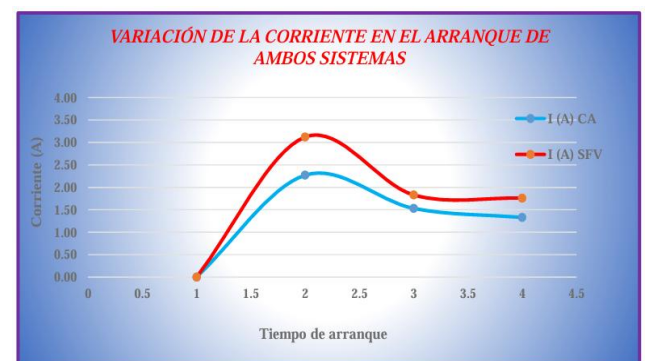
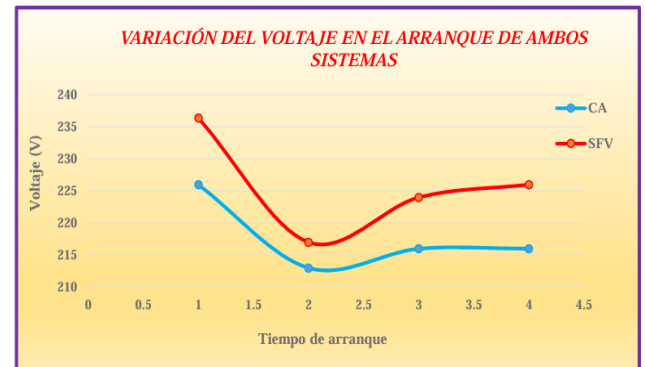
3.3 Evaluación del desempeño del sistema de bombeo

3.3.1 Evaluación energética

Prueba 1: Arranque de la bomba y caída de tensión CA vs. SFV.

Se evaluó el comportamiento eléctrico de la electrobomba durante el arranque y los primeros minutos de funcionamiento de ambos sistemas. Se registraron el voltaje y la corriente para identificar la variación de la potencia y la caída de tensión. En el sistema CA, el voltaje pasó de 213 V durante el arranque a 216–217 V durante la operación, mientras que en el SFV pasó de 217 V a 224–226 V. La potencia inicial fue de 483.51 W para CA y 677.04 W para SFV, disminuyendo posteriormente conforme se estabilizó el funcionamiento.

Momento	Sistema	V (V)	I (A)	P = V×I (W)
Reposo	CA	226	0	0
Arranque (t = 0 s)	CA	213	2.27	483.51
30 s	CA	216	1.53	330.48
5 min	CA	216	1.33	287.28
10 min	CA	217	1.29	279.93
Reposo	SFV	236.4	0	0
Arranque (t = 0 s)	SFV	217	3.12	677.04
30 s	SFV	224	1.83	409.92
5 min	SFV	226	1.76	397.76
10 min	SFV	226	1.76	397.76



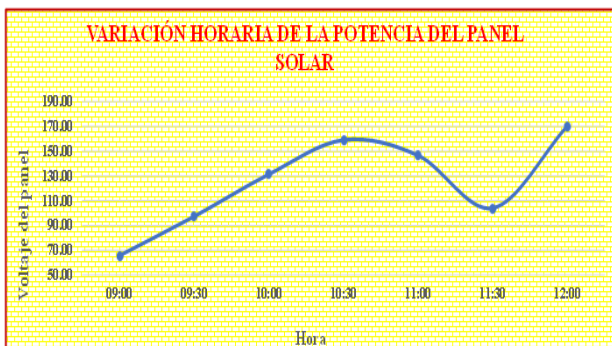
La caída de tensión fue de 0.88 % en CA y 0.25 % en SFV, por lo que ambos sistemas cumplieron con el límite de 3 %. La menor caída registrada en el SFV se relaciona con la menor longitud del cable utilizado en este sistema.

Parámetro	CA (cable 100 m)	SFV (cable 1 m)
V entrada (V)	228	236.4
V bornes bomba (V)	226	235.8
ΔV	2	0.6
$\Delta V\%$	0.88%	0.25%
$CNE \leq 3\%$	Cumple	Cumple

Prueba 2: Variación horaria de la potencia del panel solar.

Se registró la potencia generada por los paneles durante el periodo de operación para observar cómo respondió el sistema frente a las condiciones de radiación solar. La generación presentó variaciones durante el día, lo que permitió comprobar que el funcionamiento del sistema depende directamente de la disponibilidad del recurso solar.

Hora	V panel DC (V)	I panel (A)	P = V×I (W)	Condición climática
09:00	54.23	1.21	65.58	Despejado
09:30	57.88	1.68	97.10	Despejado
10:00	61.35	2.14	131.18	Despejado
10:30	64.12	2.48	158.97	Despejado
11:00	63.41	2.31	146.45	Parcialmente nublado
11:30	59.74	1.74	103.88	Nublado
12:00	65.28	2.61	170.17	Despejado
12:08	-	-	-	Baterías agotadas bomba detenida



Indicador	Sistema CA	Sistema SFV
Tiempo de operación (h/día)	4.33	3.14
Volumen bombeado (m³/día)	2.425	2.179
Energía consumida (kWh/día)	1.615	1.171
Energía específica (kWh/m³)	0.666	0.537
Energía hidráulica útil (kWh)	0.118	0.106
Rendimiento energético (%)	7.28	9.03
Emisiones CO ₂ (kg/día)	0.763	0.000

Como resultado global, el sistema SFV consumió 1.171 kWh/día, mientras que el sistema CA consumió 1.615 kWh/día,

representando un ahorro energético de 27.5 %. La energía específica también fue menor en el SFV, con 0.537 kWh/m³ frente a 0.666 kWh/m³.

El rendimiento energético alcanzó 9.03 % en el SFV y 7.28 % en CA, mostrando una mejora del desempeño energético del sistema fotovoltaico. Además, el SFV evitó las emisiones asociadas al consumo de electricidad convencional, estimándose una reducción de 278.64 kgCO₂/año.

3.3.2 Evaluación operativa

Prueba 3: Aforo volumétrico y determinación del caudal.

Se realizó el aforo en la llegada al tanque utilizando un volumen conocido y registrando el tiempo requerido para su llenado. En las condiciones evaluadas, el sistema CA alcanzó un caudal de 0.560 m³/h, mientras que el SFV alcanzó 0.694 m³/h, obteniendo el sistema fotovoltaico un caudal 23.9 % mayor.

Este resultado es importante porque demuestra que el sistema fotovoltaico no solamente permite alimentar la bomba, sino que bajo las condiciones evaluadas logró entregar un mayor caudal que el sistema convencional.

Medición	tiempo CA (s)	tiempo FV (s)
1	25.66	20.77
2	25.80	20.90
3	25.50	20.65
4	25.90	20.85
5	25.70	20.70
Promedio	25.71	20.77



Prueba 4: Tiempo de llenado del tanque.

Además del aforo, se registró durante cinco días el tiempo real necesario para llenar el tanque con el SFV. En los días con cielo despejado se completaron los 2.18 m³ en 3.18, 3.37 y 3.08 horas. En los días con lluvia intensa o nubosidad persistente, el volumen no llegó a completarse debido a la menor generación solar.

El tiempo teórico para cubrir la demanda fue de 3.14 horas, valor cercano a los tiempos obtenidos en los días con condiciones favorables. Esto permite comprobar que el diseño responde adecuadamente cuando existe suficiente radiación solar.

En la comparación general, el SFV necesitó 3.14 h/día, mientras que el sistema CA necesitó 3.89 h/día para cubrir la demanda. El abatimiento máximo fue de 0.82 m para SFV y 0.95 m para CA.

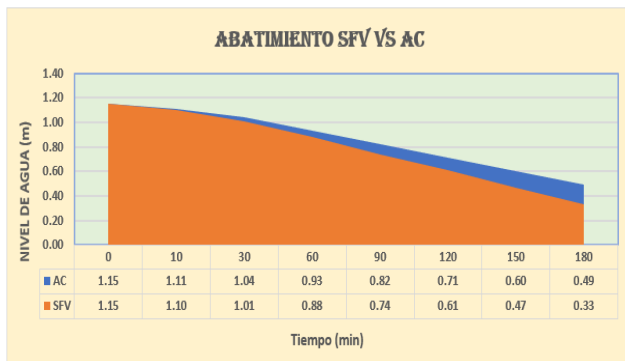
Día	Fecha	Vol. bombeado (m ³)	T. inicio	T. fin	T. real (h)	Observación
1	16/02/25	2.18	09:00	12:11	3.18	Cielo despejado. Volumen completado.
2	17/02/25	1.27	09:00	10:49	1.83	Lluvia intensa desde las 10:47. Baterías agotadas. Volumen no completado.
3	18/02/25	2.18	09:00	12:22	3.37	Nubosidad parcial con dos interrupciones de ~15 min. Volumen completado con retraso.
4	19/02/25	1.80	09:00	11:35	2.59	Nubosidad persistente redujo recarga de baterías. Volumen no completado.
5	20/02/25	2.18	09:00	12:05	3.08	Cielo despejado. Volumen completado en tiempo óptimo.
Promedio		1.92			2.81	

Prueba 5: Abatimiento del nivel de agua

Durante las pruebas se registró el descenso del nivel de agua en el pozo mientras operaban ambos sistemas. El abatimiento máximo fue de 0.95 m para el sistema CA y 0.82 m para el SFV, representando una reducción de 13.7 % en el SFV respecto al sistema convencional.

El menor abatimiento observado con el sistema fotovoltaico indica que, bajo las condiciones evaluadas, el pozo presentó una menor variación de nivel durante su operación. Este resultado complementa la evaluación del caudal y del tiempo de llenado, permitiendo verificar el comportamiento hidráulico del sistema durante las pruebas de campo.

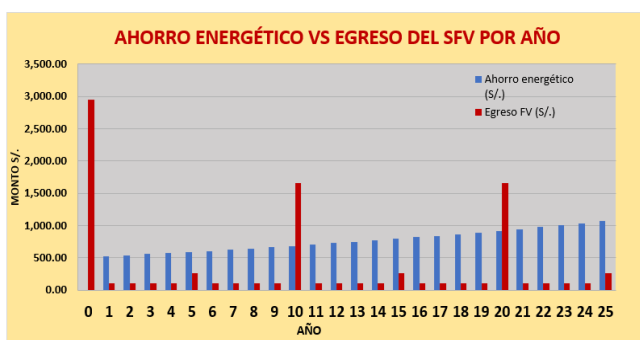




3.3.3 Evaluación económica

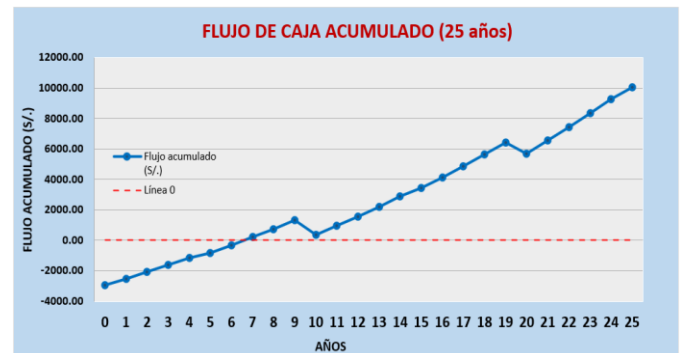
Para evaluar la viabilidad económica se compararon los costos de inversión, operación y mantenimiento de los sistemas fotovoltaico y convencional durante 25 años. Para el sistema fotovoltaico se consideró una configuración comercial optimizada, diferente a algunos equipos utilizados durante las pruebas experimentales.

El sistema fotovoltaico requirió una inversión inicial de S/. 2,953.54, mientras que el sistema CA requirió S/. 610.00. Sin embargo, durante los 25 años de evaluación, el costo acumulado fue de S/. 9,040.62 para el SFV frente a S/. 3,024.86 para el sistema CA, generando un ahorro acumulado de S/. 14,767.78.



El análisis financiero obtuvo un VAN de S/. 663.36 y una TIR de 14.78 %, superior a la tasa de descuento del 12 %. Además, el periodo de recurso hídrico durante toda la vida útil del proyecto.

recuperación fue de 6.61 años, equivalente a aproximadamente 6 años y 7 meses.



Estos resultados muestran que, el sistema fotovoltaico requiere mayor inversión inicial, el menor costo de operación permite recuperar la inversión y generar un ahorro durante su vida útil, por lo que resulta económicamente viable para el abastecimiento del vivero.

CONCLUSIONES

O.E.1: Se caracterizaron las condiciones climáticas, topográficas e hidrológicas del vivero municipal de Huamanga, determinándose una demanda hídrica máxima de 2.18 m³/día en el mes de noviembre, calculada a partir de coeficientes de cultivo medidos experimentalmente en campo. La oferta hídrica del puquial con caudal mínimo de 9.90 m³/día garantiza el abastecimiento continuo durante todo el año, con un superávit mínimo de 238.74 m³/mes confirmado mediante el balance hídrico mensual. El análisis de sostenibilidad hídrica determinó una relación recarga/extracción de 7.88 y un balance positivo acumulado de +109,479.58 m³ a 20 años, confirmando la viabilidad del

O.E.2: Se diseñó el sistema de bombeo fotovoltaico con caudal de diseño de 0.484 m³/h y HMT de 17.80 m. La electrobomba MEDAS OB60 de 0.5 HP entregó un caudal real de 0.694 m³/h, cubriendo 2.18 m³ en 3.14 horas dentro de las 4.53 HSP disponibles. El campo fotovoltaico comprende tres paneles SunshineSolar MONO HZS-180W 540 Wp, utilizándose un inversor-cargador MUST 3,000W en calidad de préstamo durante la prueba; para implementación definitiva se recomienda el MUST 800W/12V con batería gel CSBattery 12V/100Ah según el dimensionamiento del Objetivo 2

O.E.3: La evaluación comparativa demostró que el sistema fotovoltaico (SFV) presentó un mejor desempeño energético, operativo y económico que el sistema de corriente alterna (CA).

El SFV registró un menor consumo energético, un mayor rendimiento, evitó la emisión de 278.64 kgCO₂/año y suministró un caudal de 0.694 m³/h, superior al sistema convencional (0.560 m³/h). Asimismo, el análisis económico confirmó su viabilidad al obtener un VAN de S/. 663.36, una TIR de 14.78 % y un período de recuperación de la inversión de 6 años y 7 meses, respaldando su implementación para el riego del vivero municipal.

O. GENERAL: La implementación del sistema de bombeo solar fotovoltaico en el vivero municipal de Huamanga garantiza un suministro hídrico eficiente y sostenible, demostrando ser técnicamente viable,

operativamente funcional y económicamente rentable frente al sistema convencional de corriente alterna, constituyendo una alternativa de energía limpia replicable en proyectos similares de la región Ayacucho.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FAO. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Guarín, W. E., & Ruiz, J. J. (2022). *Diseño de un sistema fotovoltaico de riego para la empresa agrícola Cactus S.A.* [Tesis de título, Universidad Antonio Nariño].

Lara, F. A. (2007). *Diseño de un sistema de riego por medio de energía solar* [Tesis de título, Universidad Austral de Chile].

Martínez Farías, C. A. (2020). *Diseño de sistema de bombeo a base de energía solar para suministro de agua* [Tesis, Universidad Veracruzana].

Mott, R. L. (2015). *Mecánica de fluidos* (7.^a ed.). Pearson Educación.

NASA POWER. (2025). *POWER Data Access Viewer*. NASA.

Pérez, M. O. (2019). *Bombeo de agua del río Alameda con energía solar fotovoltaica para cultivar hortalizas en la Comunidad Campesina de Totorá – Jesús Nazareno – Huamanga – Ayacucho* [Tesis de título, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga].

Perpiñán Lamigueiro, O. (2012). *Energía solar fotovoltaica*. Universidad Politécnica de Madrid.

Sandia National Laboratories. (1998). *Guía de bombeo de agua con energía fotovoltaica*.

Sapag Chain, N., & Sapag Chain, R. (2014). *Preparación y evaluación de proyectos*. McGraw-Hill.

Zegarra, J. C. (2021). *Implementación de un sistema fotovoltaico para reducir el consumo de energía convencional en un sistema de riego tecnificado por aspersión en el Estadio Municipal César Flores Marigorda de Lambayeque* [Tesis de título, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo].