

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**TESIS**

**“DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO  
AUTÓNOMO DIRECTO PARA BOMBLEAR AGUA DESDE UN  
POZO HASTA UN EMBALSE Y POSTERIOR RIEGO POR  
GOTEO DE CULTIVO DE PALTA”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO MECÁNICO**

**ELABORADO POR:  
WILSON JOSIEL CORBERA TERRONES**

**ASESOR  
MSc. Ing. RAFAEL LEONARDO ESPINOZA PAREDES**

**LIMA – PERÚ**

**2023**

## DEDICATORIA

A Dios:

Por haberme dado la vida, por guiarme a lo largo de mi existencia y haberme permitido llegar a este momento tan importante de mi vida profesional. Gracias por estar conmigo en cada paso que doy. ¡Mi Señor, Mi Dios!

A mi mamá y papá:

Por su amor, trabajo y gran sacrificio en todos estos años de estudio y trabajo. Por haberme guiado por el camino del bien con su ejemplo. Gracias a ustedes he logrado cumplir hoy un sueño. Me siento orgulloso de ser su hijo. ¡Son los mejores padres!

A mi hermano:

Por su cariño, compañía y apoyo a lo largo de mi vida. Por hacer que me supere día a día. Eres la persona a quién más admiro: inteligente, hábil, responsable, trabajador, amante de gatos y un buen profesional. ¡Eres el mejor!

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi gratitud a mi querida y gloriosa Universidad Nacional de Ingeniería por haberme permitido asistir a sus aulas donde sin lugar a duda pasé una hermosa etapa y donde adquirí conocimiento de calidad. Gracias por incentivar me el espíritu de investigar, lo que me ha conllevado a titularme mediante este trabajo de investigación.

## RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo principal diseñar un sistema de bombeo fotovoltaico autónomo directo para impulsar agua desde un pozo hasta un embalse para satisfacer la demanda hídrica del riego por goteo requerido para el cultivo de 5 hectáreas de palta en el Fundo Delicia localizado en el centro poblado La Viña, distrito de Nueva Arica, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque en Perú. En el diseño de la instalación se consideró tres sistemas, los cuales son: el sistema de bombeo, el sistema de riego por goteo, y el sistema fotovoltaico.

La instalación de bombeo elegida en esta investigación es una instalación de bombeo fotovoltaica autónoma directa en la cual el funcionamiento de la bomba se limita solamente a los momentos en que hay radiación solar. La radiación solar se obtiene de la plataforma web PVGIS dando como resultado una variación de irradiación diaria desde 5.291 kWh/m<sup>2</sup> en el mes de marzo hasta 6.139 kWh/m<sup>2</sup> en el mes de noviembre para un ángulo de inclinación óptimo de 10°. El caudal de bombeo se establece para el mes con máximo caudal requerido lo cual sucede en el mes de enero dando como resultado un caudal de diseño de 48 m<sup>3</sup>/h. Para establecer este caudal, la bomba debe proporcionar 71.476 m de carga total. Con la finalidad de cumplir este

requerimiento de bombeo, se seleccionó una bomba sumergible que requiere de un motor trifásico con potencia nominal de 11 kW. Además, la tubería de impulsión es una tubería de PVC de 4" de diámetro nominal y los accesorios instalados en esta tubería constan de 4 codos de 90°, 1 válvula de compuerta y 1 válvula de retención.

El sistema de riego por goteo por gravedad está formado por un embalse de 500 m<sup>3</sup> con una base rectangular de 10 m x 20 m y una altura de 2.5 m el cual puede almacenar el agua de hasta 2 días de riego. El embalse debe estar ubicado en un nivel adecuado con la finalidad de proporcionar la presión necesaria en los goteros. En base a los cálculos realizados se tienen tuberías laterales de polietileno de 32 mm de diámetro nominal, tuberías portlaterales de PVC de 2" de diámetro nominal, una tubería primaria de PVC de 4" de diámetro nominal y goteros compensantes de 8 l/h.

Finalmente, el sistema fotovoltaico está formado por 60 paneles monocristalinos de 370 W con una disposición de 3 cadenas en paralelo y 20 paneles en serie por cadena produciendo un generador fotovoltaico de 22.2 kW de potencia nominal. El dispositivo electrónico que se encargará de convertir la corriente continua desarrollada por el generador fotovoltaico en corriente alterna es un inversor de bombeo solar de 15 kW con una entrada máxima en DC de 880 V y 33.3 A, y una salida trifásica de 380 V – 460 V.

**Palabras clave:** bombeo de agua, energía solar fotovoltaica, riego por goteo, cultivo de palta.

## ABSTRACT

The main objective of this thesis is to design a direct autonomous photovoltaic pumping system to pump water from a well to a reservoir to meet the water demand of drip irrigation required for the cultivation of 5 hectares of avocado in the Delicia farm located in La Viña village, Nueva Arica district, Chiclayo province, Lambayeque department in Peru. In the design of the installation, three systems were considered, which are: the pumping system, the drip irrigation system, and the photovoltaic system.

The pumping system chosen in this thesis is a direct autonomous photovoltaic pumping system in which the operation of the pump is limited only to the moments when there is solar radiation. Solar radiation is obtained from the PVGIS web platform, resulting in a variation in daily irradiation from 5.291 kWh/m<sup>2</sup> for the month of March to 6.139 kWh/m<sup>2</sup> in the month of November for an optimum inclination angle of 10°. The pumping flow is established for the month with the maximum flow required, which happens in the month of January, resulting in a design flow of 48 m<sup>3</sup>/h. To establish this flow, the pump must provide 71.476 m of total head. To meet this pumping requirement, a submersible pump was selected that requires a three-phase motor with a nominal power of 11 kW. In addition, the discharge pipe is a 4" nominal

diameter PVC pipe and the accessories installed in this pipe consist of 4 90° elbows, 1 gate valve and 1 check valve.

The gravity drip irrigation system consists of a 500 m<sup>3</sup> reservoir with a rectangular base of 10 m x 20 m and a height of 2.5 m, which can store water for up to 2 days of irrigation. The reservoir must be located at a suitable level in order to provide the necessary pressure in the drippers. Based on the calculations carried out, there are polyethylene lateral pipes with a nominal diameter of 32 mm, PVC submain pipes with a nominal diameter of 2", a PVC main pipe with a nominal diameter of 4" and compensating drippers of 8 l/h.

Finally, the photovoltaic system is made up of 60 monocrystalline panels of 370 W with an arrangement of 3 chains in parallel and 20 panels in series per chain, producing a photovoltaic generator with a nominal power of 22.2 kW. The electronic device that will be in charge of converting the direct current developed by the photovoltaic generator into alternating current is a 15 kW solar pump inverter with a maximum DC input of 880 V and 33.3 A, and a three-phase output of 380 V – 460 V.

**Keywords:** water pumping, photovoltaic solar energy, drip irrigation, avocado cultivation.

## PRÓLOGO

La presente tesis muestra el uso de la energía solar fotovoltaica para bombear agua para uso agrícola. Una de las consideraciones que se planteó en el diseño del sistema fotovoltaico fue el no uso de baterías con la finalidad de no encarecer la instalación. La acumulación de energía se realiza mediante el almacenamiento de agua en un embalse ubicado en un nivel superior con respecto al cultivo. Otra consideración que se estableció fue la realización de una tesis de tal forma que un estudiante o investigador de ingeniería que no tenga conocimientos previos sobre energía solar fotovoltaica, mecánica de fluidos y riego por goteo pueda entenderlo con relativa facilidad. Para eso, el presente trabajo de investigación se estructuró en seis capítulos los cuales se describen a continuación.

El Capítulo I es una introducción general de cómo surgió el presente trabajo. Comienza con la descripción del problema de investigación, la propuesta de los objetivos y la revisión de la literatura relacionada a bombeo fotovoltaico.

El Capítulo II presenta los conceptos generales sobre instalaciones solares fotovoltaicas, mecánica de fluidos, requerimiento de agua de un cultivo y riego por goteo.

En el Capítulo III se plantea la hipótesis y se definen las variables independientes y dependientes para el cálculo del sistema de bombeo fotovoltaico autónomo directo para riego agrícola.

El Capítulo IV trata sobre la metodología de la investigación usada en esta tesis donde se describe el tipo y diseño de la investigación, la unidad de análisis, y la matriz de consistencia.

En el Capítulo V se calcula una instalación de bombeo fotovoltaica autónoma directa para bombear agua desde un pozo hasta un embalse para regar por goteo 5 hectáreas de palta. Los cálculos comienzan con la determinación del volumen de agua diario requerido por el sembrío y el dimensionamiento del volumen del embalse. Posteriormente, se determina el caudal de bombeo de diseño el cual está directamente relacionado con la irradiación solar en la zona de cultivo. En seguida se diseña el sistema de riego por goteo, en el cual se calculan los diámetros de las tuberías laterales, portalaterales y primaria. Una vez definido el nivel del embalse, se calcula la carga total de la bomba y se procede a seleccionarla. Luego, se determina el punto de operación de la bomba y se realiza la verificación del fenómeno de cavitación. Finalmente, se realiza la configuración del sistema fotovoltaico compuesto por los paneles solares y el inversor de bombeo solar.

El Capítulo VI muestra el análisis de los cálculos y resultados obtenidos. Se muestran resultados importantes para el sistema de bombeo, sistema de riego por goteo y el sistema fotovoltaico. La selección y especificación de los elementos y dispositivos del sistema de bombeo fotovoltaico autónomo directo

para riego por goteo permiten una confirmación de la hipótesis planteada en esta investigación.

Asimismo, se presentan las respectivas Conclusiones, Recomendaciones, Referencias Bibliográficas y Anexos que complementan la elaboración de la presente investigación.

## ÍNDICE

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTO .....	iii
RESUMEN .....	iv
ABSTRACT.....	vi
PRÓLOGO.....	1
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN .....	8
1.1. Generalidades .....	8
1.2. Descripción del problema de investigación.....	10
1.2.1. Fundamentación del problema.....	10
1.2.2. Formulación del problema.....	14
1.3. Objetivos del Estudio .....	14
1.3.1. Objetivo General .....	14
1.3.2. Objetivos Específicos.....	14
1.4. Antecedentes investigativos .....	15
1.4.1. Internacional.....	15
1.4.2. Nacional .....	21
CAPITULO II MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	29
2.1. Marco teórico .....	29
2.1.1. Instalaciones solares fotovoltaicas.....	29
2.1.1.1. Coordenadas geográficas.....	29
2.1.1.2. Radiación solar.....	31
2.1.1.3. Tipos de radiación solar sobre una superficie.....	33
2.1.1.4. Energía solar fotovoltaica .....	34
2.1.1.5. Efecto fotovoltaico .....	35
2.1.1.6. Semiconductores P y N .....	37
2.1.1.7. Célula solar.....	40
2.1.1.8. Irradiancia e irradiación .....	41
2.1.1.9. Coordenadas solares.....	42
2.1.1.10. Orientación de una superficie receptora .....	44

2.1.1.11. Efecto del espesor de la atmósfera terrestre sobre la radiación solar .....	47
2.1.1.12. Radiación global sobre una superficie .....	49
2.1.1.13. Horas solares pico .....	49
2.1.1.14. Paneles solares .....	51
2.1.1.15. Generador fotovoltaico.....	60
2.1.1.16. Sistema de bombeo de agua solar fotovoltaico .....	62
2.1.1.17. Componentes de un sistema de bombeo fotovoltaico autónomo directo .....	67
2.1.2. Mecánica de fluidos.....	78
2.1.2.1. Conceptos básicos .....	78
2.1.2.2. Propiedades de los fluidos.....	80
2.1.2.3. Conservación de la masa .....	89
2.1.2.4. Ecuación general de la energía .....	95
2.1.2.5. Flujo en tuberías.....	104
2.1.2.6. Pérdidas de energía .....	107
2.1.2.7. Bombas hidráulicas .....	111
2.1.3. Demanda hídrica de los cultivos.....	122
2.1.3.1. Evapotranspiración .....	122
2.1.3.2. Requerimiento bruto de riego .....	124
2.1.3.3. Volumen diario de agua por planta .....	124
2.1.3.4. Tiempo de riego.....	125
2.1.3.5. Volumen diario de agua por hectárea.....	125
2.1.3.6. Volumen de agua total.....	127
2.1.4. Riego por goteo.....	127
2.1.4.1. Generalidades .....	127
2.1.4.2. Componentes principales .....	129
2.1.4.3. Cálculo hidráulico .....	134
2.1.5. Python .....	145
2.2. Marco conceptual .....	146
CAPITULO III HIPÓTESIS Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES .	149
3.1. Hipótesis.....	149

3.1.1.	Hipótesis general.....	149
3.1.2.	Hipótesis específicas.....	149
3.2.	Operacionalización de variables .....	150
3.2.1.	Variables independientes .....	150
3.2.2.	Variables dependientes.....	150
3.2.3.	Operacionalización.....	150
CAPITULO IV METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....		153
4.1.	Tipo y Diseño de la Investigación .....	153
4.2.	Unidad de Análisis .....	153
4.3.	Matriz de Consistencia.....	154
CAPITULO V DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....		155
5.1.	Volumen de agua de riego diario .....	155
5.2.	Volumen del embalse .....	160
5.3.	Caudal de bombeo .....	161
5.3.1.	Ángulo de inclinación óptimo.....	162
5.3.2.	Irradiación solar incidente a 10° .....	163
5.3.3.	Caudal de la bomba .....	164
5.4.	Diseño del sistema de riego por goteo .....	165
5.4.1.	Cálculo de las tuberías laterales .....	165
5.4.2.	Cálculo de las tuberías portlaterales .....	167
5.4.3.	Presiones en la subunidad de riego .....	168
5.4.4.	Cálculo de la tubería primaria .....	170
5.5.	Carga total de la bomba.....	172
5.5.1.	Cálculo de la tubería de impulsión .....	172
5.5.2.	Pérdida de carga total .....	173
5.5.2.1.	Pérdida de carga por fricción .....	173
5.5.2.2.	Pérdidas de carga menores.....	174
5.5.3.	Carga de la bomba.....	176
5.5.4.	Presión a la salida de la bomba .....	178
5.6.	Selección de la bomba.....	179
5.7.	Punto de operación de la bomba .....	180

5.8. Potencia de la bomba .....	182
5.9. Cavitación en la bomba y el NPSH.....	183
5.10. Diseño del sistema fotovoltaico .....	185
5.10.1. Potencia del generador fotovoltaico.....	185
5.10.2. Paneles solares .....	186
5.10.3. Disposición en serie y paralelo .....	189
5.10.4. Inversor de bombeo solar .....	190
CAPITULO VI ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	192
6.1. Sistema de bombeo fotovoltaico para riego por goteo.....	192
6.1.1. Sistema de bombeo .....	192
6.1.2. Sistema de riego por goteo .....	197
6.1.3. Sistema fotovoltaico .....	201
6.2. Prueba de hipótesis .....	204
CONCLUSIONES .....	205
RECOMENDACIONES.....	209
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	211
ANEXOS.....	217

## **CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Generalidades**

La investigación para la instalación de bombeo fotovoltaico se realiza en el Fundo Delicia ubicado en el centro poblado La Viña, distrito de Nueva Arica, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque en Perú. En esta zona del país, el clima es muy cálido y las actividades económicas principales son la agricultura y la ganadería. Con respecto a la agricultura, existen áreas donde riegan por gravedad ya que se encuentran cerca de los canales de regadío. Por otro lado, existen enormes áreas áridas alejadas del agua y de la red eléctrica en las cuales algunos agricultores están empezando a construir pozos de agua subterránea para empezar a cultivarlas.

La necesidad de electrificar lugares remotos además de los problemas ambientales actuales ha propiciado el desarrollo de las tecnologías energéticas renovables tales como la energía solar fotovoltaica, energía solar térmica y energía eólica. El mundo entero está avanzando hacia la cada vez menos dependencia de los combustibles fósiles donde los diferentes estados avanzan cada vez más decididos, pero en formas desiguales.

El Índice de Transición Energética (ETI, por sus siglas en inglés) el cual compara a 115 países en el desempeño de sus sistemas energéticos,

determina que 92 países avanzaron en su transición a energías limpias en la última década. El ETI muestra que 3 países escandinavos: Suecia, Noruega y Dinamarca, lideran la transición hacia energías limpias. A nivel latinoamericano, Uruguay aparece en el puesto 13, Costa Rica en el 26, Colombia en el 29, Brasil en el 30, Chile en el 34, Paraguay en el 36 y Perú en el 42 (World Economic Forum, 2021).

La energía solar fotovoltaica es una forma de energía renovable con múltiples beneficios en la cual se produce electricidad mediante la transformación directa de la radiación solar a través de un dispositivo electrónico denominado célula fotoeléctrica, también llamada célula fotovoltaica o célula solar. El grupo de células fotovoltaicas conectadas en forma adecuada forman un panel solar.

En cuanto a costos, durante décadas los precios de los paneles solares han disminuido significativamente. La disminución de precios se ha producido por factores como la innovación tecnológica, optimización de la producción, economías de escala, incrementos en la eficiencia de los módulos, mayor vida útil de los sistemas fotovoltaicos, y el desarrollo de estándares y especificaciones (European Photovoltaic Industry Association and Greenpeace International, 2011). Por ejemplo, según la International Energy Agency (2022) los costos se han abaratado en promedio desde unos 105.7 USD/W en el año 1975 hasta unos 0.2 USD/W en el año 2020.

Debido a la disminución en costos de los sistemas fotovoltaicos, éstos se han hecho más accesibles y actualmente se utilizan en diferentes proyectos a pequeña y gran escala. De acuerdo con Cruz Ornetta (2012) la electricidad

generada por los generadores fotovoltaicos se usa en aplicaciones de telecomunicaciones, electrificación rural, explotaciones agrícolas, explotaciones ganaderas, iluminación, señalización, control y desarrollo rural.

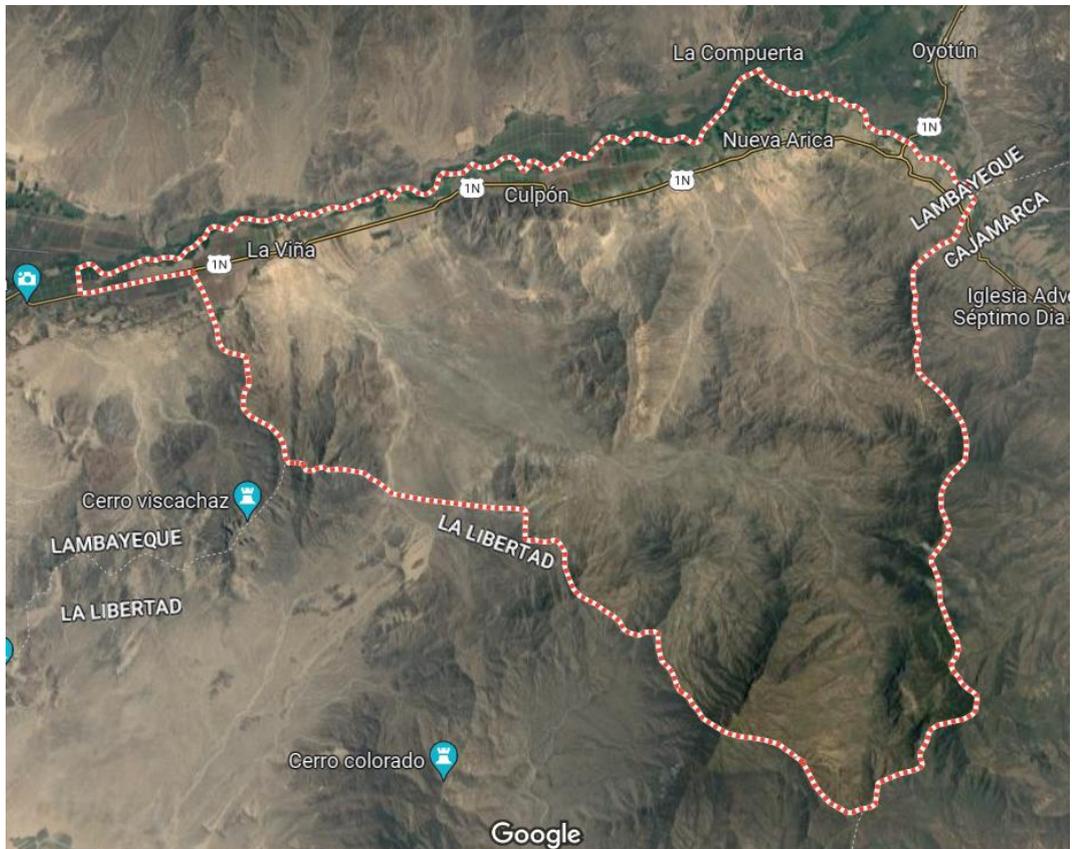
El Perú es un país con un gran potencial solar presentando irradiaciones diarias desde los 4.5 kWh/m<sup>2</sup> hasta los 6.5 kWh/m<sup>2</sup>. La zona de mayor potencial solar del territorio peruano es la costa sur ubicada entre las latitudes 16° S y 18° S con valores diarios de 6.0 kWh/m<sup>2</sup> a 6.5 kWh/m<sup>2</sup>. Otra zona con un buen potencial solar es la costa norte (3° S a 8° S) con una irradiación diaria entre los 5.5 kWh/m<sup>2</sup> a 6.0 kWh/m<sup>2</sup> (SENAMHI, 2003).

## **1.2. Descripción del problema de investigación**

### **1.2.1. Fundamentación del problema**

El Fundo Delicia está ubicado en el departamento de Lambayeque, provincia de Chiclayo, distrito de Nueva Arica, en el centro poblado La Viña. Desde un punto de vista hidrogeológico el fundo se ubica en el valle Zaña en la margen izquierda del río Zaña. El fundo consta aproximadamente de 80 hectáreas de tierras eriazas, en el cual se ha construido un pozo de agua subterránea ya que se pretende iniciar un sembrío piloto de 5 hectáreas de palta. En la Figura 1.1 y Figura 1.2 se puede observar la ubicación de la zona de sembrío.

**Figura 1.1: Ubicación del distrito de Nueva Arica.**



**Fuente:** Google Maps (consultado en marzo de 2023).

**Figura 1.2: Ubicación de la zona de sembrío.**



**Fuente:** Google Earth Pro (consultado en marzo de 2023).

En la Figura 1.2 puede observarse los puntos que conforman el área a sembrar, los cuales presentan las coordenadas geográficas indicadas en la Tabla 1.1.

**Tabla 1.1: Coordenadas geográficas del sembrío.**

Punto	Latitud $\phi$	Longitud $\lambda$	Altitud
1	-6.914086°	-79.449931°	138.0 msnm
2	-6.914086°	-79.451749°	138.0 msnm
3	-6.916341°	-79.451749°	144.0 msnm
4	-6.916341°	-79.449931°	144.0 msnm

Nota: Las coordenadas fueron tomadas mediante un GPS marca GARMIN modelo GPSMAP 65s.

**Fuente:** Elaboración propia.

La zona de cultivo se ubica aproximadamente a unos 2 km al sur del centro poblado La Viña. Esta zona es un lugar remoto y se encuentra aislada de la red eléctrica convencional lo cual genera la problemática de la falta de electricidad para poner en funcionamiento electrobombas con la finalidad de impulsar agua para riego agrícola.

Por otro lado, los agricultores de los alrededores que poseen pozos utilizan motobombas accionadas por combustible para el riego de sus chacras. Una de las problemáticas del uso de motobombas es que generan altos costos a largo plazo como lo son los gastos en comprar el combustible, los mantenimientos periódicos y la compra de repuestos.

Otro de los problemas que presenta el uso de sistemas de bombeo propulsados por combustibles fósiles es que la quema de dichos combustibles es la causa principal de problemas ambientales como el efecto invernadero, el agujero de la capa de ozono, las lluvias ácidas y la contaminación

generalizada por lo que su impacto es sumamente perjudicial (Nicoletti et al., 2015).

Según la aplicación web POWER DATA ACCESS VIEWER de la NASA, el distrito de Nueva Arica presenta una irradiación global diaria media de unos 5.15 kWh/m<sup>2</sup>. Dicha cifra denota el gran potencial fotovoltaico de la zona, el cual puede ser aprovechado para satisfacer la necesidad de energía eléctrica en zonas aisladas de la red eléctrica pública.

Si bien los sistemas fotovoltaicos tienen generalmente un alto costo inicial de inversión, éstos presentan características que los hacen proyectos atractivos como una fuente alternativa de potencia para bombeo de agua: no producen emisiones de carbono, son silenciosos y tienen un bajo costo de operación y mantenimiento (Aliyu, et al., 2018).

Por lo expuesto anteriormente, en el presente trabajo de investigación se propone diseñar una instalación fotovoltaica autónoma directa que alimente con electricidad a una electrobomba para impulsar agua desde un pozo hasta un embalse para proveer el agua requerida para el riego por goteo de 5 hectáreas de palta. Se eligió esta propuesta debido al alto potencial solar del lugar, así como para superar los problemas de la falta de electricidad pública en la zona, altos costos generados a largo plazo por el uso de sistemas de bombeo convencionales y la contaminación ambiental que produce la quema de combustibles fósiles.

La propuesta anterior está en línea con el objetivo número 7 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos por la ONU. Naciones Unidas (2015) define este objetivo como “garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos” (p. 16). Este objetivo busca el acceso universal a la energía eléctrica para el año 2030 así como incrementar considerablemente para el año 2030 la proporción de las energías renovables con respecto a la producción total de energía.

### **1.2.2. Formulación del problema**

¿Es posible diseñar técnicamente un sistema de bombeo fotovoltaico autónomo directo que impulse agua desde un pozo hasta un embalse de almacenamiento para abastecer la necesidad de agua que requiere el riego por goteo de 5 hectáreas de palta en el Fundo Delicia ubicado en el centro poblado La Viña, distrito de Nueva Arica, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque?

### **1.3. Objetivos del Estudio**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Diseñar un sistema de bombeo fotovoltaico autónomo directo para impulsar agua desde un pozo hasta un embalse para satisfacer la demanda hídrica de riego gota a gota requerido para el cultivo de 5 hectáreas de palta en el Fundo Delicia localizado en el centro poblado La Viña, distrito de Nueva Arica, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Evaluar la radiación solar en la zona del sembrío.

- Determinar la demanda hídrica del cultivo.
- Establecer las dimensiones del embalse de almacenamiento.
- Diseñar el sistema de riego por goteo.
- Dimensionar el sistema de bombeo.
- Configurar el sistema fotovoltaico.

#### **1.4. Antecedentes investigativos**

Para guiar este trabajo de investigación, se tomó los siguientes estudios relacionados a sistemas de bombeo fotovoltaico.

##### **1.4.1. Internacional**

Lara (2007) en su trabajo de titulación “Diseño de un Sistema de Riego por Medio de Energía Solar, a Través de Paneles FV” busca diseñar un sistema de riego por goteo energizado por paneles solares para el sembrío de tomates en una parcela de 1/4 de hectárea ubicado en el pueblo Buchupureo en Chile. En este estudio, primero se determina el caudal de bombeo a partir de la evapotranspiración del cultivo usando el método Blaney-Criddle, luego se calcula la altura manométrica del sistema según la topografía de la zona, se selecciona la bomba solar, se determina la orientación y cantidad de paneles solares, se selecciona el regulador de carga y se seleccionan los accesorios de riego por goteo. Además, se presenta una estimación del costo de la instalación para ver su viabilidad en el tiempo. Por último, una de las conclusiones que se presenta es que los sistemas de bombeo solar para riego muestran características que los hacen atractivos para agricultores de pequeñas chacras.

Maldonado (2011) en su trabajo de graduación “Paneles Solares como Fuente de Energía Eléctrica para Sistemas de Mini Riego en Producción de Hortalizas en el Departamento de Quiché” presenta el estudio sobre cómo aprovechar la energía solar para bombear agua para el riego por goteo de hortalizas en el departamento de Quiché en Guatemala. El sistema de riego que se utiliza es por medio de cintas de goteo debido a que es económico y trabaja con presiones bajas. La insolación promedio del lugar es de 6.24 horas sol pico. La alimentación eléctrica es generada por 5 paneles solares de 65 W. Según el análisis financiero del proyecto, la instalación de este sistema sería rentable.

Arceda & Hernández (2012) en su trabajo monográfico “Proyecto de Riego por Goteo Utilizando Energía Solar para el Cultivo de Aguacate en la Finca Ojo de Agua en la Localidad de San Francisco Libre” proponen como objetivo diseñar un sistema de riego gota a gota utilizando energía solar fotovoltaica para el cultivo de 1.11 manzanas (7753.43 m<sup>2</sup>) de aguacate en el municipio de San Francisco Libre en Nicaragua. En este proyecto se plantea bombear agua desde un pozo hacia un tanque de almacenamiento para su posterior distribución en el sistema de riego. En este trabajo se realiza el diseño agronómico del cultivo, el diseño hidráulico del sistema de riego y se establece el sistema fotovoltaico para alimentar la bomba. Se determina un requerimiento diario de agua de 7392 l para regar el sembrío. Entre la selección de los componentes está la elección de goteros de 8 l/h, módulos

solares monocristalinos de 100 W, una bomba solar trifásica de 550 W y un tanque de almacenamiento de 7100 l.

Jácome (2017) en su trabajo de titulación “Propuesta de sistema de bombeo utilizando paneles fotovoltaicos” propone un sistema de riego por aspersión con bomba superficial alimentado eléctricamente por módulos solares para cultivos de hasta 1 hectárea en el cantón de Balzar en Ecuador. El valor de las horas sol pico crítico de la zona es de 1.9 HSP y corresponde para el mes de junio. En el dimensionamiento se escoge una bomba centrífuga de 0.85 hp, 6 paneles monocristalinos de 90 W, 9 baterías de plomo-ácido híbridas de 55 Ah con una tensión de 12 V para 3 días de autonomía, regulador de carga con una corriente de entrada de hasta 40 A, y un inversor con potencia continua de hasta 1500 W y potencia pico hasta 3000 W. El costo aproximado del sistema se estima en USD 4820.

Vargas (2018) en su proyecto de grado “Diseño de un Sistema de Bombeo de Agua Subterránea con Energía Solar Fotovoltaica para Riego en la Comunidad de Valencia” tiene el objetivo de dimensionar un sistema de energía solar fotovoltaica para riego para un área de 10000 m<sup>2</sup> lo cual beneficiará a 10 familias que siembran diversas hortalizas y legumbres en la comunidad de Valencia en Bolivia. En esta zona, ya se realizó un proyecto similar con energía convencional, pero fracasó. Para el proyecto se realiza una excavación de pozo de 8” de diámetro y 15 m de profundidad en la cual una bomba sumergible es encargada de impulsar agua a través de una tubería de PVC de 6”. En la determinación de las alturas hidráulicas se considera el

abatimiento del pozo. En el dimensionamiento se tiene una electrobomba de 1 kW y 12 módulos solares con una potencia total de 2.58 kW.

Llopis (2018) en su trabajo fin de máster “Diseño de una Instalación Solar Fotovoltaica para Bombeo de 55 kW para el Riego de la Huerta de Alicante de Mutxamel” establece el objetivo de bombear agua desde una balsa a 90 msnm hasta otra balsa a 185 msnm a lo largo de una tubería de conducción existente de unos 5247 m ubicada en el municipio de Mutxamel en España. Una vez que el agua es almacenada en la balsa más elevada se puede regar por gravedad. Las necesidades hídricas son para abastecer un área de 60 hectáreas con 570000 m<sup>3</sup> de agua anuales. En el proyecto se opta por la instalación de 2 bombas sumergibles idénticas de 45 kW de potencia nominal conectadas en paralelo y 629 paneles de 315 W inclinados 64°. También se estudia sobre cómo ajustar las velocidades de las bombas de tal forma que el consumo de energía de las bombas y la producción eléctrica fotovoltaica sea lo más cercana posible. Por último, se estudia el transitorio hidráulico del sistema en donde se propone un calderín a la salida del grupo de bombeo como medida de protección en caso de paradas repentinas debido a la falta de electricidad.

Benghanem et al. (2018) en su artículo de investigación “Estimation of Daily Flow Rate of Photovoltaic Water Pumping Systems Using Solar Radiation Data” plantean como objetivo estimar el caudal de un sistema de bombeo solar a partir de datos de radiación solar de un lugar. Usando una instalación de bombeo experimental ubicada en Madinah en Arabia Saudita proponen una

relación de segundo orden entre la potencia de bombeo y el caudal. Luego, usando datos experimentales para el caudal e irradiación solar proponen un modelo no lineal entre estas magnitudes. Los autores indican que usando el modelo propuesto y sabiendo la radiación solar de un sitio, se puede determinar con buena precisión el caudal en cualquier ubicación en Arabia Saudita para una carga manométrica dada incluso antes de la instalación del sistema de bombeo fotovoltaico.

Schilardi et al. (2019) en su trabajo de investigación “Diseño de un Sistema de Bombeo Solar Fotovoltaico para Riego por Goteo en Viñedos” plantean como objetivo principal diseñar una instalación de bombeo solar conectada a la red para regar mediante goteo 18.83 hectáreas de viñedos ubicado en Mendoza en Argentina. La demanda hídrica anual es de 862 mm/ha para lo cual se dispone de un equipo de riego con 1230 horas de funcionamiento anuales. El ángulo de inclinación óptimo de los paneles solares para la zona es de 26.47°. El mes crítico del proyecto es agosto. Finalmente, el dimensionado del proyecto requiere la instalación de 120 paneles solares monocristalinos de 255 W para la energización de dos bombas centrífugas de 60.5 m<sup>3</sup>/h y 15 hp instaladas en paralelo.

Bolaños et al. (2019) en su seminario “Propuesta de Bombeo Solar para un Sistema de Riego Agrícola Semi Automatizado mediante un Tanque Elevado en el Municipio de Tecámac, Estado de México” plantean diseñar un sistema de bombeo fotovoltaico para abastecer de forma eficiente el agua requerida para el riego de 9000 m<sup>2</sup> de cultivo de maíz ubicado en el municipio de

Tecámac en México, ofreciendo mejoras económicas a los agricultores al poder realizar dos cosechas anuales. En el proyecto se utiliza un riego por goteo mediante el bombeo de agua desde una cisterna de 90 m<sup>3</sup> hasta un tanque elevado de 18 m<sup>3</sup>. En el dimensionamiento hidráulico se determina una bomba de 1 hp y una tubería de impulsión de 2". El sistema requiere un total de 8 paneles solares de 260 W y 8 baterías de 120 Ah de capacidad. Los horarios de riego se gestionan desde un tablero de control con sistema Arduino 1. Finalmente, se realiza un análisis financiero donde se indica que la inversión del proyecto se recupera al cabo de 3 años y 3 meses.

Hospital & González (2021) en su proyecto de grado "Diseño de un Sistema de Bombeo Alimentado por Energía Solar Fotovoltaica en la Zona de Cundinamarca" proponen un sistema de bombeo fotovoltaico autónomo para bombear agua desde un pozo profundo hasta un tanque en el municipio de Chaguaní en Colombia con el fin de abastecer agua en épocas secas del año. La determinación de la demanda hídrica se hace para el 10% de la población rural de Chaguaní considerando el consumo humano, de animales y cultivos obteniendo un consumo diario cercano a los 63 m<sup>3</sup>. El dimensionamiento del tanque de almacenamiento se hace para 3 días de autonomía. Las horas sol pico de la zona para el peor mes de radiación son 4.5 horas estableciendo un régimen de bombeo de 42.2 m<sup>3</sup>/h. Luego presentan un estudio geoeléctrico en donde especifican que se perforará un pozo de 80 m de profundidad. Los autores seleccionan una bomba sumergible monofásica de 15 hp, 38 paneles monocristalinos de 380 W, 2 baterías de 48 V con capacidad de 3420 Ah, 2

controladores de carga de 85 A y 1 controlador de 60 A conectados en paralelo, y 2 inversores con potencias de 8 kW y 6 kW.

#### **1.4.2. Nacional**

Alata (2015) en su tesina titulada “Dimensionamiento de un Sistema de Bombeo con Paneles Solares – Caso UNALM” propone el diseño de una instalación fotovoltaica para alimentar eléctricamente una estación de bombeo y así abastecer de agua a los servicios higiénicos de un pabellón de la Universidad Nacional Agraria la Molina ubicada en Lima. Los requerimientos de agua son 5 m<sup>3</sup> diarios y se establece un tiempo de bombeo de 4 horas. La altura dinámica de bombeo se estima en unos 6.2 m. El mes más desfavorable para la radiación solar es el mes de junio con una irradiación de 4.69 kWh/m<sup>2</sup>. En la elección de componentes se tiene 1 panel solar de 110 W, una bomba superficial con motor DC de 40 W, regulador de carga de 10 A – 12 V, 1 batería de 100 Ah – 12 V, y otros elementos de protección eléctrica. Las mediciones en campo de la temperatura alcanzada por el panel solar muestran valores de hasta 50 °C. Finalmente, el autor estima el costo del sistema de bombeo solar en S/ 3500 con un tiempo de retorno de 4.8 años.

Heredia & Sánchez (2017) en su tesis titulada “Diseño de un Sistema de Bombeo Fotovoltaico por Goteo Automatizado Para Terrenos de Cultivo de Espárragos del Fundo Inca Verde en el Sector Pampas La Sandías Provincia de Chepén - Departamento de La Libertad” proponen el dimensionamiento de un sistema de riego solar por goteo de 10 hectáreas de espárrago el cuál se puede cultivar y cosechar durante cualquier época del año. Los goteros

seleccionados tienen una descarga de 1.5 l/h. La necesidad de agua de las 10 hectáreas es de 424075.5 l diarios los cuales se dividen en 5 turnos de 2 hectáreas cada uno con un tiempo máximo de 1.89 horas de riego por turno. Los parámetros de bombeo son para un caudal de 44955 l/h y una carga dinámica total de 61.77 m dando como resultado 2 bombas centrífugas trifásicas de 10 hp conectadas en paralelo. El dimensionado del sistema fotovoltaico da como resultado 152 paneles solares de 260 W, 296 baterías de 254 Ah, 7 reguladores de 100 A, y 6 inversores de 4 kW. Para la automatización del riego se emplean contactores, temporizadores y electroválvulas.

Asmat (2018) en su tesis titulada “Determinación de la Eficiencia de un Sistema de Bombeo Fotovoltaico en el Distrito de Yaurisque – Cusco” evalúa técnicamente los componentes de un sistema de bombeo solar existente compuesto de una bomba solar, un panel fotovoltaico y un tanque elevado que es usado para riego agrícola en épocas secas del año. Durante el periodo de prueba, el volumen diario de agua bombeado fue de 4.17 m<sup>3</sup>/día debido a que el abatimiento del pozo restringía un bombeo continuo a pesar de la buena radiación de la zona. La eficiencia global del sistema se estima en 24.95%. El estudio muestra que el caudal otorgado por la bomba y la energía entregada por el panel son muy dependientes de la radiación solar. Finalmente, concluye que el sistema de bombeo no trabaja en el punto de máxima eficiencia debido a que la bomba opera con una altura bastante menor a la óptima. Bajo estas

condiciones, el área máxima que puede regarse es de 3400 m<sup>2</sup> para cultivos cómo maíz amiláceo, trigo y hortalizas.

Hervias (2018) en su tesis titulada “Diseño de un Sistema de Bombeo mediante Energía Solar Fotovoltaica para Suministrar Agua Potable a la Población de Maynas – Perú” plantea el diseño de una instalación solar para abastecer de agua potable a una población de 120 familias en la ciudad de Iquitos mediante la potabilización del agua del río Nanay con una planta de tratamiento de ósmosis inversa. La autora determina la irradiación de la zona usando datos de la NASA, calcula la potencia de la bomba usando la teoría de la mecánica de fluidos y obtiene las horas de insolación con la cual establece el régimen de bombeo. Además, dimensiona las tuberías a usar. Para cubrir la necesidad eléctrica del sistema se requieren 15 paneles policristalinos de 330 W generando una potencia total de 4950 W los cuales son consumidos por una bomba trifásica sumergible de 3 hp.

Peralta (2018) en su trabajo de investigación titulado “Estudio Experimental de un Sistema de Bombeo Solar Fotovoltaico en Corriente Continua” realiza un análisis experimental de la generación de energía eléctrica de una instalación fotovoltaica que alimenta a un motor de corriente continua para bombear agua para el riego de uva en el distrito de Urcu en Arequipa. Se utilizaron diferentes instrumentos de medición para la obtención de datos. Todas las señales emitidas por los instrumentos de medición fueron enviadas a un sistema de adquisición de datos para su posterior envío a una computadora en la cual se analizó y procesó. Los datos medidos para la

radiación muestran un gran potencial solar de la zona. El autor especifica que el uso de la energía solar fotovoltaica en corriente continua es más eficiente debido a que no se necesita de un inversor DC/AC. Un resultado importante es que la señal que mide el osciloscopio en el motor DC de la bomba es del tipo continuo pero los pulsos generan una señal muy parecida a una onda sinusoidal lo cual mejora la eficiencia de la generación del campo magnético y este es el motivo por el cuál todo el sistema opera en DC.

Dávalos (2019) en su tesis titulada “Diseño de un Sistema de Bombeo Fotovoltaico para Riego Agrícola en el Caserío La Guayaba, distrito de Bellavista, Jaén – Cajamarca” propone el diseño de un generador solar fotovoltaico para electrificar una bomba que se encargará de impulsar agua hacia varios tanques de almacenamiento para el riego de 1 hectárea de yuca en el departamento de Cajamarca. La caracterización del recurso solar de la zona muestra un valor mínimo de radiación diaria de  $3.71 \text{ kWh/m}^2$  y se da en el mes de febrero. La necesidad hídrica de riego se estima en  $40 \text{ m}^3/\text{día}$  lo cual se debe abastecer en 3.71 horas dando como resultado un caudal de  $10.78 \text{ m}^3/\text{h}$ . Los cálculos muestran una altura total equivalente de 28.6 m, lo cual tiene que ser suministrado por la bomba. Se selecciona una electrobomba solar sumergible de 1.7 kW la cual es energizada mediante 16 paneles fotovoltaicos monocristalinos de 100 W. El sistema de almacenamiento de agua se dimensiona para 1 día de autonomía dando como resultado 14 cisternas de 2800 l cada una conectadas entre sí. La evaluación económica proyecta una inversión de USD 21757.13 con un VAN de USD

15976.67 y un TIR de 9%. El autor recomienda implementar el proyecto diseñado.

Talavera (2019) en su tesis titulada “Factibilidad Técnico Económico mediante la Implementación de Paneles Solares Fotovoltaicos para Accionar las Bombas de Riego Agrícola en el Distrito de Pacanguilla – Chepén – La Libertad” propone la instalación de un sistema solar fotovoltaico para alimentar eléctricamente los motores de las bombas de agua de una caseta del sistema de riego existente en una empresa agrícola ubicada en el departamento de La Libertad. La caseta del sistema de riego está conformada por 7 bombas de 0.75 hp y 2 bombas de 50 hp. El valor de la irradiación solar fue determinado con el software PVsyst dando un valor crítico diario de 4.74 kWh/m<sup>2</sup> en el mes de julio. La inclinación óptima calculada es de 9° sin embargo el autor escoge 30°. El diseño fotovoltaico se realiza dividiendo el sistema en 3 partes. El primer sistema está conformado por las 7 bombas de 0.75 hp las cuales consumen en total una energía diaria de 23.1 kWh dando como resultado 16 paneles de 350 W con 20 baterías de 600 Ah - 12 V. Los otros dos sistemas son para cada bomba de 50 hp las cuales necesitan diariamente 222 kWh de energía cada una dando para cada instalación 150 paneles de 350 W y 55 baterías de 1000 Ah - 24 V. El análisis económico da como resultado una inversión de S/ 1009149.72 obteniendo un ROI de tan solo 3 años lo cual sugiere que el proyecto es rentable de modo que el autor recomienda su implementación.

Zambrano (2019) en su tesis titulada “Sistema de Bombeo de Agua Utilizando Paneles Solares en el Sector Boyero – C.P. Porcón Alto” evalúa la factibilidad de una instalación solar fotovoltaica para bombear agua subterránea desde un pozo hasta un reservorio con la posterior distribución a una población proyectada de 134 personas que viven en el centro poblado Porcón Alto en Cajamarca. La población manifiesta que su principal problema es el desabastecimiento de agua durante la época de estiaje. Para determinar la factibilidad hidráulica se realizaron 20 mediciones en el pozo para calcular el caudal proporcionado por la fuente. Se determina la factibilidad hidráulica debido a que el caudal de la fuente de 1.232 l/s es mayor que el caudal máximo diario requerido por toda la población de 0.101 l/s. Por otro lado, se analizaron los datos proporcionados por el SENAMHI de radiación solar de 6 años (2013 al 2018) entre los meses de mayo a octubre (meses de estiaje) dando una media de 6.22 horas de sol al día con lo cual se verifica la factibilidad energética. El dimensionamiento del sistema resulta en una bomba sumergible monofásica de 1 hp, un tanque de almacenamiento de 2500 l y 4 paneles solares de 370 W. La red de distribución se dimensiona teniendo en cuenta que las presiones en los puntos de entrega sean mayores a 5 mca y las velocidades estén entre 0.6 m/s y 3.0 m/s dando como resultado tuberías de PVC de 1” y 3/4”. Finalmente, el costo del proyecto asciende a S/ 43821.76.

Baltazar (2020) en su tesis titulada “Sistema de Bombeo Solar Fotovoltaico para Abastecimiento de Agua en la I.E.P. Apóstol San Pedro del Distrito Tres De Diciembre” diseña la configuración de un sistema de bombeo accionado

por electricidad fotovoltaica para abastecer con agua de un manantial a un colegio particular ubicado en el departamento de Junín. El principal problema de la institución es la falta de abastecimiento de agua potable debido a las limitaciones de la red pública logrando abastecer como máximo 1000 l en 9 horas de trabajo lo cual provoca un incumplimiento en lo dispuesto en el Reglamento Nacional de Edificaciones. El cálculo se inicia con el establecimiento del periodo de diseño, población futura de estudiantes, dotación de agua por alumno y los caudales de consumo. Luego se diseña el diámetro de las líneas de conducción, se calcula la velocidad del flujo dentro de las tuberías, se determinan las pérdidas primarias y secundarias, y se dimensiona el reservorio y cisterna. En base a los cálculos realizados, el sistema tiene la siguiente configuración: 1 bomba centrífuga superficial de 1.5 hp, 6 paneles de 300 W, controlador de carga de 60 A, 4 baterías con capacidad de 155 Ah, un inversor de 1000 W - 12 V, tanque reservorio de 11.272 m<sup>3</sup>, tanque cisterna de 8.455 m<sup>3</sup> y una línea de conducción de PVC de 2".

Jara (2021) en su tesis titulada "Diseño de un Sistema de Bombeo Solar Directo para Riego por Goteo en el Distrito de Guadalupito – La Libertad" plantea la configuración de una instalación de bombeo fotovoltaica para impulsar directamente agua para regadío desde un pozo hasta los sembríos de 7 hectáreas de palta ubicado en el departamento de La Libertad. El diseño se considera directo ya que no incluye tanque de almacenamiento ni baterías. La data de radiación solar se obtiene de la herramienta web PVGIS. El criterio

que se aplica es para el mes con mayor requerimiento hídrico el cual resulta ser el mes de febrero con una irradiación diaria de 5.90 kWh/m<sup>2</sup>. La máxima demanda hídrica para suplir es de 1029 l/min con una carga dinámica total de 27.5 m lo cual será suministrado por una bomba sumergible trifásica de 7.5 kW. El generador fotovoltaico consta de 28 paneles solares de 370 W inclinados 15°. Finalmente, la evaluación económica indica un retorno de la inversión de 10 años.

## **CAPITULO II MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL**

### **2.1. Marco teórico**

#### **2.1.1. Instalaciones solares fotovoltaicas**

La radiación solar que llega a un lugar puede obtenerse a partir de diferentes bases de datos las cuales generalmente utilizan las coordenadas geográficas para localizar un determinado lugar del planeta.

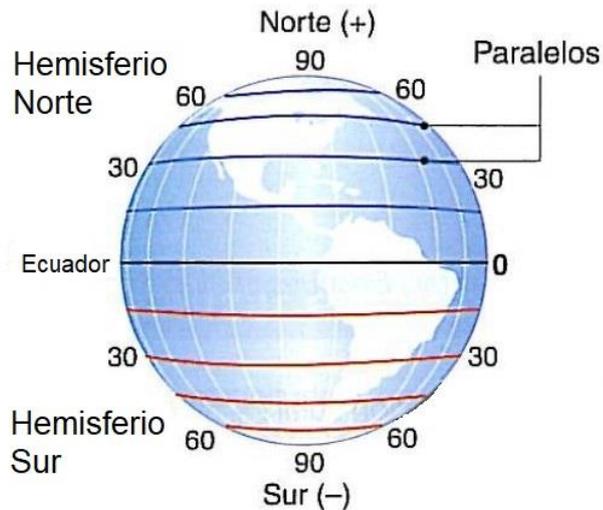
##### **2.1.1.1. Coordenadas geográficas**

Castejón & Santamaría (2010) manifiestan que cualquier punto sobre la superficie de la tierra puede definirse con precisión mediante sus coordenadas geográficas: latitud y longitud.

##### **2.1.1.1.1. Latitud**

La latitud  $\phi$  es la distancia angular entre un punto cualquiera en la superficie terrestre y la línea ecuatorial medida sobre el meridiano que pasa por dicho punto. Según el hemisferio en que se encuentre el punto puede ser latitud norte o latitud sur como se indica en la Figura 2.1. Todos los puntos que presentan una misma latitud definen un paralelo. El ecuador es el paralelo  $0^\circ$  (Castejón & Santamaría, 2010).

**Figura 2.1: Latitud de un lugar.**



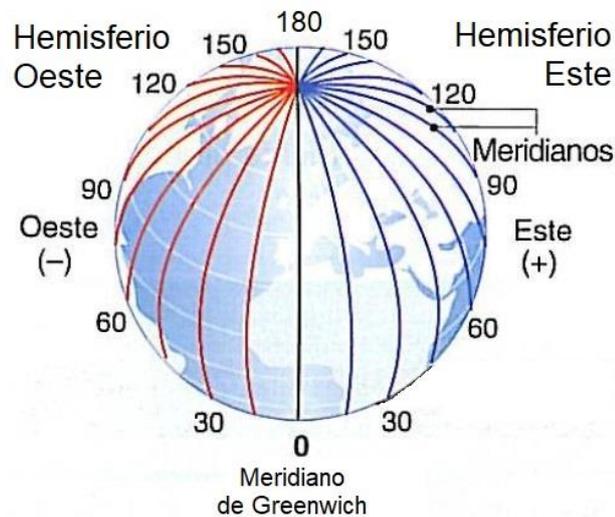
**Fuente:** Adaptada de Castejón & Santamaría, Instalaciones Solares Fotovoltaicas, 2010.

De la Figura 2.1, se observa que la latitud se mide de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  y puede representarse mediante dos formas, por ejemplo, un punto a  $30^\circ$  latitud sur puede especificarse como  $30^\circ$  S o  $-30^\circ$ , y un punto a  $60^\circ$  latitud norte puede representarse como  $60^\circ$  N o  $+60^\circ$ .

#### 2.1.1.1.2. Longitud

La longitud  $\lambda$  es la distancia angular entre un punto en la superficie terrestre y el meridiano de Greenwich medida sobre el paralelo que pasa por dicho punto. El meridiano  $0^\circ$  es el meridiano de Greenwich por ser el meridiano de referencia. El meridiano de Greenwich divide a la tierra en dos hemisferios: el hemisferio occidental (oeste) y el hemisferio oriental (este) como se aprecia en la Figura 2.2. Todos los puntos que presentan una misma longitud definen un meridiano (Castejón & Santamaría, 2010).

**Figura 2.2: Longitud de un lugar.**



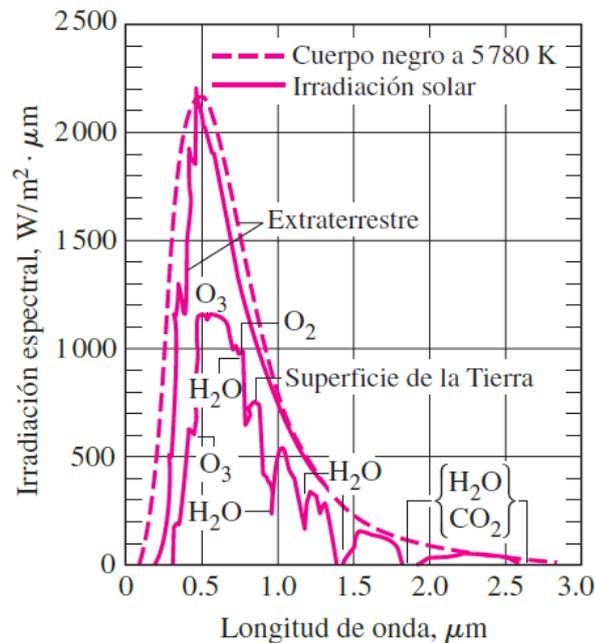
**Fuente:** Adaptada de Castejón & Santamaría, Instalaciones Solares Fotovoltaicas, 2010.

De la Figura 2.2, se observa que la longitud se mide de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  y puede representarse mediante dos formas, por ejemplo, un punto a  $60^\circ$  longitud este puede especificarse cómo  $60^\circ$  E o  $+60^\circ$ , y un punto a  $90^\circ$  longitud oeste puede representarse como  $90^\circ$  W o  $-90^\circ$ .

#### 2.1.1.2. Radiación solar

El sol es la principal fuente de energía de nuestro planeta. Según Brown et al. (2003) la composición actual del sol es de aproximadamente 73% de hidrógeno, 26% de helio y 1% de otros elementos químicos. La energía generada en el sol proviene de las reacciones de fusión nuclear en donde dos átomos de hidrógeno se fusionan para formar un átomo de helio (Çengel & Ghajar, 2011). Esta energía liberada durante las reacciones de fusión llega a nuestro planeta en forma de radiación solar que es un conjunto de ondas electromagnéticas con diferentes longitudes de onda como se muestra la Figura 2.3.

**Figura 2.3: Radiación solar afuera de la atmósfera y en la superficie de la tierra.**



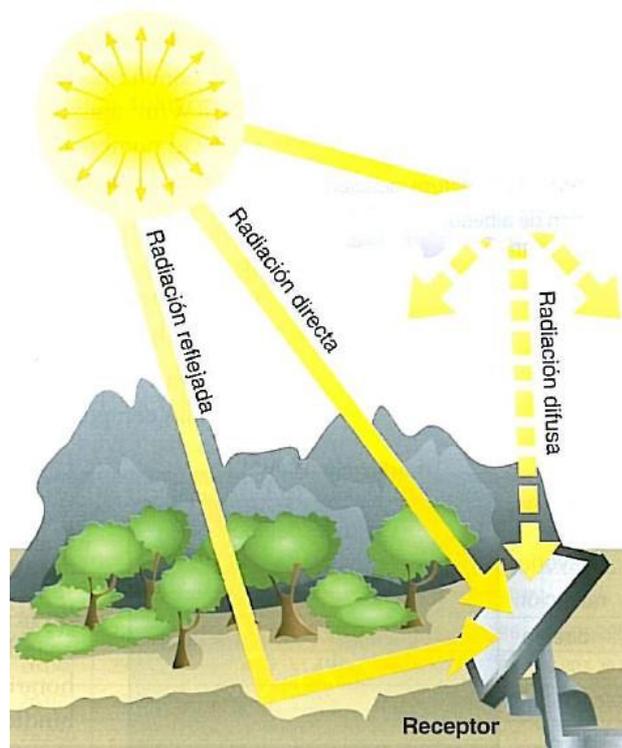
**Fuente:** Çengel & Ghajar, Transferencia de Calor y Masa, 2011.

En la Figura 2.3 puede observarse que la radiación solar que llega a la superficie de la tierra es menor que la existente apenas afuera de la atmósfera. Según Çengel & Ghajar (2011) este fenómeno ocurre debido a la atenuación que sufre la radiación solar al pasar a través de la atmósfera debido a fenómenos como la absorción y la dispersión. Castejón & Santamaría (2010) especifican que la porción del espectro con longitudes de onda que van desde los  $0.40 \mu m$  hasta los  $0.78 \mu m$  corresponde a la luz visible, las ondas electromagnéticas con longitudes de onda menores a  $0.40 \mu m$  son radiaciones ultravioletas, y las radiaciones con longitudes de onda mayores a  $0.78 \mu m$  corresponden a radiaciones infrarrojas.

### 2.1.1.3. Tipos de radiación solar sobre una superficie

Perpiñán (2020) especifica que la radiación solar que llega a una superficie localizada en la corteza terrestre puede descomponerse en 3 partes: radiación directa, radiación difusa, y radiación reflejada o de albedo. En la Figura 2.4 se representan estos tipos de radiaciones.

**Figura 2.4: Tipos de radiación sobre una superficie receptora.**



**Fuente:** Castejón & Santamaría, Instalaciones Solares Fotovoltaicas, 2010.

- Radiación directa: La radiación directa es la radiación que llega a una superficie receptora que proviene directamente desde el sol y no sufre ningún tipo de desviación por parte de la atmósfera (Perpiñán, 2020).
- Radiación difusa: La radiación difusa es la radiación que llega a una superficie receptora que procede de todo el cielo excepto el sol. Incluye todos los rayos dispersados por la atmósfera (Perpiñán, 2020).

- Radiación de albedo o reflejada: La radiación de albedo o reflejada es la radiación que llega a una superficie receptora reflejada por el suelo (Perpiñán, 2020).

De acuerdo con Perpiñán (2020) a la suma de estas tres componentes se le conoce como radiación global y es la radiación total que recibe una superficie.

#### 2.1.1.4. Energía solar fotovoltaica

Según Castejón & Santamaría (2010) la energía solar fotovoltaica se refiere a la energía eléctrica obtenida a partir de la conversión directa de la radiación solar a través de un dispositivo electrónico denominado célula solar fotovoltaica también conocida como célula solar fotoeléctrica. El principio de funcionamiento de una célula solar se basa en el efecto fotovoltaico. El conjunto de células solares conectadas eléctricamente forma un panel o módulo solar y el conjunto de módulos fotovoltaicos conectados eléctricamente forman un generador fotovoltaico. En la Figura 2.5 se muestra un ejemplar de una célula solar.

**Figura 2.5: Célula solar fotovoltaica.**

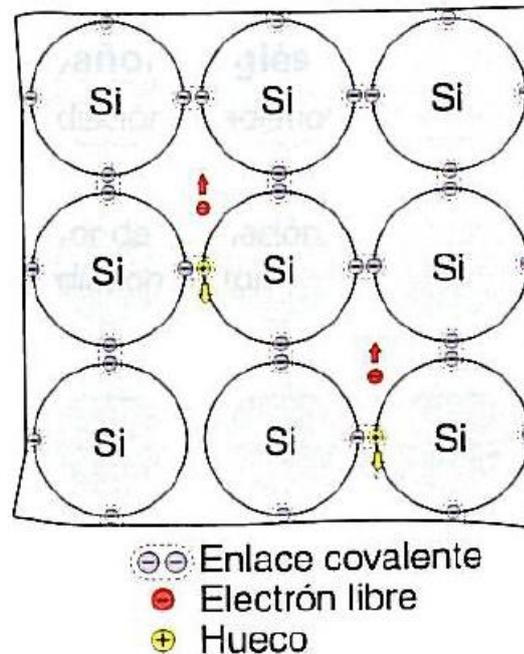


**Fuente:** Iberdrola S.A., “Células fotovoltaicas: conoce su evolución, sus diferentes tipos y las últimas innovaciones”, 2023.

#### **2.1.1.5. Efecto fotovoltaico**

Según Castejón & Santamaría (2010) las células solares están fabricadas de un material semiconductor el cual presenta una mejor conductividad eléctrica que un aislante, pero no es tan buen conductor eléctrico como un metal. El semiconductor más usado industrialmente es el silicio. Los átomos de silicio tienen 4 electrones de valencia. Los átomos de silicio tienden a formar estructuras cristalinas en la que cada átomo comparte sus 4 electrones de valencia con 4 átomos de su alrededor formando enlaces covalentes. Si los electrones de un enlace covalente logran absorber cierto nivel mínimo de energía, éstos escapan del enlace y se transforman en electrones libres que viajan por la red cristalina. Cuando un electrón abandona un átomo de silicio, deja un hueco en la red cristalina y para fines prácticos un hueco puede modelarse como una partícula con carga positiva. En la Figura 2.6 se presenta un esquema de la red cristalina formada por el silicio.

**Figura 2.6: Red cristalina de átomos de silicio.**



**Fuente:** Castejón & Santamaría, Instalaciones Solares Fotovoltaicas, 2010.

La energía mínima para romper un enlace covalente y generar un par electrón-hueco es 1.2 eV para el caso del silicio. La radiación solar está formada por ondas electromagnéticas las cuales transportan energía en forma de fotones con diferentes niveles de energía. Por ejemplo, el rango de radiación ultravioleta tiene fotones con energía superiores a 3.1 eV, la luz visible entre 1.6 eV a 3.1 eV, y la radiación infrarroja menor a 1.6 eV. Cuando un fotón con suficiente energía en su trayectoria incide en un electrón de enlace provocará un par electrón-hueco, sin embargo, uno con poca energía no producirá ninguna rotura de enlace (Castejón & Santamaría, 2010).

Cuando incide luz en un material semiconductor se generan electrones y huecos con movimientos aleatorios en la red cristalina. Para que este proceso tenga utilidad, los electrones y huecos deben agruparse en zonas diferentes

con la finalidad de generar un campo eléctrico lo que a su vez crea una diferencia de potencial. El fenómeno de conversión de la luz solar en diferencia de potencial se conoce como efecto fotovoltaico. Para agrupar los electrones y huecos en áreas diferentes se utiliza una unión de semiconductores P y N (Castejón & Santamaría, 2010).

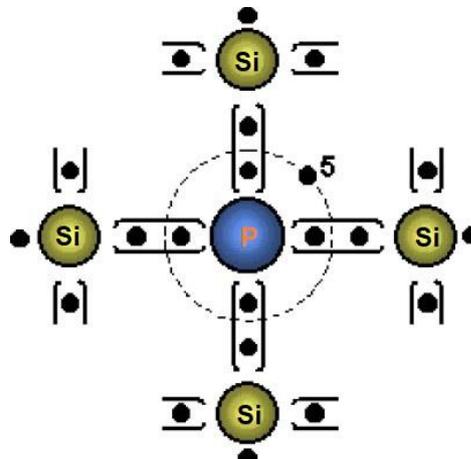
#### **2.1.1.6. Semiconductores P y N**

Los semiconductores pueden mejorar su conductividad eléctrica al agregar impurezas en la red cristalina proceso que se denomina dopado. Existen dos tipos de impurezas:

- a) Impurezas pentavalentes: Las impurezas pentavalentes son elementos químicos que tienen 5 electrones de valencia como por ejemplo el fósforo, el antimonio y el arsénico.
- b) Impurezas trivalentes: Las impurezas trivalentes son elementos químicos que tienen 3 electrones de valencia como por ejemplo el boro, el galio y el indio.

Cuando el silicio se dopa con impurezas pentavalentes, cuatro de los electrones de valencia de la impureza forman enlaces con los átomos de silicio llegando al equilibrio, sin embargo, el quinto electrón de la impureza queda libre el cual podría convertirse en portador de carga negativa aumentando así la conductividad eléctrica del silicio. Los semiconductores dopados con impurezas pentavalentes se les denomina semiconductores tipo N (Castejón & Santamaría, 2010). En la Figura 2.7 se representa un dopaje tipo N.

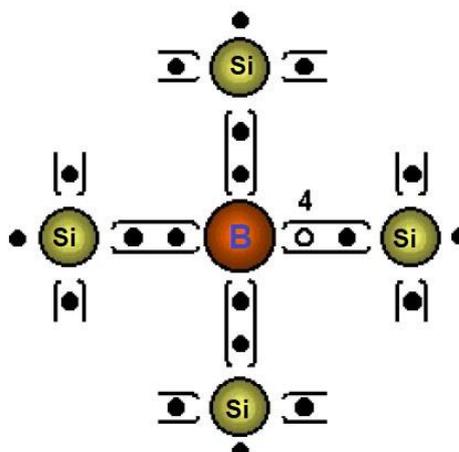
**Figura 2.7: Dopaje tipo N.**



**Fuente:** Adaptada de Perpiñán, Energía Solar Fotovoltaica, 2020.

Por otro lado, cuando el silicio se dopa con impurezas trivalentes, los tres electrones de valencia de la impureza forman enlaces con los átomos de silicio llegando al equilibrio, sin embargo, el cuarto electrón de valencia que le “falta” se comporta como un hueco en la red cristalina. El hueco se puede modelar como una carga positiva. Los semiconductores dopados con impurezas trivalentes se les denomina semiconductores tipo P (Castejón & Santamaría, 2010). En la Figura 2.8 se representa un dopaje tipo P.

**Figura 2.8: Dopaje tipo P.**

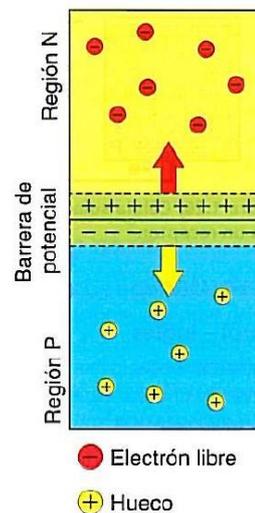


**Fuente:** Adaptada de Perpiñán, Energía Solar Fotovoltaica, 2020.

### 2.1.1.6.1. Unión P-N

Castejón & Santamaría (2010) mencionan que cuando a un material semiconductor se le añaden impurezas tipo N por un lado e impurezas tipo P por otro se forma una unión P-N con dos zonas bien definidas eléctricamente, una zona N y una zona P separadas por una barrera de potencial como se muestra en la Figura 2.9.

**Figura 2.9: Unión P-N en un semiconductor.**



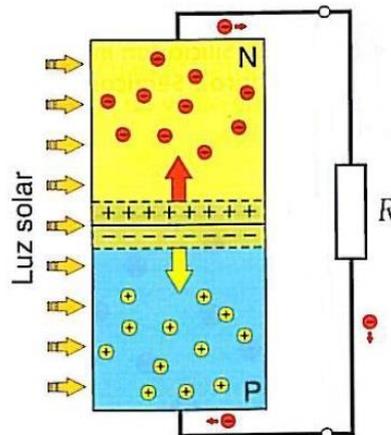
**Fuente:** Castejón & Santamaría, Instalaciones Solares Fotovoltaicas, 2010.

Debido a la atracción eléctrica que se da entre cargas positivas y negativas, los electrones libres de la región N cercanos a la región P se mueven a esta región ocupando los huecos más cercanos de la región P. Por lo tanto, en la región N se crean iones positivos y en la región P se crean iones negativos. Debido a que los iones forman parte de una red cristalina no pueden moverse y de esta forma establecen un campo eléctrico o barrera de potencial el cual impide el paso del resto de electrones libres de la región N a la región P. Esta barrera de potencial mantiene separados a los electrones libres y huecos en cada región (Castejón & Santamaría, 2010).

### 2.1.1.7. Célula solar

De acuerdo con Castejón & Santamaría (2010) una célula solar es básicamente una unión P-N con conexiones eléctricas en la región P y región N de tal forma que permiten la conexión de una carga eléctrica externa. Cuando se ilumina la célula solar se generan electrones libres y huecos los cuales son separados por la barrera de potencial de la unión P-N. De esta forma, se concentran cargas negativas en la región N y cargas positivas en la región P produciendo una diferencia de potencial que aumenta con la potencia de la luz que incide en la célula solar. En la Figura 2.10 se representa el funcionamiento de una célula solar.

**Figura 2.10: Célula solar conectada a una carga.**



**Fuente:** Castejón & Santamaría, Instalaciones Solares Fotovoltaicas, 2010.

Para cuantificar la radiación solar que llega a una célula solar se utilizan dos magnitudes: la irradiancia y la irradiación.

### **2.1.1.8. Irradiancia e irradiación**

#### **2.1.1.8.1. Irradiancia**

La irradiancia es la potencia de la radiación solar por unidad de área. En el sistema internacional se mide en  $W/m^2$  (Perpiñán, 2020).

#### **2.1.1.8.2. Irradiación**

La irradiación es la integración de la irradiancia en un periodo de tiempo determinado (Perpiñán, 2020). En el sistema internacional se mide en  $J/m^2$ . Debido a la relación con la energía eléctrica se utilizan unidades como  $Wh/m^2$  y sus múltiplos.

En la presente investigación para especificar la irradiancia global e irradiación global se utilizará la letra  $H$ . En la Tabla 2.1 se dan algunos ejemplos de notación.

**Tabla 2.1: Ejemplos de notación para irradiancias e irradiaciones.**

Notación	Significado
$H^{(\beta)}$	Irradiancia global sobre una superficie con inclinación $\beta$ y acimut $0^\circ$ .
$H^{(0^\circ)}$	Irradiancia global sobre una superficie horizontal.
$H^{(\alpha,\beta)}$	Irradiancia global sobre una superficie con acimut $\alpha$ e inclinación $\beta$ .
$H_d^{(\beta)}$	Irradiación global diaria sobre una superficie con inclinación $\beta$ y acimut $0^\circ$ .
$H_d^{(0^\circ)}$	Irradiación global diaria sobre una superficie horizontal.
$H_d^{(\alpha,\beta)}$	Irradiación global diaria sobre una superficie con acimut $\alpha$ e inclinación $\beta$ .
$H_m^{(\beta)}$	Irradiación global mensual sobre una superficie con inclinación $\beta$ y acimut $0^\circ$ .
$H_m^{(0^\circ)}$	Irradiación global mensual sobre una superficie horizontal.
$H_m^{(\alpha,\beta)}$	Irradiación global mensual sobre una superficie con acimut $\alpha$ e inclinación $\beta$ .
$H_a^{(\beta)}$	Irradiación global anual sobre una superficie con inclinación $\beta$ y acimut $0^\circ$ .
$H_a^{(0^\circ)}$	Irradiación global anual sobre una superficie horizontal.
$H_a^{(\alpha,\beta)}$	Irradiación global anual sobre una superficie con acimut $\alpha$ e inclinación $\beta$ .

Nota: El acimut e inclinación de una superficie se definen en la Sección 2.1.1.10.

**Fuente:** Elaboración del autor.

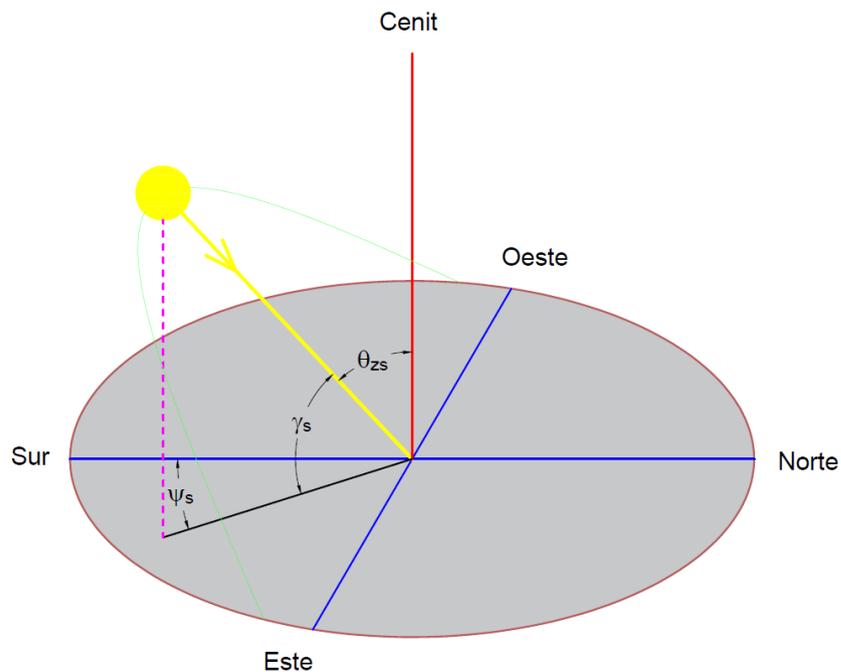
A continuación, se define la posición del sol en el cielo mediante las coordenadas solares.

#### 2.1.1.9. Coordenadas solares

Considerando el movimiento aparente del sol alrededor de la tierra, se puede definir la posición del sol en el cielo en un lugar de la tierra mediante las

coordenadas solares: elevación solar y acimut solar. En la Figura 2.11 se muestra una representación gráfica de estas coordenadas.

**Figura 2.11: Coordenadas solares.**



**Fuente:** Elaboración del autor.

Estas coordenadas solares, se definen respecto a la perpendicular de la zona, llamada cenit, que si es proyectada hacia abajo pasa por el centro de la tierra.

A continuación, se definen las coordenadas solares:

- Elevación solar: La elevación solar  $\gamma_s$  es el ángulo formado por la dirección del sol, o de los rayos solares, con respecto a la horizontal del lugar (Castejón & Santamaría, 2010). La elevación solar varía a lo largo del día, siendo  $0^\circ$  en el alba y ocaso, y toma un valor máximo en el medio día solar (cuando el sol está contenido en el plano meridional del lugar).

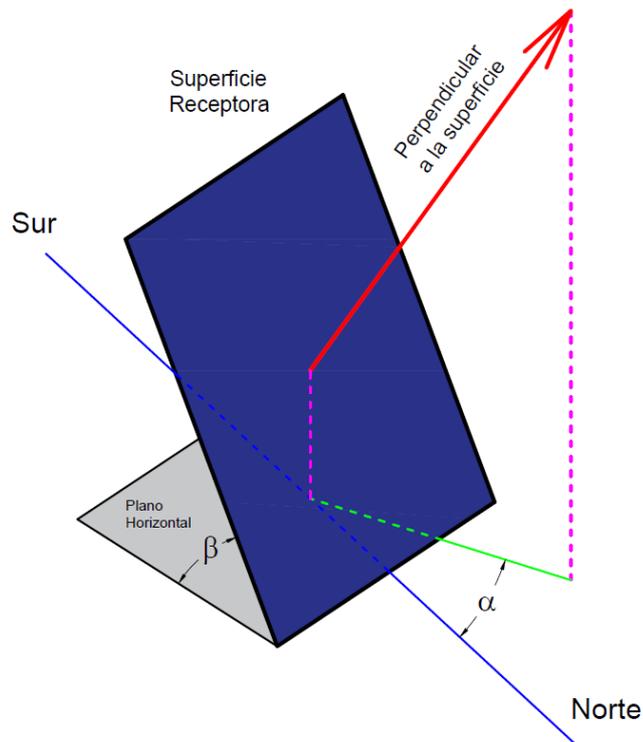
- Acimut solar: El acimut solar  $\psi_s$  es el ángulo formado por la proyección de la dirección del sol, o de los rayos solares, en el plano horizontal y la línea Norte-Sur. Generalmente, en el hemisferio sur toman al Norte y en el hemisferio norte al Sur como referencia (Castejón & Santamaría, 2010).
- Ángulo cenital: El ángulo cenital  $\theta_{zs}$  es el ángulo formado por la dirección del sol, o de los rayos solares, y el cenit del lugar. Es el ángulo complementario de la altura solar (Castejón & Santamaría, 2010).

#### **2.1.1.10. Orientación de una superficie receptora**

Una superficie receptora de radiación, como un panel solar, se debe colocar de tal forma que reciba la mayor cantidad de energía solar. La orientación de un panel solar se define mediante las siguientes coordenadas angulares:

- Ángulo de acimut: El ángulo de acimut  $\alpha$  es el ángulo que forma la proyección sobre el plano horizontal de la perpendicular al panel solar y la dirección Norte-Sur tal como se aprecia en la Figura 2.12.
- Ángulo de inclinación: El ángulo de inclinación  $\beta$  es el ángulo que forma el panel solar con respecto al plano horizontal como se representa en la Figura 2.12.

**Figura 2.12: Orientación de un panel solar.**



**Fuente:** Elaboración del autor.

Una superficie receptora recibe la mayor cantidad de radiación solar si es perpendicular a los rayos solares. Debido a que la posición del sol varía durante el día, por ende, la orientación de un panel solar tendría también que variar con la finalidad de captar la mayor cantidad de energía solar. El cambio de orientación de un panel solar se puede conseguir mediante la instalación de seguidores solares, sin embargo, estos dispositivos encarecen la instalación fotovoltaica y lo habitual es instalar los paneles solares en orientaciones fijas. La orientación fija óptima de un panel ( $\alpha_{opt}$  y  $\beta_{opt}$ ) depende de la latitud del lugar y del hemisferio donde se encuentre.

Para maximizar la energía solar recibida por un panel solar, el acimut del panel debe estar orientado perfectamente hacia el Norte para el caso del hemisferio

sur y perfectamente hacia el Sur en el caso del hemisferio norte. Esto es así, debido a que, en el medio día solar, el sol se encuentra en el plano meridional del lugar. Por lo tanto, el acimut óptimo para una superficie fija  $\alpha_{opt}$  es  $0^\circ$ .

La inclinación óptima de un panel fijo puede determinarse mediante fórmulas basadas en análisis estadísticos de la radiación solar que llega a diferentes latitudes en superficies con diferentes inclinaciones. Castejón & Santamaría (2010) proponen la siguiente fórmula, la cual es válida para proyectos que buscan la mayor captación de energía solar durante el año:

$$\beta_{opt} = 3.7 + 0.69 |\phi| \quad [2.1]$$

Donde:  $\beta_{opt}$  es el ángulo de inclinación óptimo del panel y  $\phi$  es la latitud del lugar.

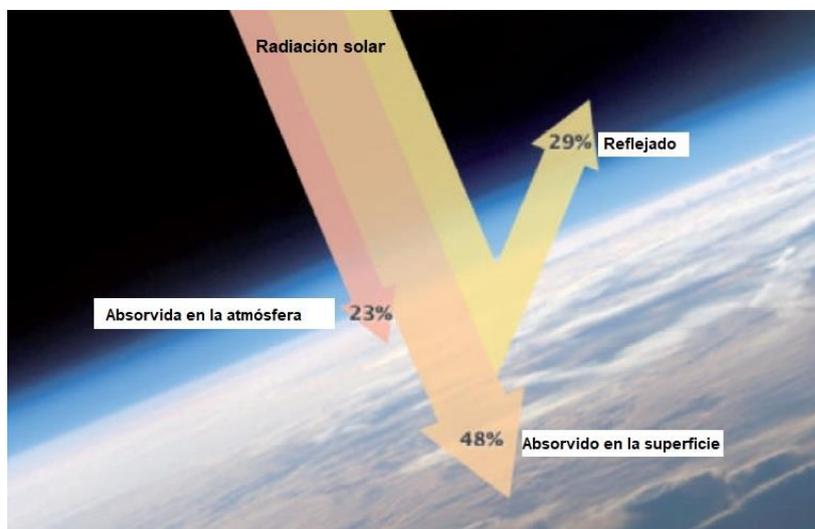
En la presente investigación, para determinar el ángulo de inclinación óptimo se usa un programa en Python el cual obtiene los valores de irradiación solar de una base de datos para un determinado lugar a diferentes ángulos de inclinación y devuelve el ángulo que aporta la mayor cantidad de energía solar.

En la práctica, cuando el ángulo de inclinación óptimo resulta ser menor a  $10^\circ$ , lo cual principalmente ocurre en los trópicos, los paneles solares se instalan inclinados  $10^\circ$  para permitir que la lluvia limpie los paneles de forma natural (Jacobson & Jadhav, 2018).

#### 2.1.1.11. Efecto del espesor de la atmósfera terrestre sobre la radiación solar

La radiación solar atraviesa la atmósfera antes de llegar a la superficie terrestre. La intensidad de la radiación se ve afectada por efectos atmosféricos como la reflexión y absorción. Del 100% de la radiación que llega al exterior de la atmósfera, el 29% es reflejado nuevamente al espacio exterior principalmente por las nubes, alrededor del 23% de la energía es absorbida por los gases que conforman la atmósfera, vapor de agua, polvo y otras partículas, y el 48% restante es absorbido en la superficie terrestre (Federación Bioquímica de la Provincia de Buenos Aires, 2012). En la Figura 2.13 se muestran estos efectos atmosféricos sobre la radiación solar.

**Figura 2.13: Efecto de la atmósfera sobre la radiación solar.**



**Fuente:** Adaptada de Federación Bioquímica de la Provincia de Buenos Aires, Las Nubes y el Ciclo de la Energía, 2012.

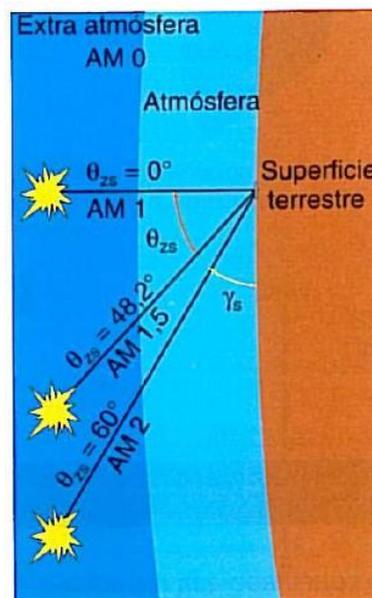
Los efectos atmosféricos mencionados anteriormente varían en intensidad dependiendo del espesor de la atmósfera que tiene que recorrer la radiación solar. Para especificar el recorrido atmosférico que tiene que viajar la radiación solar se utiliza el concepto de masa de aire (AM, por sus siglas en

inglés) la cual se representa en la Figura 2.14. Por ejemplo, cuando el sol está ubicado directamente arriba en un lugar, el recorrido de la radiación por la atmósfera es mínimo y se dice que la masa de aire vale 1, lo cual puede representarse como AM 1. El valor de AM 0 se utiliza para especificar a una superficie apenas afuera de la atmósfera terrestre. La masa de aire para una posición determinada del sol puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$AM = \frac{1}{\text{sen } \gamma_s} \quad [2.2]$$

Donde:  $AM$  es la masa de aire y  $\gamma_s$  es la elevación solar.

**Figura 2.14: Masa de aire para diferentes alturas solares.**



**Fuente:** Castejón & Santamaría, Instalaciones Solares Fotovoltaicas, 2010.

Los datos técnicos de los paneles solares se obtienen a partir de ensayos en donde se utiliza una condición de AM 1.5 lo que significa una altura solar de 41.8°.

#### **2.1.1.12. Radiación global sobre una superficie**

Los valores de la irradiación solar de un lugar pueden obtenerse de diferentes fuentes como lo son los desarrollados por los propios estados, empresas privadas, organizaciones e instituciones. Para el caso del Perú, existe un atlas de radiación solar desarrollado por el SENAMHI el cual data del año 2003 lo cual puede contener información desfasada debido a los cambios climáticos que ocurren con el tiempo. También, existen aplicaciones web confiables como las desarrolladas por la NASA y la Comisión Europea Joint Research Center que presentan datos más actualizados y con periodos climatológicos de más de 10 años. A continuación, se dan los enlaces hacia estas herramientas web:

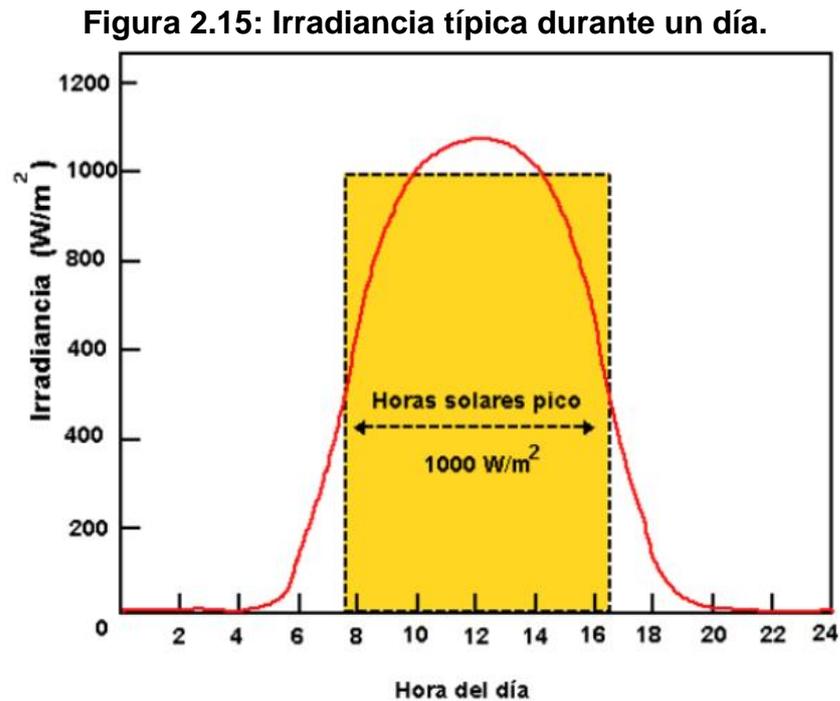
- POWER – NASA: <https://power.larc.nasa.gov/>
- PVGIS – Comisión Europea: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/)

En esta investigación se usará el aplicativo web PVGIS debido a que esta herramienta también proporciona las irradiaciones en planos inclinados lo cual permitirá determinar el ángulo de inclinación óptimo de los paneles solares. Según la European Commission (2023) el aplicativo PVGIS estima la radiación solar mediante el procesamiento de imágenes satelitales usando algoritmos matemáticos cuyos resultados luego son validados a partir de mediciones realizadas en estaciones terrestres.

#### **2.1.1.13. Horas solares pico**

Pérez et al. (2017) definen las horas solares pico HSP como la irradiación entregada por un sol hipotético con irradiancia constante de  $1 \text{ kW/m}^2$  que

coincide con la energía entregada por el sol real con todas sus variaciones de irradiancia durante un día normal. En la Figura 2.15 se muestra una representación gráfica de las horas solares pico.



**Fuente:** Pérez, Morales, & Castro, “The Hour Equivalent Solar Pick, Definition and Interpretation”, 2017.

Matemáticamente, las horas solares pico se calcula como la división entre la irradiación que recibe una determinada superficie durante un día (área bajo la curva roja en la Figura 2.15) y el valor de irradiancia de 1 kW/m<sup>2</sup>. Entonces, se tiene la siguiente ecuación:

$$HSP = \frac{H_d^{(\alpha,\beta)}}{1 \text{ kW/m}^2} \quad [2.3]$$

Donde:  $HSP$  son las horas solares pico y  $H_d^{(\alpha,\beta)}$  es la irradiación global diaria sobre una superficie con acimut  $\alpha$  e inclinación  $\beta$  en kWh/m<sup>2</sup>.

#### **2.1.1.14. Paneles solares**

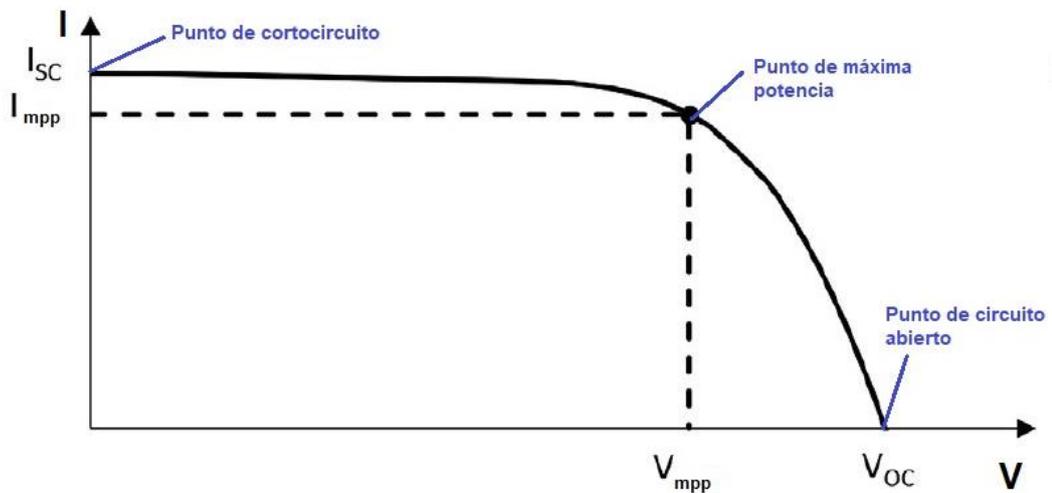
La agrupación eléctrica de varias células solares para la obtención de niveles de voltaje y corriente adecuados forman un panel fotovoltaico. Actualmente, la mayoría de las industrias utilizan los siguientes materiales para la fabricación de las células solares:

- Silicio monocristalino: El silicio monocristalino presenta una estructura cristalina uniforme lo que quiere decir que la red cristalina de todo el sólido es continua. Estos paneles presentan una eficiencia del 15% al 18% (Castejón & Santamaría, 2010).
- Silicio policristalino: El silicio policristalino presenta una estructura cristalina no uniforme y consta de múltiples pequeños cristales de silicio. Estos paneles presentan una eficiencia menor a los monocristalinos con valores característicos entre el 12% al 14% y son de menor coste que los monocristalinos (Castejón & Santamaría, 2010).
- Silicio amorfo: El silicio amorfo presenta una estructura no cristalina. La potencia de estos paneles disminuye con el uso y su eficiencia está alrededor del 6% al 9% (Castejón & Santamaría, 2010).

##### **2.1.1.14.1. Curva característica I vs V**

La curva característica de un panel solar se muestra en la Figura 2.16.

**Figura 2.16: Curva I vs V de un panel solar.**



**Fuente:** Adaptada de Casado, et al., Raspberry Pi Based Photovoltaic I-V Curve Tracer, 2022.

Según Castejón & Santamaría (2010) la curva característica anterior se obtiene al conectar diferentes cargas al circuito del panel bajo determinadas condiciones de prueba que suelen ser una irradiancia de  $1000 \text{ W/m}^2$ , temperatura de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  y masa de aire AM 1.5. También se incluyen los casos de circuito abierto y corto circuito. Esta curva presenta los siguientes puntos característicos:

- Punto de corto circuito: En el punto de corto circuito, el voltaje es 0 y se presenta la máxima corriente entregada por el panel  $I_{SC}$ .
- Punto de circuito abierto: En el punto de circuito abierto, la corriente es 0 y se presenta el máximo voltaje entregado por el panel  $V_{OC}$ .
- Punto de máxima potencia: En el punto de máxima potencia se presenta la máxima potencia entregada por el panel  $\dot{W}_{mpp}$ . Este punto define la corriente  $I_{mpp}$  y el voltaje  $V_{mpp}$ . Se cumple la siguiente relación:

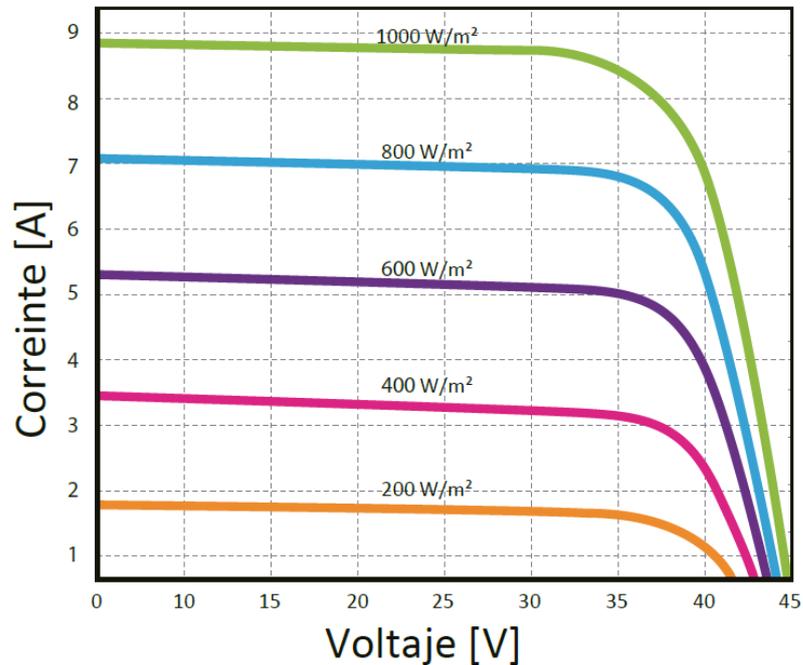
$$\dot{W}_{mpp} = I_{mpp} V_{mpp} \quad [2.4]$$

Donde:  $\dot{W}_{mpp}$  es la potencia máxima o potencia pico del panel solar,  $I_{mpp}$  es la corriente en el punto de máxima potencia, y  $V_{mpp}$  es el voltaje en el punto de máxima potencia.

#### **2.1.1.14.2. Efecto de la irradiancia y temperatura en la curva I vs V**

Es importante conocer cómo afectan la irradiancia y temperatura en la curva característica de un panel. En la Figura 2.17 se muestra la curva I vs V en función de la irradiancia para un panel solar. Como puede apreciarse, la corriente de corto circuito  $I_{sc}$  varía linealmente con la irradiancia. El voltaje de circuito abierto  $V_{oc}$  varía muy poco con respecto a la irradiancia por lo que puede suponerse como constante para fines prácticos. La potencia máxima del panel  $\dot{W}_{mpp}$  aumenta si la irradiancia aumenta y disminuye si la irradiancia disminuye.

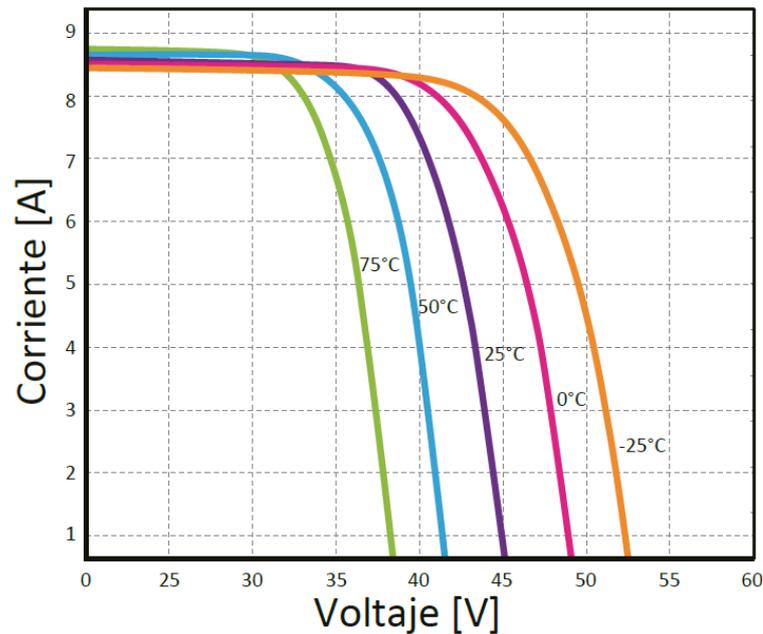
**Figura 2.17: Curva característica I vs V de un panel solar a diferentes irradiancias a una temperatura de la célula de 25 °C.**



**Fuente:** Bauer Energy, Panel Solar 370 W 72 Células Monocristalino, 2019.

La Figura 2.18 muestra la curva I vs V en función de la temperatura de la célula solar para un panel solar. De esta figura, puede apreciarse que el voltaje de circuito abierto  $V_{oc}$  disminuye cuando aumenta la temperatura de la célula. Además, la corriente de cortocircuito  $I_{sc}$  aumenta ligeramente cuando aumenta la temperatura y a efectos prácticos puede considerarse constante. Por otro lado, la potencia máxima del panel  $\dot{W}_{mpp}$  disminuye cuando aumenta la temperatura.

**Figura 2.18: Curva característica I vs V de un panel solar a diferentes temperaturas de célula y una irradiancia de 1000 W/m<sup>2</sup>.**



**Fuente:** Bauer Energy, Panel Solar 370 W 72 Células Monocristalino, 2019. Castejón & Santamaría (2010) especifican que la temperatura de funcionamiento de una célula solar depende de la temperatura ambiente y de la irradiancia, y proponen la siguiente relación para su cálculo:

$$T_{cel} = T_{amb} + (NOCT - 20) \frac{H^{(\alpha,\beta)}}{800} \quad [2.5]$$

Donde:  $T_{cel}$  es la temperatura de operación de la célula solar en °C,  $T_{amb}$  es la temperatura ambiente en °C,  $NOCT$  es temperatura de operación nominal de la célula solar en °C, y  $H^{(\alpha,\beta)}$  es la irradiancia incidente en la célula solar en W/m<sup>2</sup>.

### 2.1.1.14.3. Hoja técnica del fabricante

Los datos eléctricos que aparecen en una hoja técnica son:

- Potencia máxima: La potencia máxima  $\dot{W}_{mpp}$  es también conocida como potencia pico. Es un punto en la curva  $I$  vs  $V$  en donde el producto  $I \times V$  es máximo.
- Voltaje de circuito abierto: El voltaje de circuito abierto  $V_{oc}$  es el voltaje proporcionado por el módulo solar cuando no existe ninguna carga conectada.
- Intensidad de cortocircuito: La intensidad de cortocircuito  $I_{sc}$  es la corriente proporcionada por el módulo solar cuando se cortocircuitan sus bornes.
- Voltaje en el punto de máxima potencia: El voltaje en el punto de máxima potencia  $V_{mpp}$  es el voltaje correspondiente en el punto de máxima potencia.
- Corriente en el punto de máxima potencia: La corriente en el punto de máxima potencia  $I_{mpp}$  es la corriente correspondiente en el punto de máxima potencia.

Los parámetros anteriores se miden bajo ciertas condiciones de ensayo que se denominan Condiciones Estándar de Medida (STC, por sus siglas en inglés) las cuales son: irradiancia de  $1000 \text{ W/m}^2$ , temperatura de la célula de  $25 \text{ °C}$  y una distribución espectral solar de AM 1.5 (Castejón & Santamaría, 2010).

En una hoja técnica, también se especifican otros parámetros como:

- Temperatura de operación nominal de la célula: La temperatura de operación nominal de la célula (*NOCT*, por sus siglas en inglés) es la

temperatura promedio de las células de un panel en condiciones de 800 W/m<sup>2</sup> de irradiancia, distribución espectral AM 1.5, 20 °C de temperatura ambiente, 1 m/s de velocidad del viento, panel en circuito abierto y montaje con la parte trasera libre del panel.

- Coeficiente potencia-temperatura: El coeficiente potencia-temperatura  $CT_{W_{mpp}}$  indica la variación en la potencia máxima por grado centígrado de variación de la temperatura de las células solares. Generalmente, se especifica en forma relativa como %/°C.
- Coeficiente corriente-temperatura: El coeficiente corriente-temperatura  $CT_{I_{sc}}$  indica la variación en la corriente de cortocircuito por grado centígrado de variación de la temperatura de las células solares. Generalmente, se especifica en forma relativa como %/°C.
- Coeficiente voltaje-temperatura: El coeficiente voltaje-temperatura  $CT_{V_{oc}}$  indica la variación en el voltaje de circuito abierto por grado centígrado de variación de la temperatura de las células solares. Generalmente, se especifica en forma relativa como %/°C.

#### **2.1.1.14.4. Conexión de módulos fotovoltaicos**

Cuando el voltaje y corriente suministrados por un panel solar no son los adecuados para un proyecto se tienen que conectar en serie y/o paralelo para formar un generador fotovoltaico.

#### **Conexión de módulos en serie**

Este tipo de conexión se realiza para elevar el voltaje del generador fotovoltaico. La Figura 2.19 muestra una conexión en serie de paneles solares.

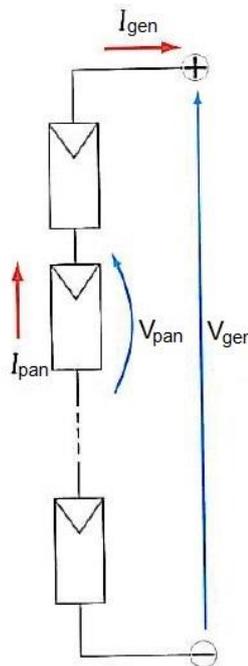
En este arreglo se cumple lo siguiente:

$$I_{gen} = I_{pan} \quad [2.6-a]$$

$$V_{gen} = N_{ser}^{pan} \times V_{pan} \quad [2.6-b]$$

Donde:  $I_{gen}$  es la corriente del generador fotovoltaico,  $I_{pan}$  es la corriente del panel solar,  $V_{gen}$  es el voltaje del generador fotovoltaico,  $N_{ser}^{pan}$  es el número de paneles en serie, y  $V_{pan}$  es el voltaje del panel solar.

**Figura 2.19: Conexión de paneles en serie.**



**Fuente:** Adaptada de Castejón & Santamaría, Instalaciones Solares Fotovoltaicas, 2010.

### Conexión de módulos en paralelo

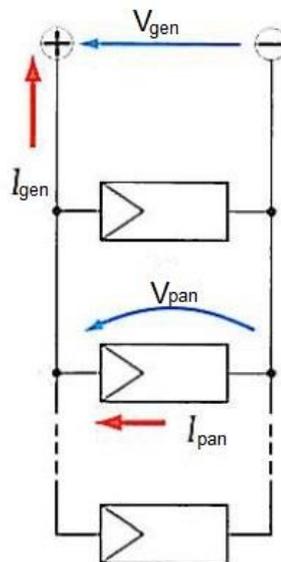
Este tipo de conexión se realiza para elevar la corriente del generador fotovoltaico. La Figura 2.20 muestra una conexión en paralelo de paneles solares. En este arreglo se cumple lo siguiente:

$$I_{gen} = N_{par}^{cad} \times I_{pan} \quad [2.7-a]$$

$$V_{gen} = V_{pan} \quad [2.7-b]$$

Donde:  $I_{gen}$  es la corriente del generador fotovoltaico,  $N_{par}^{cad}$  es el número de cadenas en paralelo,  $I_{pan}$  es la corriente del panel solar,  $V_{gen}$  es el voltaje del generador fotovoltaico, y  $V_{pan}$  es el voltaje del panel solar.

**Figura 2.20: Conexión de paneles en paralelo.**



**Fuente:** Adaptada de Castejón & Santamaría, Instalaciones Solares Fotovoltaicas, 2010.

### Conexión de módulos en serie y paralelo

Este tipo de conexión se realiza para elevar tanto el voltaje como la corriente del generador fotovoltaico. La Figura 2.21 muestra una conexión en serie y paralelo de paneles solares. En este arreglo se cumple lo siguiente:

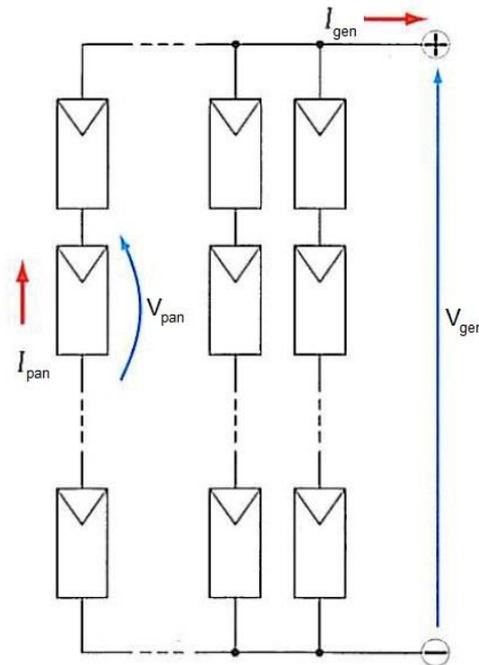
$$I_{gen} = N_{par}^{cad} \times I_{pan} \quad [2.8-a]$$

$$V_{gen} = N_{ser}^{pan} \times V_{pan} \quad [2.8-b]$$

Donde:  $I_{gen}$  es la corriente del generador fotovoltaico,  $N_{par}^{cad}$  es el número de cadenas en paralelo,  $I_{pan}$  es la corriente del panel solar,  $V_{gen}$  es el voltaje del

generador fotovoltaico,  $N_{ser}^{pan}$  es el número de paneles en serie, y  $V_{pan}$  es el voltaje del panel solar.

**Figura 2.21: Conexión de paneles en serie y paralelo.**



**Fuente:** Adaptada de Castejón & Santamaría, Instalaciones Solares Fotovoltaicas, 2010.

El número total de paneles del generador fotovoltaico se calcula con:

$$N_{pan} = N_{ser}^{pan} \times N_{par}^{cad} \quad [2.9]$$

Donde:  $N_{pan}$  es el número total de paneles del generador fotovoltaico,  $N_{ser}^{pan}$  es el número de paneles en serie, y  $N_{par}^{cad}$  es el número de cadenas en paralelo.

#### 2.1.1.15. Generador fotovoltaico

La conexión eléctrica de varios paneles solares para satisfacer la demanda energética de un determinado proyecto se denomina generador fotovoltaico.

### 2.1.1.15.1. Potencia del generador fotovoltaico

La potencia del generador fotovoltaico se calcula con:

$$\dot{W}_{gen} = N_{pan} \dot{W}_{mpp,corr} \quad [2.10]$$

Donde:  $\dot{W}_{gen}$  es la potencia del generador fotovoltaico,  $N_{pan}$  es el número total de paneles del generador fotovoltaico, y  $\dot{W}_{mpp,corr}$  es la potencia pico del panel solar corregida por el efecto de la temperatura de la célula solar.

Además, la potencia que entrega el generador fotovoltaico también puede calcularse con:

$$\dot{W}_{gen} = \frac{E_{gen}}{HSP} \quad [2.11]$$

Donde:  $\dot{W}_{gen}$  es la potencia del generador fotovoltaico,  $E_{gen}$  es la energía proporcionada por el generador fotovoltaico, y  $HSP$  son las horas solares pico.

Por otro lado, la energía que entrega el generador fotovoltaico se determina a partir del consumo energético diario de las cargas al considerar el rendimiento energético de la instalación fotovoltaica. Para instalaciones con solamente demandas en AC se tiene:

$$E_{gen} = \frac{E_{AC}}{R} \quad [2.12]$$

Donde:  $E_{gen}$  es la energía proporcionada por el generador fotovoltaico,  $E_{AC}$  es la demanda energética diaria de las cargas en AC, y  $R$  es el rendimiento energético de la instalación fotovoltaica.

De acuerdo con Castejón & Santamaría (2010) algunos valores típicos del rendimiento energético de una instalación fotovoltaica son:

- Sistemas con inversor:  $R = 0.7$ .
- Sistemas con inversor, batería y regulador:  $R = 0.6$ .
- Sistemas con batería y regulador de carga (sin inversor):  $R = 0.7$ .

#### **2.1.1.15.2. Voltaje del sistema fotovoltaico**

El voltaje nominal del sistema fotovoltaico se determina con:

$$V_{sf}^{nom} = N_{ser}^{pan} V_{mpp} \quad [2.13]$$

Donde:  $V_{sf}^{nom}$  es el voltaje nominal del sistema fotovoltaico,  $N_{ser}^{pan}$  es el número de paneles en serie, y  $V_{mpp}$  es el voltaje en el punto de máxima potencia.

Para el caso de un sistema de bombeo fotovoltaico autónomo directo, se debe tener en cuenta en establecer un voltaje nominal del sistema fotovoltaico dentro del voltaje DC recomendado en la entrada del inversor de bombeo solar.

#### **2.1.1.16. Sistema de bombeo de agua solar fotovoltaico**

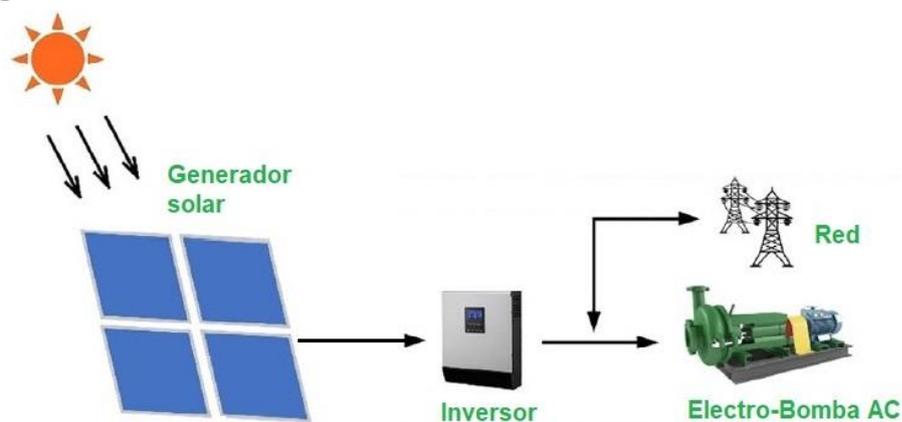
Muralidhar & Rajasekar (2021) mencionan que los sistemas de bombeo de agua accionados con energía solar fotovoltaica pueden clasificarse en términos generales como sistemas de bombeo fotovoltaicos conectados a la red y sistemas de bombeo fotovoltaicos autónomos. El objetivo de todos estos sistemas es bombear el agua disponible en un nivel específico en forma efectiva.

### 2.1.1.16.1. Sistema de bombeo fotovoltaico conectado a la red

Los sistemas conectados a la red son más preferibles para ubicaciones urbanas y semiurbanas debido a su alto potencial de utilización por la cercanía a la red eléctrica convencional. Estos sistemas generalmente se componen de un generador fotovoltaico, un inversor y un motor AC acoplado a una bomba, produciéndose un intercambio energético entre la red eléctrica y el sistema fotovoltaico. Así, el sistema fotovoltaico alimenta el exceso de energía a la red y extrae energía de la red cuando la energía solar es limitada (Muralidhar & Rajasekar, 2021).

La diferencia entre un sistema de bombeo conectado a la red y los autónomos radica en la ausencia del subsistema de acumulación compuesto por las baterías y el regulador de carga. En la Figura 2.22, se muestra un esquema general de un sistema de bombeo de agua fotovoltaico conectado a la red.

**Figura 2.22: Sistema de bombeo fotovoltaico conectado a la red.**



**Fuente:** Adaptada de Muralidhar & Rajasekar, "A Review of Various Components of Solar Water-Pumping System: Configuration, Characteristics, and Performance", 2021.

### **2.1.1.16.2. Sistema de bombeo fotovoltaico autónomo**

A diferencia de las instalaciones solares de bombeo conectadas a la red, un sistema de bombeo de agua fotovoltaico autónomo, también conocido como sistema de bombeo fotovoltaico aislado de la red, se implementa en lugares donde no hay electricidad o el acceso a ésta es limitada. Estos sistemas son beneficiosos en áreas remotas o rurales dónde la operación de una bomba de agua es posible incluso en días de baja irradiación y días lluviosos. Se utilizan en aplicaciones de riego agrícola, cría de ganado, uso industrial y uso doméstico. Estos sistemas se clasifican principalmente en dos tipos, los sistemas de bombeo fotovoltaico autónomos alimentados por baterías y los sistemas de bombeo fotovoltaico autónomos directos (Muralidhar & Rajasekar, 2021).

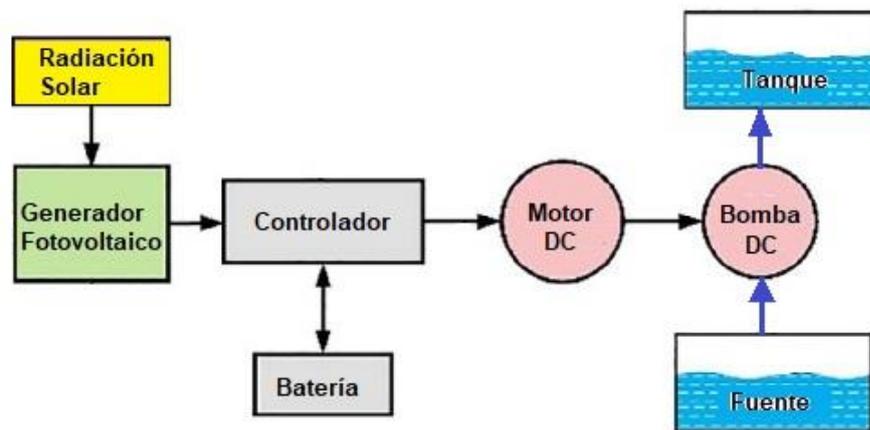
#### **Sistema de bombeo fotovoltaico autónomo con baterías**

Los sistemas de bombeo autónomos alimentados con baterías son configuraciones confiables que ayudan en el funcionamiento continuo de la bomba durante situaciones como sombreamiento parcial de los paneles, el apagado del generador fotovoltaico, y los días con baja radiación solar. Este tipo de sistema se utiliza en aplicaciones donde se requiere un suministro de electricidad independientemente de la radiación solar (Muralidhar & Rajasekar, 2021).

Según Muralidhar & Rajasekar (2021) dependiendo del convertidor de potencia usado, estos sistemas pueden soportar bombas con motores AC o motores DC. El exceso de energía generado por los paneles se almacena en

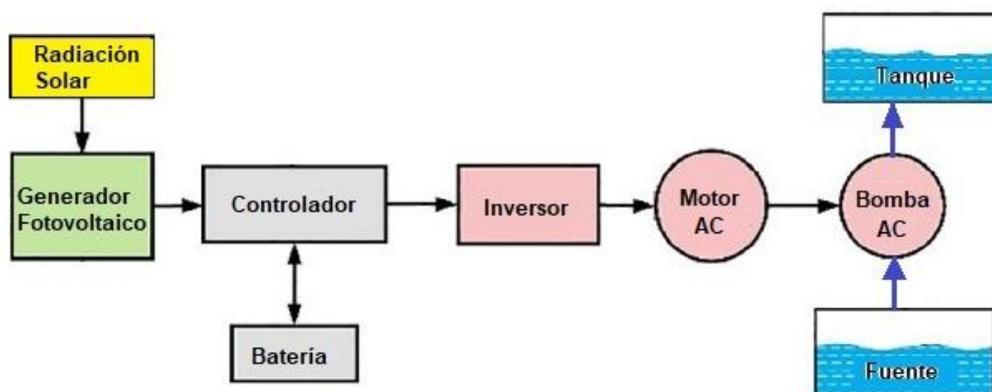
baterías mediante el controlador de carga y de esta forma entregan la energía requerida por la bomba incluso durante días lluviosos, días nublados o por la noche. Sin embargo, la introducción de baterías en el sistema fotovoltaico encarece el costo del proyecto. Esquemas generales de estos sistemas se muestran en la Figura 2.23 y Figura 2.24.

**Figura 2.23: Sistema de bombeo fotovoltaico autónomo con baterías para una electrobomba DC.**



**Fuente:** Adaptada de Muralidhar & Rajasekar, "A Review of Various Components of Solar Water-Pumping System: Configuration, Characteristics, and Performance", 2021.

**Figura 2.24: Sistema de bombeo fotovoltaico autónomo con baterías para una electrobomba AC.**



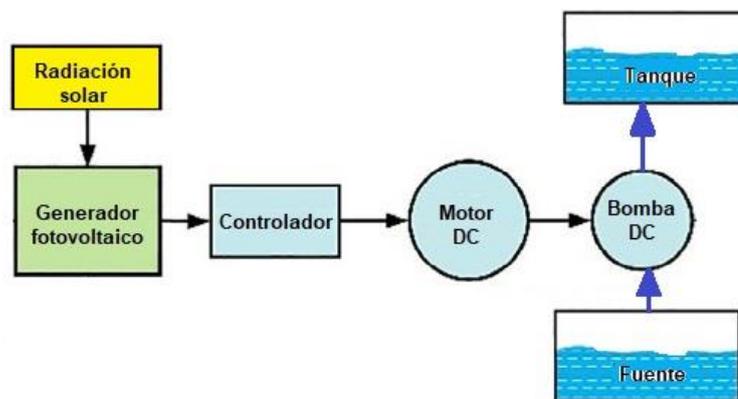
**Fuente:** Adaptada de Muralidhar & Rajasekar, "A Review of Various Components of Solar Water-Pumping System: Configuration, Characteristics, and Performance", 2021.

### Sistema de bombeo fotovoltaico autónomo directo

De acuerdo con Muralidhar & Rajasekar (2021) este tipo de instalación consiste en conectar el motor eléctrico de la bomba de agua al generador fotovoltaico mediante un convertidor de potencia sin usar baterías. En general, se prefiere el no uso de baterías para una recuperación rápida de la inversión y reducir el costo del sistema.

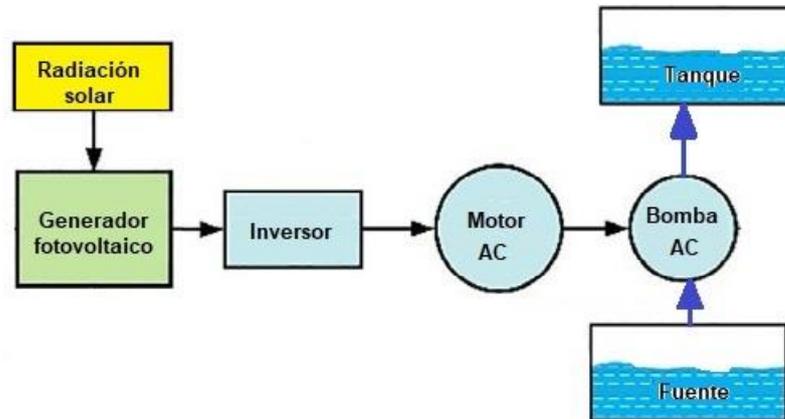
Estos tipos de sistemas se utilizan en aplicaciones donde el uso de la bomba se limita solamente a los momentos en que hay radiación solar. Arreglos típicos de esta clase de instalaciones se muestran en la Figura 2.25 y Figura 2.26.

**Figura 2.25: Sistema de bombeo fotovoltaico autónomo directo para una electrobomba DC.**



**Fuente:** Adaptada de Muralidhar & Rajasekar, "A Review of Various Components of Solar Water-Pumping System: Configuration, Characteristics, and Performance", 2021.

**Figura 2.26: Sistema de bombeo fotovoltaico autónomo directo para una electrobomba AC.**



**Fuente:** Adaptada de Muralidhar & Rajasekar, “A Review of Various Components of Solar Water-Pumping System: Configuration, Characteristics, and Performance”, 2021.

Cuando a un sistema fotovoltaico autónomo se le añaden otras fuentes de energía como grupos electrógenos, aerogeneradores, etc., el sistema es conocido como sistema fotovoltaico híbrido (Castejón & Santamaría, 2010).

En la presente investigación se diseña un sistema de bombeo de agua fotovoltaico autónomo directo para impulsar agua desde un pozo de agua subterránea hasta un embalse para el posterior riego por goteo de 5 hectáreas de sembrío de palta.

#### **2.1.1.17. Componentes de un sistema de bombeo fotovoltaico autónomo directo**

Un sistema de bombeo fotovoltaico autónomo directo es una integración de varios componentes cuya operación sincrónica es vital para lograr producir, en forma eficiente, la energía eléctrica requerida por la bomba hidráulica.

#### **2.1.1.17.1. Paneles solares**

Para un mayor entendimiento de estos dispositivos, consultar la Sección 2.1.1.14.

#### **2.1.1.17.2. Inversor de bombeo solar**

El inversor de bombeo solar, también conocido como controlador de bombeo solar o variador de frecuencia solar, es un dispositivo electrónico que convierte la corriente continua desarrollada por el generador fotovoltaico en corriente alterna, accionando así una bomba hidráulica con motor AC (Inverter, 2021). Adicional a la entrada DC para el generador fotovoltaico, algunos modelos incluyen una entrada adicional de respaldo monofásica o trifásica en la cual se puede conectar un grupo electrógeno o directamente a la red eléctrica cuando la energía solar no es suficiente. La salida soporta motores monofásicos o motores trifásicos dependiendo del modelo. Algunos modelos también incluyen entradas para controlar los niveles de agua tanto en el pozo como en el tanque de almacenamiento. Según lo consultado en el mercado digital, la mayoría de los inversores de bombeo solar incluyen una tecnología denominada Rastreo del Punto de Máxima Potencia (MPPT, por sus siglas en inglés). La tecnología MPPT es un algoritmo usado para maximizar la extracción de potencia disponible en el generador fotovoltaico dependiendo de la intensidad de la luz solar y temperatura de las células.

Jácome (2017) precisa que los inversores actualmente se fabrican de tal forma que producen altas potencias durante cortos periodos de tiempo, esto debido a las altas corrientes que se generan durante el arranque de los

motores y de esta forma se evita el sobredimensionamiento de este dispositivo. En la Figura 2.27 se muestra un ejemplar de inversor de bombeo solar.

**Figura 2.27: Inversor de bombeo solar modelo JNP15KH del fabricante Jntech Renewable Energy.**



**Fuente:** Jntech Renewable Energy, JNTECH 15KW Solar Pump Inverter Three Phase 380V With IP65, 2023.

Para seleccionar un inversor se debe tener en cuenta la potencia simultánea de todas las cargas de consumo. Se tiene que escoger un dispositivo que soporte toda la potencia de consumo después de aplicar un factor de seguridad. Para el caso de un sistema de bombeo de agua fotovoltaico autónomo directo, la carga de consumo está compuesta por el motor eléctrico de la bomba hidráulica. Entonces, la potencia del inversor de bombeo solar se calcula con:

$$\dot{W}_{inv} = f_s \times \dot{W}_{motor} \quad [2.14]$$

Donde:  $\dot{W}_{inv}$  es la potencia del inversor de bombeo solar,  $fs$  es un factor de seguridad, y  $\dot{W}_{motor}$  es la potencia consumida por el motor eléctrico de la bomba.

Además, a la hora de seleccionar un inversor de bombeo solar se debe tener en cuenta de no sobrepasar el máximo voltaje DC permisible en la entrada del inversor. Esto es:

$$V_{inv}^{max} > V_{mpp} \times N_{ser}^{pan} \quad [2.15]$$

Donde:  $V_{inv}^{max}$  es el voltaje DC máximo permisible en la entrada del inversor,  $V_{mpp}$  es el voltaje del panel solar en el punto de máxima potencia, y  $N_{ser}^{pan}$  es el número de paneles en serie.

Por otro lado, se debe verificar también que la corriente máxima DC admitida en la entrada del inversor sea superior a la máxima generada por el generador fotovoltaico. Esto es:

$$I_{inv}^{max} > I_{sc,corr} \times N_{par}^{cad} \times fs \quad [2.16]$$

Donde:  $I_{inv}^{max}$  es la corriente DC máxima permisible en la entrada del inversor,  $I_{sc,corr}$  es la corriente de cortocircuito del panel solar corregida por el efecto de temperatura de la célula solar,  $N_{par}^{cad}$  es el número de cadenas en paralelo, y  $fs$  es un factor de seguridad.

Por último, se debe tener presente qué tipo de red se necesita a la salida del inversor la cual puede ser monofásica o trifásica.

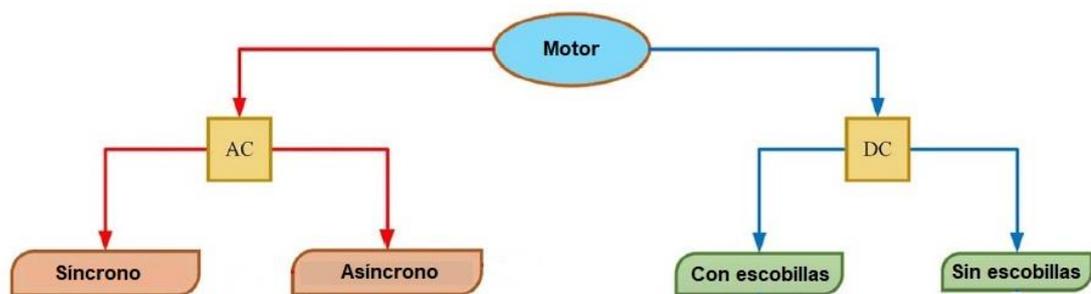
### 2.1.1.17.3. Bomba hidráulica

La fundamentación teórica de las bombas hidráulicas se muestra en la Sección 2.1.2.7.

### 2.1.1.17.4. Motor eléctrico

Los motores eléctricos son dispositivos que transforman la energía eléctrica que consumen en energía mecánica en su eje. La clasificación de los motores adecuados para aplicaciones de bombeo fotovoltaico se ilustra en la Figura 2.28.

**Figura 2.28: Clasificación de los motores eléctricos.**



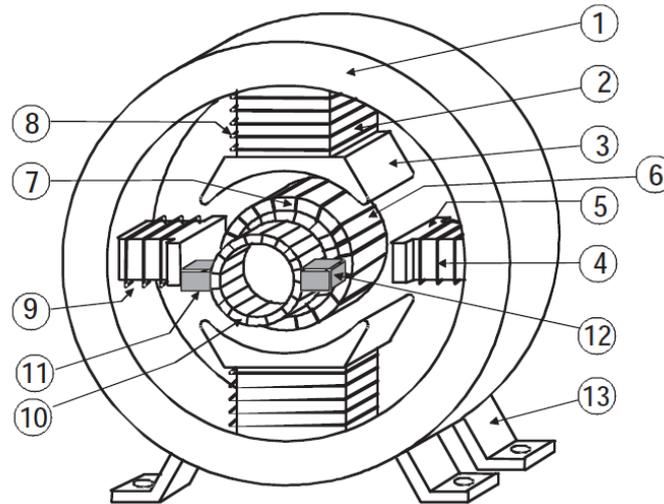
**Fuente:** Adaptada de Muralidhar & Rajasekar, “A Review of Various Components of Solar Water-Pumping System: Configuration, Characteristics, and Performance”, 2021.

De acuerdo con el tipo de alimentación eléctrica del motor, éstos se clasifican como motores de corriente continua y motores de corriente alterna.

#### **Motor eléctrico de corriente continua**

Un motor de corriente continua está formado por una parte fija o estator y una parte móvil o rotor. En la Figura 2.29 se muestra un esquema de las partes principales de este tipo de motor.

**Figura 2.29: Esquema de un motor de corriente continua.**



Nota: (1) culata, (2) núcleo polar, (3) zapata polar, (4) y (5) interpolos, (6) inducido, (7) devanado del inducido, (8) devanado inductor, (9) devanado del interpolo, (10) colector de delgas, (11) y (12) escobillas, y (13) pies de apoyo.

**Fuente:** Fraile, Máquinas Eléctricas, 2008.

El estator está formado por la culata (1) que pertenece al circuito magnético inductor. La culata en la parte inferior presenta los pies de apoyo (13). La culata también contiene a los núcleos polares (2) sobre los cuales se enrolla el devanado inductor (8). La parte de los polos cercanas al rotor presenta un ensanchamiento denominado zapata polar (3). Para mejorar la conmutación, se suelen agregar unos polos intermedios (4) y (5), también conocidos como interpolos, cuyos devanados (9) se conectan en serie con el inducido (Fraile, 2008).

El rotor está formado por el inducido (6), el devanado del inducido (7), y el colector de delgas (10) (Fraile, 2008).

La alimentación de corriente al colector de delgas se realiza a través de las escobillas (11) y (12). Las escobillas permanecen inmóviles en el espacio lo

que significa que mientras el rotor gira las escobillas mantienen una posición fija respecto a los polos del motor (Fraile, 2008).

En este tipo de motores, el giro de la máquina se debe a la interacción entre el flujo magnético del inductor con las corrientes del inducido al conectarse éste a una fuente DC, lo que a su vez ocasiona una fuerza electromotriz de reacción en el rotor que se opone a la corriente. Por lo tanto, el paso de una corriente DC por el devanado del inducido genera en el rotor un par electromagnético que tiene carácter motriz. El movimiento del motor se mantiene mientras el par electromagnético generado por el motor sea superior al par resistente ejercido por la carga mecánica acoplada en el eje del motor (Fraile, 2008).

Una desventaja que presenta este tipo de motor es el mantenimiento continuo costoso debido principalmente al desgaste que sufren las escobillas por el contacto que tienen con las delgas.

Existen también motores de corriente continua sin escobillas. Estos motores tienen una disposición inversa a la convencional, es decir el inductor está en el rotor y sus polos están formados por imanes permanentes. El inducido está en el estator y las conmutaciones de corriente en las bobinas de éste se realizan mediante interruptores electrónicos. El elemento más interesante que tiene esta clase de motor es el sistema de detección de la posición del rotor el cual utiliza unos sensores fotoeléctricos o magnéticos para que las conmutaciones electrónicas se realicen justo en el momento adecuado.

Debido a que no utilizan un colector de delgas, no existen chisporroteos. Generalmente se fabrican con potencias inferiores a 1 kW (Fraile, 2008).

### **Motor eléctrico de corriente alterna**

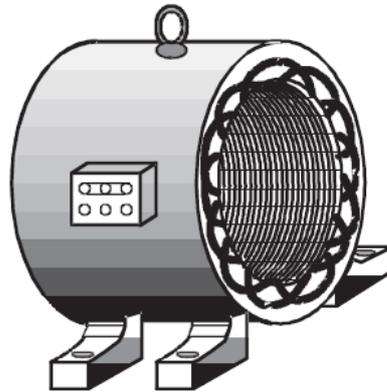
Los motores eléctricos de corriente alterna se clasifican a su vez como motores asíncronos y motores síncronos.

#### Motores asíncronos

Los motores asíncronos, también llamados motores de inducción, al igual que cualquier otra máquina rotativa de conversión electromecánica está constituida por un estator y un rotor. En el estator se inserta generalmente el inductor el cual es energizado por una red monofásica o trifásica. El rotor es el inducido y las corrientes que circulan por este elemento son el resultado de la interacción con el campo magnético del estator. Estos motores según el tipo de rotor que presentan se clasifican como motores asíncronos con rotor en jaula de ardilla y motores asíncronos con rotor devanado (Fraile, 2008).

En la Figura 2.30 se muestra el estator de un motor asíncrono en cuya periferia interior se encuentra el devanado inductor. Al alimentar con una corriente este devanado, se produce un campo magnético giratorio. Adicionalmente, el estator está rodeado por la carcasa en dónde se sitúan las patas de fijación y los cáncamos de elevación (Fraile, 2008).

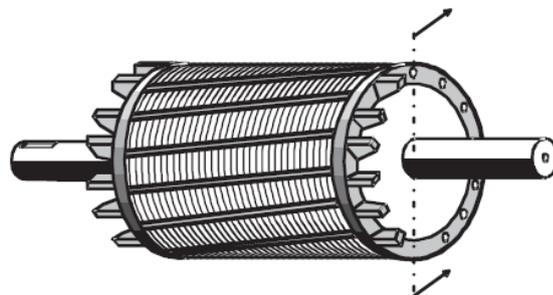
**Figura 2.30: Estator de un motor asíncrono.**



**Fuente:** Fraile, Máquinas Eléctricas, 2008.

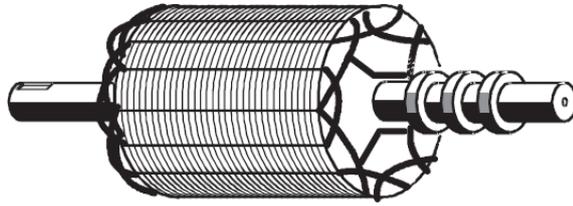
El rotor está formado por un conjunto de chapas apiladas formando un cilindro en dónde se arrolla el devanado inducido. En el rotor tipo jaula de ardilla, también conocido como rotor en cortocircuito, se tiene una serie de conductores puestos en cortocircuito por dos anillos laterales tal como se muestra en la Figura 2.31. En el rotor devanado, también conocido como rotor con anillos, se tiene un arrollamiento similar al colocado en el estator, en el que por un lado se unen en estrella y por el otro lado se mandan a unos anillos aislados entre sí tal como se representa en la Figura 2.32.

**Figura 2.31: Rotor en jaula de ardilla o en cortocircuito.**



**Fuente:** Fraile, Máquinas Eléctricas, 2008.

**Figura 2.32: Rotor devanado o con anillos.**



**Fuente:** Fraile, Máquinas Eléctricas, 2008.

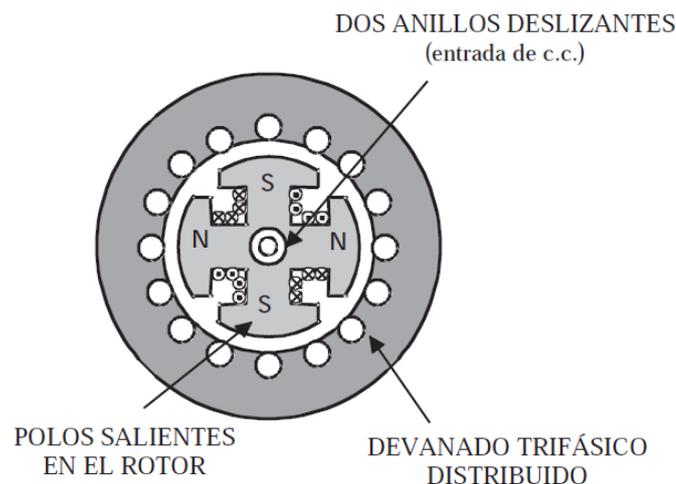
Para el caso de un motor trifásico, el devanado del estator está formado por tres arrollamientos desfasados  $120^\circ$  que al introducir por ellos corrientes trifásicas producen un campo magnético giratorio cuya velocidad en RPM se llama velocidad de sincronismo. Este campo magnético giratorio induce fuerzas electromotrices en las barras de la jaula de ardilla y como éstas forman un circuito cerrado debido a los anillos laterales, surgen corrientes en éstas que reaccionan con el flujo del estator produciendo el giro del motor. Además, cabe mencionar que el rotor de estas máquinas gira a velocidades menores a la de sincronismo motivo por el cual se llaman motores asíncronos (Fraile, 2008).

Los motores asíncronos son ampliamente usados debido a su construcción simple y robusta sobre todo el motor asíncrono jaula de ardilla el cuál puede trabajar en las condiciones más adversas presentando un excelente desempeño con mínimos mantenimientos. Actualmente, más del 80% de motores eléctricos industriales son de este tipo de máquina. Sin embargo, su limitación histórica ha sido el problema de la regulación de su velocidad (Fraile, 2008).

Motores síncronos

Los motores síncronos son máquinas rotativas de conversión electromecánica cuya velocidad de rotación está directamente relacionada con la frecuencia de la red alterna a la cual está conectada. Al igual que los otros tipos de motores están constituidos por dos devanados independientes: un devanado inductor energizado por corriente continua y un devanado inducido alimentado por corriente alterna. En las máquinas síncronas grandes, el devanado inductor se coloca en el rotor y el devanado inducido en el estator. En la Figura 2.33 se muestra un esquema de un motor síncrono.

**Figura 2.33: Esquema de un motor síncrono.**



**Fuente:** Fraile, Máquinas Eléctricas, 2008.

El devanado del estator es alimentado por una corriente alterna produciendo un campo magnético giratorio el cual gira a una velocidad fija (estrechamente relacionada con la frecuencia de alimentación) denominada velocidad de sincronismo. Por otro lado, el devanado del rotor es alimentado por una corriente continua mediante unos anillos produciendo polos magnéticos de polaridad alterna. Los polos magnéticos opuestos del estator y rotor se atraen haciendo que el campo magnético del rotor se alinee al campo magnético

giratorio del estator produciéndose un acoplamiento de campos lo que genera el giro del motor. Los motores síncronos son llamados así porque la velocidad del rotor es la misma que la velocidad del campo magnético giratorio del estator.

La desventaja de los motores síncronos es que no pueden arrancar por si solos ya que el rotor se encuentra sometido a un par alternante lo que impide el arranque de la máquina cuando está en reposo. Por este motivo, se utilizan dispositivos especiales de arranque para la puesta en funcionamiento de esta clase de motores (Fraile, 2008).

## **2.1.2. Mecánica de fluidos**

### **2.1.2.1. Conceptos básicos**

#### **2.1.2.1.1. Fluido**

Una sustancia puede existir en tres estados de agregación: sólido, líquido y gaseoso. Una sustancia en la fase líquida o gaseosa se conoce como fluido y se caracteriza por su deformación continua cuando está bajo el efecto de un esfuerzo cortante por más pequeño que sea (Çengel & Cimbala, 2018).

#### **2.1.2.1.2. Flujo interno vs flujo externo**

Según Çengel & Cimbala (2018) el flujo en una tubería o ducto es un flujo interno si el fluido queda completamente limitado por las superficies sólidas. En contraste, el flujo de un fluido no limitado sobre una superficie es un flujo externo.

#### **2.1.2.1.3. Flujo estacionario**

De acuerdo con Çengel & Cimbala (2018) el término estacionario significa que no hay cambio en las propiedades de una sustancia en un punto particular con respecto al tiempo. Muchos dispositivos, como bombas y turbinas, operan durante largos periodos de tiempo bajo las mismas condiciones y se denominan dispositivos de flujo estacionario. Durante un flujo estacionario, las propiedades del fluido pueden variar de un punto a otro, pero para un punto en particular se mantienen constantes.

#### **2.1.2.1.4. Flujo uniforme**

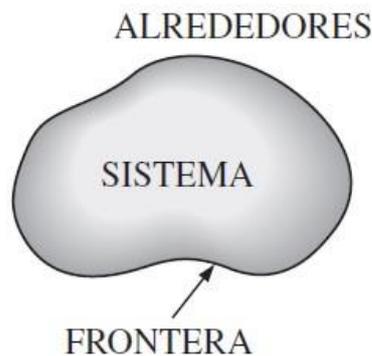
El término uniforme significa que no hay cambio en las propiedades de una sustancia con respecto a la posición (Çengel & Cimbala, 2018). Por ejemplo, cuando se dice que un flujo es uniforme en una sección transversal de una tubería significa que las propiedades del fluido son constantes en todos los puntos de la sección transversal de la tubería.

#### **2.1.2.1.5. Sistema y volumen de control**

Un sistema es una cantidad de materia o región en el espacio elegida para su estudio. La región que se encuentra afuera del sistema se le denomina alrededores. La superficie que separa al sistema de sus alrededores se denomina frontera. En la Figura 2.34 se muestra una representación gráfica de estos conceptos. Los sistemas se clasifican como cerrados o abiertos. Un sistema cerrado, también llamado masa de control, consta de una masa fija y ninguna masa puede cruzar la frontera del sistema, sin embargo, la energía sí puede cruzar la frontera del sistema. Un sistema abierto, también llamado

volumen de control, es una región del espacio seleccionada adecuadamente para su análisis. Tanto la masa como la energía pueden cruzar la frontera de un volumen de control (Çengel & Cimbala, 2018).

**Figura 2.34: Un sistema, sus alrededores y la frontera que los limita.**



**Fuente:** Çengel & Boles, Termodinámica, 2012.

### 2.1.2.2. Propiedades de los fluidos

En esta sección se presentan las propiedades de los fluidos que se encuentran comúnmente en el flujo de fluidos.

#### 2.1.2.2.1. Temperatura

Çengel & Boles (2012) mencionan que a pesar de estar familiarizados con la temperatura  $T$  como una medida del “calor” y el “frío”, no es fácil proporcionar una definición exacta de esta magnitud.

En la práctica, la temperatura se indica con mayor frecuencia en grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) o grados Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ ).

#### 2.1.2.2.2. Presión

Çengel & Boles (2012) especifican que la presión  $P$  se define como la fuerza normal ejercida por un fluido por unidad de área. En el sistema internacional

se mide en  $N/m^2$  lo cual se llama Pascal (Pa). Otras unidades de uso común son el bar y la atmósfera estándar. Se tienen las siguientes equivalencias:

$$1 \text{ bar} = 0.987 \text{ atm} = 10^5 \text{ Pa} = 14.504 \text{ psi} = 1.020 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 10.197 \text{ mca}$$

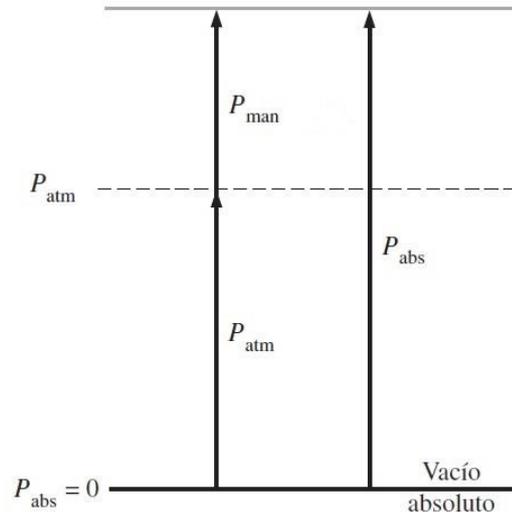
La presión real que existe en un punto de un fluido se llama presión absoluta y se mide con respecto al vacío absoluto (presión absoluta de cero). En la vida real, la mayoría de los instrumentos de medición de presión dan una lectura que representa la presión por encima de la presión atmosférica local de modo que indican la diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica. A esta diferencia de presiones se le denomina presión manométrica (Çengel & Boles, 2012). Se tiene la siguiente ecuación que relaciona estas presiones:

$$P_{man} = P_{abs} - P_{atm} \quad [2.17]$$

Donde:  $P_{man}$  es la presión manométrica,  $P_{abs}$  es la presión absoluta, y  $P_{atm}$  es la presión atmosférica local.

Una representación gráfica de estas presiones se muestra en la Figura 2.35.

**Figura 2.35: Presión absoluta, presión manométrica y presión atmosférica.**



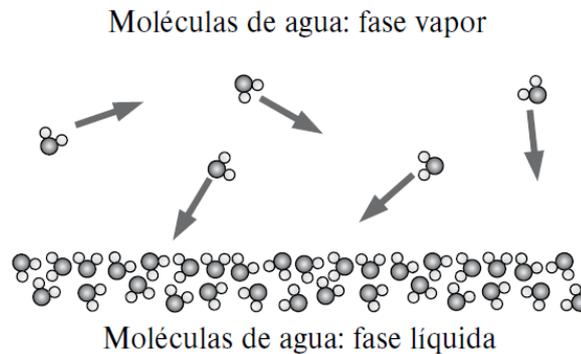
**Fuente:** Çengel & Boles, Termodinámica, 2012.

### Presión de vapor

Para una temperatura específica, la presión a la cuál una sustancia cambia de fase se denomina presión de saturación  $P_{sat}$ . Por ejemplo, a una temperatura de 100 °C, la presión de saturación del agua es 1 atm (Çengel & Cimbala, 2018).

La presión de vapor  $P_{vap}$  de una sustancia se define como la presión ejercida por su vapor cuando se encuentra en equilibrio de fases con su líquido a una temperatura específica como se muestra en la Figura 2.36. La presión de vapor es igual a la presión de saturación (Çengel & Cimbala, 2018).

**Figura 2.36: Equilibrio entre las fases líquida y vapor de una sustancia.**



**Fuente:** Çengel & Cimbala, Mecánica de Fluidos, 2018.

La presión de vapor es de interés en el flujo de líquidos debido a la vaporización no planeada que puede ocurrir cuando la presión del líquido a una temperatura determinada cae por debajo de la presión de vapor como en el lado de succión del impulsor de las bombas. Las burbujas de vapor también llamadas burbujas de cavitación colapsan corriente abajo causando ondas de alta presión muy destructivas lo que genera erosión en el equipo de flujo (Çengel & Cimbala, 2018). La presión de vapor del agua a varias temperaturas se muestra en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2: Presión de vapor del agua.**

Temperatura $T$ (°C)	Presión de vapor $P_{vap}$ (kPa)
0	0.611
5	0.872
10	1.23
15	1.71
20	2.34
25	3.17
30	4.25
40	7.38
50	12.35
100	101.3

**Fuente:** Çengel & Cimbala, Mecánica de Fluidos, 2018.

### 2.1.2.2.3. Densidad

De acuerdo con Mott & Untener (2015) la densidad se define como la cantidad de masa por unidad de volumen de una sustancia. Es decir:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [2.18]$$

Donde:  $\rho$  es la densidad de una sustancia,  $m$  es la masa de la sustancia, y  $V$  es el volumen de la sustancia.

En general, la densidad de una sustancia depende de la presión y temperatura. Los líquidos se pueden considerar como sustancias incompresibles durante la mayoría de los procesos y la variación de su densidad con respecto a la presión suele ser despreciable. La densidad de los líquidos depende más intensamente de la temperatura que de la presión (Çengel & Cimbala, 2018). En la Tabla 2.3 se muestra la densidad del agua a diversas temperaturas.

**Tabla 2.3: Densidad del agua.**

Temperatura $T$ (°C)	Densidad $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
0	1000
5	1000
10	1000
15	1000
20	998
25	997
30	996
35	994
40	992
45	990
50	988

**Fuente:** Mott & Untener, Mecánica de Fluidos, 2015.

#### 2.1.2.2.4. **Peso específico**

Según Mott & Untener (2015) el peso específico se define como peso por unidad de volumen de una sustancia. Es decir:

$$\gamma = \rho g \quad [2.19]$$

Donde:  $\gamma$  es el peso específico de una sustancia,  $\rho$  es la densidad de la sustancia, y  $g$  es la aceleración de la gravedad.

De acuerdo con Çengel & Cimbala (2018) para fines prácticos se puede suponer un valor constante de  $9.81 \text{ m/s}^2$  como la gravedad a nivel de mar.

#### 2.1.2.2.5. **Energía**

La energía existe en diversas formas: mecánica, cinética, potencial, eléctrica, magnética, química, nuclear, etc. La suma de todas ellas es la energía total  $E$  (o  $e$  en base a una masa unitaria) de un sistema. Es útil considerar dos clases de energía para los diferentes tipos de energía que forman la energía total de un sistema: la energía microscópica y la energía macroscópica.

##### **Energía interna**

La suma de todas las formas de energía microscópica se conoce como energía interna de un sistema  $U$  (o  $u$  en base a una masa unitaria) (Çengel & Boles, 2012).

Por otro lado, la energía macroscópica está relacionada con el movimiento y el efecto de factores externos como la gravedad, la electricidad, el magnetismo y la tensión superficial.

### Energía cinética

La energía cinética  $EC$  (o  $ec$  en base a una masa unitaria) es la energía que posee un sistema como resultado de su movimiento con respecto a un marco de referencia (Çengel & Boles, 2012). Se calcula con:

$$ec = \frac{v^2}{2} \quad [2.20]$$

Donde:  $ec$  es la energía cinética por unidad de masa y  $v$  es la velocidad del sistema.

### Energía potencial gravitatoria

La energía potencial gravitatoria  $EPG$  (o  $epg$  en base a una masa unitaria) es la energía que tiene un sistema como resultado de la interacción con un campo gravitacional (Çengel & Boles, 2012). Se calcula con:

$$epg = g Z \quad [2.21]$$

Donde:  $epg$  es la energía potencial gravitatoria por unidad de masa,  $g$  es la aceleración de la gravedad, y  $Z$  es la altura o cota del sistema.

### Entalpía

En el análisis de flujos de fluidos es conveniente definir una propiedad llamada entalpía como:

$$h = u + \frac{P}{\rho} \quad [2.22]$$

Donde:  $h$  es la entalpía,  $u$  es la energía interna por unidad de masa,  $P$  es la presión, y  $\rho$  es la densidad.

En la ecuación anterior, el término  $P/\rho$  representa la energía de flujo que viene a ser la energía por unidad de masa requerida para mover el fluido y mantener el flujo.

### **Energía total**

Çengel & Cimbala (2018) indican que en un sistema que carece de efectos eléctricos, magnéticos y de tensión superficial, la energía total por unidad de masa de este sistema  $e$  consta de tres partes: energía interna, energía cinética y energía potencial gravitatoria. Para el caso de un fluido que fluye se presenta una forma adicional de energía que es la energía de flujo  $P/\rho$ . Entonces, la energía total de un fluido que fluye es:

$$\theta = u + \frac{P}{\rho} + ec + epg$$

Utilizando la definición de la propiedad entalpía, la relación anterior queda como:

$$\theta = h + ec + epg \quad [2.23]$$

Donde:  $\theta$  es la energía total de un fluido que fluye,  $h$  es la entalpía,  $ec$  es la energía cinética por unidad de masa, y  $epg$  es la energía potencial gravitatoria por unidad de masa.

#### **2.1.2.2.6. Viscosidad**

##### **Viscosidad dinámica**

Según Çengel & Cimbala (2018) la viscosidad dinámica o viscosidad absoluta  $\mu$  es una propiedad que representa la resistencia interna de un fluido al

movimiento o a la fluidez. En el sistema internacional tiene unidades de  $kg/m\ s$  o su equivalente  $N\ s/m^2$ . En la Tabla 2.4, se muestra la viscosidad dinámica del agua a diferentes temperaturas.

**Tabla 2.4: Viscosidad dinámica del agua.**

Temperatura $T$ (°C)	Viscosidad dinámica $\mu$ (N s/m <sup>2</sup> )
0	$1.75 \times 10^{-3}$
5	$1.52 \times 10^{-3}$
10	$1.30 \times 10^{-3}$
15	$1.15 \times 10^{-3}$
20	$1.02 \times 10^{-3}$
25	$8.91 \times 10^{-4}$
30	$8.00 \times 10^{-4}$
35	$7.18 \times 10^{-4}$
40	$6.51 \times 10^{-4}$
45	$5.94 \times 10^{-4}$
50	$5.41 \times 10^{-4}$

**Fuente:** Mott & Untener, Mecánica de Fluidos, 2015.

### Viscosidad cinemática

La viscosidad cinemática se define como la razón entre la viscosidad dinámica y la densidad (Çengel & Cimbala, 2018). Esto es:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad [2.24]$$

Donde:  $\nu$  es la viscosidad cinemática,  $\mu$  es la viscosidad absoluta, y  $\rho$  es la densidad.

En forma general, la viscosidad de un fluido depende de la temperatura y presión. Para los líquidos, tanto la viscosidad dinámica como la viscosidad cinemática son prácticamente independientes de la presión. En cambio, la temperatura es un factor importante en la viscosidad de los líquidos

disminuyendo a medida que aumenta la temperatura (Çengel & Cimbala, 2018).

### **2.1.2.3. Conservación de la masa**

Para procesos que no involucran conversión entre masa y energía se cumple el principio de conservación de la masa.

#### **2.1.2.3.1. Flujo másico**

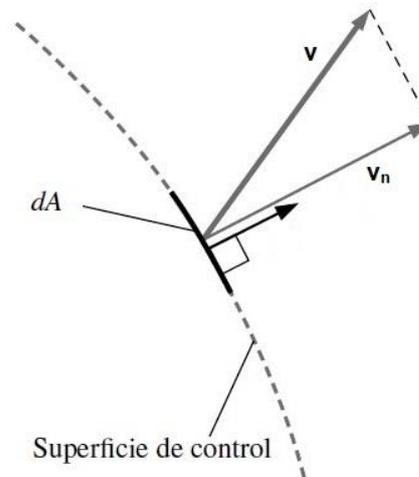
La cantidad de masa que fluye a través de una sección transversal por unidad de tiempo se denomina flujo másico  $\dot{m}$ .

De la Figura 2.37, puede observarse que el flujo másico diferencial  $\delta\dot{m}$  que fluye por un elemento diferencial de área  $dA$  perteneciente a una sección transversal de una tubería se calcula con:

$$\delta\dot{m} = \rho v_n dA \quad [2.25]$$

Donde:  $\delta\dot{m}$  es el flujo másico diferencial,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $v_n$  es la componente de la velocidad del flujo normal a  $dA$ , y  $dA$  es un elemento diferencial de área.

**Figura 2.37: Componente de la velocidad del flujo normal a  $dA$ .**



**Fuente:** Adaptada de Çengel & Cimbala, Mecánica de Fluidos, 2018.

El flujo másico que cruza por toda el área de la sección transversal de una tubería se calcula por integración:

$$\dot{m} = \int_A \delta \dot{m}$$

Reemplazando la Ecuación 2.25 en la relación anterior resulta lo siguiente:

$$\dot{m} = \int_A \rho v_n dA \quad [2.26]$$

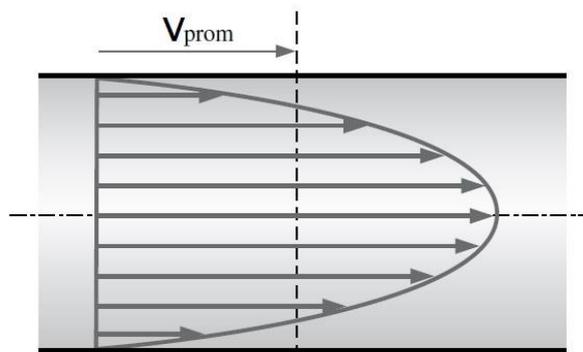
Donde:  $\dot{m}$  es el flujo másico en una tubería,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $v_n$  es la componente de la velocidad del flujo normal a  $dA$ ,  $dA$  es un elemento diferencial de área, y  $A$  es el área de la sección transversal de la tubería.

Çengel & Cimbala (2018) mencionan que la velocidad  $v_n$  varía a lo largo de la sección transversal de un tubo, siendo 0 en las paredes del tubo hasta un valor máximo en la línea central del tubo o cerca de ésta.

Se define la velocidad promedio  $v_{prom}$ , representada en la Figura 2.38, como el valor de  $v_n$  promediado a lo largo de toda la sección transversal  $A$  de la tubería:

$$v_{prom} = \frac{\int_A v_n dA}{A}$$

**Figura 2.38: Velocidad promedio en la sección transversal de una tubería.**



**Fuente:** Çengel & Cimbala, Mecánica de Fluidos, 2018.

Para un flujo en el cual la densidad  $\rho$  es constante a lo largo de la sección transversal  $A$ , la Ecuación 2.26 se expresa como:

$$\dot{m} = \rho \int_A v_n dA$$

Reemplazando la definición para la velocidad promedio en la relación anterior y eliminado por simplicidad el subíndice de la velocidad promedio resulta lo siguiente:

$$\dot{m} = \rho v A \quad [2.27]$$

Donde:  $\dot{m}$  es el flujo másico por la sección transversal de una tubería,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $v$  es la velocidad promedio del flujo, y  $A$  es el área de la sección transversal de la tubería.

La cantidad de volumen de fluido que fluye a través de una sección transversal por unidad de tiempo se denomina flujo volumétrico o caudal  $\dot{V}$  y se calcula por:

$$\dot{V} = \int_A v_n dA$$

Reemplazando la definición para la velocidad promedio en la relación anterior y eliminado por simplicidad el subíndice de la velocidad promedio resulta lo siguiente:

$$\dot{V} = v A \quad [2.28]$$

Donde:  $\dot{V}$  es el caudal por la sección transversal de una tubería,  $v$  es la velocidad promedio del flujo, y  $A$  es el área de sección transversal de la tubería.

El flujo de masa y el caudal están relacionados por:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} \quad [2.29]$$

Donde:  $\dot{m}$  es el flujo másico,  $\rho$  es la densidad, y  $\dot{V}$  es el caudal.

#### **2.1.2.3.2. Principio de conservación de la masa**

El principio de conservación de la masa para un volumen de control (VC) puede enunciarse como: la tasa de transferencia neta de masa hacia dentro

de un volumen de control o hacia fuera de éste es igual a la tasa de cambio neto de la masa total que encierra el volumen de control (Çengel & Cimbala, 2018). Es decir:

$$\sum_{ent} \dot{m} - \sum_{sal} \dot{m} = \frac{dm_{VC}}{dt} \quad [2.30]$$

Donde:

$$\sum_{ent} \dot{m} : \text{Flujo másico total hacia dentro del volumen de control.}$$

$$\sum_{sal} \dot{m} : \text{Flujo másico total hacia fuera del volumen de control.}$$

$$\frac{dm_{VC}}{dt} : \text{Tasa de cambio de la masa del volumen de control.}$$

### 2.1.2.3.3. Balance de masa para un proceso de flujo estacionario

En un proceso de flujo estacionario, la cantidad de masa que encierra un volumen de control se mantiene constante con el paso del tiempo. Por lo tanto:

$$\frac{dm_{VC}}{dt} = 0$$

Teniendo en cuenta lo anterior, la Ecuación 2.30 queda como:

$$\sum_{ent} \dot{m} = \sum_{sal} \dot{m} \quad [2.31]$$

La Ecuación 2.31 expresa que la suma total de todos los flujos másicos que entran a un volumen de control es igual a la suma total de todos los flujos másicos que salen del mismo volumen de control para un proceso estacionario.

Varios dispositivos de ingeniería incluyen una sola entrada y salida como es el caso de bombas, turbinas y tuberías. A estos dispositivos también se los denomina dispositivos de una sola corriente. Si se denota con el subíndice “1” a la entrada y con el subíndice “2” a la salida, la Ecuación 2.31 para estos dispositivos se reduce a:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad [2.32]$$

Donde:  $\dot{m}_1$  es el flujo másico en la entrada del dispositivo de una sola corriente y  $\dot{m}_2$  es el flujo másico en la salida del dispositivo de una sola corriente.

### Flujo incompresible

Un líquido puede considerarse en esencia incompresible durante un proceso debido a que su densidad no varía considerablemente. Entonces, la Ecuación 2.31 se reduce a:

$$\sum_{ent} \rho \dot{V} = \sum_{sal} \rho \dot{V} \rightarrow \rho \sum_{ent} \dot{V} = \rho \sum_{sal} \dot{V}$$

Al cancelar la densidad en ambos miembros de la relación anterior resulta:

$$\sum_{ent} \dot{V} = \sum_{sal} \dot{V} \quad [2.33]$$

La Ecuación 2.33 expresa que la suma total de todos los caudales que entran a un volumen de control es igual a la suma total de todos los caudales que salen del mismo volumen de control para un proceso estacionario con flujo incompresible.

Para sistemas de una sola corriente, donde el fluido entra por la sección “1” y sale por la sección “2”, la Ecuación 2.33 queda como:

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_2 \quad [2.34]$$

Donde:  $\dot{V}_1$  es el caudal en la entrada del dispositivo de una sola corriente y  $\dot{V}_2$  es el caudal en la salida del dispositivo de una sola corriente.

Utilizando la Ecuación 2.28, la Ecuación 2.34 resulta en:

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad [2.35]$$

Donde:  $v_1$  es la velocidad promedio del flujo en la entrada del dispositivo de una sola corriente,  $A_1$  es el área de la sección transversal en la entrada del dispositivo de una sola corriente,  $v_2$  es la velocidad promedio del flujo en la salida del dispositivo de una sola corriente, y  $A_2$  es el área de la sección transversal en la salida del dispositivo de una sola corriente.

La Ecuación 2.35 se conoce como ecuación de continuidad para líquidos.

#### **2.1.2.4. Ecuación general de la energía**

El balance de energía para cualquier tipo de sistema que experimenta cualquier clase de proceso se expresa matemáticamente como (Çengel & Boles, 2012):

$$E_{ent} - E_{sal} = \Delta E_{sis} \quad [2.36]$$

Donde:  $E_{ent}$  es la energía que entra al sistema,  $E_{sal}$  es la energía que sale del sistema, y  $\Delta E_{sis}$  es el cambio en la energía total del sistema.

La Ecuación 2.36 en forma de tasa se expresa como:

$$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sal} = \frac{dE_{sis}}{dt} \quad [2.37]$$

Donde:  $\dot{E}_{ent}$  es la tasa de transferencia de energía que entra al sistema,  $\dot{E}_{sal}$  es la tasa de transferencia de energía que sale del sistema, y  $dE_{sis}/dt$  es la tasa de cambio en la energía total del sistema.

#### **2.1.2.4.1. Mecanismos de transferencia de energía**

La energía puede transferirse hacia o desde un sistema mediante tres mecanismos: calor, trabajo y masa (Çengel & Boles, 2012).

##### **Transferencia de calor Q**

Una interacción de energía entre un sistema y sus alrededores es transferencia de calor si sólo ocurre debido a una diferencia de temperatura. La dirección de la transferencia de calor es siempre del sistema de más alta temperatura al cuerpo de más baja temperatura (Çengel & Cimbala, 2018). La transferencia de calor hacia un sistema aumenta la energía del sistema y la transferencia de calor desde un sistema disminuye la energía del sistema.

La tasa de transferencia de energía por calor se representará como  $\dot{Q}$ .

##### **Transferencia de trabajo W**

Una interacción de energía es trabajo si está relacionada con una fuerza que actúa a lo largo de una distancia. También, puede decirse que una interacción de energía es trabajo si ésta no ocurre debido a una diferencia de temperatura. El trabajo realizado sobre un sistema aumenta la energía de éste, mientras que el trabajo realizado por un sistema disminuye la energía de éste (Çengel & Boles, 2012).

La tasa de transferencia de energía por trabajo también denominado potencia se representará como  $\dot{W}$ .

### Transferencia de energía por masa

El flujo másico que entra y/o sale de un sistema funciona como otro mecanismo de transferencia de energía. Cuando entra masa a un sistema, la energía de éste aumenta, mientras que, cuando sale masa de un sistema, la energía de éste disminuye (Çengel & Boles, 2012).

La tasa de transferencia de energía por masa se representará como  $\dot{E}^{masa}$ .

Si se tiene en cuenta los mecanismos de transferencia de energía, la Ecuación 2.37 puede expresarse como:

$$\dot{Q}_{ent} - \dot{Q}_{sal} + \dot{W}_{ent} - \dot{W}_{sal} + \dot{E}_{ent}^{masa} - \dot{E}_{sal}^{masa} = \frac{dE_{sis}}{dt} \quad [2.38]$$

Donde:

- $\dot{Q}_{ent}$  : Tasa de transferencia de calor que entra al sistema.
- $\dot{Q}_{sal}$  : Tasa de transferencia de calor que sale del sistema.
- $\dot{W}_{ent}$  : Potencia que entra al sistema.
- $\dot{W}_{sal}$  : Potencia que sale del sistema.
- $\dot{E}_{ent}^{masa}$  : Tasa de transferencia de energía que entra con la masa al sistema.
- $\dot{E}_{sal}^{masa}$  : Tasa de transferencia de energía que sale con la masa del sistema.
- $\frac{dE_{sis}}{dt}$  : Tasa de cambio en la energía total del sistema.

Teniendo en cuenta la siguiente notación:

$$\dot{Q}_{ent,neto} = \dot{Q}_{ent} - \dot{Q}_{sal} \quad [2.39-a]$$

$$\dot{W}_{ent,neto} = \dot{W}_{ent} - \dot{W}_{sal} \quad [2.39-b]$$

Donde:  $\dot{Q}_{ent,neto}$  es la tasa de transferencia de calor neta hacia el sistema y

$\dot{W}_{ent,neto}$  es la potencia neta hacia el sistema.

La Ecuación 2.38 resulta en:

$$\dot{Q}_{ent,neto} + \dot{W}_{ent,neto} + \dot{E}_{ent}^{masa} - \dot{E}_{sal}^{masa} = \frac{dE_{sis}}{dt} \quad [2.40]$$

La tasa de transferencia de energía con la masa se determina con:

$$\dot{E}_{ent}^{masa} = \sum_{ent} \dot{m}\theta \quad [2.41-a]$$

$$\dot{E}_{sal}^{masa} = \sum_{sal} \dot{m}\theta \quad [2.41-b]$$

Donde:  $\dot{m}$  es el flujo másico y  $\theta$  es la energía de un fluido que fluye.

Entonces la Ecuación 2.40 queda como:

$$\dot{Q}_{ent,neto} + \dot{W}_{ent,neto} + \sum_{ent} \dot{m}\theta - \sum_{sal} \dot{m}\theta = \frac{dE_{sis}}{dt}$$

Teniendo en cuenta la energía de un fluido que fluye, ver Ecuación 2.23, la relación anterior queda como:

$$\begin{aligned} & \dot{Q}_{ent,neto} + \dot{W}_{ent,neto} \\ & = \frac{dE_{sis}}{dt} + \sum_{sal} \dot{m} \left( h + \frac{v^2}{2} + gZ \right) - \sum_{ent} \dot{m} \left( h + \frac{v^2}{2} + gZ \right) \quad [2.42] \end{aligned}$$

#### 2.1.2.4.2. Balance de energía para un proceso de flujo estacionario

Durante un flujo estacionario, la cantidad de energía total del sistema (en este caso un volumen de control) permanece constante, es decir:

$$\frac{dE_{sis}}{dt} = 0$$

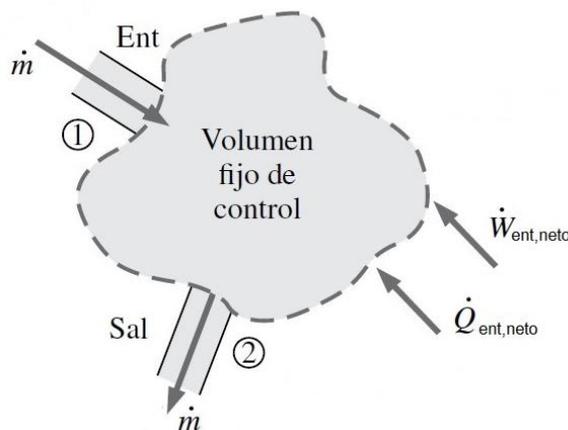
Entonces, la Ecuación 2.42 se reduce a:

$$\dot{Q}_{ent,neto} + \dot{W}_{ent,neto} = \sum_{sal} \dot{m} \left( h + \frac{v^2}{2} + gZ \right) - \sum_{ent} \dot{m} \left( h + \frac{v^2}{2} + gZ \right) \quad [2.43]$$

Varios dispositivos de ingeniería incluyen una sola entrada y salida de flujo como se muestra en la Figura 2.39. El flujo másico en estos dispositivos  $\dot{m}$  se mantiene constante. Si se denota con el subíndice "1" a la entrada y con el subíndice "2" a la salida, la Ecuación 2.43 para estos dispositivos se reduce a la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_{ent,neto} + \dot{W}_{ent,neto} = \dot{m} \left( h_2 - h_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(Z_2 - Z_1) \right) \quad [2.44]$$

**Figura 2.39: Dispositivo con una sola entrada y salida de flujo.**



**Fuente:** Adaptada de Çengel & Cimbala, Mecánica de Fluidos, 2018.

Expresando la Ecuación 2.44 por unidad de masa, se tiene:

$$q_{ent,neto} + w_{ent,neto} = h_2 - h_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(Z_2 - Z_1) \quad [2.45]$$

Donde:  $q_{ent,neto}$  es la transferencia neta de calor hacia el sistema por unidad de masa y  $w_{ent,neto}$  es la entrada neta de trabajo hacia el sistema por unidad de masa.

Aplicando la definición de entalpía, ver Ecuación 2.22, y reordenando la Ecuación 2.45 resulta:

$$w_{ent,neto} + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} + gZ_1 = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} + gZ_2 + (u_2 - u_1 - q_{ent,neto}) \quad [2.46]$$

En mecánica de fluidos, la entrada neta de trabajo al sistema suele ser el trabajo neto proporcionado por flechas rotatorias ya que no se consideran otros tipos de trabajos como los realizados por fuerzas eléctricas, magnéticas y de tensión superficial. Por lo tanto, si se considera que el sistema sólo contiene trabajos de flechas, la Ecuación 2.46 queda como:

$$w_{ent,neto}^{flecha} + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} + gZ_1 = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} + gZ_2 + (u_2 - u_1 - q_{ent,neto}) \quad [2.47]$$

Donde:  $w_{ent,neto}^{flecha}$  es la entrada neta de trabajo de flechas hacia el sistema por unidad de masa.

El lado izquierdo de la Ecuación 2.47, representa la energía mecánica que ingresa al sistema y los tres primeros términos del lado derecho representan la salida de energía mecánica del sistema. El término  $u_2 - u_1 - q_{ent,neto}$  representa la pérdida de energía mecánica por unidad de masa entre los puntos "1" y "2". Es decir:

$$e_{perd}^{mec} = u_2 - u_1 - q_{ent,neto} \quad [2.48]$$

Donde:  $e_{perd}^{mec}$  es la pérdida de energía mecánica por unidad de masa entre los puntos “1” y “2”.

Reemplazando la Ecuación 2.48 en la Ecuación 2.47 se tiene:

$$w_{ent,neto}^{flecha} + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} + gZ_1 = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} + gZ_2 + e_{perd}^{mec} \quad [2.49]$$

Denotando con  $w_{bomba}^{flecha}$  al trabajo de flecha suministrado por una bomba y con  $w_{turbina}^{flecha}$  al trabajo de flecha extraído por una turbina, la Ecuación 2.49 queda como:

$$w_{bomba}^{flecha} - w_{turbina}^{flecha} + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} + gZ_1 = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} + gZ_2 + e_{perd}^{mec}$$

Reordenando términos se tiene la siguiente ecuación:

$$w_{bomba}^{flecha} + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} + gZ_1 = w_{turbina}^{flecha} + \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} + gZ_2 + e_{perd}^{mec} \quad [2.50]$$

Además, la pérdida de energía mecánica entre los puntos “1” y “2” se puede expresar como:

$$e_{perd}^{mec} = e_{perd}^{bomba} + e_{perd}^{turbina} + e_{perd}^{tubería} \quad [2.51]$$

Donde:  $e_{perd}^{bomba}$  es la pérdida de energía mecánica en la bomba por unidad de masa,  $e_{perd}^{turbina}$  es la pérdida de energía mecánica en la turbina por unidad de masa, y  $e_{perd}^{tubería}$  es la pérdida de energía mecánica en la tubería por unidad de masa.

Reemplazando la Ecuación 2.51 en la Ecuación 2.50 y agrupando los términos convenientemente resulta lo siguiente:

$$\begin{aligned} (w_{bomba}^{flecha} - e_{perd}^{bomba}) + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} + gZ_1 \\ = (w_{turbina}^{flecha} + e_{perd}^{turbina}) + \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} + gZ_2 + e_{perd}^{tubería} \end{aligned} \quad [2.52]$$

Realizando la representación siguiente:

$$w_{bomba} = w_{bomba}^{flecha} - e_{perd}^{bomba} \quad [2.53-a]$$

$$w_{turbina} = w_{turbina}^{flecha} + e_{perd}^{turbina} \quad [2.53-b]$$

Donde:  $w_{bomba}$  es el trabajo entregado al fluido por la bomba por unidad de masa y  $w_{turbina}$  es el trabajo extraído del fluido por la turbina por unidad de masa.

La Ecuación 2.52, entonces puede representarse como:

$$w_{bomba} + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} + gZ_1 = w_{turbina} + \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} + gZ_2 + e_{perd}^{tubería} \quad [2.54]$$

La Ecuación 2.54 puede expresarse en términos de cargas si se divide toda la ecuación por la aceleración de la gravedad  $g$ , resultando la siguiente relación:

$$h_{bomba} + \frac{P_1}{\rho_1 g} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = h_{turbina} + \frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + h_L \quad [2.55]$$

Donde:

$$h_{bomba} = \frac{w_{bomba}}{g} \quad : \quad \text{Carga entregada al fluido por la bomba también llamada carga total de la bomba.}$$

$$h_{turbina} = \frac{W_{turbina}}{g} \quad : \quad \text{Carga extraída del fluido por la turbina.}$$

$$h_L = \frac{e_{perd}^{tuberia}}{g} \quad : \quad \text{Pérdida de carga irreversible entre los puntos "1" y "2" debido a todos los componentes del sistema de tubería diferentes a la bomba y turbina.}$$

### Flujo incompresible

Un líquido puede considerarse en esencia incompresible durante un proceso por lo que su densidad  $\rho$  puede asumirse constante. Entonces, la Ecuación 2.55 resulta en:

$$h_{bomba} + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = h_{turbina} + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + h_L \quad [2.56]$$

Para el caso especial de un tramo de flujo que no contiene bomba, ni turbina y con pérdidas de carga despreciables, se tiene lo siguiente:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2$$

La relación anterior puede expresarse en forma compacta como:

$$\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + Z = \text{constante} \quad [2.57]$$

La Ecuación 2.57 se conoce como ecuación de Bernoulli. Cada término en esta ecuación tiene dimensiones de longitud y representa algún tipo de carga:

- $P/\rho g$ : carga de presión estática.
- $v^2/2g$ : carga de presión dinámica.
- $Z$ : carga de elevación.

La suma de la carga de presión estática y la carga de presión dinámica se llama carga de presión de estancamiento del fluido que fluye.

La suma de la carga de presión estática, carga de presión dinámica, y carga de elevación proporciona la carga total para el fluido que fluye.

#### **2.1.2.5. Flujo en tuberías**

En esta sección se estudia el flujo interno de un fluido sobre un conducto cuando éste está totalmente lleno del fluido. Un sistema de tubería típico incluye una bomba para impulsar el fluido, tuberías para conducir el fluido, codos para cambiar de dirección al fluido y válvulas para controlar el caudal del flujo.

##### **2.1.2.5.1. Número de Reynolds**

Mott & Untener (2015) especifican que en forma experimental es posible demostrar que el carácter de un flujo en una tubería redonda depende de la densidad del fluido  $\rho$ , la viscosidad dinámica del fluido  $\mu$ , el diámetro interno de la tubería  $D$  y la velocidad promedio del flujo  $v$ . Estos parámetros sirven para definir un número adimensional conocido como Número de Reynolds  $Re$  y se calcula como:

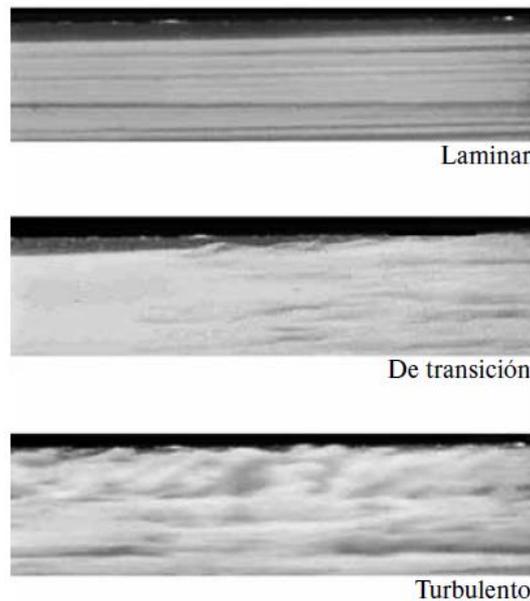
$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad [2.58]$$

##### **2.1.2.5.2. Flujo laminar y turbulento**

El movimiento fuertemente ordenado de un fluido se conoce como flujo laminar. El movimiento de fluidos muy viscosos a bajas velocidades generalmente produce un flujo laminar. Por otro lado, el movimiento

fuertemente desordenado de un fluido se denomina flujo turbulento. El movimiento de fluidos con baja viscosidad a velocidades altas generalmente produce un flujo turbulento. Un flujo que se encuentra entre laminar y turbulento se conoce como flujo en transición (Çengel & Cimbala, 2018). En la Figura 2.40 se muestra un ejemplo de flujo laminar, turbulento y en transición.

**Figura 2.40: Flujo laminar, de transición y turbulento.**



**Fuente:** Çengel & Cimbala, Mecánica de Fluidos, 2018.

En aplicaciones prácticas, cuando un flujo en una tubería presenta un número de Reynolds menor a 2000 se considera como flujo laminar. Cuando el número de Reynolds es mayor a 4000 se considera un flujo turbulento. En el rango de número de Reynolds entre 2000 y 4000 es imposible predecir qué tipo de flujo se ha formado por lo que a este rango se le denomina región crítica (Mott & Untener, 2015). En resumen, se tiene lo siguiente:

Si  $Re < 2000 \Rightarrow$  Flujo laminar.

Si  $2000 < Re < 4000 \Rightarrow$  Región crítica.

Si  $Re > 4000 \Rightarrow$  Flujo turbulento.

#### **2.1.2.5.3. Tuberías disponibles en el mercado**

Existen varios tipos de tuberías disponibles en el mercado, por ejemplo, tuberías de acero, tuberías de cobre, tuberías de hierro dúctil y tuberías de plástico.

Las tuberías de plástico se utilizan en una variedad de aplicaciones debido a su poco peso, facilidad de instalación, fortaleza contra la corrosión y resistencia química. Estas tuberías se utilizan por ejemplo en redes de agua y gas, sistema de alcantarillado y aguas residuales, producción de petróleo y gas, riego, minería, y muchas aplicaciones más (Mott & Untener, 2015). Se fabrican en diferentes tipos de plástico, por ejemplo: polietileno (PE), cloruro de polivinilo (PVC), polietileno reticulado (PEX), etc. En el Anexo B se muestra la ficha técnica de tuberías de polietileno de baja densidad PE 32 de la marca Stantubo. En el Anexo C se muestra la ficha técnica de tuberías de PVC para la conducción de fluidos a presión del fabricante Plastisur.

#### **2.1.2.5.4. Velocidades típicas en tuberías**

En la Sección 2.1.2.6., se verá que la pérdida de energía se incrementa fuertemente a medida que aumenta la velocidad de un flujo por lo que las velocidades no pueden ser tan altas. Según Fuentes & García (1999), como regla general, la velocidad mínima suele fijarse en 0.5 m/s para evitar la sedimentación de partículas en suspensión, mientras que la velocidad máxima

fluctúa entre 2.5 y 3 m/s para evitar inconvenientes como golpes de ariete y pérdidas de energía elevadas.

#### 2.1.2.6. Pérdidas de energía

El balance de energía para un volumen de control con flujo estacionario e incompresible con una entrada y salida (ver Ecuación 2.56) es:

$$h_{bomba} + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = h_{turbina} + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + h_L$$

El término  $h_L$  representa la pérdida de carga irreversible entre los puntos “1” y “2” debido a todos los componentes del sistema de tubería diferentes a la bomba y turbina. De acuerdo con Mott & Untener (2015) la pérdida de carga  $h_L$  en un sistema de tubería está formada por las pérdidas por fricción y por las pérdidas menores debidas a los accesorios instalados en el sistema de tuberías. Esto es:

$$h_L = h_L^{fricción} + h_L^{menores} \quad [2.59]$$

Donde:  $h_L^{fricción}$  es la pérdida de carga debido a la fricción y  $h_L^{menores}$  son las pérdidas menores debidas a los accesorios.

##### 2.1.2.6.1. Pérdida por fricción

Un fluido en movimiento presenta resistencia al fluir debido a la fricción con la tubería. En la práctica es común representar la pérdida de carga por fricción para todo tipo de flujo mediante la ecuación de Darcy la cual se expresa matemáticamente como (Mott & Untener, 2015):

$$h_L^{fricción} = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad [2.60]$$

Donde:  $f$  es el factor de fricción,  $L$  es la longitud de la tubería,  $D$  es el diámetro interno de la tubería,  $v$  es la velocidad promedio del flujo, y  $g$  es la aceleración de la gravedad.

El factor de fricción  $f$  también llamado factor de fricción de Darcy se determina de forma distinta para el flujo laminar y turbulento.

### **Factor de fricción en el flujo laminar**

El factor de fricción para un flujo laminar es (Çengel & Cimbala, 2018):

$$f = \frac{64}{Re} \quad [2.61]$$

Como puede observarse, en la ecuación anterior, el factor de fricción en un flujo laminar depende solamente del número de Reynolds y es independiente de la rugosidad de la superficie interna de la tubería.

### **Factor de fricción en el flujo turbulento**

El factor de fricción para flujo turbulento depende del número de Reynolds y de la rugosidad relativa de la tubería  $\varepsilon/D$ . La forma funcional para determinar el factor de fricción en esta clase de flujo se calcula mediante la Ecuación de Colebrook (Çengel & Cimbala, 2018):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad [2.62]$$

Donde:  $\varepsilon$  es la rugosidad absoluta de la pared interna de la tubería y  $D$  es el diámetro interno de la tubería.

La Ecuación de Colebrook es implícita en  $f$  y se resuelve iterativamente o utilizando un software solucionador de ecuaciones.

La rugosidad absoluta de la pared de la tubería  $\varepsilon$  depende del material del que está hecho la tubería y del método de fabricación. En la Tabla 2.5 se muestran valores de rugosidad típicos.

**Tabla 2.5: Rugosidad de la pared de la tubería para diversos materiales.**

Material	Rugosidad $\varepsilon$ (m)
Vidrio	Liso
Plástico	$3.0 \times 10^{-7}$
Tubo estirado; cobre, latón, acero	$1.5 \times 10^{-6}$
Acero, comercial o soldado	$4.6 \times 10^{-5}$
Hierro galvanizado	$1.5 \times 10^{-4}$
Hierro dúctil - revestido	$1.2 \times 10^{-4}$
Hierro dúctil - sin revestir	$2.4 \times 10^{-4}$
Concreto, bien hecho	$1.2 \times 10^{-4}$
Acero remachado	$1.8 \times 10^{-3}$

**Fuente:** Mott & Untener, Mecánica de Fluidos, 2015.

#### 2.1.2.6.2. Pérdidas menores

Un fluido en un sistema de tubería típico fluye a través de varios accesorios como válvulas, codos, reducciones, expansiones, etc. Estos accesorios ocasionan turbulencia local y generan pérdidas adicionales mediante la disipación de energía en forma de calor. En un sistema con tuberías largas, las pérdidas debidas a accesorios suelen ser pequeñas comparadas con las pérdidas por fricción en los tubos (también llamada pérdidas mayores) y por eso se les denomina pérdidas menores. Mott & Untener (2015) especifican que la pérdida menor que ocurre en un accesorio se puede determinar con:

$$h_L^{menor} = K \frac{v^2}{2g} \quad [2.63]$$

Donde:  $h_L^{menor}$  es la pérdida de carga menor en un accesorio,  $K$  es el coeficiente de resistencia del accesorio,  $v$  es la velocidad promedio del flujo, y  $g$  es la aceleración de la gravedad.

Según Çengel & Cimbala (2018) la pérdida de carga que genera un accesorio también puede determinarse mediante el concepto de longitud equivalente del accesorio  $L_e$  que viene a ser la longitud de un tramo de tubería que causa la misma pérdida de energía en el accesorio. El aporte en la pérdida de carga de un accesorio puede considerarse simplemente adicionando la longitud  $L_e$  a la longitud total de la tubería. Una relación para la pérdida de carga de un accesorio utilizando la longitud equivalente es:

$$h_L^{menor} = f \frac{L_e}{D} \frac{v^2}{2g} \quad [2.64]$$

La división entre la longitud equivalente del accesorio y el diámetro interno del mismo  $L_e/D$  se denomina relación de longitud equivalente del accesorio y se especifica en la Tabla 2.6 para diversos accesorios.

**Tabla 2.6: Relación de longitud equivalente para diversos accesorios.**

Accesorio	$L_e/D$
Válvula de globo - totalmente abierta	340
Válvula de ángulo - totalmente abierta	150
Válvula de compuerta - totalmente abierta	8
Válvula de compuerta - abierta 75%	35
Válvula de compuerta - abierta 50%	160
Válvula de compuerta - abierta 25%	900
Válvula de retención - tipo oscilante	100
Válvula de retención - tipo bola	150
Válvula de mariposa - totalmente abierta, 2" - 8"	45
Válvula de mariposa - totalmente abierta, 10" - 14"	35
Válvula de mariposa - totalmente abierta, 16" - 24"	25
Válvula de pie - tipo disco de vástago	420
Válvula de pie - tipo disco de bisagras	75
Codo estándar de 90°	30
Codo de 90° y radio largo	20
Codo de 90° para calle	50
Codo estándar de 45°	16
Codo de 45° para calle	26
Dobleces de retorno cerrado	50
Te estándar - con flujo por la línea principal	20
Te estándar - con flujo por la ramificación	60

**Fuente:** Mott & Untener, Mecánica de Fluidos, 2015.

### 2.1.2.7. Bombas hidráulicas

Las bombas se utilizan para impulsar fluidos a través de sistemas de tuberías.

La bomba entrega el caudal requerido del fluido para la aplicación específica mientras proporciona la energía necesaria al fluido para vencer la carga por elevación, carga de presión estática, carga de presión dinámica y la pérdida de carga que ocurre en el sistema de tuberías.

#### 2.1.2.7.1. Potencia suministrada por la bomba al fluido

La potencia que una bomba suministra a un fluido se calcula con (Mott & Untener, 2015):

$$\dot{W}_{bomba} = \gamma h_{bomba} \dot{V}_{bomba} \quad [2.65]$$

Donde:  $\dot{W}_{bomba}$  es la potencia suministrada por una bomba al fluido,  $\gamma$  es el peso específico del fluido,  $h_{bomba}$  es la carga total de la bomba, y  $\dot{V}_{bomba}$  es el caudal de bombeo.

#### 2.1.2.7.2. Eficiencia de la bomba

La eficiencia mecánica de la bomba  $\eta_{bomba}$  es la relación entre la potencia suministrada por ésta al fluido  $\dot{W}_{bomba}$  y la potencia en la flecha de la bomba  $\dot{W}_{bomba}^{flecha}$ . Es decir:

$$\eta_{bomba} = \frac{\dot{W}_{bomba}}{\dot{W}_{bomba}^{flecha}} \quad [2.66]$$

Considerando que la potencia en la flecha de la bomba es suministrada por un motor eléctrico, se define la eficiencia del motor eléctrico  $\eta_{motor}$  como la relación entre la potencia en la flecha de la bomba  $\dot{W}_{bomba}^{flecha}$  y la potencia eléctrica consumida por el motor  $\dot{W}_{motor}$ . Esto es:

$$\eta_{motor} = \frac{\dot{W}_{bomba}^{flecha}}{\dot{W}_{motor}} \quad [2.67]$$

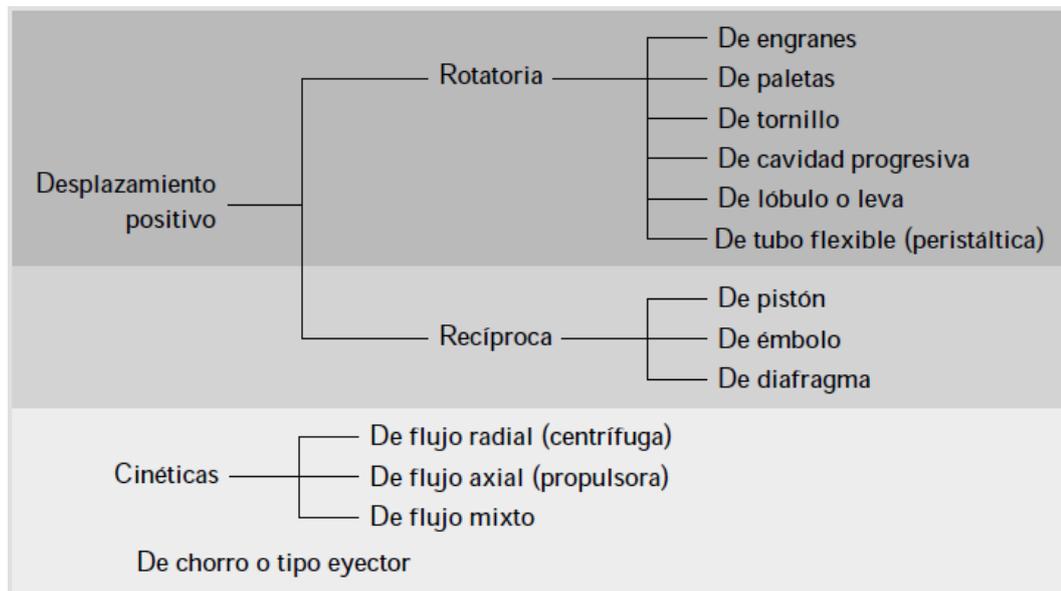
Se define la eficiencia del acoplamiento motor eléctrico – bomba  $\eta_{mb}$  de la siguiente forma:

$$\eta_{mb} = \frac{\dot{W}_{bomba}}{\dot{W}_{motor}} \rightarrow \eta_{mb} = \eta_{bomba} \eta_{motor} \quad [2.68]$$

### 2.1.2.7.3. Tipos de bombas

De acuerdo con Mott & Untener (2015), en forma general, las bombas se clasifican como bombas de desplazamiento positivo y bombas cinéticas como se muestra en la Figura 2.41.

**Figura 2.41: Clasificación de las bombas.**



**Fuente:** Mott & Untener, Mecánica de Fluidos, 2015.

#### **Bombas de desplazamiento positivo**

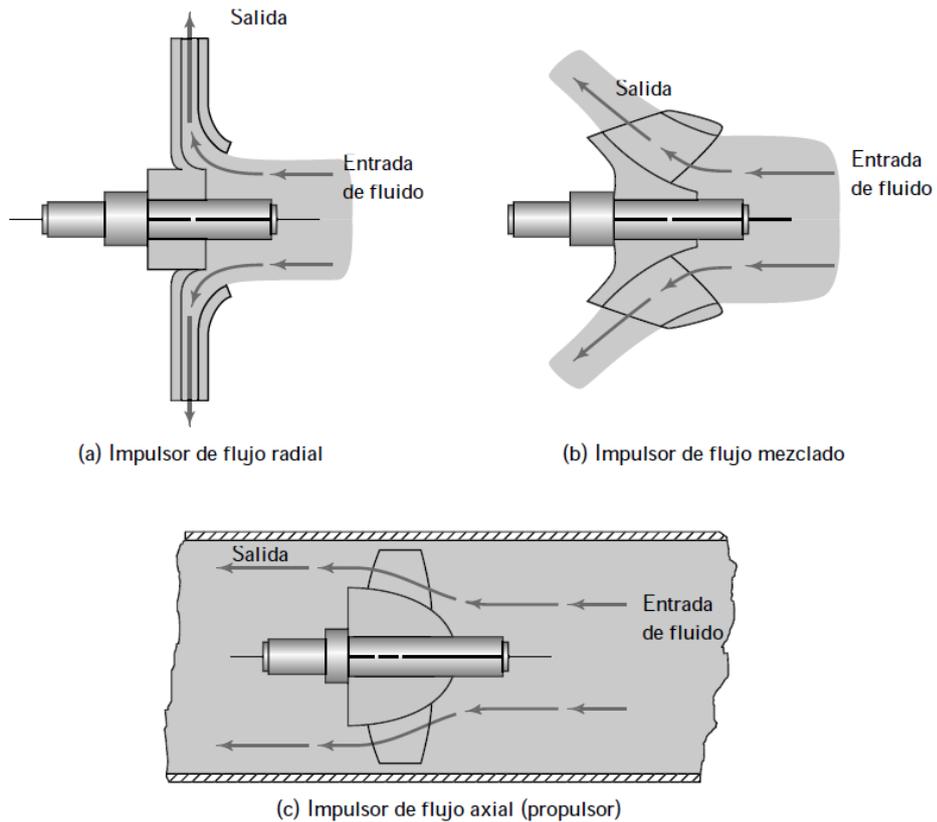
Este tipo de bombas se caracterizan por entregar un volumen fijo de fluido por cada revolución del eje de la bomba. Frecuentemente, producen presiones muy altas con caudales moderados. Las bombas de desplazamiento positivo a su vez se clasifican en rotatorias y recíprocas (Mott & Untener, 2015). En la Figura 2.41 se listan varios tipos de cada una.

#### **Bombas cinéticas**

Este tipo de bombas operan mediante la transferencia de energía cinética desde un elemento rotatorio llamado impulsor hasta un fluido. El fluido en su

paso a través de la bomba gana energía de presión y energía cinética. La Figura 2.42 muestra tres tipos de impulsores para bombas cinéticas.

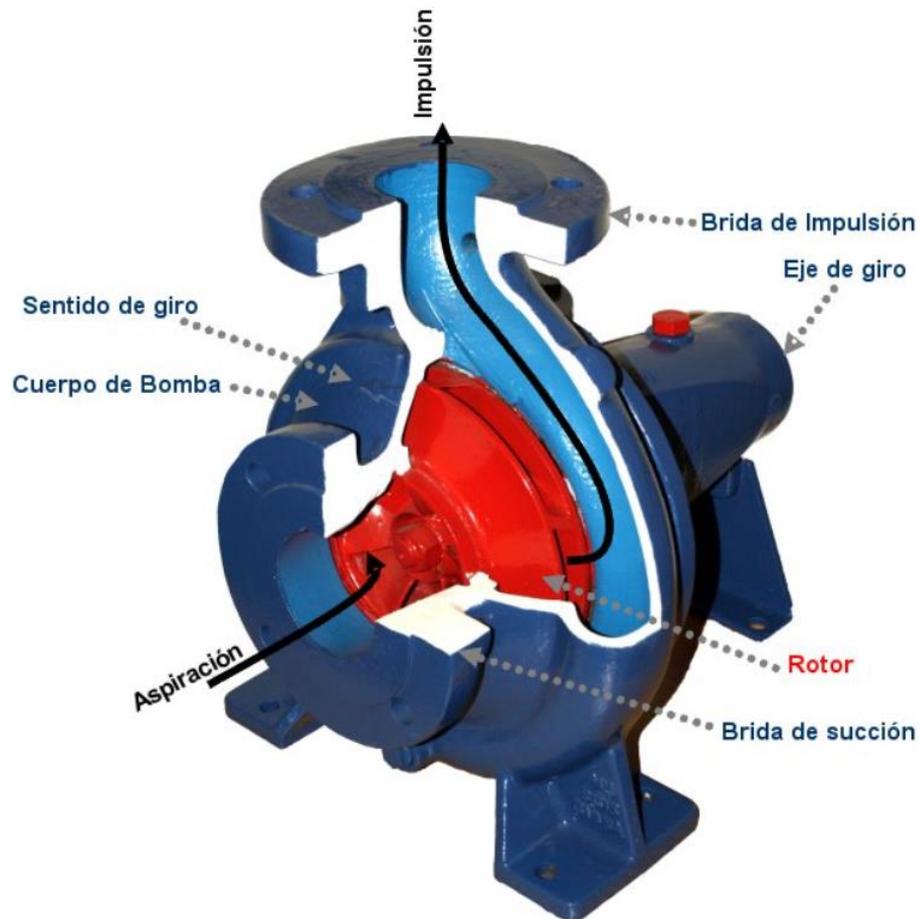
**Figura 2.42: Tipos de impulsores para bombas cinéticas.**



**Fuente:** Mott & Untener, Mecánica de Fluidos, 2015.

Según Mott & Untener (2015) el tipo de bomba cinética más usada es la bomba centrífuga. La Figura 2.43 muestra un ejemplar de bomba centrífuga.

**Figura 2.43: Bomba centrífuga y sus partes principales.**



**Fuente:** Wikipedia, Bomba Centrífuga, 2022.

Las bombas centrífugas por el tipo de aplicación pueden ser sumergibles, superficiales y flotantes. En el bombeo de agua desde pozos profundos se usan bombas sumergibles las cuales están diseñadas de tal forma que todo el conjunto bomba y motor eléctrico van sumergidos en el fluido que se piensa bombear. La Figura 2.44 muestra un ejemplar de bomba sumergible.

**Figura 2.44: Bomba sumergible.**

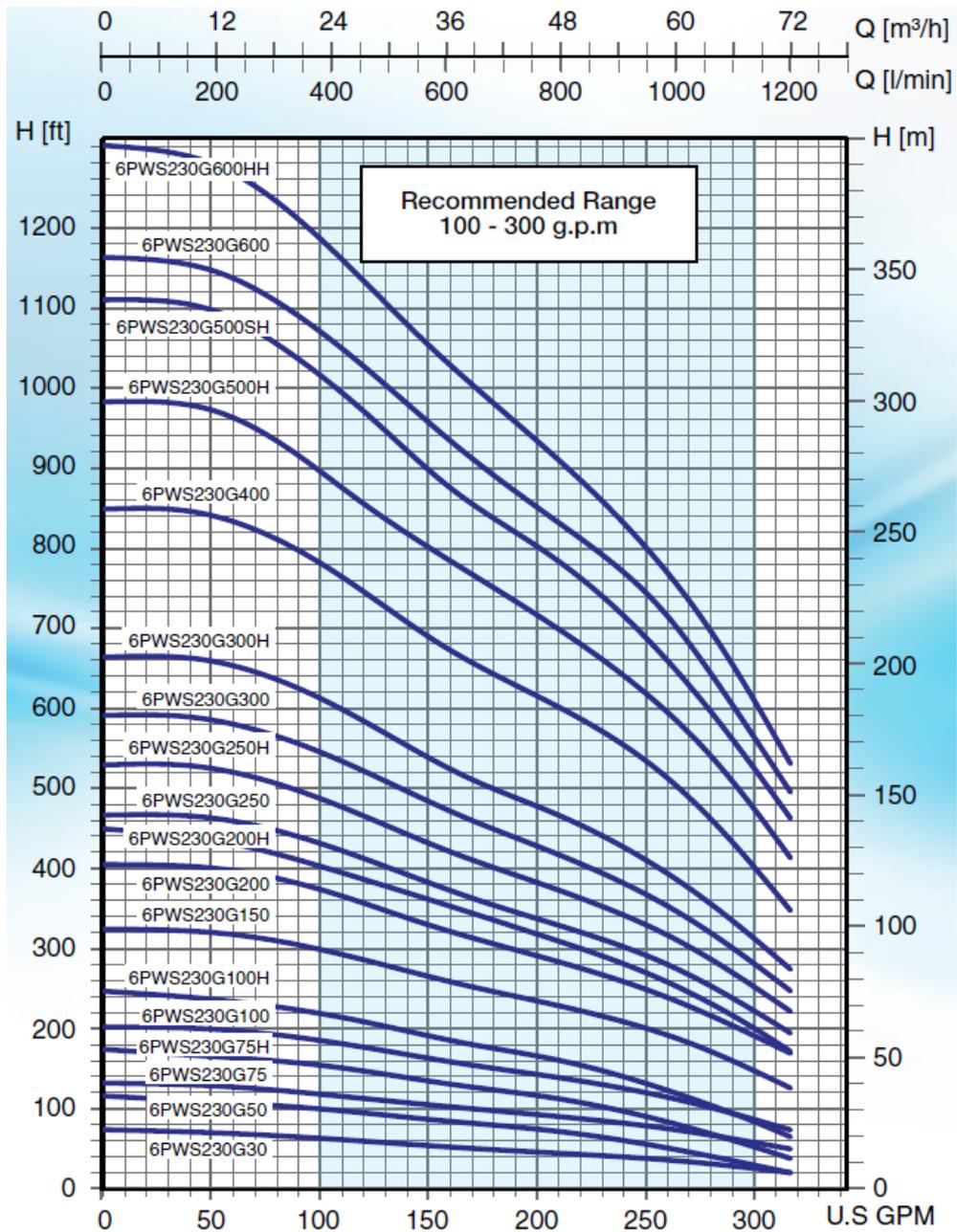


**Fuente:** Pearl Water Systems, Pearl 6PWS230G, 2018.

#### **2.1.2.7.4. Curvas de rendimiento para bombas centrífugas**

La curva típica de desempeño de una bomba grafica la carga total de la bomba  $h_{bomba}$  versus el caudal de bombeo  $\dot{V}_{bomba}$  (Mott & Untener, 2015). La carga total de la bomba, también llamada carga dinámica total, se determina a partir de la ecuación general de la energía, mientras que el caudal se establece por el requerimiento específico de la aplicación. La Figura 2.45 muestra una gráfica típica para cada modelo de la serie de bombas sumergibles 6PWS230G del fabricante Pearl Water Systems. En esta figura puede apreciarse que en el eje horizontal se representa el caudal que puede abastecer la bomba en galones por minuto americano (U.S. GPM),  $m^3/h$  o  $l/min$ , y en el eje vertical se tabula la carga total de la bomba expresada en pies o en metros.

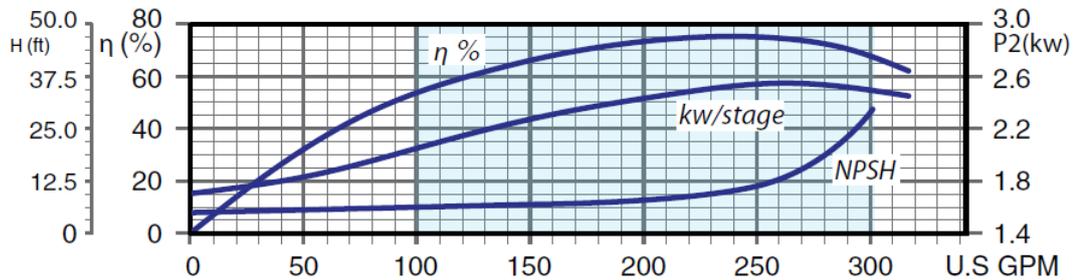
**Figura 2.45: Curva carga total vs caudal de una bomba.**



**Fuente:** Pearl Water Systems, Pearl 6PWS230G, 2018.

Otras curvas características muestran la eficiencia, potencia y NPSH en relación con el caudal. La Figura 2.46 muestra esta clase de gráficas para la misma clase de bombas de la Figura 2.45.

**Figura 2.46: Curvas de eficiencia, potencia y NPSH para una bomba.**



**Fuente:** Pearl Water Systems, Pearl 6PWS230G, 2018.

El funcionamiento de una bomba debe estar próximo al punto de máxima eficiencia siendo valores típicos de eficiencia entre 60% y 80% para bombas centrífugas (Mott & Untener, 2015).

#### 2.1.2.7.5. Carga de aspiración neta positiva

La carga de aspiración neta positiva (NPSH, por sus siglas en inglés) está directamente relacionada con el fenómeno de cavitación y la presión de vapor del fluido bombeado. El diseño de la línea de succión del sistema de bombeo debe proporcionar una presión suficientemente alta para evitar el desarrollo de la cavitación en la cual se forman burbujas de vapor dentro del fluido que son perjudiciales para el rendimiento de la instalación de bombeo.

#### Cavitación

Cuando la presión a la entrada de la bomba es muy baja se forman burbujas de vapor. Si la bomba extrae líquido desde un nivel inferior o las pérdidas de carga son excesivas en la línea de succión, es posible que la presión en la entrada de la bomba sea suficientemente baja como para formar burbujas de vapor. El fluido entra a la bomba por el puerto de succión y es allí donde se genera el menor punto de presión. Posteriormente, la rotación del impulsor

acelera el fluido en su paso a través de las paletas y la voluta, y la presión del fluido aumenta en este proceso. Si se formaron burbujas en el puerto de succión, éstas estallarán corriente abajo debido al aumento de presión. El colapso de las burbujas ejerce fuerzas de impacto en los álabes del impulsor y causa una erosión rápida de éste. Cuando se produce el fenómeno de cavitación en una bomba, la performance de ésta se ve afectada gravemente. La bomba vibra y genera ruido. Si se permite operar la bomba bajo estas condiciones termina destruyéndose en poco tiempo (Mott & Untener, 2015).

### **Presión de vapor**

La teoría sobre la presión de vapor de una sustancia se desarrolla en la Sección 2.1.2.2.2.

### **NPSH**

Los fabricantes de bombas ensayan cada modelo de bomba para determinar la presión de succión necesaria para evitar la cavitación y la reportan en forma de carga de aspiración neta positiva requerida  $NPSH_{req}$ . La Figura 2.46 muestra la gráfica del NPSH requerido para las bombas sumergibles Pearl serie 6PWS230G.

Por otro lado, la propia configuración de la instalación de bombeo establece una carga de aspiración neta positiva que se conoce como NPSH disponible denotado por  $NPSH_{dis}$ . Para que no exista cavitación, el  $NPSH_{dis}$  debe ser significativamente mayor que el  $NPSH_{req}$ . Generalmente, se establece la siguiente condición de diseño (Mott & Untener, 2015):

$$NPSH_{dis} > 1.1 NPSH_{req} \quad [2.69]$$

Donde:  $NPSH_{dis}$  es la carga de aspiración neta positiva disponible en la instalación de bombeo y  $NPSH_{req}$  es la carga de aspiración neta positiva requerida por la bomba.

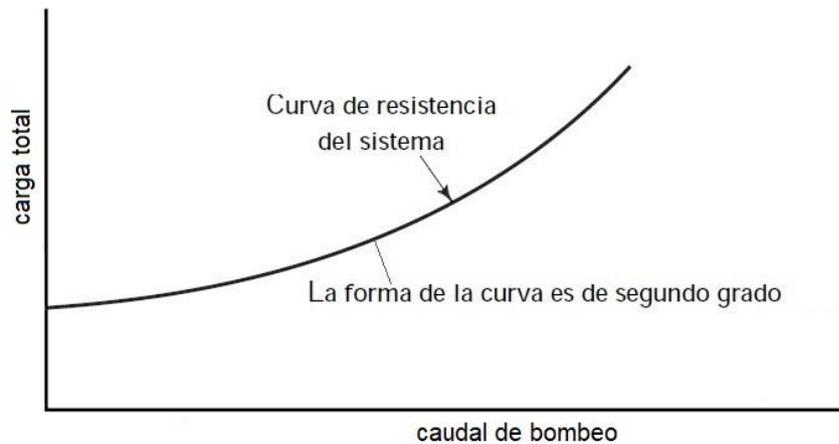
La carga de aspiración neta positiva disponible se define como la diferencia entre la carga de presión de estancamiento en la entrada de la bomba y la carga de la presión de vapor a la temperatura de bombeo (Çengel & Cimbala, 2018). Es decir:

$$NPSH_{dis} = \left( \frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} \right)_{\text{entrada de bomba}} - \frac{P_{vap}}{\rho g} \quad [2.70]$$

Donde:  $P_{vap}$  es la presión de vapor del fluido a la temperatura de bombeo.

#### 2.1.2.7.6. Curva de resistencia del sistema

La gráfica de la carga total de la bomba en función del caudal de bombeo para una instalación se denomina curva de resistencia del sistema o simplemente curva del sistema. Mott & Untener (2015) señalan que la forma típica de una de estas curvas es parabólica como puede observarse en la Figura 2.47. En la Sección 5.7 se determina la curva del sistema para la instalación de bombeo de la presente investigación.

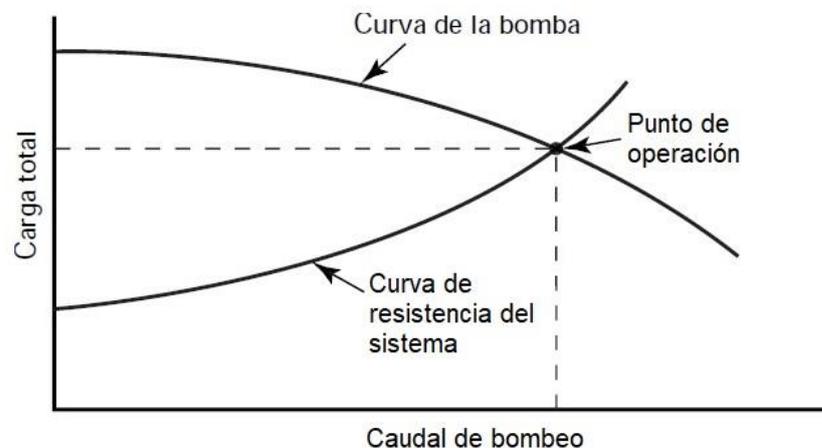
**Figura 2.47: Curva de resistencia del sistema.**

**Fuente:** Adaptada de Mott & Untener, Mecánica de Fluidos, 2015.

#### 2.1.2.7.7. Punto de operación de la bomba

El punto de operación de una bomba es el punto sobre su curva característica en el cual la bomba funcionará cuando se instale en un sistema de tubería dado. De acuerdo con Mott & Untener (2015) para determinar el punto de operación se superponen la curva de desempeño de la bomba y la curva de resistencia del sistema en cuya intersección se define el punto de operación.

La Figura 2.48 muestra un ejemplo del punto de operación de una bomba.

**Figura 2.48: Punto de operación de una bomba.**

**Fuente:** Adaptada de Mott & Untener, Mecánica de Fluidos, 2015.

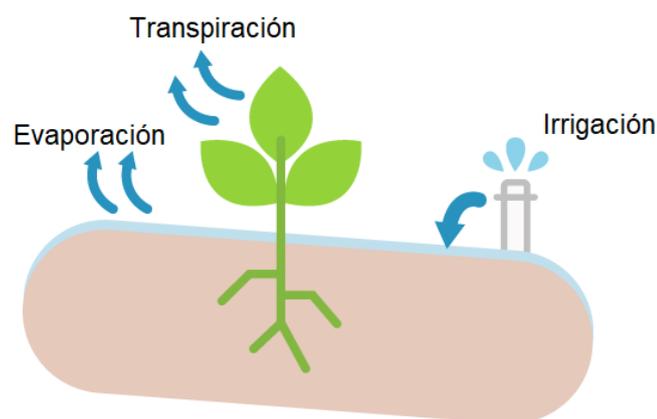
En la selección de una bomba se busca que el punto de operación se encuentre cercano al punto de máxima eficiencia de la bomba.

### 2.1.3. Demanda hídrica de los cultivos

#### 2.1.3.1. Evapotranspiración

La evapotranspiración es un proceso mediante el cual el agua se traslada desde la superficie terrestre hacia la atmósfera. Este proceso incluye el agua transpirada por un cultivo y el agua evaporada desde la superficie del suelo. Casi la totalidad del agua que se usa para irrigar una planta se pierde por evapotranspiración ya que sólo alrededor del 0.1% al 1% se incorpora en los tejidos de la planta. En la Figura 2.49 se representa el proceso de evapotranspiración. Desde un punto de vista práctico, la necesidad hídrica de un cultivo se considera igual a la pérdida por evapotranspiración del cultivo (Fuentes & García, 1999).

**Figura 2.49: Evapotranspiración de un cultivo.**



**Fuente:** Adaptada de Smith, Understanding Evapotranspiration (ET), 2021.

La evapotranspiración de un cultivo  $ET_c$  es la evapotranspiración del cultivo en un suelo fértil, sin enfermedades y con la cantidad de agua necesaria para

dar una producción eficiente (Fuentes & García, 1999). Todorovic (2005) especifica que la evapotranspiración de un cultivo se determina mediante la siguiente relación:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad [2.71]$$

Donde:  $ET_c$  es la evapotranspiración de un cultivo,  $K_c$  es el coeficiente de cultivo característico de cada planta, y  $ET_0$  es la evapotranspiración del cultivo de referencia.

La evapotranspiración del cultivo de referencia  $ET_0$  se define como la evapotranspiración de un cultivo extenso y uniforme de gramíneas, de 8 cm a 15 cm de altura, en crecimiento activo, que sombrea totalmente el terreno y no está escaso de agua (Fuentes & García, 1999).

Existen diferentes métodos para calcular la evapotranspiración del cultivo de referencia. En esta investigación se emplea el método de Hargreaves y Samani, el cuál plantea la siguiente relación para su determinación (Toro et al., 2015):

$$ET_0 = 0.0135 (T_{med} + 17.78) H_d^{(0^\circ)} \quad [2.72]$$

Donde:  $ET_0$  es la evapotranspiración del cultivo de referencia en mm/día,  $T_{med}$  es la temperatura diaria media en °C, y  $H_d^{(0^\circ)}$  es la irradiación global diaria incidente en mm/día.

Para expresar la irradiación incidente en términos de profundidad de agua evaporada es necesario tomar en cuenta el calor latente de vaporización del

agua el cual depende de la temperatura o presión en la cual ocurre el cambio de fase. A 20 °C, el calor latente de vaporización es 2453.5 kJ/kg (Çengel & Boles, 2012). En otras palabras, se necesitan 2453.5 kJ para vaporizar 1 kg o 0.001 m<sup>3</sup> de agua. Por lo tanto, una entrada de energía de 2453.5 kJ en un área de 1 m<sup>2</sup> es capaz de evaporar 1 mm de agua. Entonces, se tiene la siguiente equivalencia:

$$2453.5 \text{ kJ/m}^2 = 1\text{mm} \rightarrow 1 \text{ kWh/m}^2 = 1.467\text{mm}$$

### 2.1.3.2. Requerimiento bruto de riego

El requerimiento bruto de riego se calcula teniendo en cuenta la eficiencia del sistema de riego utilizado:

$$RR = \frac{ET_c}{\eta_{riego}} \quad [2.73]$$

Donde:  $RR$  es el requerimiento bruto de riego,  $ET_c$  es la evapotranspiración del cultivo, y  $\eta_{riego}$  es la eficiencia del sistema de riego.

Valores típicos para la eficiencia del sistema de riego son de 0.85 para microaspersión y 0.9 para riego por goteo (Fuentes & García, 1999).

### 2.1.3.3. Volumen diario de agua por planta

El volumen diario de agua que requiere cada planta  $V_p$  se determina de la siguiente forma:

$$V_p = RR \times S_p \times S_s \quad [2.74]$$

Donde:  $V_p$  es el volumen diario de agua requerido por planta,  $RR$  es el requerimiento bruto de riego,  $S_p$  es la separación entre plantas, y  $S_s$  es la separación entre surcos.

#### 2.1.3.4. Tiempo de riego

El tiempo de riego de las plantas se determina con:

$$t_r = \frac{V_p}{N_p^g \times \dot{V}_g} \quad [2.75]$$

Donde:  $t_r$  es el tiempo de riego,  $V_p$  es el volumen diario de agua requerido por planta,  $N_p^g$  es el número de goteros por planta, y  $\dot{V}_g$  es el caudal del gotero.

#### 2.1.3.5. Volumen diario de agua por hectárea

Para determinar el volumen diario de agua por hectárea es necesario calcular primero la cantidad de plantas sembradas en cada hectárea. El número de plantas por hectárea es:

$$N_h^p = N_s \times N_p \quad [2.76]$$

Donde:  $N_h^p$  es el número de plantas por hectárea,  $N_s$  es el número de surcos por hectárea, y  $N_p$  es el número de plantas sembradas en cada surco por hectárea.

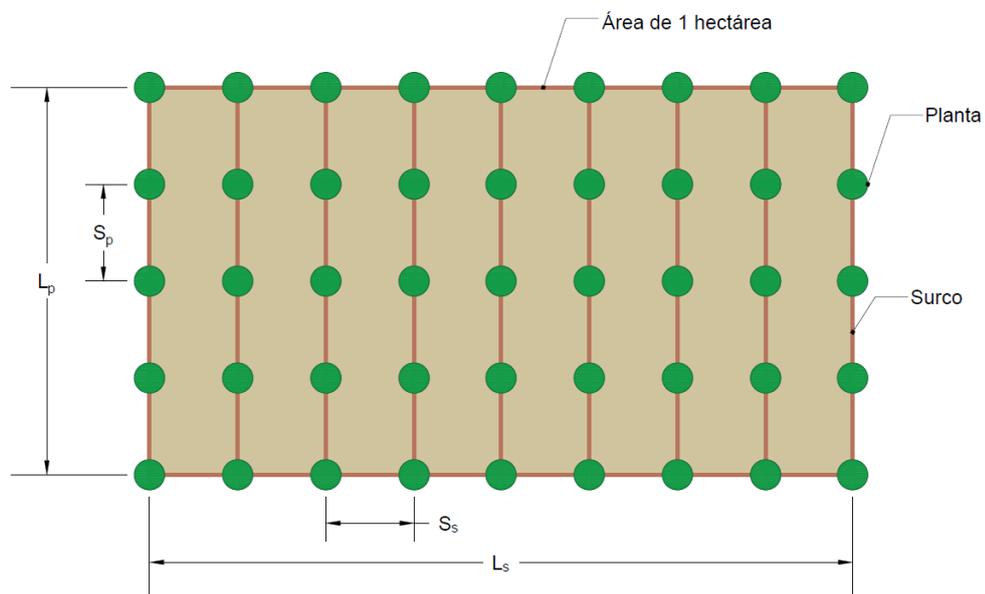
Con la ayuda de la Figura 2.50, puede establecerse las siguientes relaciones para  $N_s$  y  $N_p$ :

$$N_s = \frac{L_s}{S_s} \quad [2.77-a]$$

$$N_p = \frac{L_p}{S_p} \quad [2.77-b]$$

Donde:  $L_s$  es la dimensión de la hectárea a través de la cual se hacen los surcos,  $S_s$  es la separación entre surcos,  $L_p$  es la dimensión de la hectárea a lo largo de las plantas en cada surco, y  $S_p$  es la separación entre plantas.

**Figura 2.50: Número de surcos y número de plantas en 1 hectárea.**



**Fuente:** Elaboración del autor.

Ahora, para determinar el volumen diario de agua necesario por hectárea se usa la siguiente ecuación:

$$V_h = V_p \times N_h^p \quad [2.78]$$

Donde:  $V_h$  es el volumen de agua diario requerido por hectárea,  $V_p$  es el volumen de agua diario requerido por planta, y  $N_h^p$  es el número de plantas por hectárea.

### **2.1.3.6. Volumen de agua total**

El volumen de agua total diario requerido por un sembrío se calcula considerando el número de hectáreas del proyecto:

$$V_t = V_h \times N_h \quad [2.79]$$

Donde:  $V_t$  es el volumen de agua total diario requerido por un sembrío,  $V_h$  es el volumen de agua diario requerido por hectárea, y  $N_h$  es el número de hectáreas del proyecto.

### **2.1.4. Riego por goteo**

#### **2.1.4.1. Generalidades**

El riego por goteo o riego gota a gota es un tipo de riego localizado que consiste en aplicar el agua a una zona delimitada del volumen del suelo que generalmente ocupan las raíces de la planta utilizando pequeños caudales a baja presión. El agua se aplica mediante unos dispositivos denominados emisores o goteros que la suministran gota a gota con un caudal inferior de 16 l/h por punto de emisión (Fuentes & García, 1999).

El suministro de agua hacia los emisores se puede realizar mediante dos métodos. El primer método consiste en el bombeo directo desde la fuente de agua hasta las líneas de riego. El segundo método consiste en bombear agua desde la fuente hasta un tanque de almacenamiento con una altura adecuada para el posterior riego por gravedad.

El sistema de riego por goteo presenta eficiencias de aplicación de agua muy altas con valores típicos entre 90% a 95% (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 2015).

#### **2.1.4.1.1. Ventajas e inconvenientes**

Según Fuentes & García (1999) las principales ventajas del sistema de riego por goteo son:

- ✓ Mejor aprovechamiento del agua.
- ✓ Posibilidad de utilizar aguas con índices de salinidad más altos.
- ✓ Mayor uniformidad de riego.
- ✓ Mejor aprovechamiento de los fertilizantes.
- ✓ Aumento de la calidad y cantidad de las cosechas.
- ✓ Menor infestación por malas hierbas.
- ✓ Posibilidad de aplicar fertilizantes, mejoradores químicos y pesticidas con el agua de riego.
- ✓ Facilidad de realización de trabajos agrícolas ya que permanece seca un buen porcentaje de la superficie del suelo.
- ✓ Ahorro en mano de obra.

De acuerdo con Fuentes & García (1999) las desventajas de este tipo de riego son:

- ✓ Se necesita de personal más calificado.
- ✓ Se tiene que realizar un análisis inicial del agua.
- ✓ Cuando se gestiona mal el riego existe la posibilidad de salinización del bulbo húmedo.

- ✓ Vigilancia periódica de los emisores con el fin de evitar obstrucciones.
- ✓ Precisa un control de las dosis de agua, fertilizantes, pesticidas y productos aplicados al agua de riego.
- ✓ Mayor inversión inicial.

#### **2.1.4.2. Componentes principales**

Los componentes principales de un sistema de riego por goteo son (Fuentes & García, 1999):

- a) Cabezal de riego.
- b) Red de distribución.
- c) Emisores.
- d) Dispositivos de control.

##### **2.1.4.2.1. Cabezal de riego**

El cabezal de riego está formado por un conjunto de dispositivos que sirven para regular, tratar, medir y filtrar el agua, comprobar la presión, agregar fertilizantes y pesticidas (Fuentes & García, 1999).

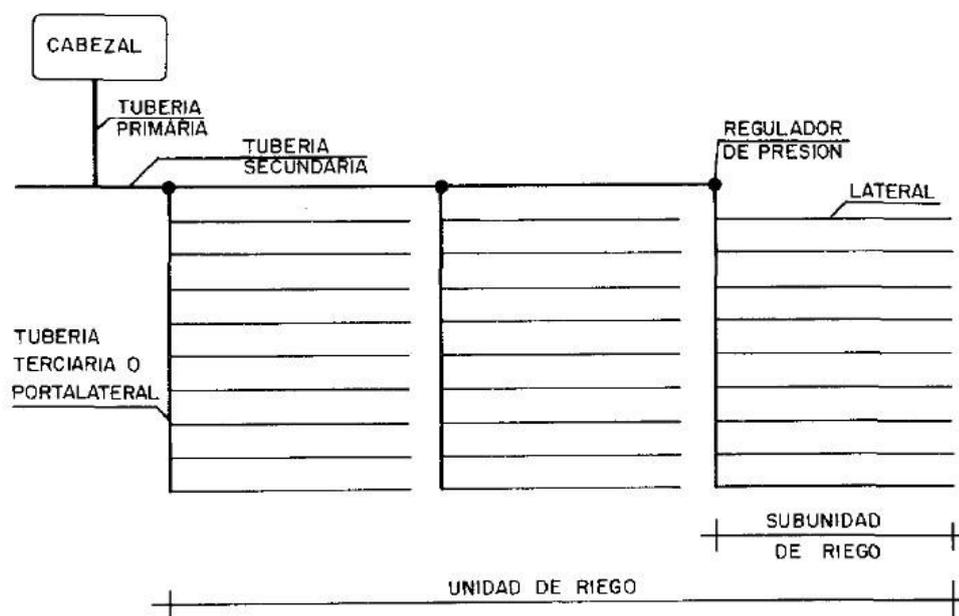
##### **2.1.4.2.2. Red de distribución**

Fuentes & García (1999) mencionan que la red de distribución conduce el agua desde el cabezal de riego hasta los emisores. La conducción del agua se hace a través de una red de tuberías que se llaman primarias, secundarias y así sucesivamente según su orden. Las tuberías de último orden se denominan laterales y son las que contienen los emisores.

Generalmente, se coloca un regulador de presión al inicio de cada tubería de donde parten los laterales (la tubería portalateral). La parte del sistema de

riego controlada por un regulador de presión se conoce como subunidad de riego. Al conjunto de subunidades de riego que se riegan desde una misma tubería se conoce como unidad de riego en cuya parte inicial se instala un dispositivo para controlar el caudal de agua (Fuentes & García, 1999). En la Figura 2.51 se muestra una red de distribución típica de riego por goteo.

**Figura 2.51: Red de distribución de un sistema de riego por goteo.**



**Fuente:** Fuentes & García, Técnicas de Riego, 1999.

De acuerdo con Fuentes & García (1999) las tuberías primarias, secundarias y terciarias generalmente son de PVC o PE. Las tuberías laterales generalmente son de PE de baja densidad.

#### 2.1.4.2.3. Emisores

Los emisores son los dispositivos que se encargan de aplicar el agua a las plantas. Uno de los principales inconvenientes que presentan estos elementos es la posibilidad de obstrucción producida por materias que van mermando la eficiencia de éstos. En el sistema de riego por goteo generalmente se utilizan

emisores de bajo caudal (hasta 16 l/h) que comprenden los goteros y cintas emisoras. Los emisores de bajo caudal usualmente operan a una presión próxima de 10 mca (Fuentes & García, 1999). En la Figura 2.52 se muestra un ejemplar de gotero del fabricante Jain Irrigation Systems.

**Figura 2.52: Gotero modelo Mini Inline.**



**Fuente:** Jain Irrigation Systems, Mini Inline Emitter, 2021.

Según Monge (2018) los emisores pueden clasificarse como compensantes y no compensantes. Los emisores compensantes prácticamente otorgan el mismo caudal bajo un rango de presiones de trabajo determinado. En los goteros no compensantes, el caudal depende fuertemente de la presión de trabajo del gotero.

### **Relación caudal – presión**

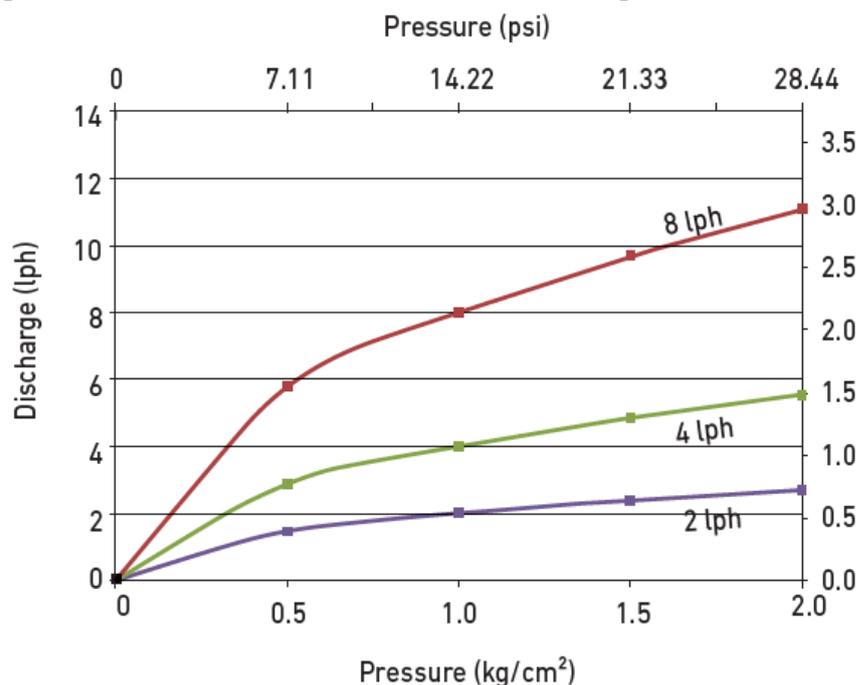
En cualquier emisor el caudal de descarga y la presión de trabajo se relacionan mediante la siguiente ecuación (Fuentes & García, 1999):

$$\dot{V}_g = k P_g^x \quad [2.80]$$

Donde:  $\dot{V}_g$  es el caudal del gotero,  $k$  es el coeficiente característico del gotero,  $P_g$  es la presión de operación del gotero, y  $x$  es el exponente de descarga del gotero (valor entre 0 y 1).

La curva definida por la Ecuación 2.80 se llama curva característica del gotero. En la Figura 2.53 se muestra un ejemplo de este tipo de curvas para los goteros no compensantes modelo Mini Inline del fabricante Jain Irrigation Systems. En esta figura puede observarse la variación considerable del caudal entregado por el gotero con respecto a la presión.

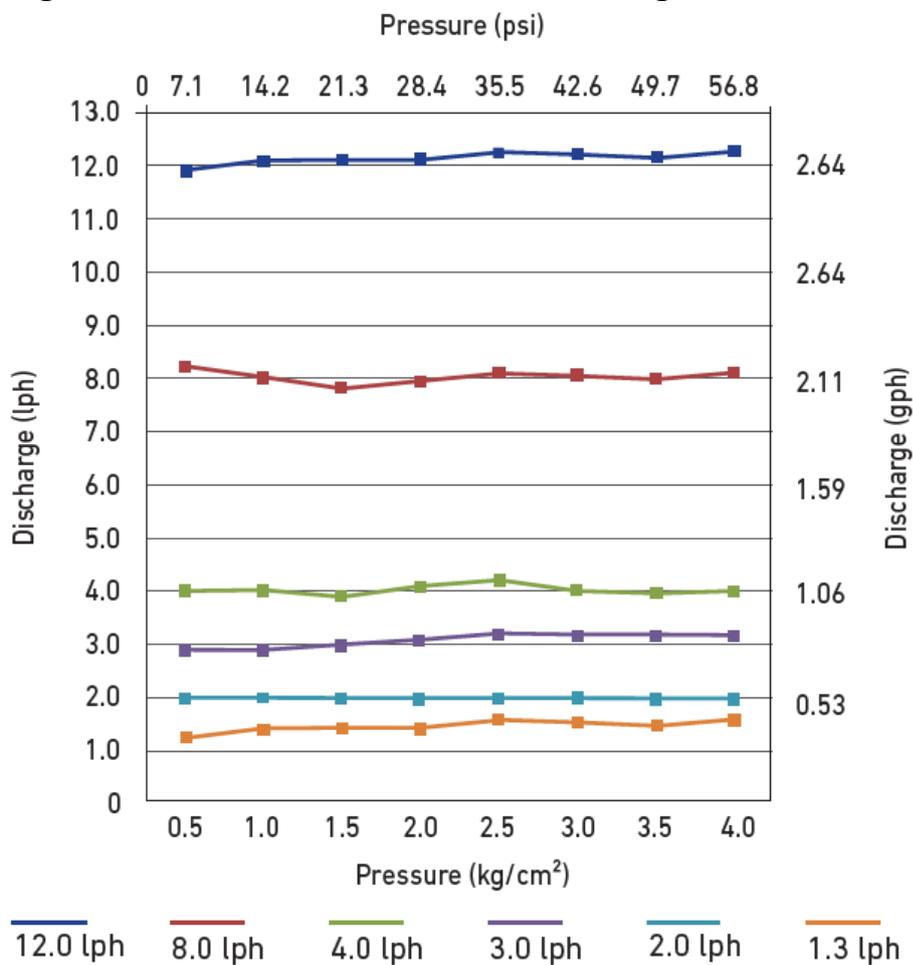
**Figura 2.53: Curvas características de los goteros Mini Inline.**



**Fuente:** Jain Irrigation Systems, Mini Inline emitter, 2021.

En la Figura 2.54 se muestra las curvas características para los goteros compensantes modelo Click Tif del fabricante Jain Irrigation Systems. En esta figura puede observarse que estos goteros entregan un caudal casi constante bajo determinados intervalos de presión.

**Figura 2.54: Curvas características de los goteros Click Tif.**



**Fuente:** Jain Irrigation Systems, Click Tif HD-PC & PCNL, 2021.

Monge (2018) menciona que el valor del exponente de descarga en los goteros compensantes está muy próximo a cero motivo por el cual el caudal varía muy poco ante las variaciones de presión. Esta característica los hace adecuados en terrenos con pendientes muy empinadas en dónde se presentan variaciones considerables de presión.

#### 2.1.4.2.4. Dispositivos de control

Los dispositivos de control son los elementos que permiten controlar el funcionamiento de la instalación de riego. Ejemplos de estos elementos son:

medidores, manómetros, reguladores de presión, reguladores de caudal, etc. (Fuentes & García, 1999).

### 2.1.4.3. Cálculo hidráulico

#### 2.1.4.3.1. Pérdidas de carga por fricción en tuberías a presión

La pérdida de carga por fricción  $h_L^{fricción}$  puede determinarse mediante la Ecuación de Darcy (ver Ecuación 2.60). Las pérdidas de carga por fricción también pueden calcularse mediante fórmulas empíricas que presentan la siguiente forma:

$$J = C D^{-\sigma} \dot{V}^\omega \quad [2.81]$$

Donde:

- $J$ : Pérdida de carga por fricción por metro lineal de tubería.
- $D$ : Diámetro interior de la tubería.
- $\dot{V}$ : Caudal por el interior de la tubería.
- $C, \sigma$  y  $\omega$ : Constantes características de cada fórmula.

La fórmula empírica más usada para tuberías de plástico en riego localizado es la fórmula de Blasius (Fuentes & García, 1999):

$$J = 0.00083 D^{-4.75} \dot{V}^{1.75} \quad [2.82]$$

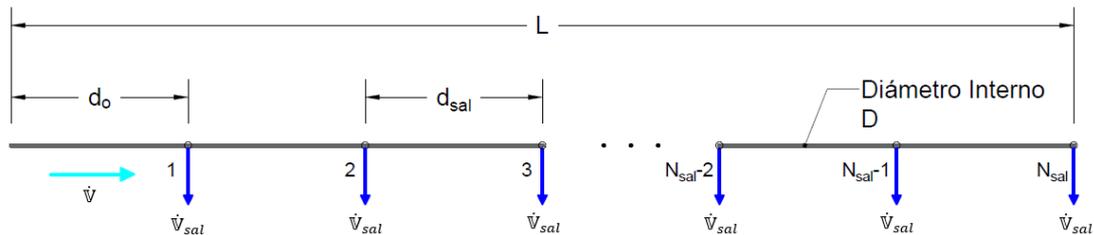
#### 2.1.4.3.2. Tuberías con salidas uniformemente espaciadas

Considérese una tubería con diámetro interno constante  $D$ , longitud  $L$ , con  $N_{sal}$  salidas espaciadas entre sí la distancia  $d_{sal}$ , y por las que sale un caudal  $\dot{V}_{sal}$ , tal como se muestra en la Figura 2.55. Se cumple lo siguiente:

$$\begin{aligned} L &= N_{sal} d_{sal} \\ \dot{V} &= N_{sal} \dot{V}_{sal} \end{aligned}$$

Donde  $\dot{V}$  representa el caudal al inicio de la tubería.

**Figura 2.55: Tubería con salidas uniformemente espaciadas.**



**Fuente:** Elaboración del autor.

Los caudales en cada tramo son:

Tramo	Caudal
1	$N_{sal} \dot{V}_{sal}$
2	$(N_{sal} - 1) \dot{V}_{sal}$
3	$(N_{sal} - 2) \dot{V}_{sal}$
$\vdots$	$\vdots$
$N_{sal} - 1$	$2\dot{V}_{sal}$
$N_{sal}$	$\dot{V}_{sal}$

En cada uno de los tramos, el caudal va disminuyendo progresivamente y las pérdidas por fricción en cada tramo también van disminuyendo. La pérdida de energía por fricción en la tubería es igual a la suma de pérdidas por fricción de todos los tramos. Esto es:

$$h_L^{fricción} = h_L^{fricción,1} + h_L^{fricción,2} + h_L^{fricción,3} + \dots + h_L^{fricción,N_{sal}}$$

El cálculo de las pérdidas por fricción con la ecuación anterior es muy trabajoso. Resulta más práctico calcular la pérdida por fricción en una tubería de igual longitud, diámetro, rugosidad y sin salidas por las que circula el caudal  $\dot{V} = N_{sal} \dot{V}_{sal}$  y posteriormente multiplicarlo por un factor reductor de tal forma

que las pérdidas por fricción en ambos casos sean las mismas. Este factor reductor se conoce como Factor de Christiansen  $F_c$ .

El Factor de Christiansen  $F_c$  depende de tres variables las cuales son (Fuentes & García, 1999):

- Número de salidas  $N_{sal}$ .
- Distancia del origen a la primera salida  $d_o$  (ver Figura 2.55).
- Constante característica de cada fórmula  $\omega$  (ver Ecuación 2.81).

En la Tabla 2.7 se dan los valores del Factor de Christiansen para una distancia  $d_o = d_{sal}$  y un coeficiente  $\omega = 1.75$ .

**Tabla 2.7: Factor de Christiansen  $F_c$  para  $d_o = d_{sal}$  y  $\omega = 1.75$ .**

$N_{sal}$	$F_c$	$N_{sal}$	$F_c$
1	1.000	17	0.393
2	0.650	18	0.392
3	0.546	19	0.390
4	0.497	20	0.389
5	0.469	22	0.387
6	0.451	24	0.385
7	0.438	26	0.383
8	0.428	28	0.382
9	0.421	30	0.380
10	0.415	35	0.378
11	0.410	40	0.376
12	0.406	50	0.374
13	0.403	60	0.372
14	0.400	80	0.370
15	0.397	100	0.369
16	0.395	150	0.367

**Fuente:** Fuentes & García, Técnicas de Riego, 1999.

### 2.1.4.3.3. Cálculo de las tuberías laterales

Las tuberías laterales o portaemisores son las que distribuyen el agua a las plantas mediante los emisores insertados en ellas. De acuerdo con Monge (2018) la velocidad en los laterales se limita a 1.5 m/s – 2 m/s debido a las elevadas pérdidas de carga que suceden en tuberías con diámetros pequeños. Además, la velocidad mínima debe ser mayor a 0.5 m/s con la finalidad de evitar sedimentaciones en las tuberías.

Para el diseño hidráulico de los laterales, se los considera como tuberías con salidas uniformemente espaciadas. El caudal en el origen de una tubería lateral  $\dot{V}_{lat}$  se determina mediante:

$$\dot{V}_{lat} = N_{lat}^p \times N_p^g \times \dot{V}_g \quad [2.83]$$

Donde:  $N_{lat}^p$  es el número de plantas por tubería lateral,  $N_p^g$  es el número de goteros por planta, y  $\dot{V}_g$  es el caudal del gotero.

Con la finalidad de tomar en cuenta las pérdidas de carga menores presentes en la tubería lateral, se define la longitud ficticia del lateral  $L_{lat}^f$ . Una buena suposición es considerar que las pérdidas de carga menores son el 20% de las pérdidas por fricción. Esto es:

$$L_{lat}^f = 1.2 \times L_{lat} \quad [2.84]$$

Donde:  $L_{lat}$  es la longitud real de la tubería lateral.

Cuando se usan goteros no compensantes, se establece como variación máxima del caudal del 10% entre los emisores de una subunidad de riego

para mantener un riego uniforme en el cultivo. Para cumplir con esta condición, se puede demostrar que la máxima variación de presión entre los goteros de una subunidad de riego debe ser (Fuentes & García, 1999):

$$P_g^{max} - P_g^{min} = \frac{0.1}{x} P_g \quad [2.85]$$

Donde:  $P_g^{max}$  es la presión del gotero con mayor presión en la subunidad de riego,  $P_g^{min}$  es la presión del gotero con menor presión en la subunidad de riego,  $x$  es el exponente de descarga del gotero, y  $P_g$  es la presión de operación del gotero.

Cuando se usan goteros compensantes, se debe buscar que las diversas presiones de operación de los goteros en la subunidad de riego estén dentro del rango de presión de regulación del gotero compensante.

Para el diseño del diámetro del lateral se fija la velocidad de flujo en el inicio de la tubería lateral  $v_{lat}$ . Es decir:

$$\dot{V}_{lat} = v_{lat} \frac{\pi}{4} D^2$$

Despejando el diámetro interno D, se tiene:

$$D = \sqrt{\frac{4 \dot{V}_{lat}}{\pi v_{lat}}}$$

En la relación anterior, para que exista una consistencia de unidades, el diámetro debe estar en m, el caudal en m<sup>3</sup>/s y la velocidad en m/s.

Cambiando de unidades resulta la siguiente relación:

$$D = 0.5947 \sqrt{\dot{V}_{lat}/v_{lat}} \quad [2.86]$$

Donde: el diámetro está en mm, el caudal en l/h y la velocidad en m/s.

La pérdida de carga en el lateral  $h_L^{lat}$  se calcula mediante la siguiente relación:

$$h_L^{lat} = J L_{lat}^f F_c$$

Reemplazando la fórmula de Blasius (ver Ecuación 2.82) en la relación anterior resulta la siguiente fórmula:

$$h_L^{lat} = \frac{0.496 \dot{V}_{lat}^{1.75} F_c L_{lat}^f}{D^{4.75}} \quad [2.87]$$

Donde:  $h_L^{lat}$  es la pérdida de carga en el lateral en mca,  $\dot{V}_{lat}$  es el caudal en el origen de la tubería lateral en l/h,  $F_c$  es el factor de Christiansen,  $L_{lat}^f$  es la longitud ficticia del lateral en m, y  $D$  es el diámetro interno del lateral en mm.

La diferencia de presión entre dos puntos cualquiera de un lateral se puede determinar mediante un balance de energía. Considerando un tramo de lateral con dirección de flujo desde el punto "i" hasta el punto "f" y despreciando las cargas de velocidad se tiene:

$$P_{lat}^i + Z_{lat}^i = P_{lat}^f + Z_{lat}^f + h_L^{i-f}$$

La diferencia de presión es:

$$P_{lat}^i - P_{lat}^f = h_L^{i-f} + (Z_{lat}^f - Z_{lat}^i) \quad [2.88]$$

Donde:

- $P_{lat}^i$ : Presión en el lateral en el punto “i”.  
 $P_{lat}^f$ : Presión en el lateral en el punto “f”.  
 $h_L^{i-f}$ : Pérdida de carga en el lateral en el tramo i-f.  
 $Z_{lat}^f$ : Cota del punto “f” del lateral.  
 $Z_{lat}^i$ : Cota del punto “i” del lateral.

De la Ecuación 2.88 se puede observar que, en laterales horizontales, la diferencia de presión entre dos puntos es igual a la pérdida de carga entre dichos puntos. Cuando se tiene un lateral en un terreno ascendente, la diferencia de presiones entre dichos puntos se acentúa como resultado de la elevación de cota. Para el caso de un lateral dispuesto en un terreno con fuerte descenso, la presión en el punto con menor cota será mayor que la presión en el punto con mayor cota debido a que la ganancia de presión por diferencia de cota es mayor que las pérdidas de carga.

#### 2.1.4.3.4. Cálculo de las tuberías portalaterales

La tubería portalateral es la que distribuye el agua a las tuberías laterales. Para el diseño hidráulico de los portalaterales se los considera como tuberías con salidas uniformemente espaciadas. Monge (2018) especifica que la velocidad máxima en estas tuberías se establece en 2.5 m/s – 3.0 m/s y la velocidad mínima en 0.5 m/s para evitar sedimentaciones.

El caudal en el origen de una tubería portalateral se determina mediante:

$$\dot{V}_{pl} = N_{pl}^{lat} \times \dot{V}_{lat} \quad [2.89]$$

Donde:  $\dot{V}_{pl}$  es el caudal en el origen de la tubería portalateral,  $N_{pl}^{lat}$  es el número de laterales en cada tubería portalateral, y  $\dot{V}_{lat}$  es el caudal en el origen de la tubería lateral.

La longitud ficticia del portalateral es igual a la longitud real del portalateral más la longitud equivalente de todos los accesorios instalados. Por lo general se toma:

$$L_{pl}^f = 1.2 L_{pl} \quad [2.90]$$

Donde:  $L_{pl}^f$  es la longitud ficticia del portalateral y  $L_{pl}$  es la longitud real del portalateral.

Cuando se usan goteros no compensantes se debe tener presente la máxima diferencia de presión permisible entre goteros de una subunidad de riego como se indicó anteriormente. Cuando se usan goteros compensantes, las presiones de los goteros en una subunidad de riego deben estar dentro del rango de presiones de funcionamiento del emisor.

El diseño del diámetro del portalateral se realiza de manera similar al del lateral fijando la velocidad de flujo en el inicio de la tubería portalateral.

La pérdida de carga en el portalateral  $h_L^{pl}$  se calcula mediante la siguiente relación:

$$h_L^{pl} = J L_{pl}^f F_c$$

Reemplazando la fórmula de Blasius (ver Ecuación 2.82) en la relación anterior se obtiene la siguiente fórmula:

$$h_L^{pl} = \frac{0.496 \dot{V}_{pl}^{1.75} F_c L_{pl}^f}{D^{4.75}} \quad [2.91]$$

Donde:  $h_L^{pl}$  es la pérdida de carga en el portalateral en mca,  $\dot{V}_{pl}$  es el caudal en el origen del portalateral en l/h,  $F_c$  es el factor de Christiansen,  $L_{pl}^f$  es la longitud ficticia del portalateral en m, y  $D$  el diámetro interno del portalateral en mm.

La diferencia de presión entre dos puntos cualquiera de un portalateral se puede determinar mediante un balance de energía. Considerando un tramo de portalateral con dirección de flujo desde el punto "i" hasta el punto "f" y despreciando las cargas de velocidad se tiene:

$$P_{pl}^i + Z_{pl}^i = P_{pl}^f + Z_{pl}^f + h_L^{i-f}$$

La diferencia de presión es:

$$P_{pl}^i - P_{pl}^f = h_L^{i-f} + (Z_{pl}^f - Z_{pl}^i) \quad [2.92]$$

Donde:

- $P_{pl}^i$ : Presión en el portalateral en el punto "i".
- $P_{pl}^f$ : Presión en el portalateral en el punto "f".
- $h_L^{i-f}$ : Pérdida de carga en el portalateral en el tramo i-f.
- $Z_{pl}^f$ : Cota del portalateral en el punto "f".
- $Z_{pl}^i$ : Cota del portalateral en el punto "i".

### 2.1.4.3.5. Cálculo de la tubería primaria

La tubería principal o primaria es aquella de la que derivan las secundarias. Según Monge (2018) la velocidad máxima en estas tuberías se establece en 2.5 m/s – 3.0 m/s y la velocidad mínima en 0.5 m/s para evitar sedimentaciones.

El caudal en la tubería primaria se determina mediante:

$$\dot{V}_{pri} = N_{sec} \times \dot{V}_{sec} \quad [2.93]$$

Donde:  $\dot{V}_{pri}$  es el caudal en la tubería primaria,  $N_{sec}$  es el número de tuberías secundarias que derivan de la primaria, y  $\dot{V}_{sec}$  es el caudal en el inicio de cada secundaria.

La longitud ficticia de la primaria es igual a la longitud real de la primaria más la longitud equivalente de todos los accesorios instalados en ella. De acuerdo con Monge (2018) para proyectos estándar de riego generalmente se toma:

$$L_{pri}^f = a L_{pri} \quad [2.94]$$

Donde:  $L_{pri}^f$  es la longitud ficticia de la primaria,  $a$  es un factor entre 1.10 y 1.15, y  $L_{pri}$  es la longitud real de la primaria.

El diseño del diámetro de la primaria se realiza de manera similar al del lateral y portalateral fijando la velocidad de flujo.

La pérdida de carga en la primaria  $h_L^{pri}$  se determina mediante la siguiente relación:

$$h_L^{pri} = J L_{pri}^f$$

Reemplazando la fórmula de Blasius (ver Ecuación 2.82) en la relación anterior resulta la siguiente fórmula:

$$h_L^{pri} = \frac{0.496 \dot{V}_{pri}^{1.75} L_{pri}^f}{D^{4.75}} \quad [2.95]$$

Donde:  $h_L^{pri}$  es la pérdida de carga en la primaria en mca,  $\dot{V}_{pri}$  es el caudal en la primaria en l/h,  $L_{pri}^f$  es la longitud ficticia de la primaria en m, y  $D$  es el diámetro interno de la primaria en mm.

La presión en el origen de la primaria se puede determinar mediante un balance de energía entre los extremos de la primaria:

$$P_{pri}^{ini} + Z_{pri}^{ini} = P_{pri}^{fin} + Z_{pri}^{fin} + h_L^{pri}$$

Entonces:

$$P_{pri}^{ini} = P_{pri}^{fin} + h_L^{pri} + (Z_{pri}^{fin} - Z_{pri}^{ini}) \quad [2.96]$$

Donde:

- $P_{pri}^{ini}$ : Presión en el inicio de la primaria.
- $P_{pri}^{fin}$ : Presión en el final de la primaria.
- $h_L^{pri}$ : Pérdida de carga en la primaria.
- $Z_{pri}^{fin}$ : Cota del extremo final de la primaria.
- $Z_{pri}^{ini}$ : Cota del extremo inicial de la primaria.

### 2.1.5. Python

Python es un lenguaje de programación orientado a objetos de alto nivel creado por Guido van Rossum en 1990. Este lenguaje de programación presenta una sintaxis simple y elegante y, sin embargo, es un lenguaje de programación poderoso y de propósito general (Sanner, 1999). El lenguaje Python se usa en una amplia gama de aplicaciones como desarrollo web, automatización de tareas mediante scripts, ciencia de datos, machine learning, aplicaciones de escritorio, etc.

De acuerdo con Amazon AWS (2023) las características representativas del lenguaje de programación Python son:

- Un lenguaje interpretado: significa que el código se ejecuta línea por línea y si ocurre un error, la ejecución se detiene.
- Un lenguaje con sintaxis simple: Python utiliza palabras similares a las del inglés. En su sintaxis, Python no utiliza llaves sino sangría lo que facilita la lectura del código.
- Un lenguaje tipeado dinámicamente: Los programadores no tienen que declarar el tipo de dato que almacena una variable porque Python lo determina en el tiempo de ejecución.
- Un lenguaje de alto nivel: Python es muy similar a los idiomas humanos.
- Un lenguaje orientado a objetos: Python considera toda entidad como un objeto.

A continuación, se listan algunas de las ventajas significativas de Python:

- Fácil de aprender.

- Códigos más cortos comparados a otros lenguajes de programación.
- Se puede usar en diferentes sistemas operativos: Windows, macOS, Linux y Unix.
- Capacidad para instalar una gran variedad de librerías externas.
- Presenta una gran comunidad online.
- Es gratuito (open-source).
- Ampliamente usado en el análisis de datos.
- Es el cuarto lenguaje de programación más popular según la encuesta a programadores de Stack Overflow 2022.

Debido a las diversas características, ventajas y popularidad del lenguaje de programación Python, en la presente investigación se usa este lenguaje para desarrollar un programa que determine el ángulo de inclinación óptimo de paneles solares mediante la obtención de valores de irradiación solar a diferentes ángulos de inclinación desde una base de datos en línea.

## **2.2. Marco conceptual**

A continuación, se describen los principales conceptos que se utilizan en la presente investigación:

- a) Energía solar fotovoltaica: Es la energía eléctrica que se obtiene por la conversión directa de la radiación solar mediante un dispositivo electrónico denominado panel solar. La conversión de energía solar en electricidad ocurre debido al efecto fotovoltaico. Este efecto ocurre en materiales conocidos como semiconductores entre los cuales el más usado es el silicio. La función de la radiación solar en el efecto

fotovoltaico es proporcionar energía a los electrones más externos para que puedan pasar a convertirse en electrones libres los cuales viajan por la red cristalina generando así electricidad.

- b) Sistema fotovoltaico: Un sistema fotovoltaico es un conjunto de componentes cuya operación sincrónica tiene la finalidad de generar electricidad para satisfacer la demanda de cargas de consumo. En forma general, pueden clasificarse como sistemas fotovoltaicos autónomos y sistemas fotovoltaicos conectados a la red. Entre los principales componentes están: los paneles solares y el inversor solar. También pueden incluir un subsistema de acumulación de energía conformado por un regulador de carga y baterías.
- c) Sistema de bombeo: Un sistema de bombeo es una integración de componentes cuya operación conjunta tiene la finalidad de transferir un líquido desde un lugar hacia otro. Entre los principales componentes están: la bomba hidráulica, un motor primario (motor eléctrico o motor de combustión), la tubería usada para transportar el fluido (tubería de succión y tubería de descarga), válvulas, y otros accesorios como codos, tes, expansiones, contracciones, y dispositivos de medición y control.
- d) Sistema de bombeo fotovoltaico autónomo directo: Es un sistema de bombeo en el cual el motor eléctrico de la bomba hidráulica es alimentado eléctricamente por un sistema fotovoltaico. Además, se dice que es autónomo porque estas instalaciones no están conectadas a la red eléctrica pública. Finalmente, se dice que es directo porque este

tipo de instalación consiste en conectar el motor eléctrico de la bomba al generador fotovoltaico mediante un convertidor de potencia sin usar baterías.

- e) Riego por goteo: Es un tipo de riego localizado que consiste en aplicar el agua a una zona delimitada del volumen del suelo que generalmente ocupan las raíces de la planta utilizando pequeños caudales a baja presión. El agua se aplica mediante unos dispositivos denominados emisores o goteros que la suministran gota a gota con un caudal inferior de 16 l/h por punto de emisión. Entre los componentes principales de un sistema de riego por goteo están: el cabezal de riego, la red de distribución, los emisores, y los dispositivos de control.

## **CAPITULO III HIPÓTESIS Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES**

### **3.1. Hipótesis**

#### **3.1.1. Hipótesis general**

El diseño de un sistema de bombeo fotovoltaico autónomo directo para impulsar agua desde un pozo hacia un embalse de almacenamiento es viable técnicamente lo cual permitirá satisfacer la demanda hídrica para el riego por goteo de 5 hectáreas de palta en el Fundo Delicia ubicado en el centro poblado La Viña, distrito de Nueva Arica, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque.

#### **3.1.2. Hipótesis específicas**

- La radiación solar en la zona del sembrío presenta un buen potencial lo cual permitirá el uso de paneles solares para la generación de energía eléctrica.
- La determinación de la demanda hídrica del cultivo permitirá establecer el volumen adecuado del embalse y el caudal de bombeo requerido.
- El establecimiento de las dimensiones adecuadas del embalse permitirá almacenar el volumen de agua necesario para un riego eficiente.

- El diseño del sistema de riego por goteo es factible lo cual permitirá irrigar las 5 hectáreas de cultivo de palta.
- El dimensionamiento del sistema de bombeo es factible lo cual permitirá trasladar el agua desde el pozo de agua subterránea hacia el embalse.
- La configuración del sistema fotovoltaico es factible lo cual permitirá alimentar eléctricamente al motor de la bomba sumergible.

### **3.2. Operacionalización de variables**

#### **3.2.1. Variables independientes**

- Parámetros solares ambientales en el área de sembrío.
- Gotero compensante.

#### **3.2.2. Variables dependientes**

- Demanda hídrica del sembrío de 5 hectáreas de palta.
- Embalse de almacenamiento.
- Sistema de bombeo de agua para impulsar agua desde el pozo hasta el embalse.
- Sistema de riego por goteo por gravedad para la irrigación del cultivo de palta.
- Sistema fotovoltaico para alimentar al motor eléctrico acoplado a la bomba sumergible.

#### **3.2.3. Operacionalización**

En la Tabla 3.1 se muestra la operacionalización de las variables de la presente investigación.

**Tabla 3.1: Operacionalización de variables.**

Variable	Indicador	Definición	Técnica e instrumentos de recolección de datos
<b>VARIABLES INDEPENDIENTES</b>			
Parámetros solares ambientales	Temperatura media diaria	Es la temperatura promedio de un día característico de un determinado mes	Plataforma web PVGIS
	Irradiación solar diaria en una superficie horizontal	Energía solar diaria que llega a una superficie horizontal por unidad de área de un día característico de un determinado mes	Plataforma web PVGIS
	Irradiación solar diaria en el ángulo de inclinación óptimo	Energía solar diaria que llega a una superficie con inclinación óptima por unidad de área de un día característico de un determinado mes	Plataforma web PVGIS
Gotero compensante	Caudal del gotero	Es el caudal proporcionado por el gotero bajo un determinado rango de presión	Ficha técnica del fabricante
	Presión del gotero	Es la presión de funcionamiento del gotero	Ficha técnica del fabricante
<b>VARIABLES DEPENDIENTES</b>			
Demanda hídrica del cultivo	Volumen total de agua para riego	Es el volumen de agua diario requerido para el riego por goteo del total de hectáreas del sembrío	Cálculos matemáticos
Embalse de almacenamiento	Capacidad del embalse	Es el volumen del embalse de almacenamiento que proporcionará el agua al sistema de riego por goteo	Cálculos matemáticos
	Nivel del embalse	Es la cota mínima en la cual debe construirse el embalse para que suministre la presión necesaria en los goteros	Cálculos matemáticos

Variable	Indicador	Definición	Técnica e instrumentos de recolección de datos
Sistema de bombeo de agua	Potencia de la electrobomba	Es la potencia del motor eléctrico acoplado a la bomba hidráulica para satisfacer el caudal de diseño y la carga dinámica total	Cálculos matemáticos y catálogo del fabricante
	Diámetro de la tubería de impulsión	Es el diámetro comercial de la tubería de impulsión	Cálculos matemáticos y catálogo de tuberías
Sistema de riego por goteo	Diámetro de las tuberías laterales	Es el diámetro comercial de las tuberías laterales	Cálculos matemáticos y catálogo de tuberías
	Diámetro de las tuberías portlaterales	Es el diámetro comercial de las tuberías portlaterales	Cálculos matemáticos y catálogo de tuberías
	Diámetro de la tubería primaria	Es el diámetro comercial de la tubería primaria	Cálculos matemáticos y catálogo de tuberías
Sistema fotovoltaico	Potencia del panel solar	Es la potencia pico del panel solar corregida por el efecto de la temperatura	Cálculos matemáticos y catálogo del fabricante
	Potencia del inversor de bombeo solar	Es la potencia máxima del motor que se puede conectar en la salida del inversor de bombeo solar	Cálculos matemáticos y catálogo del fabricante

**Fuente:** Elaboración del autor.

## **CAPITULO IV METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

### **4.1. Tipo y Diseño de la Investigación**

La presente tesis es una investigación tipo aplicada o tecnológica porque utiliza la base del conocimiento de ciencias fácticas o formales para resolver problemas que se presentan en el sector productivo (Nicomedes, 2018). En este caso se trata de un problema de índole energético relacionado a la falta de electricidad en la zona de cultivo lo que imposibilita poner en funcionamiento electrobombas para fines de riego. El diseño de la investigación es del tipo no experimental en virtud de que no existe manipulación deliberada de las variables, es decir, no se hace variar intencionalmente la variables independientes (Toro & Parra, 2006).

### **4.2. Unidad de Análisis**

En la presente investigación, la unidad de análisis es el área de cultivo formada por las 5 hectáreas de terrenos eriazos ubicado en el Fundo Delicia, centro poblado La Viña, distrito de Nueva Arica, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque.

### 4.3. Matriz de Consistencia

**Tabla 4.1: Matriz de consistencia.**

Formulación del problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Indicadores	Técnica e instrumentos de recolección de datos	
¿Es posible diseñar técnicamente un sistema de bombeo fotovoltaico autónomo directo que impulse agua desde un pozo hasta un embalse de almacenamiento para abastecer la necesidad de agua que requiere el riego por goteo de 5 hectáreas de palta en el Fundo Delicia ubicado en el centro poblado La Viña, distrito de Nueva Arica, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque?	<b>OG:</b> Diseñar un sistema de bombeo fotovoltaico autónomo directo para impulsar agua desde un pozo hasta un embalse para satisfacer la demanda hídrica de riego gota a gota requerido para el cultivo de 5 hectáreas de palta en el Fundo Delicia localizado en el centro poblado La Viña, distrito de Nueva Arica, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque.	<b>HG:</b> El diseño de un sistema de bombeo fotovoltaico autónomo directo para impulsar agua desde un pozo hacia un embalse de almacenamiento es viable técnicamente lo cual permitirá satisfacer la demanda hídrica para el riego por goteo de 5 hectáreas de palta en el Fundo Delicia ubicado en el centro poblado La Viña, distrito de Nueva Arica, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque.	<b>VI:</b> Parámetros solares ambientales	Temperatura media diaria	Plataforma web PVGIS	
				Irradiación solar diaria en una superficie horizontal	Plataforma web PVGIS	
				Irradiación solar diaria en el ángulo de inclinación óptimo	Plataforma web PVGIS	
		<b>OE:</b> Evaluar la radiación solar en la zona del sembrío.	<b>HE:</b> La radiación solar en la zona del sembrío presenta un buen potencial lo cual permitirá el uso de paneles solares para la generación de energía eléctrica.	<b>VI:</b> Gotero compensante	Caudal del gotero	Ficha técnica del fabricante
					Presión del gotero	Ficha técnica del fabricante
		<b>OE:</b> Determinar la demanda hídrica del cultivo.	<b>HE:</b> La determinación de la demanda hídrica del cultivo permitirá establecer el volumen adecuado del embalse y el caudal de bombeo requerido.	<b>VD:</b> Demanda hídrica del cultivo	Volumen total de agua para riego	Cálculos matemáticos
		<b>OE:</b> Establecer las dimensiones del embalse de almacenamiento.	<b>HE:</b> El establecimiento de las dimensiones adecuadas del embalse permitirá almacenar el volumen de agua necesario para un riego eficiente.	<b>VD:</b> Embalse de almacenamiento	Capacidad del embalse	Cálculos matemáticos
					Nivel del embalse	Cálculos matemáticos
		<b>OE:</b> Diseñar el sistema de riego por goteo.	<b>HE:</b> El diseño del sistema de riego por goteo es factible lo cual permitirá irrigar las 5 hectáreas de cultivo de palta.	<b>VD:</b> Sistema de bombeo de agua	Potencia de la electrobomba	Cálculos matemáticos y catálogo del fabricante
					Diámetro de la tubería de impulsión	Cálculos matemáticos y catálogo de tuberías
		<b>OE:</b> Dimensionar el sistema de bombeo.	<b>HE:</b> El dimensionamiento del sistema de bombeo es factible lo cual permitirá trasladar el agua desde el pozo de agua subterránea hacia el embalse.	<b>VD:</b> Sistema de riego por goteo	Diámetro de las tuberías laterales	Cálculos matemáticos y catálogo de tuberías
					Diámetro de las tuberías portalaterales	Cálculos matemáticos y catálogo de tuberías
			Diámetro de la tubería primaria		Cálculos matemáticos y catálogo de tuberías	
	<b>OE:</b> Configurar el sistema fotovoltaico.	<b>HE:</b> La configuración del sistema fotovoltaico es factible lo cual permitirá alimentar eléctricamente al motor de la bomba sumergible.	<b>VD:</b> Sistema fotovoltaico	Potencia del panel solar	Cálculos matemáticos y catálogo del fabricante	
				Potencia del inversor de bombeo solar	Cálculos matemáticos y catálogo del fabricante	

Nota: OG: Objetivo General, OE: Objetivo Específico, HG: Hipótesis General, HE: Hipótesis Específica, VI: Variable Independiente, VD: Variable Dependiente.

**Fuente:** Elaboración del autor.

## CAPITULO V DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

### 5.1. Volumen de agua de riego diario

La irradiación global diaria en una superficie horizontal y la temperatura media diaria en la zona de cultivo se obtienen de la plataforma web PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) para los años desde el 2005 hasta el 2020. En la Tabla 5.1 se muestran los valores promedio durante todos esos años para cada mes.

**Tabla 5.1: Irradiación global diaria en una superficie horizontal y temperatura media diaria.**

Mes	$H_d^{(0^\circ)}$ ( $kWh/m^2 \times día$ )	$H_d^{(0^\circ)}$ ( $mm/día$ )	$T_{med}$ ( $^\circ C$ )
Enero	5.812	8.526	23.550
Febrero	5.569	8.169	24.100
Marzo	5.290	7.761	24.012
Abril	5.568	8.168	23.106
Mayo	5.290	7.760	21.875
Junio	5.092	7.470	20.512
Julio	5.172	7.588	19.550
Agosto	5.634	8.265	19.119
Septiembre	6.037	8.856	19.362
Octubre	6.261	9.184	19.800
Noviembre	6.517	9.560	20.594
Diciembre	6.190	9.081	21.938

Nota: Los datos para los cálculos fueron extraídos del aplicativo web PVGIS. La irradiación global diaria en una superficie horizontal expresada en mm/día se obtiene al usar la equivalencia  $1 kWh/m^2 = 1.467 mm$ .

La evapotranspiración del cultivo de referencia se calcula aplicando la Ecuación 2.72 a los resultados de la Tabla 5.1. Gardiazabal et al. (2003) proponen un coeficiente de cultivo  $K_c$  de la palta para todos los meses del año de 0.72 lo cual permite determinar la evapotranspiración de la palta mediante la Ecuación 2.71. Los resultados se presentan en la Tabla 5.2.

**Tabla 5.2: Evapotranspiración de referencia y evapotranspiración de la palta.**

Mes	$ET_0$ (mm/día)	$ET_c$ (mm/día)
Enero	4.757	3.425
Febrero	4.619	3.325
Marzo	4.379	3.153
Abril	4.509	3.246
Mayo	4.154	2.991
Junio	3.861	2.780
Julio	3.824	2.753
Agosto	4.117	2.964
Septiembre	4.441	3.197
Octubre	4.660	3.355
Noviembre	4.953	3.566
Diciembre	4.869	3.506

El sistema de riego usado es el sistema de riego por goteo, por lo que se considera una eficiencia de riego del 90%. El requerimiento bruto de riego se calcula con la Ecuación 2.73. Al aplicar esta ecuación a los resultados de la Tabla 5.2 se obtienen los requerimientos brutos de riego indicados en la Tabla 5.3.

**Tabla 5.3: Requerimiento bruto de riego.**

Mes	$RR \text{ (mm/día)}$
Enero	3.806
Febrero	3.695
Marzo	3.503
Abril	3.607
Mayo	3.324
Junio	3.089
Julio	3.059
Agosto	3.293
Septiembre	3.553
Octubre	3.728
Noviembre	3.962
Diciembre	3.895

De acuerdo con Ronquillo (2022) un marco de plantación óptimo para la palta se obtiene al considerar una separación  $S_p = 4 \text{ m}$  entre paltos y  $S_s = 6 \text{ m}$  entre surcos con la finalidad de tener caminos amplios que permitan el trabajo de maquinaria para la fumigación y cosecha. El volumen diario de agua para cada planta se determina con la Ecuación 2.74. Al aplicar esta ecuación a los resultados de la Tabla 5.3 se obtienen los valores indicados en la Tabla 5.4.

**Tabla 5.4: Volumen diario de agua por planta.**

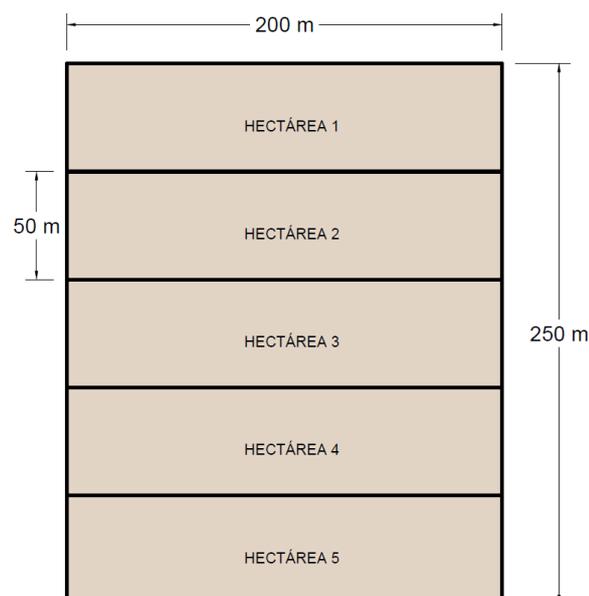
Mes	$V_p \text{ (l/planta} \times \text{ día)}$
Enero	91.332
Febrero	88.680
Marzo	84.070
Abril	86.565
Mayo	79.766
Junio	74.139
Julio	73.419
Agosto	79.043
Septiembre	85.260
Octubre	89.462
Noviembre	95.089
Diciembre	93.487

De la Tabla 5.4 se observa que el volumen de agua diario máximo por planta ocurre en el mes de noviembre con un requerimiento de 95.089 l. En este trabajo de investigación se plantea el uso de goteros compensantes debido a los descensos de nivel en el área de cultivo. Se consideran 2 goteros por palto con un caudal de 8 l/h cada uno con la finalidad de que el tiempo de riego no se extienda demasiado. El tiempo de riego se determina mediante la Ecuación 2.75. El tiempo de riego máximo ocurre en el mes de noviembre y es:

$$t_r = \frac{95.089}{2 \times 8} = 5.943 \rightarrow t_r \approx 6 \text{ h}$$

El área donde se planea realizar el sembrío piloto cuenta con 5 hectáreas, donde cada hectárea es de 50 m por 200 m como se representa en la Figura 5.1. El distanciamiento entre plantas será a lo largo de la dimensión  $L_p = 50 \text{ m}$ , mientras que los surcos se harán a través de la dimensión  $L_s = 200 \text{ m}$ .

**Figura 5.1: Esquema de las 5 hectáreas del sembrío.**



**Fuente:** Elaboración del autor.

El número de surcos en cada hectárea  $N_s$  y el número de plantas en cada surco por hectárea  $N_p$  se determinan usando la Ecuaciones 2.77:

$$N_s = \frac{L_s}{S_s} = \frac{200 \text{ m}}{6 \text{ m}} \approx 34$$

$$N_p = \frac{L_p}{S_p} = \frac{50 \text{ m}}{4 \text{ m}} \approx 13$$

El total de plantas por hectárea se determina con la Ecuación 2.76:

$$N_h^p = 34 \times 13 = 442 \text{ plantas/hectárea}$$

El volumen de agua necesario por hectárea se determina mediante la Ecuación 2.78. Usando los resultados de la Tabla 5.4 se obtienen los valores indicados en la Tabla 5.5.

**Tabla 5.5: Requerimiento hídrico por hectárea.**

Mes	$V_h$ ( $l/\text{hectárea} \times \text{día}$ )
Enero	40368.857
Febrero	39196.434
Marzo	37158.764
Abril	38261.667
Mayo	35256.647
Junio	32769.242
Julio	32451.317
Agosto	34937.009
Septiembre	37684.929
Octubre	39542.420
Noviembre	42029.217
Diciembre	41321.041

El volumen de agua diario requerido por el sembrío se determina al considerar el número de hectáreas del proyecto  $N_h = 5$ . Aplicando la Ecuación 2.79 a los

resultados de la Tabla 5.5 se obtienen los requerimientos hídricos indicados en la Tabla 5.6.

**Tabla 5.6: Volumen de agua para el sembrío de 5 hectáreas de palta.**

Mes	$V_t$ (l/día)	$V_t$ (m <sup>3</sup> /día)
Enero	201844.284	201.844
Febrero	195982.168	195.982
Marzo	185793.822	185.794
Abril	191308.335	191.308
Mayo	176283.235	176.283
Junio	163846.210	163.846
Julio	162256.585	162.257
Agosto	174685.047	174.685
Septiembre	188424.644	188.425
Octubre	197712.101	197.712
Noviembre	210146.083	210.146
Diciembre	206605.203	206.605

De la Tabla 5.6 se observa que el volumen total diario de agua para el cultivo de las 5 hectáreas de palta fluctúa durante el año con un requerimiento mínimo de 162.257 m<sup>3</sup> en el mes de julio y un requerimiento máximo de 210.146 m<sup>3</sup> en el mes de noviembre.

## 5.2. Volumen del embalse

El volumen del embalse se diseña en base a cubrir la demanda máxima diaria de agua durante el año durante cierta cantidad de días:

$$V_{emb} = V_{t_{max}} D_a f_s \quad [5.1]$$

Donde:  $V_{emb}$  es el volumen del embalse,  $V_{t_{max}}$  es el volumen total de agua diario máximo,  $D_a$  son los días de almacenamiento de agua de riego, y  $f_s$  es un factor de seguridad.

De acuerdo con el propietario, el plan de riego del cultivo consiste en bombear el agua de riego para un determinado día, el día inmediato anterior. Con la finalidad de poder almacenar el agua bombeada durante un día en que no sea necesario utilizar el agua de riego almacenada del día anterior, como por ejemplo en un día lluvioso, en esta investigación se propone 2 días de almacenamiento de agua. Además, se toma un factor de seguridad de 20% para que el agua no rebase el embalse. De la Tabla 5.6 se tiene que  $V_{t_{max}} = 210.146 \text{ m}^3$ . Al aplicar la Ecuación 5.1 se tiene:

$$V_{emb} = 210.146 \times 2 \times 1.2 = 504.351 \text{ m}^3 \rightarrow V_{emb} \approx 500 \text{ m}^3$$

Por simplicidad, el volumen del embalse se establece en  $500 \text{ m}^3$ .

El nivel en el cuál debe estar ubicado como mínimo la base del embalse para cumplir con el requerimiento de presión de los goteros compensantes se determina en la sección 5.4.4.

### 5.3. Caudal de bombeo

El sistema de bombeo de agua propuesto en esta investigación es un sistema fotovoltaico autónomo directo. Estos tipos de sistemas se utilizan en aplicaciones donde el uso de la bomba se limita solamente a los momentos en que hay radiación solar. Entonces, el tiempo de bombeo de un día va a depender directamente de la irradiación solar de ese día la cual puede ser expresada mediante las horas solares pico HSP. Para el cálculo del caudal de bombeo, se emplea la siguiente ecuación:

$$\dot{V}_{bomba} = \frac{V_t}{HSP} \quad [5.2]$$

Donde:  $\dot{V}_{bomba}$  es el caudal de bombeo,  $V_t$  es el volumen total de agua diario, y  $HSP$  son las horas solares pico en el ángulo de inclinación óptimo.

Para maximizar la captación de irradiación solar diaria se debe orientar los paneles solares hacia el norte (ya que la zona de cultivo está ubicada en el hemisferio sur) y determinar el ángulo de inclinación óptimo como se muestra en la siguiente sección.

### 5.3.1. Ángulo de inclinación óptimo

Para determinar el ángulo de inclinación óptimo  $\beta_{opt}$  de los paneles solares, se usa una aplicación desarrollada en el lenguaje Python (ver repositorio GitHub: [https://github.com/wJosielct/tesis\\_titulacion.git](https://github.com/wJosielct/tesis_titulacion.git)). Al usar las coordenadas geográficas del centroide del área de cultivo (latitud  $-6.9152^\circ$  y longitud  $-79.4508^\circ$ ) y buscando una máxima disponibilidad energética anual, el programa da como resultado un ángulo de inclinación óptimo de  $8^\circ$ .

En resumen, lo que hace el programa es primeramente extraer datos de irradiación de la base de datos web PVGIS, luego calcula la irradiación global anual promedio del periodo climatológico desde el 2005 hasta el 2020 para cada ángulo desde los  $0^\circ$  hasta los  $90^\circ$  con incrementos de  $1^\circ$ , y finalmente retorna el ángulo con máxima aportación de energía solar. En la Tabla 5.7 se muestran los resultados para algunos ángulos seleccionados.

**Tabla 5.7: Irradiación solar anual promedio a diferentes ángulos de inclinación.**

$\beta$	$H_a^{(\beta^\circ)} \left( kWh/m^2 \right)$
0°	2081.428
8°	2097.683
10°	2097.062
20°	2065.838
30°	1987.717
40°	1864.691
50°	1699.815
60°	1497.732
70°	1266.198
80°	1025.600
90°	808.339

Nota: Los datos para los cálculos fueron extraídos del aplicativo web PVGIS. Para la presente investigación, el ángulo de inclinación óptimo de los paneles solares para una máxima captación anual de energía solar es 8°. Sin embargo, Jacobson & Jadhav (2018) recomiendan un ángulo de inclinación mínimo de 10° para permitir que la lluvia lave naturalmente a los módulos solares. Por lo tanto, finalmente se elige  $\beta_{opt} = 10^\circ$  como ángulo inclinación óptimo.

### 5.3.2. Irradiación solar incidente a 10°

La irradiación solar diaria bajo un ángulo de inclinación de 10° se obtiene de la plataforma web PVGIS y las horas solares pico correspondientes se calculan mediante la Ecuación 2.3. En la Tabla 5.8 se muestran los valores promedio por mes para el periodo climatológico del 2005 al 2020.

**Tabla 5.8: Irradiación global diaria en una superficie inclinada 10° y sus respectivas horas solares pico.**

Mes	$H_d^{(10^\circ)}$ (kWh/m <sup>2</sup> )	HSP
Enero	5.451	5.451
Febrero	5.385	5.385
Marzo	5.291	5.291
Abril	5.800	5.800
Mayo	5.708	5.708
Junio	5.588	5.588
Julio	5.630	5.630
Agosto	5.953	5.953
Septiembre	6.137	6.137
Octubre	6.113	6.113
Noviembre	6.139	6.139
Diciembre	5.736	5.736

Nota: Los datos para los cálculos fueron extraídos del aplicativo web PVGIS.

### 5.3.3. Caudal de la bomba

Con los datos de la Tabla 5.6 y Tabla 5.8, y mediante la Ecuación 5.2 se obtienen los caudales de bombeo para cada mes indicados en la Tabla 5.9.

**Tabla 5.9: Caudal de bombeo requerido por mes.**

Mes	$\dot{V}_{bomba}$ (m <sup>3</sup> /h)
Enero	37.029
Febrero	36.395
Marzo	35.114
Abril	32.983
Mayo	30.882
Junio	29.319
Julio	28.822
Agosto	29.343
Septiembre	30.705
Octubre	32.342
Noviembre	34.231
Diciembre	36.018

Para las 5 hectáreas de palta, el caudal requerido durante el año varía desde un mínimo de 28.822 m<sup>3</sup>/h hasta un máximo de 37.029 m<sup>3</sup>/h. El diseño se

realiza para el mes con máximo caudal, el cual se da en el mes de enero. Sin embargo, se considera un factor de seguridad del 30% como respaldo ante los días nublados durante los cuales se dispone de menos horas solares para el bombeo del agua.

$$\dot{V}_{bomba} = 1.3 \times 37.029 \text{ m}^3/h = 48.138 \text{ m}^3/h \approx 48 \text{ m}^3/h$$

Para poder seleccionar la bomba, se necesita determinar la carga total de la bomba. Por lo tanto, se necesita saber el nivel del embalse hasta el cuál se debe impulsar el agua, lo cual requiere primero diseñar el sistema de riego por goteo.

#### **5.4. Diseño del sistema de riego por goteo**

El área de cultivo dónde se proyecta sembrar palta, presenta una pendiente aproximada de 2°. Para aprovechar esta pendiente, se pretende construir un embalse en un nivel superior con respecto al sembrío para de esta forma regar mediante goteo por gravedad. Sin embargo, el nivel en el cual debe construirse el embalse debe ser tal que suministre la presión necesaria en los goteros de riego. Lo anterior conlleva al diseño previo de las tuberías laterales, tuberías portalaterales y la tubería primaria del sistema de riego por goteo. En el Plano Nro. 1 del Anexo J se muestra el sistema de riego por goteo.

##### **5.4.1. Cálculo de las tuberías laterales**

En la presente investigación se plantea el uso de goteros compensantes debido a los descensos de nivel pronunciados a los que estarán sujetas las tuberías laterales. Además, se consideran dos goteros por planta con un

caudal de 8 l/h cada uno con la finalidad de que el tiempo de riego no se extienda demasiado. Las características técnicas del gotero seleccionado se muestran en el Anexo F en dónde puede apreciarse que el gotero proporciona un caudal de 8 l/h en el rango de presión de 5 mca hasta 40 mca.

Las tuberías laterales se han diseñado de tal forma que recorren los 250 m de longitud del terreno (ver Plano Nro. 1 del Anexo J). El número de plantas por tubería lateral es:

$$N_{lat}^p = \frac{L_{lat}}{S_p} \rightarrow N_{lat}^p = \frac{250 \text{ m}}{4 \text{ m}} \rightarrow N_{lat}^p = 62.5$$

Se ajusta un poco la separación entre plantas para tener 63 plantas en cada lateral  $N_{lat}^p = 63$ . El caudal en el origen del lateral se determina con la Ecuación 2.83:

$$\dot{V}_{lat} = 63 \times 2 \times 8 \rightarrow \dot{V}_{lat} = 1008 \text{ l/h}$$

La longitud ficticia del lateral se determina con la Ecuación 2.84:

$$L_{lat}^f = 1.2 \times 250 \rightarrow L_{lat}^f = 300 \text{ m}$$

Para el diseño del diámetro del lateral se fija una velocidad máxima de flujo de 1.5 m/s. Usando la Ecuación 2.86 se tiene:

$$D = 0.5947 \sqrt{1008/1.5} \rightarrow D = 15.416 \text{ mm}$$

Se elige una tubería comercial que presente un diámetro interior mayor. En este caso se selecciona una tubería de polietileno de 4 Bar con 32 mm de diámetro nominal, el cual presenta un diámetro interior de 28 mm (ver Anexo B).

El factor de Christiansen para  $N_{sal} = 63$ ,  $d_0 = d_{sal}$  y  $\omega = 1.75$  se determina mediante interpolación a partir de la Tabla 2.7 obteniendo un valor de  $F_c \approx 0.372$ . La pérdida de carga en el lateral se calcula mediante la Ecuación 2.87:

$$h_L^{lat} = \frac{0.496 \times 1008^{1.75} \times 0.372 \times 300}{28^{4.75}} \rightarrow h_L^{lat} = 1.334 \text{ mca}$$

#### 5.4.2. Cálculo de las tuberías portalaterales

Para la configuración del sistema de riego por goteo de esta investigación, las tuberías portalaterales vienen a ser también tuberías secundarias. En este caso, se tienen 2 tuberías portalaterales de tal forma que recorren cada una la mitad del ancho del terreno (ver Plano Nro. 1 del Anexo J). El número de laterales en cada portalateral es:

$$N_{pl}^{lat} = \frac{L_{pl}}{S_s} \rightarrow N_{pl}^{lat} = \frac{100 \text{ m}}{6 \text{ m}} \rightarrow N_{pl}^{lat} = 16.667$$

Se ajusta un poco la separación entre surcos para tener 17 laterales en cada portalateral  $N_{pl}^{lat} = 17$ . El caudal en el origen del portalateral se determina con la Ecuación 2.89:

$$\dot{V}_{pl} = 17 \times 1008 \rightarrow \dot{V}_{pl} = 17136 \text{ l/h}$$

La longitud ficticia del portalateral, se determina con la Ecuación 2.90:

$$L_{pl}^f = 1.2 \times 100 \rightarrow L_{pl}^f = 120 \text{ m}$$

Para el diseño del diámetro del portalateral se fija una velocidad máxima de flujo de 2.5 m/s. Usando una ecuación análoga a la Ecuación 2.86 se tiene:

$$D = 0.5947 \sqrt{17136/2.5} \rightarrow D = 49.236 \text{ mm}$$

Se elige una tubería comercial que presente un diámetro interior mayor. En este caso se selecciona una tubería comercial de PVC de 5 Bar con 2" de diámetro nominal, el cual presenta un diámetro interior de 56.4 mm (ver Anexo C).

El factor de Christiansen para  $N_{sal} = 17$ ,  $d_0 = d_{sal}$  y  $\omega = 1.75$  se obtiene de la Tabla 2.7 dando un valor de  $F_c = 0.393$ . La pérdida de carga en el portalateral se determina mediante la Ecuación 2.91:

$$h_L^{pl} = \frac{0.496 \times 17136^{1.75} \times 0.393 \times 120}{56.4^{4.75}} \rightarrow h_L^{pl} = 2.883 \text{ mca}$$

#### 5.4.3. Presiones en la subunidad de riego

La disposición de las tuberías portales laterales es horizontal y las pérdidas de carga hacen que la presión en estas tuberías disminuya en la dirección del flujo. Por otra parte, en las tuberías laterales se da un aumento de presión en la dirección de flujo debido a que la ganancia de presión por descenso de cota es mayor que las pérdidas de carga. Por lo tanto, en cada subunidad de riego

la presión mínima  $P_{su}^{min}$  se da en el extremo final de cada portalateral y la presión máxima  $P_{su}^{max}$  ocurre en el extremo final del primer lateral de cada subunidad de riego. Aplicando un balance de energía entre los extremos de una tubería portalateral se tiene:

$$P_{pl}^{ini} = P_{pl}^{fin} + h_L^{pl}$$

Pero  $P_{pl}^{fin} = P_{su}^{min}$ , entonces la relación anterior queda como:

$$P_{pl}^{ini} = P_{su}^{min} + 2.883 \text{ mca} \quad [5.3]$$

Donde:  $P_{pl}^{ini}$  es la presión en el inicio del portalateral y  $P_{su}^{min}$  es la presión mínima en la subunidad de riego.

En el Anexo F puede observarse que el rango de presión del gotero compensante seleccionado para un adecuado funcionamiento está entre 5 mca y 40 mca. Entonces, podemos establecer la siguiente presión mínima en las subunidades de riego:

$$P_{su}^{min} = 9 \text{ mca}$$

La presión necesaria en el inicio de cada tubería portalateral se puede determinar reemplazando el valor anterior en la Ecuación 5.3:

$$P_{pl}^{ini} = 9 + 2.883 \rightarrow P_{pl}^{ini} = 11.883 \text{ mca}$$

Aplicando un balance de energía entre los extremos del primer lateral de cada subunidad se tiene:

$$P_{lat,1^\circ}^{ini} + Z_{lat}^{ini} = P_{lat,1^\circ}^{fin} + Z_{lat}^{fin} + h_L^{lat}$$

Pero  $P_{lat,1^\circ}^{ini} \approx P_{pl}^{ini}$  y  $P_{lat,1^\circ}^{fin} = P_{su}^{max}$ , entonces la relación anterior queda como:

$$P_{pl}^{ini} + Z_{lat}^{ini} = P_{su}^{max} + Z_{lat}^{fin} + h_L^{lat}$$

Entonces, se tiene la siguiente expresión para la presión máxima en la subunidad:

$$P_{su}^{max} = P_{pl}^{ini} + (Z_{lat}^{ini} - Z_{lat}^{fin}) - h_L^{lat} \quad [5.4]$$

Donde:  $P_{su}^{max}$  es la presión máxima en la subunidad de riego,  $P_{pl}^{ini}$  es la presión en el inicio del portalateral,  $Z_{lat}^{ini}$  es la cota del inicio del lateral,  $Z_{lat}^{fin}$  es la cota del final del lateral, y  $h_L^{lat}$  es la pérdida de carga en el lateral.

Reemplazando datos en la Ecuación 5.4 se tiene:

$$P_{su}^{max} = 11.883 + (144 - 138) - 1.334 \rightarrow P_{su}^{max} = 16.549 \text{ mca}$$

Por lo tanto, se tiene un rango de presión entre 9 mca y 16.549 mca en cada subunidad de riego lo cual está acorde con el rango de presión del gotero compensante seleccionado que se encuentra entre 5 mca y 40 mca.

#### 5.4.4. Cálculo de la tubería primaria

El caudal en la tubería primaria se determina mediante la Ecuación 2.93. En este caso, se tienen 2 tuberías secundarias, ver Plano Nro. 1 del Anexo J. Entonces se tiene:

$$\dot{V}_{pri} = 2 \times 17136 \rightarrow \dot{V}_{pri} = 34272 \text{ l/h}$$

Para el diseño del diámetro de la primaria se fija una velocidad máxima de flujo de 2.5 m/s. Usando una ecuación análoga a la Ecuación 2.86 se tiene:

$$D = 0.5947 \sqrt{34272/2.5} \rightarrow D = 69.630 \text{ mm}$$

Se elige una tubería comercial que presente un diámetro interior mayor. En este caso se selecciona una tubería comercial de PVC de 5 Bar con 4" de diámetro nominal, el cual presenta un diámetro interior de 108.4 mm (ver Anexo C).

En este punto del trabajo de investigación, se debe establecer el extremo superior de la tubería primaria el cual está conectado a la base del embalse de almacenamiento. Se puede establecer el extremo superior de la tubería primaria como el punto ubicado a una distancia de 380 m del extremo inferior y con una cota de 160 msnm (ver Plano Nro. 1 del Anexo J).

La longitud ficticia de la primaria se determina mediante la Ecuación 2.94:

$$L_{pri}^f = 1.15 \times 380 \rightarrow L_{pri}^f = 437 \text{ m}$$

La pérdida de carga en la primaria se determina con la Ecuación 2.95:

$$h_L^{pri} = \frac{0.496 \times 34272^{1.75} \times 437}{108.4^{4.75}} \rightarrow h_L^{pri} = 4.034 \text{ mca}$$

La presión en el final de la tubería primaria puede determinarse mediante la Ecuación 2.96:

$$P_{pri}^{ini} = P_{pri}^{fin} + h_L^{pri} + (Z_{pri}^{fin} - Z_{pri}^{ini})$$

Considerando el caso extremo en el que el embalse se está vaciando ( $P_{pri}^{ini} = 0$ ), se tiene:

$$0 = P_{pri}^{fin} + 4.034 + (144 - 160) \rightarrow P_{pri}^{fin} = 11.966 \text{ mca} \approx 12 \text{ mca}$$

Pero  $P_{pl}^{ini} = P_{pri}^{fin}$ , entonces:

$$P_{pl}^{ini} \approx 12 \text{ mca}$$

El resultado anterior indica que aún en la condición extrema en la cual el embalse se está vaciando, se tiene una presión garantizada en el inicio de la tubería portalateral de 12 mca. Este resultado está acorde con los 11.883 mca de presión necesaria al inicio de la tubería portalateral calculada en la sección anterior. Por lo tanto, el punto seleccionado como extremo superior de la tubería primaria es adecuado.

## 5.5. Carga total de la bomba

Para determinar la carga total de la bomba, primero es necesario dimensionar la tubería de impulsión del sistema de bombeo.

### 5.5.1. Cálculo de la tubería de impulsión

El caudal en la tubería de impulsión es el caudal de bombeo el cual fue determinado en la Sección 5.3.3. Por lo tanto:

$$\dot{V}_{imp} = 48 \text{ m}^3/\text{h} = 48000 \text{ l/h} = 0.0133 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para el diseño del diámetro de la tubería de impulsión se fija una velocidad máxima de flujo de 2.5 m/s. Usando una ecuación análoga a la Ecuación 2.86 se tiene:

$$D = 0.5947 \sqrt{48000/2.5} \rightarrow D = 82.404 \text{ mm}$$

Se elige una tubería comercial que presente un diámetro interior mayor. En este caso, se debe elegir una tubería con una presión nominal adecuada que soporte la presión a la salida de la bomba. El cálculo de la presión a la salida de la bomba se determina en la Sección 5.5.4. Se opta por seleccionar una tubería comercial de PVC de 10 Bar con 4" de diámetro nominal, el cual presenta un diámetro interior de 103.2 mm (ver Anexo C).

En el Plano Nro. 2 del Anexo J se muestra la configuración del sistema de bombeo.

## 5.5.2. Pérdida de carga total

### 5.5.2.1. Pérdida de carga por fricción

La velocidad real en la tubería de impulsión es:

$$v_{imp} = \frac{\dot{V}_{bomba}}{\pi/4 D^2} \rightarrow v_{imp} = \frac{0.0133}{\pi/4 \times 0.1032^2} \rightarrow v_{imp} = 1.594 \text{ m/s}$$

Considerando el bombeo de agua a 20 °C se tienen las siguientes propiedades del agua (ver Tabla 2.3 y Tabla 2.4):

$$\rho = 998 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 1.002 \times 10^{-3} \text{ kg/m s}$$

Para determinar el factor de fricción, se necesita conocer el tipo de flujo el cual se determina con el número de Reynolds (ver Ecuación 2.58):

$$Re = \frac{998 \times 1.594 \times 0.1032}{1.002 \times 10^{-3}} \rightarrow Re \approx 163844.542$$

Como  $Re > 4000$  se tiene un flujo turbulento. La rugosidad absoluta del PVC se obtiene de la Tabla 2.5 siendo  $\varepsilon = 3 \times 10^{-7} m$  para plástico. El factor de fricción para flujo turbulento se determina con la ecuación de Colebrook (ver Ecuación 2.62):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{3 \times 10^{-7} / 0.1032}{3.7} + \frac{2.51}{163844.542 \sqrt{f}} \right) \rightarrow f = 0.0162$$

Del Plano Nro. 2 del Anexo J, se observa que la longitud total de la tubería de impulsión es  $L_{imp} = 800 m$ .

La pérdida de carga por fricción se determina con la Ecuación 2.60:

$$h_L^{fricción} = 0.0162 \times \frac{800}{0.1032} \times \frac{1.594^2}{2 \times 9.81} \rightarrow h_L^{fricción} = 16.263 m$$

### 5.5.2.2. Pérdidas de carga menores

En un sistema típico con tuberías largas, como en la presente investigación, las pérdidas menores causadas por la instalación de accesorios y componentes en el sistema de bombeo son mucho menores que la pérdida de carga originada por la fricción en la tubería. Se puede asumir que las pérdidas menores son alrededor del 10% de la pérdida mayor, sin embargo, se calculará la pérdida menor para cada componente en el sistema de bombeo

teniendo en cuenta los elementos indicados en la Tabla 5.10 (ver Plano Nro. 2 del Anexo J).

**Tabla 5.10: Accesorios instalados en el sistema de bombeo.**

Elemento	Cantidad	$L_e/D$
Codo estándar de 90°	4	30
Válvula de compuerta totalmente abierta	1	8
Válvula de retención tipo bola	1	150

Nota: Los valores de relación de longitud equivalente fueron tomados de Mott & Untener, Mecánica de Fluidos, 2015.

Las pérdidas menores en el sistema de bombeo  $h_L^{menores}$  son:

$$h_L^{menores} = h_L^{cod} + h_L^{com} + h_L^{ret} \quad [5.5]$$

Donde:  $h_L^{cod}$  es la pérdida menor en los 4 codos,  $h_L^{com}$  es la pérdida menor en la válvula de compuerta totalmente abierta, y  $h_L^{ret}$  es la pérdida menor en la válvula de retención tipo bola.

La pérdida de carga en cada accesorio se determina con la Ecuación 2.64 dando los siguientes resultados:

#### Pérdidas en los codos

$$h_L^{cod} = 4 f \frac{L_e}{D} \frac{v_{imp}^2}{2g} \rightarrow h_L^{cod} = 4 \times 0.0162 \times 30 \times \frac{1.594^2}{2 \times 9.81} \rightarrow h_L^{cod} = 0.252 \text{ m}$$

#### Pérdidas en la válvula de compuerta

$$h_L^{com} = f \frac{L_e}{D} \frac{v_{imp}^2}{2g} \rightarrow h_L^{com} = 0.0162 \times 8 \times \frac{1.594^2}{2 \times 9.81} \rightarrow h_L^{com} = 0.017 \text{ m}$$

#### Pérdidas en la válvula de retención

$$h_L^{ret} = f \frac{L_e}{D} \frac{v_{imp}^2}{2g} \rightarrow h_L^{ret} = 0.0162 \times 150 \times \frac{1.594^2}{2 \times 9.81} \rightarrow h_L^{ret} = 0.315 \text{ m}$$

Al reemplazar los resultados anteriores en la Ecuación 5.5, se tiene:

$$h_L^{menores} = 0.252 + 0.017 + 0.315 \rightarrow h_L^{menores} = 0.583 \text{ m}$$

En este caso, las pérdidas menores representan alrededor del 3.6% de las pérdidas por fricción por lo que suponer que las pérdidas menores son alrededor del 10% de las pérdidas por fricción en sistemas de tuberías largas es una suposición adecuada para cálculos más rápidos.

La pérdida de carga total se determina con la Ecuación 2.59:

$$h_L = 16.263 + 0.583 \rightarrow h_L = 16.846 \text{ m}$$

### 5.5.3. Carga de la bomba

El agua para riego del cultivo de palta será bombeada desde un pozo de agua subterránea existente (ver Anexo H) hacia un embalse de almacenamiento para el posterior riego por goteo. Este pozo de tajo abierto presenta un diámetro de 1.5 m y una profundidad de 40 m. Según el propietario, este pozo fue detectado usando la técnica de radiestesia y construido durante el primer trimestre del 2022. Para determinar la profundidad del nivel estático del pozo, se hicieron mediciones durante el mes de julio del 2022 dando una profundidad máxima de 27 m de la napa freática.

Según el Instituto Nacional de Recursos Naturales (2006) el flujo subterráneo del valle Zaña en el sector La Viña se orienta de noreste a suroeste. Además, en el margen izquierdo del río Zaña en el distrito de Nueva Arica, la

profundidad del nivel estático en pozos se ubica entre 1.84 m y 17.60 m de profundidad (ver Anexo I).

La profundidad del nivel del agua en el pozo del Fundo Delicia resulta ser mayor que los datos proporcionados en el Anexo I debido principalmente a que el fundo se ubica en una zona empinada en la base de una cadena montañosa (ver Anexo H). Además, las mediciones fueron tomadas durante el mes de julio el cual pertenece a la época de estiaje donde el acuífero subterráneo presenta niveles de agua menores.

Una vez medido el nivel estático del pozo, se procede a estimar el nivel dinámico del pozo lo cual se consigue al considerar el abatimiento del pozo. El abatimiento viene a ser la distancia que desciende el nivel del agua subterránea cuando se encuentra en funcionamiento el equipo de bombeo. En la presente investigación, el abatimiento del pozo se estima en 3 m usando el procedimiento mostrado en Vargas (2018) y los parámetros hidráulicos de pozos del Anexo I.

El balance de energía para un proceso de flujo estacionario con flujo incompresible se realiza con la Ecuación 2.56. Se aplica esta ecuación entre los puntos 'a' y 'b' del sistema de bombeo (ver Plano Nro. 2 del Anexo J). El punto 'a' se encuentra en el nivel dinámico del pozo y el punto 'b' es el punto de descarga en el embalse. Finalmente, considerando que no hay turbina se tiene lo siguiente:

$$h_{bomba} + \frac{P_a}{\rho g} + \frac{v_a^2}{2g} + Z_a = \frac{P_b}{\rho g} + \frac{v_b^2}{2g} + Z_b + h_L$$

Se tienen las siguientes particularidades del sistema de bombeo:  $P_a = P_b = 0$  y  $v_a \approx 0$ . Por lo tanto, la carga total de la bomba  $h_{bomba}$  es:

$$h_{bomba} = (Z_b - Z_a) + \frac{v_b^2}{2g} + h_L \quad [5.6]$$

Donde:  $Z_b$  es la cota del punto "b",  $Z_a$  es la cota del punto "a",  $v_b$  es la velocidad promedio del flujo en el punto "b",  $g$  es la aceleración de la gravedad, y  $h_L$  es la pérdida de carga total en la instalación de bombeo.

Al reemplazar datos, se tiene:

$$h_{bomba} = (162.5 - 108) + \frac{1.594^2}{2 \times 9.81} + 16.846 \rightarrow h_{bomba} = 71.476 \text{ m}$$

#### 5.5.4. Presión a la salida de la bomba

Ahora, se aplica el balance de energía entre los puntos 'a' y 's' del sistema de bombeo (ver Plano Nro. 2 del Anexo J). El punto 's' es el punto de salida de la bomba (el inicio de la tubería de impulsión). Considerando que no hay turbina se tiene lo siguiente:

$$h_{bomba} + \frac{P_a}{\rho g} + \frac{v_a^2}{2g} + Z_a = \frac{P_s}{\rho g} + \frac{v_s^2}{2g} + Z_s + h_L$$

Se tienen las siguientes particularidades del sistema de bombeo:  $P_a = 0$ ,  $v_a \approx 0$ ,  $Z_a = 108 \text{ msnm}$  y  $Z_s = 106.5 \text{ msnm}$ . Las pérdidas de carga entre los puntos 'a' y 's' se pueden considerar despreciables debido a que no existe tubería de

succión ni otros dispositivos de flujo, por lo tanto  $h_L \approx 0$ . Entonces se tiene lo siguiente:

$$h_{bomba} + Z_a = \frac{P_s}{\rho g} + \frac{v_s^2}{2g} + Z_s$$

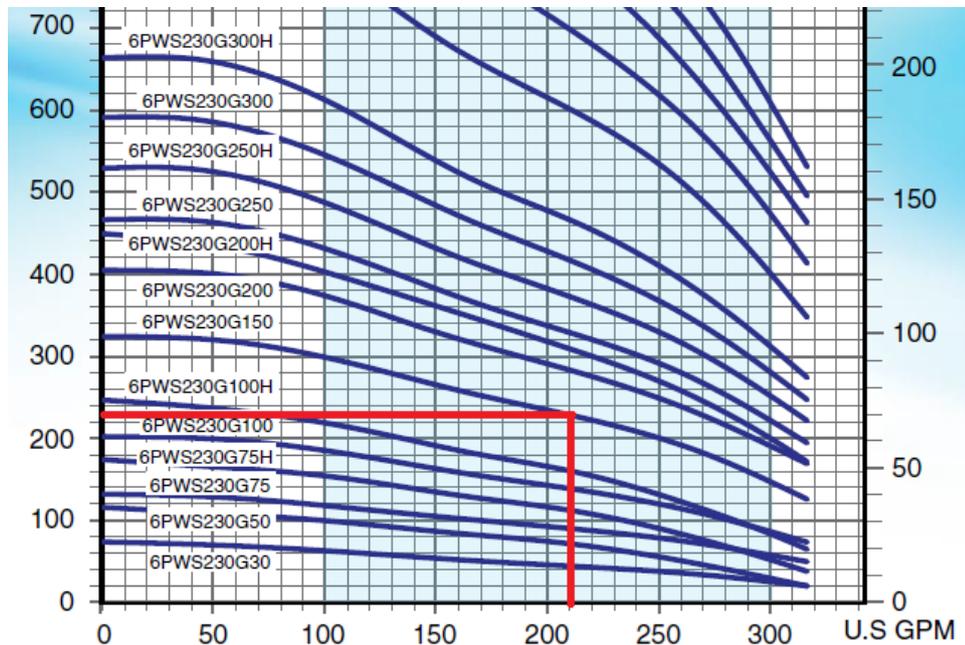
$$P_s = 998 \times 9.81 \times \left( 71.476 + 108 - 106.5 - \frac{1.594^2}{2 \times 9.81} \right) \rightarrow P_s = 713193.944 \text{ Pa}$$

$$P_s = 713.194 \text{ kPa} = 7.132 \text{ Bar}$$

Así, la presión manométrica a la salida de la bomba es de 7.132 Bar.

## 5.6. Selección de la bomba

Los parámetros básicos para seleccionar una bomba son el caudal de diseño y la carga total requerida (Mott & Untener, 2015). De la Sección 5.3.3 se tiene que  $\dot{V}_{bomba} = 48 \text{ m}^3/\text{h} = 211.337 \text{ GPM}$  y de la Sección 5.5.3 se tiene que  $h_{bomba} = 71.476 \text{ m} = 234.501'$ . Al ubicar el punto anterior en las curvas de rendimiento de las bombas sumergibles marca Pearl serie 6PWS230G (ver Anexo D) se obtiene la Figura 5.2.

**Figura 5.2: Selección de la bomba.**

**Fuente:** Adaptada de Pearl Water Systems, Pearl 6PWS230G, 2018.

En la Figura 5.2, se observa que el punto de diseño de la bomba parece caer sobre la curva de la bomba modelo 6PWS230G150. Por lo tanto, se selecciona la bomba sumergible modelo 6PWS230G150 cuyas características técnicas se muestran en el Anexo D. En este anexo, puede observarse que la bomba seleccionada requiere de un motor eléctrico con potencia nominal de 11 kW/15 hp. Entre los motores que ofrece el mismo fabricante de la bomba sumergible se elige un motor sumergible trifásico modelo 6MWCP150D363V cuyas características técnicas se muestran en el Anexo E.

### 5.7. Punto de operación de la bomba

Para determinar el punto de operación de la bomba primero se debe hallar la curva de resistencia del sistema la cual es una relación entre el caudal de bombeo y la carga de la bomba.

De la Ecuación 5.6 se tiene:

$$h_{bomba} = (Z_b - Z_a) + \frac{v_b^2}{2g} + h_L$$

Además, se tiene la siguiente recopilación de fórmulas:

$$v_b = v_{imp} = \frac{\dot{V}_{bomba}}{\pi/4 \times D^2}$$

$$h_L = h_L^{fricción} + h_L^{menores}$$

$$h_L^{fricción} = f \frac{L_{imp}}{D} \frac{v_{imp}^2}{2g}$$

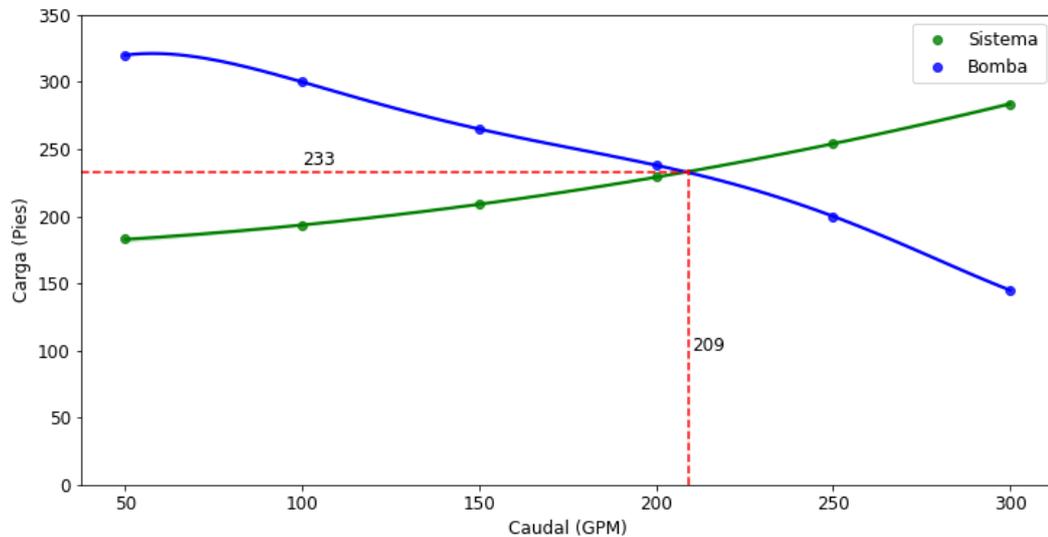
$$h_L^{menores} = 4 f \left(\frac{L_e}{D}\right)_{cod} \frac{v_{imp}^2}{2g} + f \left(\frac{L_e}{D}\right)_{com} \frac{v_{imp}^2}{2g} + f \left(\frac{L_e}{D}\right)_{ret} \frac{v_{imp}^2}{2g}$$

Al reemplazar las ecuaciones anteriores en la Ecuación 5.6, se obtiene una relación entre  $h_{bomba}$  y  $\dot{V}_{bomba}$  que viene a ser la curva de resistencia del sistema:

$$h_{bomba} = (Z_b - Z_a) + \left(1 + f \frac{L_{imp}}{D} + 4 f \left(\frac{L_e}{D}\right)_{cod} + f \left(\frac{L_e}{D}\right)_{com} + f \left(\frac{L_e}{D}\right)_{ret}\right) \frac{\dot{V}_{bomba}^2}{\pi^2 g / 8 \times D^4}$$

De la relación anterior puede observarse una relación cuadrática entre la carga de la bomba y el caudal de bombeo. Ahora, se procede a graficar esta relación juntamente con la curva característica de la bomba proporcionada por el fabricante (ver Anexo D) para determinar el punto de operación como se muestra en la Figura 5.3.

**Figura 5.3: Punto de operación de la bomba.**



Nota: Los datos para graficar la curva de la bomba fueron tomados de Pearl Water Systems, Pearl 6PWS230G, 2018.

**Fuente:** Elaboración del autor.

El punto de operación ocurre en la intersección de las curvas del sistema y de la bomba. En este caso, la bomba sumergible instalada en el sistema proporcionará alrededor de unos  $209 \text{ GPM} = 47.469 \text{ m}^3/\text{h} = 0.013 \text{ m}^3/\text{s}$  lo cual está muy cerca de los  $48 \text{ m}^3/\text{h}$  que se estableció en la sección 5.3.3. Adicionalmente, la carga que suministrará la bomba en el punto de operación es alrededor de  $233' = 71.018 \text{ m}$ .

## 5.8. Potencia de la bomba

En el punto de operación, la potencia que la bomba seleccionada le suministra al fluido se calcula con la Ecuación 2.65:

$$\dot{W}_{bomba} = 998 \times 9.81 \times 71.018 \times 0.013 \rightarrow \dot{W}_{bomba} = 9.168 \text{ kW}$$

De acuerdo con la ficha técnica de la bomba sumergible (ver Anexo D) un valor adecuado para la eficiencia bajo el caudal de operación es 72%. La potencia eléctrica consumida por el motor se determina con la Ecuación 2.68.

$$\eta_{mb} = \frac{\dot{W}_{bomba}}{\dot{W}_{motor}} \rightarrow \dot{W}_{motor} = \frac{9.168 \text{ kW}}{0.72} \rightarrow \dot{W}_{motor} = 12.733 \text{ kW}$$

### 5.9. Cavitación en la bomba y el NPSH

Con la finalidad de evitar la cavitación, es necesario saber que la presión en cualquier punto dentro de la bomba se debe mantener por encima de la presión de vapor del agua bombeada.

Al aplicar la ecuación general de la energía, ver Ecuación 2.56, para una corriente de fluido entre los puntos 'a' y 'e' (ver Plano Nro. 2 del Anexo J) se tiene lo siguiente:

$$\frac{P_a}{\rho g} + \frac{v_a^2}{2g} + Z_a = \frac{P_e}{\rho g} + \frac{v_e^2}{2g} + Z_e + h_L$$

Para la configuración característica de la presente investigación se tiene que  $P_a = P_{atm} = 101.325 \text{ kPa}$ ,  $v_a \approx 0$  y  $Z_a - Z_e = 2.335 \text{ m}$ . Además, las pérdidas de carga entre los puntos 'a' y 'e' se pueden considerar despreciables debido a que no existe tubería de succión ni otros dispositivos de flujo, por lo tanto  $h_L \approx 0$ . Al reemplazar estos datos resulta lo siguiente:

$$\frac{P_e}{\rho g} + \frac{v_e^2}{2g} = \frac{101.325 \times 10^3}{998 \times 9.81} + 2.335 \rightarrow \frac{P_e}{\rho g} + \frac{v_e^2}{2g} = 12.684 \text{ m}$$

La presión de vapor del agua a 20 °C según la Tabla 2.2 es  $P_{vap} = 2.34 \text{ kPa}$ .

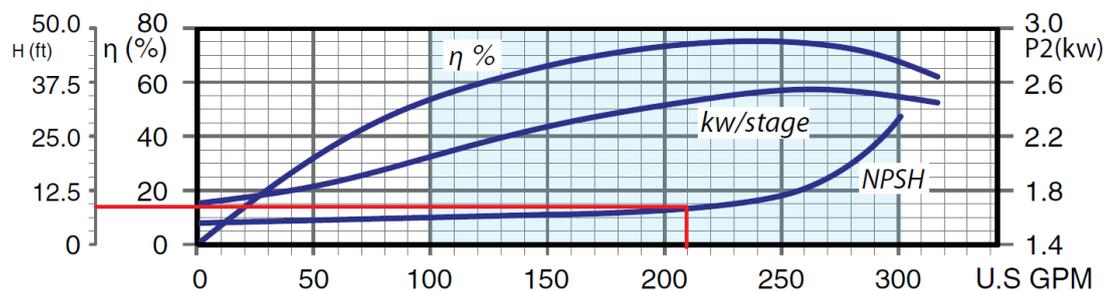
La carga de aspiración neta positiva disponible se calcula con la Ecuación 2.70:

$$NPSH_{dis} = \frac{P_e}{\rho g} + \frac{v_e^2}{2g} - \frac{P_{vap}}{\rho g}$$

$$NPSH_{dis} = 12.684 - \frac{2.34 \times 10^3}{998 \times 9.81} \rightarrow NPSH_{dis} = 12.445 \text{ m} \approx 40.831'$$

El NPSH requerido por la bomba se obtiene a partir de la curva característica proporcionada por el fabricante como se muestra en la Figura 5.4.

**Figura 5.4: NPSH requerido.**



**Fuente:** Adaptada de Pearl Water Systems, Pearl 6PWS230G, 2018.

Bajo el caudal de operación de 209 GPM se tiene que  $NPSH_{req} \approx 9.375'$ . Al

verificar la Ecuación 2.69, se tiene lo siguiente:

$$NPSH_{dis} > 1.1 NPSH_{req} \rightarrow 40.831' > 1.1 \times 9.375'$$

$$40.831' > 10.312' \rightarrow \text{verdad}$$

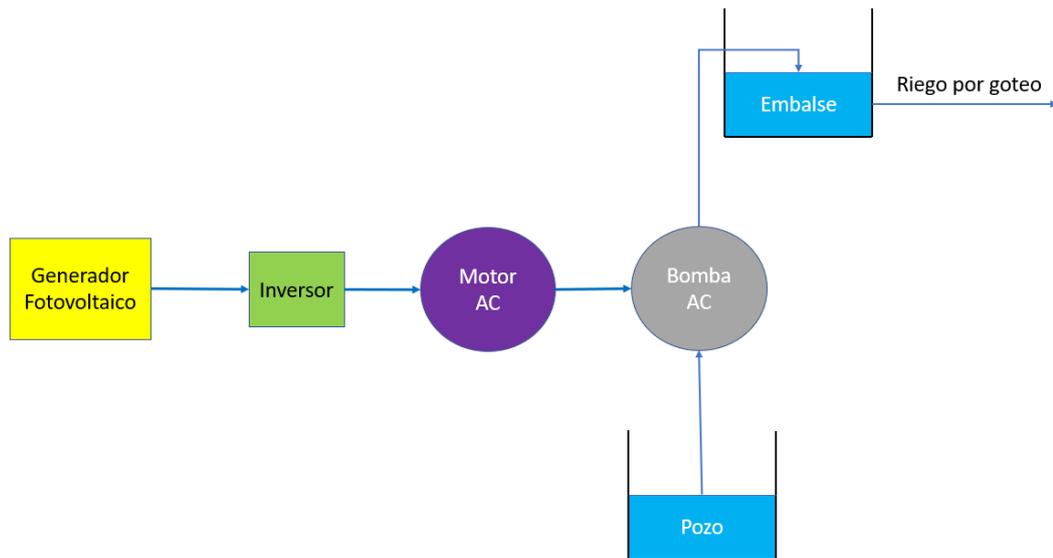
La Ecuación 2.69 resulta ser verdad, lo que verifica que no habrá problemas de cavitación bajo el caudal de operación.

## 5.10. Diseño del sistema fotovoltaico

### 5.10.1. Potencia del generador fotovoltaico

En la Figura 5.5 se muestra el esquema del sistema de bombeo fotovoltaico autónomo directo a diseñar.

**Figura 5.5: Esquema del sistema fotovoltaico autónomo directo.**



**Fuente:** Elaboración del autor.

La energía que entrega el generador fotovoltaico se calcula con la Ecuación 2.12. En este caso, la demanda energética en AC está formada por el consumo eléctrico del motor de la bomba sumergible. El tiempo de operación de la bomba es igual a las horas solares pico debido a que el funcionamiento de la electrobomba depende directamente de la radiación solar diaria.

Entonces:

$$E_{gen} = \frac{E_{AC}}{R} = \frac{\dot{W}_{motor} \times HSP}{R}$$

La potencia que entrega el generador fotovoltaico se calcula con la Ecuación 2.11. Por lo tanto, se tiene la siguiente expresión para determinar la potencia del generador fotovoltaico:

$$\dot{W}_{gen} = \frac{E_{gen}}{HSP} \rightarrow \dot{W}_{gen} = \frac{\dot{W}_{motor}}{R}$$

En conformidad con Castejón & Santamaría (2010) un rendimiento energético típico para una instalación fotovoltaica con solamente inversor es  $R = 0.7$ .

Entonces:

$$\dot{W}_{gen} = \frac{12.733 \text{ kW}}{0.7} \rightarrow \dot{W}_{gen} = 18.191 \text{ kW}$$

### 5.10.2. Paneles solares

Una vez calculada la potencia del generador fotovoltaico se procede a seleccionar los paneles solares que lo conforman y establecer cómo tienen que ir conectados para satisfacer las necesidades eléctricas de la instalación fotovoltaica. (Castejón & Santamaría, 2010) especifican que la selección de un panel solar adecuado implica elegir paneles con un voltaje adecuado y una potencia que conectando un número adecuado de paneles proporcione como mínimo la potencia calculada del generador fotovoltaico.

En el sistema de bombeo fotovoltaico autónomo directo a diseñar, el generador fotovoltaico tiene que producir el voltaje adecuado para el funcionamiento del inversor de bombeo solar. Además, la conexión de paneles solares debe ser adecuada con la finalidad de no sobrepasar los parámetros eléctricos permisibles en la entrada del inversor de bombeo solar.

En el mercado fotovoltaico podemos encontrar una diversidad de marcas y potencias de paneles solares. En la Tabla 5.11 se muestra un cuadro comparativo de algunos paneles seleccionados.

**Tabla 5.11: Comparación de paneles solares.**

$\dot{W}_{mpp}$	Eficiencia	$I_{sc}$	$V_{oc}$	$I_{mpp}$	$V_{mpp}$	$N_{par}^{cad}$	$N_{ser}^{pan}$	Observación
200 W	13.5%	6.00 A	44.53 V	5.55 A	36.1 V	5	22	Supera la corriente admisible del inversor
370 W	19.0%	9.95 A	48.30 V	9.23 A	40.10 V	3	20	Ok
455 W	20.4%	11.41 A	49.85 V	10.88 A	41.82 V	3	20	Supera la corriente admisible del inversor

Nota: La comparativa fue realizada entre los paneles SolarMaxx 200 W, Bauer 370 W y JA Solar 455 W.

De la Tabla 5.11, puede observarse que un modelo de panel solar adecuado sería el panel de 370 W debido a que cumple con los parámetros eléctricos a la entrada del inversor, requiere una menor cantidad de paneles y presenta una buena eficiencia. Por lo tanto, en la presente investigación para suplir de energía eléctrica al motor de la bomba sumergible se eligen los módulos monocristalinos de 370 W del fabricante Bauer Energy cuyos datos técnicos se muestran en el Anexo A.

El efecto que tiene la temperatura de trabajo de las células solares influye notablemente en los parámetros eléctricos de un módulo solar por lo que debe ser considerado. La temperatura de las células solares cuando la temperatura ambiente es 24.100 °C (tomamos la temperatura máxima de la Tabla 5.1) y bajo una irradiancia de 1000 W/m<sup>2</sup> se calcula mediante la Ecuación 2.5:

$$T_{cel} = 24.100 + (45 - 20) \times \frac{1000}{800} \rightarrow T_{cel} = 55.350 \text{ } ^\circ\text{C} \approx 56 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Los parámetros corregidos del módulo solar bajo una temperatura de trabajo de 56 °C se calculan con las siguientes relaciones:

$$\Delta \dot{W}_{mpp} = CT_{\dot{W}_{mpp}} (T_{cel} - 25) \quad [5.7-a]$$

$$\Delta V_{oc} = CT_{V_{oc}} (T_{cel} - 25) \quad [5.7-b]$$

$$\Delta I_{sc} = CT_{I_{sc}} (T_{cel} - 25) \quad [5.7-c]$$

Donde:

$\Delta \dot{W}_{mpp}$ : Variación porcentual de la potencia pico por efecto de la temperatura de la célula solar.

$CT_{\dot{W}_{mpp}}$ : Coeficiente potencia-temperatura.

$T_{cel}$ : Temperatura de operación de la célula solar.

$\Delta V_{oc}$ : Variación porcentual del voltaje de circuito abierto por efecto de la temperatura de la célula solar.

$CT_{V_{oc}}$ : Coeficiente voltaje-temperatura.

$\Delta I_{sc}$ : Variación porcentual de la corriente de cortocircuito por efecto de la temperatura de la célula solar.

$CT_{I_{sc}}$ : Coeficiente corriente-temperatura.

En las Ecuaciones 5.7, el valor '25' representa la temperatura bajo las condiciones de prueba del panel solar. Usando datos del Anexo A y el resultado para  $T_{cel}$  se tiene lo siguiente:

$$\Delta \dot{W}_{mpp} = -0.57402\% (56 - 25) \approx -17.795\%$$

$$\Delta V_{oc} = -0.38038\% (56 - 25) \approx -11.792\%$$

$$\Delta I_{sc} = +0.02973\% (56 - 25) \approx +0.922\%$$

Las magnitudes corregidas se muestran en la Tabla 5.12.

**Tabla 5.12: Parámetros corregidos del panel solar debido a la temperatura.**

Parámetro	Variación	Valor Corregido
Potencia máxima del panel	-17.795%	$\dot{W}_{mpp,corr} = 304.160 \text{ W}$
Voltaje de circuito abierto	-11.792%	$V_{oc,corr} = 42.605 \text{ V}$
Corriente de corto circuito	+0.922%	$I_{sc,corr} = 10.042 \text{ A}$

El número total de paneles del generador fotovoltaico se calcula con la Ecuación 2.10:

$$\dot{W}_{gen} = N_{pan} \dot{W}_{mpp,corr} \rightarrow 18.191 = N_{pan} \times 0.304 \rightarrow N_{pan} = 59.806 \approx 60$$

Entonces, se debe disponer de 60 paneles solares como mínimo para suplir la demanda de potencia del sistema. En este caso, se elige  $N_{pan} = 60$  ya que como se verá en la siguiente subsección, este número es divisible por la cantidad de paneles en serie que hay en cada cadena del generador fotovoltaico.

### 5.10.3. Disposición en serie y paralelo

Para determinar el número de paneles en serie en cada cadena del arreglo fotovoltaico primero se establece el voltaje nominal del sistema fotovoltaico. Como puede observarse del Anexo G, un voltaje adecuado para el inversor de bombeo solar es  $V_{sf}^{nom} = 800 \text{ V}$ .

El número de paneles en serie se determina mediante la Ecuación 2.13:

$$V_{sf}^{nom} = N_{ser}^{pan} V_{mpp} \rightarrow 800 = N_{ser}^{pan} \times 40.1 \rightarrow N_{ser}^{pan} = 19.950 \approx 20$$

El número de cadenas en paralelo se determina mediante la Ecuación 2.9:

$$N_{pan} = N_{ser}^{pan} \times N_{par}^{cad} \rightarrow 60 = 20 \times N_{par}^{cad} \rightarrow N_{par}^{cad} = 3$$

Por lo tanto, el generador fotovoltaico está formado por 3 cadenas en paralelo con 20 paneles en serie por cadena.

#### 5.10.4. Inversor de bombeo solar

Se requiere un inversor de bombeo solar para una bomba sumergible con motor de 460 V y potencia nominal de 11 kW (ver Anexo E). La potencia del inversor se determina con la Ecuación 2.14. Si se toma un factor de seguridad del 10%, se tiene:

$$\dot{W}_{inv} = f_s \times \dot{W}_{motor} \rightarrow \dot{W}_{inv} = 1.1 \times 12.733 \rightarrow \dot{W}_{inv} = 14.007 \text{ kW}$$

Además, el voltaje que el inversor debe soportar en su entrada se determina con la Ecuación 2.15:

$$V_{inv}^{max} > V_{mpp} \times N_{ser}^{pan} \rightarrow V_{inv}^{max} > 40.1 \times 20 \rightarrow V_{inv}^{max} > 802 \text{ V}$$

Adicionalmente, la corriente que el inversor debe soportar en su entrada se calcula con la Ecuación 2.16. Tomando un factor de seguridad del 10%, se tiene:

$$I_{inv}^{max} > I_{sc,corr} \times N_{par}^{cad} \times f_s \rightarrow I_{inv}^{max} > 10.042 \times 3 \times 1.1 \rightarrow I_{inv}^{max} > 33.138 \text{ A}$$

Por último, se debe escoger un inversor cuya salida soporte una red trifásica debido a que el motor que acciona la bomba sumergible es trifásico.

La configuración del sistema fotovoltaico se muestra en el Plano Nro. 3 del Anexo J.

Los cálculos desarrollados a lo largo de este capítulo han sido obtenidos mediante un cuaderno de Jupyter ejecutando el lenguaje de programación Python y pueden ser consultados en el siguiente repositorio de GitHub: [https://github.com/wJosielct/tesis\\_titulacion](https://github.com/wJosielct/tesis_titulacion).

## **CAPITULO VI ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

En la presente investigación se busca diseñar un sistema de bombeo solar fotovoltaico para un proyecto piloto sobre riego por goteo de 5 hectáreas de palta en el Fundo Delicia ubicado en el departamento de Lambayeque. Este lugar se caracteriza por encontrarse lejos de la red eléctrica pública por lo que se busca una alternativa para poner en operación una electrobomba para impulsar agua desde un pozo existente hasta un embalse para riego agrícola. En tal sentido, se propone un sistema de bombeo fotovoltaico autónomo directo para alimentar el motor de la bomba. Cabe mencionar que la acumulación de energía se realiza mediante el almacenamiento de agua en un embalse ubicado en un nivel superior con respecto al cultivo.

El cálculo técnico del proyecto se basa en el diseño del sistema de bombeo, el dimensionamiento del sistema de riego por goteo y la configuración del sistema fotovoltaico.

### **6.1. Sistema de bombeo fotovoltaico para riego por goteo**

#### **6.1.1. Sistema de bombeo**

El dimensionamiento del sistema de bombeo de agua inició con la determinación de la demanda hídrica que necesitan las 5 hectáreas de palta. En el procedimiento de cálculo se usó el método de Hargreaves y Samani

para la determinación de la evapotranspiración de referencia. Además, la irradiación global incidente sobre una superficie horizontal y la temperatura media diaria se obtuvieron de la plataforma web PVGIS para los años desde el 2005 hasta el 2020 que es el periodo climatológico disponible en esta plataforma. Para determinar la evapotranspiración de la palta se utilizó un coeficiente de cultivo de 0.72 para todos los meses del año. Para el cálculo del requerimiento bruto de riego se usó una eficiencia de riego del 90% ya que éste es un valor característico en sistemas de riego por goteo. El volumen de agua diario que requiere cada planta se determinó al considerar un marco de plantación de 4 m entre plantas y 6 m entre surcos. El requerimiento de agua diario máximo por planta ocurre en el mes de noviembre y es 95.089 l.

De acuerdo con el marco de plantación de 4 m x 6 m, se tienen 442 plantas por hectárea. El requerimiento de agua diario para el cultivo de las 5 hectáreas de palta es variable durante el año con un máximo en el mes de noviembre de 210.146 m<sup>3</sup> y un mínimo en el mes de julio de 162.257 m<sup>3</sup>.

El área de cultivo dónde se desea sembrar, presenta una pendiente aproximada de 2°. Para aprovechar esta pendiente, se pretende construir un embalse en un nivel superior con respecto al sembrío para de esta forma regar mediante goteo por gravedad. El embalse de almacenamiento de agua se dimensionó considerando el volumen total de agua diario máximo, 2 días de almacenamiento y un factor de seguridad del 20% lo que resultó en un embalse con volumen de 500 m<sup>3</sup>. En la Tabla 6.1 se muestran las dimensiones del embalse diseñado.

**Tabla 6.1: Dimensiones del embalse.**

Volumen	500 m <sup>3</sup>
Ancho	10 m
Largo	20 m
Altura	2.5 m

El nivel a partir del cual debe construirse el embalse debe ser el adecuado con la finalidad de proporcionar la presión adecuada en los goteros.

El sistema de bombeo de agua elegido en esta investigación es un sistema fotovoltaico autónomo directo por lo que el uso de la bomba se limita solamente a los momentos en que hay radiación solar. Por lo tanto, el tiempo de bombeo de cada día va a depender directamente de la irradiación solar diaria la cual puede ser expresada mediante las horas solares pico HSP. En la determinación del ángulo de inclinación óptimo de los paneles solares se utilizó una aplicación desarrollada en el lenguaje de programación Python. Para una máxima captación energética anual, el programa determina un ángulo de inclinación óptimo de 8°. Sin embargo, se escogió como ángulo de inclinación óptimo el valor de 10° para permitir que la lluvia lave naturalmente los paneles solares. La irradiación solar incidente a 10° de inclinación muestra una variación en las horas solares pico durante el año entre 5.291 horas en marzo hasta 6.139 horas en noviembre. El caudal de bombeo se determinó mediante la división entre el volumen de agua diario requerido para el riego de las 5 hectáreas y las horas solares pico produciendo un caudal de bombeo máximo durante el mes de enero. Además, se consideró un factor de seguridad del 30% dando un caudal de diseño de 48 m<sup>3</sup>/h.

Para la determinación de la carga total de la bomba se comenzó estableciendo una velocidad máxima de flujo en la tubería de impulsión de 2.5 m/s, lo cual dio como resultado la selección de una tubería comercial de PVC de 10 Bar con 4" de diámetro nominal. En este caso, se eligió una tubería con una presión nominal adecuada de tal forma que pueda soportar la presión a la salida de la bomba de 7.132 Bar. Las características técnicas de la tubería de impulsión se presentan en la Tabla 6.2.

**Tabla 6.2: Parámetros técnicos de la tubería de impulsión.**

Presión nominal	10 bar
Diámetro nominal	4"
Diámetro externo	114 mm
Diámetro interno	103.2 mm
Espesor	5.4 mm
Longitud total	5 m
Longitud útil	4.914 m

**Fuente:** Plastisur Perú, Ficha Técnica - Tubería PVC Agua a Presión, 2021.

Las pérdidas de carga por fricción en la línea de impulsión fueron determinadas en 16.263 m para una longitud de tubería de 800 m. Las pérdidas de carga menores fueron calculadas en 0.583 m debido a las pérdidas que se dan en los 4 codos de 90°, 1 válvula de compuerta y 1 válvula de retención instaladas en la línea de impulsión. La pérdida de carga total es 16.846 m. La carga total de la bomba se determinó mediante un balance de energía para un proceso de flujo estacionario con flujo incompresible entre un punto que se encuentra en el nivel dinámico del pozo y un punto en la descarga hacia el embalse. La carga total de la bomba fue estimada en 71.476 m.

Para la selección de la bomba se tuvo en cuenta el caudal de diseño de 48 m<sup>3</sup>/h y la carga total de 71.476 m. Para cumplir con los requerimientos anteriores se seleccionó una bomba sumergible Pearl modelo 6PWS230G150. En la Tabla 6.3 se muestran los parámetros técnicos de este modelo de bombas sumergibles.

**Tabla 6.3: Parámetros técnicos de la bomba sumergible seleccionada.**

Marca	Pearl
Modelo	6PWS230G150
Motor	11 kW/15 hp
Ø de descarga	4"
Etapas	5
Peso	16 kg
Caudal recomendado	100 GPM - 300 GPM

**Fuente:** Pearl Water Systems, Pearl 6PWS230G, 2018.

De la Tabla 6.3, puede observarse que la bomba seleccionada requiere de un motor de 11 kW/15 hp de potencia nominal. Entre los motores que ofrece el mismo fabricante de la bomba sumergible se elige un motor sumergible trifásico modelo 6MWCP150D363V cuyas características técnicas se muestran en la Tabla 6.4.

**Tabla 6.4: Parámetros técnicos del motor eléctrico seleccionado.**

Marca	Pearl
Modelo	6MWCP150D363V
Fases	3
Potencia	11 kW/15 hp
Voltaje	460 V
RPM	3490
Frecuencia	60 Hz
Peso	55 kg

**Fuente:** Pearl Water Systems, Submersible Motors, 2023.

También, se determinó el punto de operación de la bomba al superponer la curva de resistencia del sistema juntamente con la curva característica de la bomba seleccionada dando como resultado un caudal de operación de 209 GPM o 47.469 m<sup>3</sup>/h. Además, la carga que suministrará la bomba en el punto de operación será alrededor de 233' o 71.018 m.

Finalmente, en este sistema se analizó el fenómeno de cavitación en la bomba dando un NPSH disponible de 40.831' para un NPSH requerido de 9.375'. Al cumplirse la relación  $NPSH_{dis} > 1.1 NPSH_{req}$  se confirma que no se presentará problemas de cavitación bajo el caudal de operación.

En el Plano Nro. 2 del Anexo J se muestra la configuración del sistema de bombeo.

### **6.1.2. Sistema de riego por goteo**

El sistema de riego por goteo utiliza el agua almacenada en el embalse que se encuentra en un nivel superior con respecto al sembrío para regar por gravedad. Este sistema está formado por los goteros, tuberías laterales, tuberías portlaterales y la tubería primaria.

El volumen de agua diario máximo que necesita cada planta es 95.089 l y ocurre en el mes de noviembre. Se planteó el uso de goteros compensantes debido a los descensos de nivel pronunciados a los que estarán sujetas las tuberías laterales. Además, se consideró 2 goteros por planta con un caudal de 8 l/h cada uno con la finalidad de que el tiempo de riego no se extienda demasiado dando como resultado un tiempo de riego máximo aproximado de

6 horas. En la Tabla 6.5 se muestran las especificaciones técnicas del gotero seleccionado.

**Tabla 6.5: Parámetros técnicos del gotero compensante seleccionado.**

Modelo	Click Tif
Fabricante	Jain Irrigation Systems
Descarga	8 l/h
Rango de presión	$0.5 \text{ kg/cm}^2 - 4 \text{ kg/cm}^2$
Exponente de descarga	$x = 0.04$
Coeficiente del gotero	$k = 8.0$

**Fuente:** Jain Irrigation Systems, Click Tif HD-PC & PCNL, 2021.

El sistema de riego por goteo está formado por 2 subunidades de riego en donde cada subunidad presenta 17 tuberías laterales de 250 m cada una. El número de plantas de palto en cada lateral es de 63. El caudal en el origen de cada lateral es 1008 l/h. Con la finalidad de tomar en cuenta las pérdidas de carga menores presentes en la tubería lateral se consideró que las pérdidas de carga menores son el 20% de las pérdidas por fricción resultando en una longitud ficticia del lateral igual a 300 m. Para el cálculo del diámetro del lateral se fijó una velocidad máxima de 1.5 m/s dando como resultado la elección de una tubería comercial de polietileno de 4 Bar con 32 mm de diámetro nominal. La pérdida de carga en el lateral se calculó en 1.334 mca. Las características técnicas de la tubería lateral seleccionada se presentan en la Tabla 6.6.

**Tabla 6.6: Parámetros técnicos de la tubería lateral.**

Presión nominal	4 bar
Diámetro exterior nominal	32 mm
Espesor	2 mm
Masa métrica	0.192 kg/m
Material	PE 32 reciclado

**Fuente:** Plásticos KIRA, Tubería de Polietileno Baja Densidad PE 32 STANTUBO, 2014.

Las tuberías portalaterales son en total 2 y tienen una longitud de 100 m cada una. El número de tuberías laterales en cada portalateral es 17. El caudal en el origen de cada portalateral es 17136 l/h. Con la finalidad de tomar en cuenta las pérdidas de carga menores presentes en la tubería portalateral se consideró que las pérdidas de carga menores son el 20% de las pérdidas por fricción resultando en una longitud ficticia del portalateral igual a 120 m. Para el cálculo del diámetro del portalateral se fijó una velocidad máxima de 2.5 m/s dando como resultado la elección de una tubería comercial de PVC de 5 Bar con 2" de diámetro nominal. La pérdida de carga en el portalateral se calculó en 2.883 mca. Las características técnicas de la tubería portalateral seleccionada se presentan en la Tabla 6.7.

**Tabla 6.7: Parámetros técnicos de la tubería portalateral.**

Presión nominal	5 bar
Diámetro nominal	2"
Diámetro externo	60 mm
Diámetro interno	56.4 mm
Espesor	1.8 mm
Longitud total	5 m
Longitud útil	4.955 m
Material	PVC

**Fuente:** Plastisur Perú, Ficha Técnica - Tubería PVC Agua a Presión, 2021.

En el análisis de las presiones en las subunidades de riego se tiene que la presión en una tubería portalateral disminuye en la dirección del flujo debido a las pérdidas de carga que se presentan en estas tuberías horizontales. En las tuberías laterales se da un incremento de presión en la dirección de flujo debido a que la ganancia de presión por descenso de cota es mayor que las pérdidas de carga en estas tuberías. Por lo tanto, en cada subunidad de riego

la presión mínima se da en el extremo final de cada portalateral y la presión máxima ocurre en el extremo final del primer lateral de cada subunidad. El rango de presión del gotero compensante seleccionado está entre 5 mca y 40 mca. Debido a esto, se estableció que un valor adecuado para la presión mínima en la subunidad es 9 mca lo que conlleva a tener una presión necesaria en el inicio de cada tubería portalateral de 11.883 mca y una presión máxima en la subunidad de 16.549 mca. Por lo tanto, se tiene un rango de presión en cada subunidad de riego acorde con el rango de presión del gotero compensante seleccionado.

La tubería primaria gestiona un caudal de 34272 l/h. Se fijó una velocidad de flujo máxima por la primaria de 2.5 m/s dando como resultado la elección de una tubería comercial de PVC de 5 Bar con 4" de diámetro nominal. El extremo superior de la tubería primaria está conectado directamente a la base del embalse por lo que debe elegirse la posición adecuada de éste para garantizar la presión necesaria requerida en los goteros. De acuerdo con la topografía de la zona, se elige un punto ubicado a una distancia de 380 m del extremo inferior de la primaria y con una cota de 160 msnm para satisfacer este requisito. Con la finalidad de tomar en cuenta las pérdidas de carga menores presentes en la tubería primaria se consideró que las pérdidas de carga menores son el 15% de las pérdidas por fricción resultando una longitud ficticia de la primaria igual a 437 m. La pérdida de carga en la primaria se determinó en 4.034 mca. Al considerar el caso extremo en el que el embalse se está vaciando se calculó una presión de casi 12 mca en el final de la tubería

primaria resultado que está acorde para el valor de presión mínima que se estableció en la subunidad de riego. La presión máxima en la primaria ocurre en el tramo final de esta tubería cuando el embalse se encuentra totalmente lleno dándonos un valor de 14.466 mca. Las características técnicas de la tubería primaria se presentan en la Tabla 6.8.

**Tabla 6.8: Parámetros técnicos de la tubería primaria.**

Presión nominal	5 bar
Diámetro nominal	4"
Diámetro externo	114 mm
Diámetro interno	108.4 mm
Espesor	2.8 mm
Longitud total	5 m
Longitud útil	4.914 m
Material	PVC

**Fuente:** Plastisur Perú, Ficha Técnica - Tubería PVC Agua a Presión, 2021.

En el Plano Nro. 1 del Anexo J se muestra la configuración del sistema de riego por goteo por gravedad.

### 6.1.3. Sistema fotovoltaico

El sistema fotovoltaico autónomo directo está formado por el generador fotovoltaico y el inversor de bombeo solar.

Se requiere un inversor de bombeo solar para una bomba sumergible con motor trifásico de 460 V y 11 kW de potencia nominal. La potencia del inversor de bombeo solar debe seleccionarse de tal forma que esté por encima de la potencia que consume la electrobomba. La potencia eléctrica que consume el motor de la bomba en el punto de operación se determinó en 12.733 kW bajo una eficiencia de la electrobomba del 72%. Al considerar un factor de

seguridad del 10%, la potencia que el inversor debe soportar se estimó en 14.007 kW como mínimo. Además, el voltaje que el inversor debe soportar en su entrada es 802 V como mínimo y la corriente que debe soportar en su entrada tomando un factor de seguridad del 10% es 33.138 A como mínimo. Al tener en cuenta esta información, se seleccionó un inversor de bombeo solar modelo JNP15KH del fabricante Jntech Renewable Energy cuyos parámetros técnicos se muestran en la Tabla 6.9.

**Tabla 6.9: Parámetros técnicos del inversor de bombeo solar seleccionado.**

Modelo	JNP15KH
Fabricante	Jntech Renewable Energy
Entrada DC	
Voltaje DC de entrada máximo	880 V
Voltaje MPPT recomendado	460 V - 850 V
Corriente DC de entrada máxima	33.3 A
Eficiencia MPPT máxima	99%
Entrada AC	
Rango de voltaje de entrada AC	330 V - 460 V (3 fases)
Frecuencia de entrada AC	50 Hz / 60 Hz
Salida AC	
Potencia del motor máxima	15 kW
Voltaje de salida nominal	380 V - 460 V (3 fases)
Rango de frecuencia de salida	0 ~ 50 Hz / 60 Hz
Corriente de salida nominal	29 A

**Fuente:** Jntech Renewable Energy, Solar Pump Inverter - User Manual, 2021.

La potencia que el generador fotovoltaico debe proporcionar se determina a partir de la potencia eléctrica que consume el motor y al considerar el rendimiento energético de la instalación fotovoltaica. Con un rendimiento energético de 0.7 se tiene una potencia del generador fotovoltaico de 18.191 kW. Para generar esta potencia se optó por seleccionar los módulos

monocristalinos de 370 W del fabricante Bauer Energy cuyos datos técnicos se muestran en la Tabla 6.10.

**Tabla 6.10: Parámetros técnicos del panel solar seleccionado.**

Parámetro	Valor
Modelo	BSP370M
Fabricante	Bauer Energy
Potencia máxima, $\dot{W}_{mpp}$	370 W
Voltaje de circuito abierto, $V_{oc}$	48.3 V
Corriente de corto circuito, $I_{sc}$	9.95 A
Voltaje de máxima potencia, $V_{mpp}$	40.1 V
Corriente de máxima potencia, $I_{mpp}$	9.23 A
Condiciones del test	1000 W/m <sup>2</sup> , 25 °C, 1.5 AM
Coeficiente corriente-temperatura, $CT_{I_{sc}}$	+0.02973%
Coeficiente voltaje-temperatura, $CT_{V_{oc}}$	-0.38038%
Coeficiente potencia-temperatura, $CT_{\dot{W}_{mpp}}$	-0.57402%
Temperatura de operación nominal de la célula, $NOCT$	45 °C
Eficiencia del módulo, $\eta_{pan}$	19%

**Fuente:** Bauer Energy, Panel Solar 370 W 72 Células Monocristalino, 2019.

El efecto que tiene la temperatura de trabajo de las células solares influye notablemente en los parámetros eléctricos de un módulo solar por lo que debe ser considerado. La temperatura de operación de las celulares solares se estimó en 56 °C lo cual reduce la potencia pico de los módulos solares hasta 304.160 W. Este efecto hace que para suplir los 18.191 kW del generador fotovoltaico se deba disponer de 60 paneles solares, produciendo un generador fotovoltaico de 22.2 kW de potencia nominal.

La disposición de los paneles en el generador fotovoltaico se determinó al considerar el voltaje nominal del sistema fotovoltaico establecido en 800 V, lo cual es un voltaje adecuado para el inversor de bombeo solar, dando como

resultado un generador fotovoltaico compuesto de 3 cadenas en paralelo con 20 paneles en serie en cada cadena.

En el Plano Nro. 3 del Anexo J se muestra la configuración del sistema fotovoltaico autónomo directo.

## **6.2. Prueba de hipótesis**

En virtud del establecimiento de la configuración y selección de los componentes del sistema de bombeo, sistema de riego por goteo y sistema fotovoltaico entonces el diseño de un sistema de bombeo fotovoltaico autónomo directo para impulsar agua desde un pozo hasta un embalse de almacenamiento es viable técnicamente lo cual permitirá satisfacer la demanda hídrica para el riego por goteo de 5 hectáreas de palta en el Fundo Delicia ubicado en el centro poblado La Viña, distrito de Nueva Arica, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque.

## CONCLUSIONES

- 1) En esta investigación se diseñó un sistema de bombeo fotovoltaico autónomo directo para impulsar agua desde un pozo hasta un embalse para satisfacer la demanda hídrica del riego por goteo del cultivo de 5 hectáreas de palta en el Fundo Delicia localizado en el centro poblado La Viña, distrito de Nueva Arica, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque. Un aspecto clave en el diseño de esta instalación fue considerar tres sistemas: el sistema de bombeo, el sistema fotovoltaico y el sistema de riego por goteo.
- 2) En esta investigación se evaluó la radiación solar en la zona del sembrío. Lo más importante para esta evaluación fue determinar el ángulo de inclinación óptimo de los paneles solares lo cual resultó en un valor de 10°. La irradiación solar diaria bajo este ángulo de inclinación presenta poca fluctuación durante el año con un mínimo de 5.291 kWh/m<sup>2</sup> en el mes de marzo y un máximo de 6.139 kWh/m<sup>2</sup> en el mes de noviembre lo cual demuestra el gran potencial solar de la zona.
- 3) En esta investigación se determinó la demanda hídrica para el riego por goteo del cultivo de 5 hectáreas de palta. El factor más importante para esta determinación fue calcular la evapotranspiración del cultivo de

referencia para lo cual se utilizó el método de Hargreaves y Samani. Los resultados indican una necesidad de agua variable durante el año con un mínimo de 162.257 m<sup>3</sup>/día en el mes de julio y un máximo de 210.146 m<sup>3</sup>/día en el mes de noviembre.

- 4) En esta investigación se estableció las dimensiones del embalse de almacenamiento que se encargará de proveer el agua al sistema de riego por goteo. Lo más importante para este establecimiento de dimensiones fue determinar el volumen de almacenamiento en el cual se consideró el volumen total de agua de riego diario máximo, una capacidad de dos días de almacenamiento y un factor de seguridad de 20% dando como resultado una capacidad de almacenamiento de 500 m<sup>3</sup>. Las dimensiones del embalse fueron establecidas en 10 m de ancho, 20 m de largo y una altura de 2.5 m.
- 5) En esta investigación se diseñó el sistema de riego por goteo que se encargará de irrigar a las plantas de palto. Un factor importante en el diseño de este sistema fue seleccionar el tipo de gotero para lo cual se optó por elegir un gotero tipo compensante debido a la diferencia de cota pronunciada del terreno del sembrío. Otro factor importante fue el diseño de la red de distribución en la cual se consideró 1 tubería primaria, 2 tuberías portlaterales y 34 tuberías laterales. El diseño dio como resultado la selección de goteros compensantes de 8 l/h bajo el rango de presión de 5 mca – 40 mca, una tubería primaria de PVC de 5 Bar con 4" de diámetro nominal, tuberías portlaterales de PVC de 5

Bar con 2" de diámetro nominal y tuberías laterales de polietileno de 4 Bar con 32 mm de diámetro nominal.

- 6) En esta investigación se dimensionó el sistema de bombeo que se encargará de impulsar el agua de riego desde un pozo hacia el embalse de almacenamiento. Un factor importante en el dimensionamiento de este sistema fue el cálculo del caudal de bombeo para lo cual se tomó en cuenta el mes con máximo caudal requerido y un factor de seguridad del 30% como respaldo ante los días nublados durante los cuales se dispone de menos horas solares para el bombeo del agua. Otro factor importante fue la determinación de la carga total de la bomba para lo cual se aplicó la ecuación general de la energía. El dimensionamiento dio como resultado una bomba sumergible que entrega un caudal de 209 GPM (47.469 m<sup>3</sup>/h) y una carga de 233' (71.018 m) en el punto de operación, un motor eléctrico trifásico de 11 kW y 460 V, una tubería de impulsión de PVC de 10 Bar con 4" de diámetro nominal, y los accesorios instalados en esta tubería constan de 4 codos de 90°, 1 válvula de compuerta y 1 válvula de retención.
- 7) En esta investigación se configuró el sistema fotovoltaico que se encargará de alimentar eléctricamente al motor de la bomba sumergible. Un aspecto importante en la configuración de este sistema fue la elección de unos paneles solares adecuados con la finalidad de no sobrepasar los parámetros eléctricos de entrada del inversor de bombeo solar. Otro aspecto importante fue la consideración de la temperatura de funcionamiento de las células solares lo cual hace

disminuir la potencia pico de los paneles solares. La configuración dio como resultado un generador fotovoltaico formado por 60 paneles monocristalinos de 370 W conectados 20 en serie y 3 cadenas en paralelo, y un inversor de bombeo solar de 15 kW con una entrada máxima en DC de 880 V – 33.3 A y una salida trifásica de 380 V – 460 V.

## RECOMENDACIONES

- ❖ En una segunda etapa del proyecto se recomienda automatizar el sistema de riego por goteo.
- ❖ Realizar un mantenimiento periódico de los paneles solares de 1 vez por mes con la finalidad de limpiar la suciedad acumulada en la superficie de los módulos y así evitar una disminución en su eficiencia.
- ❖ Se recomienda tener un sistema de energía de respaldo en caso de imprevistos. En este caso, se sugiere un grupo electrógeno para alimentar a la electrobomba el cuál funcionará solamente en casos de fuerza mayor.
- ❖ El diseño de los cables eléctricos, protecciones eléctricas y puesta a tierra debe ser realizado por un ingeniero eléctrico o mecánico eléctrico especialista.
- ❖ Se sugiere la intervención del sector estatal con la finalidad de poner a disposición del público en general datos actuales sobre irradiación solar en el territorio peruano. El desarrollo de un mapa solar con sistema de información geográfica (GIS por sus siglas en inglés) disponible en la web sería bastante interesante para los investigadores de este tipo de tecnologías.

- ❖ Se recomienda determinar el payback del proyecto para que el propietario sepa en cuánto tiempo va a recuperar su inversión.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alata, J. (2015). Dimensionamiento de un Sistema de Bombeo con Paneles Solares – Caso UNALM.
- Aliyu, M., Hassan, G., Said, S., Siddiqui, M., Alawami, A., & Elamin, I. (2018). A Review of Solar-Powered Water Pumping Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(87), 61-76.
- Amazon AWS. (2023, Enero 31). ¿Qué es Python? Recuperado de amazon: <https://aws.amazon.com/es/what-is/python/>
- Arceda, M., & Hernández, A. (2012). Proyecto de Riego por Goteo Utilizando Energía Solar para el Cultivo de Aguacate en la Finca Ojo de Agua en la Localidad de San Francisco Libre.
- Asmat, C. (2018). Determinación de la Eficiencia de un Sistema de Bombeo Fotovoltaico en el Distrito de Yaurisque – Cusco.
- Baltazar, M. (2020). Sistema de Bombeo Solar Fotovoltaico para Abastecimiento de Agua en la I.E.P. Apóstol San Pedro del Distrito Tres De Diciembre.
- Bauer Energy. (2019). Panel Solar 370 W 72 Células Monocristalino [versión PDF]. Recuperado de Autosolar: <https://autosolar.pe/pdf/ficha-tecnica-panel-370-bauer.pdf>
- Benghanem, M., Daffallah, K., & Almohammed, A. (2018). Estimation of Daily Flow Rate of Photovoltaic Water Pumping Systems Using Solar Radiation Data. *Results in Physics*(8), 949-954.
- Bolaños, J., Perea, R., & Rivera, M. (2019). Propuesta de Bombeo Solar para un Sistema de Riego Agrícola Semiautomatizado mediante un Tanque Elevado en el Municipio de Tecámac, Estado de México.
- Brown, T., LeMay, H., Bursten, B., & Burdge, J. (2003). *Química La Ciencia Central* (9na ed.). Prentice Hall Inc.

- Casado, P., Blanes, J. M., Torres, C., Orts, C., Marroquí, D., & Garrigós, A. (2022). Raspberry Pi Based Photovoltaic I-V Curve Tracer. *HardwareX*, 11, Article e00262.
- Castejón, A., & Santamaría, G. (2010). *Instalaciones Solares Fotovoltaicas*. Editex.
- Çengel, Y., & Boles, M. (2012). *Termodinámica (7ma ed.)*. McGRAW-HILL.
- Çengel, Y., & Cimbala, J. (2018). *Mecánica de Fluidos (4ta ed.)*. McGraw-Hill.
- Çengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de Calor y Masa (4ta ed.)*. The McGraw-Hill Companies.
- Cruz Ornetta, V. (2012). Los sistemas de energía solar fotovoltaica en el Perú. *Paradigmas*, 4(1), 101-113.
- Dávalos, J. (2019). Diseño de un Sistema de Bombeo Fotovoltaico para Riego Agrícola en el Caserío La Guayaba, distrito de Bellavista, Jaén – Cajamarca.
- European Commission. (2023). PVGIS data sources & calculation methods. Recuperado de EU Science Hub: [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/pvgis-online-tool/getting-started-pvgis/pvgis-data-sources-calculation-methods\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/pvgis-online-tool/getting-started-pvgis/pvgis-data-sources-calculation-methods_en)
- European Photovoltaic Industry Association and Greenpeace International. (2011). *Solar Generation 6: Solar Photovoltaic Electricity Empowering the World*.
- Federación Bioquímica de la Provincia de Buenos Aires. (2012). Las Nubes y el Ciclo de la Energía. *Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana*(3), 35-39.
- Fraile, J. (2008). *Máquinas Eléctricas (6ta ed.)*. Madrid: McGRAW-HILL.
- Fuentes, J., & García, G. (1999). *Técnicas de Riego*. Mundi-Prensa México, S.A. de C.V.
- Gardiazabal, F., Magdahl, C., Mena, F., & Wilhelmy, C. (2003). Determinación del Coeficiente de Cultivo (KC) para paltos CV. Hass en Chile. V Congreso Mundial del Aguacate, (pp. 329-334).
- Heredia, C., & Sánchez, D. (2017). Diseño de un Sistema de Bombeo Fotovoltaico por Goteo Automatizado Para Terrenos de Cultivo de Espárragos del Fundo Inca Verde en el Sector Pampas La Sandías Provincia de Chepén - Departamento de La Libertad.

Hervias, A. (2018). Diseño de un Sistema de Bombeo mediante Energía Solar Fotovoltaica para Suministrar Agua Potable a la Población de Maynas – Perú.

Hospital, K., & González, L. (2021). Diseño de un Sistema de Bombeo Alimentado por Energía Solar Fotovoltaica en la Zona de Cundinamarca.

Iberdrola S.A. (2023). Células fotovoltaicas: conoce su evolución, sus diferentes tipos y las últimas innovaciones. Recuperado de Iberdrola: [https://www.iberdrola.com/innovacion/celulas-fotovoltaicas-fotoelectrica#:~:text=QU%C3%89%20ES%20UNA%20C%C3%89LULA%20FOTOVOLTAICA,electrones\)%20gracias%20al%20efecto%20fotoel%C3%A9ctrico.](https://www.iberdrola.com/innovacion/celulas-fotovoltaicas-fotoelectrica#:~:text=QU%C3%89%20ES%20UNA%20C%C3%89LULA%20FOTOVOLTAICA,electrones)%20gracias%20al%20efecto%20fotoel%C3%A9ctrico.)

Instituto Nacional de Recursos Naturales. (2006). Estudio Hidrogeológico del Valle de Zaña - Informe Final. Zaña: Ministerio de Agricultura.

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. (2015). Manual de Capacitación: Riego por Goteo [versión PDF]. Recuperado de INTA: [https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta\\_manual\\_riego\\_por\\_goteo.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_manual_riego_por_goteo.pdf)

International Energy Agency. (2022, 04 28). Evolution of solar PV module cost by data source, 1970-2020. Recuperado de <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/evolution-of-solar-pv-module-cost-by-data-source-1970-2020>

Inverter. (2021, Febrero 20). Solar Pump Inverter Functions. Recuperado de <https://www.inverter.com/solar-pump-inverter-functions>

Jacobson, M., & Jadhav, V. (2018). World Estimates of PV Optimal Tilt Angles and Ratios of Sunlight Incident upon Tilted and Tracked PV Panels Relative to Horizontal Panels. *Solar Energy*(169), 55-66.

Jácome, B. (2017). Propuesta de Sistema de Bombeo Utilizando Paneles Fotovoltaicos.

Jain Irrigation Systems. (2021). Click Tif HD-PC & PCNL [versión PDF]. Recuperado de Jain: <https://www.jains.com/PDF/Catalogue/Drip/Dripper/Click%20Tif%20HD.pdf>

Jain Irrigation Systems. (2021). Mini Inline Emitter. Recuperado de Jain: [https://www.jains.com/irrigation/emitters%20and%20drippers/Mini\\_Inline\\_Emitter.htm](https://www.jains.com/irrigation/emitters%20and%20drippers/Mini_Inline_Emitter.htm)

Jain Irrigation Systems. (2021). Mini Inline emitter [versión PDF]. Recuperado de Jain: <https://www.jains.com/PDF/Catalogue/Drip/Dripper/Mini%20Inline%20Emitter.pdf>

Jara, H. (2021). Diseño de un Sistema de Bombeo Solar Directo para Riego por Goteo en el Distrito de Guadalupe – La Libertad.

Jntech Renewable Energy. (2021). Solar Pump Inverter - User Manual [versión PDF]. Recuperado de Jntech: <https://www.jntechenergy.com/uploadfile/downloads/18.05.99.9083-JNP18K5H-V5-EN-V1.2%20user%20manual.pdf>

Jntech Renewable Energy. (2023). JNTECH 15KW Solar Pump Inverter Three Phase 380V With IP65. Recuperado de Jntech: [https://www.jntechenergy.com/jntech-15kw-solar-pump-inverter-three-phase-380v-with-ip65\\_p37.html](https://www.jntechenergy.com/jntech-15kw-solar-pump-inverter-three-phase-380v-with-ip65_p37.html)

Lara, F. (2007). Diseño de un Sistema de Riego por Medio de Energía Solar, a Través de Paneles FV.

Llopis, M. (2018). Diseño de una Instalación Solar Fotovoltaica para Bombeo de 55 kW para el Riego de la Huerta de Alicante de Mutxamel.

Maldonado, E. (2011). Paneles Solares como Fuente de Energía Eléctrica para Sistemas de Mini Riego en Producción de Hortalizas en el Departamento de Quiché.

Monge, M. (2018). Diseño Agronómico e Hidráulico de Riegos Agrícolas a Presión. Madrid: Editorial Agrícola Española.

Mott, R., & Untener, J. (2015). Mecánica de Fluidos (7ma ed.). Pearson Education.

Muralidhar, K., & Rajasekar, N. (2021). A Review of Various Components of Solar Water-Pumping System: Configuration, Characteristics, and Performance. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(9).

Naciones Unidas. (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Resolución aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015.

Nicoletti, G., Arcuri, N., Nicoletti, G., & Bruno, R. (2015). A Technical and Environmental Comparison Between Hydrogen and Some Fossil Fuels. *Energy Conversion and Management*, 89, 205-213.

Nicomedes, E. (2018). Tipos de Investigación. Universidad Santo Domingo de Guzmán, 1-4.

Pearl Water Systems. (2018). Pearl 6PWS230G [versión PDF]. Recuperado de Pearl: <https://www.pearlwatersystems.com/downloads/data-sheets/PEARL-TECHDATA-6PWS230G.pdf>

- Pearl Water Systems. (2023). Submersible Motors [versión PDF]. Recuperado de Pearl: <https://www.pearlwatersystems.com/wp-content/uploads/2023/03/pearl-catalog-submersible-motors.pdf>
- Peralta, A. (2018). Estudio Experimental de un Sistema de Bombeo Solar Fotovoltaico en Corriente Continua.
- Pérez, M., Morales, I., & Castro, E. (2017). The Hour Equivalent Solar Pick, Definition and Interpretation. *Ingeniería Energética*, 38(2), 124-131.
- Perpiñán, O. (2020). Energía Solar Fotovoltaica.
- Plásticos KIRA. (2014). Tubería de Polietileno Baja Densidad PE 32 STANTUBO [versión PDF]. Recuperado de Plásticos KIRA: <https://plasticoskira.com/script/photo/1441620486FT-PE32-STANTUBO-v1.pdf>
- Plastisur Perú. (2021). Ficha Técnica - Tubería PVC Agua a Presión [versión PDF]. Recuperado de Plastisur: <https://plastisur.com.pe/wp-content/uploads/2022/03/AGUA-FRIA-A-PRESION-2.pdf>
- Ronquillo, Y. (2022). Manejo Agronómico del Palto CV Hass Experiencias en el Valle de Chilca - Lima.
- Sanner, M. (1999). Python: A Programming Language For Software Integration And Development. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, 17(1), 57-61.
- Schilardi, C., Funes, D., Lunghi, Y., Longo, V., Méjica, A., Nogal, P., & Pedra, R. (2019). Diseño de un Sistema de Bombeo Solar Fotovoltaico para Riego por Goteo en Viñedos. II Congreso de Agua, Ambiente y Energía. Montevideo.
- SENAMHI. (2003). Atlas de Energía Solar del Perú. Lima.
- Smith, B. (2021, Abril 26). Understanding Evapotranspiration (ET). Recuperado de Semios: <https://blog.semios.com/understanding-evapotranspiration>
- Talavera, J. (2019). Factibilidad Técnico Económico mediante la Implementación de Paneles Solares Fotovoltaicos para Accionar las Bombas de Riego Agrícola en el Distrito de Pacanguilla – Chepén – La Libertad.
- Todorovic, M. (2005). Crop Evapotranspiration. *Water Encyclopedia*, 571-578.
- Toro, A., Arteaga, R., Vázquez, M., & Ibáñez, L. (2015). Modelos para Determinar la Evapotranspiración de Referencia en la Zona Norte Bananera del Urabá Antioqueño (Colombia). *Agrociencia*, 49(8), 821-836.

Toro, I., & Parra, R. (2006). Metodología de la Investigación. Universidad EAFIT.

Vargas, B. (2018). Diseño de un Sistema de Bombeo de Agua Subterránea con Energía Solar Fotovoltaica para Riego en la Comunidad de Valencia.

Wikipedia. (2022). Bomba centrífuga. Recuperado de Wikipedia:  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Bomba\\_centric%C3%ADfuga](https://es.wikipedia.org/wiki/Bomba_centric%C3%ADfuga)

World Economic Forum. (2021). Fostering Effective Energy Transition 2021 edition.

Zambrano, J. (2019). Sistema de Bombeo de Agua Utilizando Paneles Solares en el Sector Boyero – C.P. Porcón Alto.

## **ANEXOS**

ANEXO A: Ficha técnica del panel solar monocristalino Bauer 370 W.

ANEXO B: Ficha técnica de tubería de PE de baja densidad Stantubo.

ANEXO C: Ficha técnica de tuberías de PVC Plastisur.

ANEXO D: Ficha técnica de la bomba sumergible Pearl serie 6PWS230G.

ANEXO E: Ficha técnica del motor eléctrico trifásico Pearl serie 6MWCP.

ANEXO F: Ficha técnica del gotero Click Tif.

ANEXO G: Ficha técnica del inversor de bombeo solar JNP15KH.

ANEXO H: Galería fotográfica.

ANEXO I: Datos hidrogeológicos del valle Zaña.

ANEXO J: Planos.

## ANEXO A

### Ficha técnica del panel solar monocristalino Bauer 370 W



## PANEL SOLAR 370W 72 CÉLULAS MONOCRISTALINO

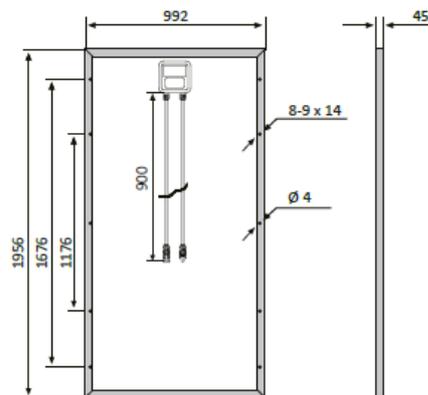
### Características

Tamaño del módulo	1956 x 992 x 45 mm
Células	72 piezas monocristalinas (156 x 156 mm)
Cristal	Bajo contenido en hierro y templado (3,2 mm)
Potencia máxima (Wp)	370W
Cable	90cm, 4mm <sup>2</sup>
Voltaje en circuito abierto (Voc)	48.3V
Intensidad en cortocircuito (Isc)	9.95A
Voltaje a máxima potencia (Vm)	40.1V
Intensidad a máxima potencia (Im)	9.23A
Condiciones del test	1000W/m <sup>2</sup> , 25°C, AM 1.5
Voltaje máximo sistema	1000Vdc
Coefficiente temperatura - Isc	+0.02973%
Coefficiente temperatura - Uoc	-0.38038%
Coefficiente temperatura - Pmpp	-0.57402%
Temperatura normal trabajo célula	45°C
Eficiencia del módulo	19%
Certificados de producto	TUV(IEC 61215, IEC 61730), CE
Certificados de la empresa	ISO9001, ISO14001, ISO18001
Peso	21.5 kg
Garantía del producto	10 años
Garantía de potencia	25 años

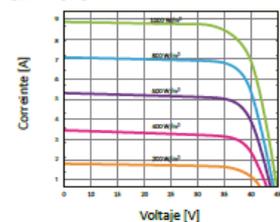
### BSP370M



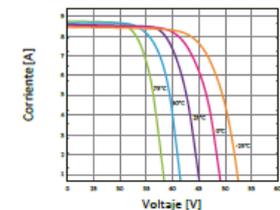
### Esquemas



### Curvas



Características de los módulos a temperaturas constantes de 25°C y niveles variables de irradiación



Características de los módulos a temperaturas variables e irradiación constante de 1.000W/m<sup>2</sup>

**Fuente:** Bauer Energy, Panel Solar 370 W 72 Células Monocristalino, 2019.

## ANEXO B

### Ficha técnica de tubería de PE de baja densidad Stantubo

	FICHA TÉCNICA	Rev.: 1 Fecha: 25/02/2012 Pág. 1 de 2	 
	<b>STANTUBO</b>		

## TUBERÍA DE POLIETILENO BAJA DENSIDAD PE 32 STANTUBO

### APLICACIONES:

- Riego localizado.
- Riego en superficie.
- Distribución de agua para riego en explotaciones agrícolas.
- No aptas para agua potable.

### VENTAJAS DE LOS TUBOS DE POLIETILENO:

- Resistencia a los rayos UV
- Insensibilidad a la corrosión
- Las paredes lisas de la tubería obstaculizan la formación de incrustaciones y nos ofrecen una pérdida de carga reducida
- Flexibilidad
- Facilidad de montaje e instalación con accesorios mecánicos.

### CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS

Estas tuberías están diseñadas para su utilización en explotaciones agrícolas. El material empleado en su fabricación es reciclado favoreciendo de esta manera al medio ambiente.

Los resultados de estos ensayos representan unos valores medios. Deben confirmarse para cada lote de material



Ensayos	Material PE BD	Tubo	Norma de referencia
Densidad	≤ 935 kg/m <sup>3</sup>		ISO 1183 y ISO 1872/1
Contenido en negro de carbono	2,0 a 2,6 %	> 2%	ISO 6964
Índice de fluidez	< 1,2 sobre 2,16 kg	< 1,2 sobre 2,16 kg	ISO 1133
Alargamiento a la rotura		≥ 350 %	ISO 6259-1 y 3
Comportamiento al calor		< 3%	UNE-EN 743
Resistencia a la presión interna a 80°C		> 165h a 2.0 Mpa	UNE EN ISO 1167-1 y 2

### Corrección de la presión en función de la temperatura

T del fluido °C	20°	25°	30°	35°	40°
Coeficiente de reducción de presión	1	0,81	0,65	0,46	0,30

Se debe corregir la Presión Nominal del tubo en función de la temperatura del fluido aplicando el factor arriba indicado. Para una tubería PN4 con un fluido a 30°C. La Presión Máxima Admisible (PMA) sería de  $4 \times 0,65 = 2,6$  bar.

	FICHA TÉCNICA	Rev.: 1	 
	<b>STANTUBO</b>	Fecha: 25/02/2012 Pág. 2 de 2	

#### CARACTERÍSTICAS DIMENSIONALES:

- Material: PE32 reciclado.
- Para otros diámetros consultar.

Presión (bar)	Diámetro exterior nominal (mm)	Espesor (mm)	Masa métrica indicativa (kg/m)
4	20	1,7	0,100
	25	2	0,147
	32	2	0,192
	40	2,4	0,300
	50	3	0,477
	63	3,8	0,739
	75	4,5	1,037
6	90	5,4	1,430
	20	2	0,115
	25	2,3	0,168
	32	3	0,274
	40	3,7	0,422
	50	4,6	0,653
	63	5,8	1,031
10	75	6,8	1,459
	90	8,2	2,082
	20	2,8	0,155
	25	3,5	0,241
	32	4,4	0,392
	40	5,5	0,614
	50	6,9	0,954
10	63	8,6	1,495
	75	10,3	2,135
	90	12,3	2,940

#### EMBALAJE:



- La tubería se sirve en rollos de los siguientes metrajes: 10, 25, 50, 100, 200 y 400 m/rollo
- Los rollos se pueden enviar sobre pallet envueltos en film.
- Marcaje metro a metro
- Posibilidad de personalización: Etiquetas personalizadas, códigos de barras, EAN13, EAN14.

#### GARANTÍA:

Teniendo en cuenta las condiciones de utilización normales: Exposición a los rayos UV, intemperies, cambios de temperatura ambientales, presiones, etc.

Los tubos tienen una garantía de 2 años des de la fecha de fabricación marcada en el propio tubo.

La responsabilidad de plásticos KIRA se limita únicamente a la reposición del material defectuoso.

**Fuente:** Plásticos KIRA, Tubería de Polietileno Baja Densidad PE 32 STANTUBO, 2014.

## ANEXO C Ficha técnica de tuberías de PVC Plastisur

Ficha Técnica

Agua a Presión

TUBERÍAS Y CONEXIONES PARA AGUA FRÍA CON PRESIÓN SEGÚN NTP 399.00:2015/ NTP 399.019:2004

La tubería para conducción de fluidos con unión simple presión de PLASTISUR cumple la norma NTP 399.002. Son fabricadas en diámetros de 1/2" hasta 12" para una presión de trabajo de 5 Bar, 7,5 Bar y 15 Bar, y contamos con conexiones inyectadas en diversos tamaños y variedades en color gris oscuro.

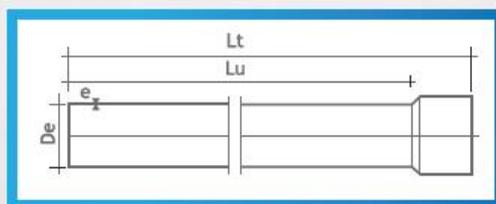
### CARÁCTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS TUBERÍAS PARA AGUA FRÍA SEGÚN NTP 399.002:2015

CLASE 15 (15 BAR)					CLASE 10 (10 BAR)					CLASE 7,5 (7,5 BAR)					CLASE 5 (5 BAR)				
Dim. Nom. (Pulg)	Dim. Ext. (mm)	Esp. Nom. (mm)	Dim. Int. (mm)	Long. UII (mm)	Dim. Nom. (Pulg)	Dim. Ext. (mm)	Esp. Nom. (mm)	Dim. Int. (mm)	Long. UII (mm)	Dim. Nom. (Pulg)	Dim. Ext. (mm)	Esp. Nom. (mm)	Dim. Int. (mm)	Long. UII (mm)	Dim. Nom. (Pulg)	Dim. Ext. (mm)	Esp. Nom. (mm)	Dim. Int. (mm)	Long. UII (mm)
1/2	21,0	1,8	17,4	4,984	1/2(*)	21,0	1,8	17,4	4,984	1 1/4	42,0	1,8	38,4	4,986	2(*)	60,0	1,8	56,4	4,985
3/4	26,5	1,8	22,9	4,980	3/4(*)	26,5	1,8	22,9	4,980	1 1/2(*)	48,0	1,8	44,4	4,984	2 1/2	73,0	1,8	69,4	4,945
1	33,0	2,3	28,4	4,975	1(*)	33,0	1,8	28,4	4,975	2(*)	60,0	2,2	55,6	4,955	3(*)	86,5	2,2	84,1	4,934
1 1/4	42,0	2,9	36,2	4,969	1 1/4	42,0	2,0	38,0	4,960	2 1/2	73,0	2,6	67,8	4,940	4(*)	114,0	2,9	108,4	4,914
1 1/2	48,0	3,3	41,4	4,964	1 1/2(*)	48,0	2,3	43,4	4,964	3(*)	86,5	3,2	82,1	4,954	5	126,0	4,1	119,8	4,874
2	60,0	4,2	51,6	4,955	2(*)	60,0	2,8	54,2	4,955	4(*)	114,0	4,1	106,8	4,914	6	159,0	5,3	206,4	4,836
2 1/2	73,0	5,1	62,5	4,945	2 1/2(*)	73,0	3,5	66,0	4,945	6(*)	168,0	5,1	155,8	4,874	10	273,0	6,7	259,6	4,795
3	86,5	6,2	76,1	4,934	3(*)	86,5	4,2	80,1	4,934	8	219,0	7,0	203,2	4,874	12	323,0	7,9	307,2	4,758
4	114,0	8,0	98,0	4,914	4(*)	114,0	5,4	103,2	4,914	10	273,0	9,0	253,2	4,795					
5	126,0	11,2	144,6	4,874	5	126,0	6,0	120,0	4,874	12	323,0	11,7	299,6	4,758					
6	159,0	15,3	188,4	4,834	6	159,0	10,4	148,2	4,834										
8	219,0	19,0	235,0	4,795	8	219,0	13,0	247,0	4,795										
10	273,0	22,5	278,0	4,758	10	273,0	15,4	292,2	4,758										
12	323,0				12	323,0													

PRUEBAS MECÁNICAS				
Tipo de Prueba	T °C Ensayo	Tiempo Ensayo	Requisitos	Evaluación
Resistencia a la presión hidrostática sostenida	20 °C	1 hora	Clase 5: 15 bar Clase 7,5: 22 bar Clase 10: 29 bar	No deben romperse ni perder presión por fisura o grietas
Resistencia a la presión hidrostática instantánea	20 °C	1 min	Clase 5: 22 bar Clase 7,5: 33 bar Clase 10: 44 bar	No deben romperse ni perder presión por fisura o grietas
Aplastamiento transversal	20 °C	5 min	Aplast. al 40% del diámetro	No deben evidenciar a simple vista fisuras.
Resistencia al impacto	0 °C	-	10% rot. max.	-

PRUEBAS FÍSICAS				
Tipo de Prueba	T °C Ensayo	Tiempo Ensayo	Requisitos	Evaluación
Apariencia	20 °C	-	Lisa	Superficie exterior e interior
Resistencia al diclorometano	15 °C	30 min	Sin ataque	Inmersión en diclorometano

La tubería PLASTISUR para la conducción de fluidos a presión, empalmes simple presión, es fabricada en longitudes de 5m color gris, blanco y otros a solicitud del cliente.



**Advertencia:**  
La exposición directa al fuego de tuberías PVC ocasiona la pérdida de sus propiedades físicas y mecánicas.



Plastisur

Calidad del Sur

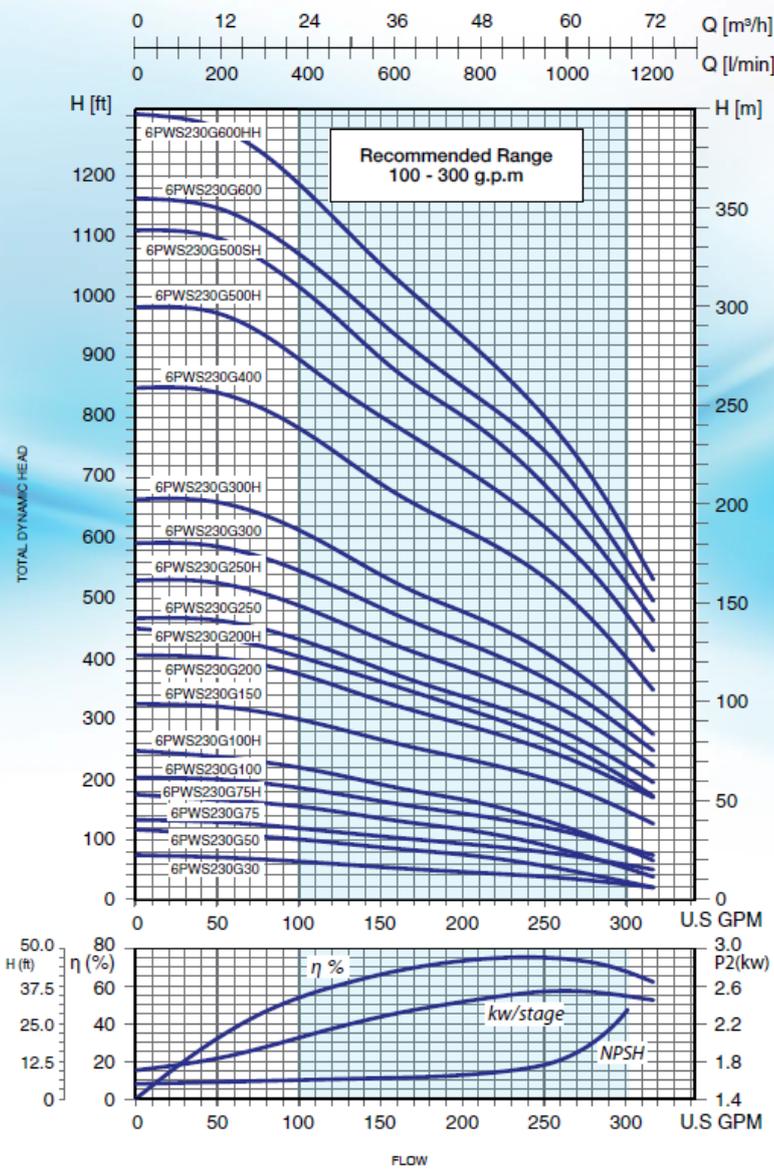
**Fuente:** Plastisur Perú, Ficha Técnica - Tubería PVC Agua a Presión, 2021.

ANEXO D

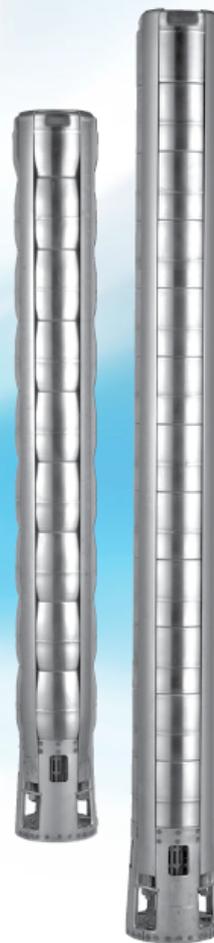
Ficha técnica de la bomba sumergible Pearl serie 6PWS230G



6PWS230G Performance Curves

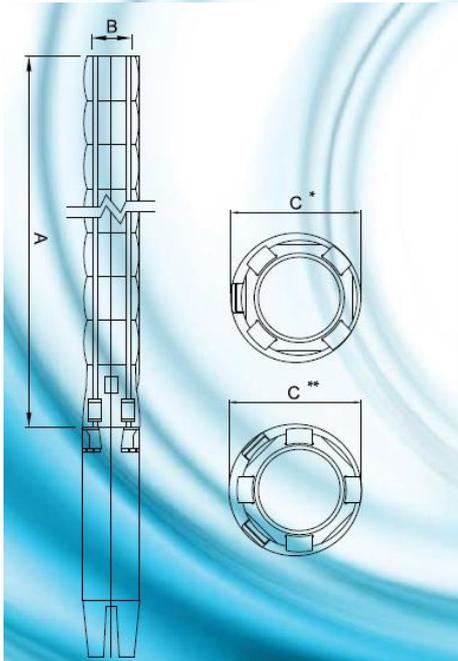


3" or 4" DISCHARGE



Selection Chart - 6PWS230G

MODEL	STAGES	MOTOR		Q = FLOW													
				l/min 0		189		378		567		756		945		1134	
		gpm 0		50		100		150		200		290		300			
		H = TOTAL HEAD IN METERS / TOTAL HEAD IN FEET															
		KW	HP	M	FT	M	FT	M	FT	M	FT	M	FT	M	FT	M	FT
6PWS230G30	1	2.2	3	23.2	76	21.3	70	18.9	62	16.8	55	13.7	45	12.2	40	7.6	25
6PWS230G50	2	3.7	5	36.0	118	31.1	102	30.5	100	25.9	85	22.9	75	17.7	58	9.1	30
6PWS230G75	2	5	7.5	38.4	126	39.6	130	36.0	118	32.0	105	29.0	95	24.4	80	15.2	50
6PWS230G75H	3	5	7.5	53.4	175	51.8	170	47.3	155	41.2	135	36.6	120	27.4	90	18.3	60
6PWS230G100	3	7.5	10	61.6	202	61.0	200	55.5	182	48.8	160	42.7	140	36.6	120	24.4	80
6PWS230G100H	4	7.5	10	73.8	242	72.6	238	67.1	220	57.9	190	50.3	165	39.6	130	23.8	78
6PWS230G150	5	11	15	98.2	322	97.6	320	91.5	300	80.8	265	72.6	238	61.0	200	44.2	145
6PWS230G200	6	15	20	122.3	401	122.0	400	112.8	370	100.6	330	88.4	290	74.7	245	57.9	190
6PWS230G200H	7	15	20	137.2	450	134.1	440	122.6	402	109.8	360	97.0	318	81.7	268	61.0	200
6PWS230G250	7	18.5	25	141.8	465	140.9	462	131.1	430	115.9	380	103.0	338	88.4	290	67.1	220
6PWS230G250H	8	18.5	25	161.6	530	156.1	512	147.9	485	131.1	430	115.9	380	100.6	330	76.2	250
6PWS230G300	9	22	30	180.5	592	177.4	582	165.2	542	146.3	480	131.1	430	112.2	368	85.4	280
6PWS230G300H	10	22	30	202.7	665	201.2	660	186.0	610	158.5	520	146.3	480	125.0	410	94.5	310
6PWS230G400	13	30	40	257.6	845	256.1	840	237.8	780	210.4	690	188.4	618	163.1	535	122.0	400
6PWS230G500H	15	37	50	298.8	980	295.7	970	274.4	900	243.9	800	218.9	718	189.0	620	143.3	470
6PWS230G500SH	17	37	50	338.4	1110	335.4	1100	310.4	1018	274.4	900	243.9	800	208.8	685	158.5	520
6PWS230G600	18	45	60	355.2	1165	349.1	1145	326.2	1070	291.2	955	259.1	850	225.6	740	170.7	560
6PWS230G600HH	20	45	60	396.3	1300	390.2	1280	361.3	1185	320.1	1050	283.5	930	243.9	800	184.5	605



Dimensions - 6PWS230G

MODEL	DIMENSIONS IN/MM						NET WEIGHT		
	A		B		C*				LBS
	IN	MM	IN	MM	IN	MM			
6PWS230G30	15 3/32	383	NPT 3" or 4"	5 3/8	146	5 27/32	148	15.3	6.9
6PWS230G50	19 9/32	496	NPT 3" or 4"	5 3/8	146	5 27/32	148	20.3	9.2
6PWS230G75	19 9/32	496	NPT 3" or 4"	5 3/8	146	5 27/32	148	20.3	9.2
6PWS230G75H	23 31/32	609	NPT 3" or 4"	5 3/8	146	5 27/32	148	25.4	11.5
6PWS230G100	23 31/32	609	NPT 3" or 4"	5 7/8	149	6	152	25.4	11.5
6PWS230G100H	28 7/16	722	NPT 3" or 4"	5 7/8	149	6	152	30.3	13.7
6PWS230G150	32 7/8	835	NPT 3" or 4"	5 7/8	149	6	152	35.4	16.0
6PWS230G200	37 11/32	948	NPT 3" or 4"	5 7/8	149	6	152	40.4	18.3
6PWS230G200H	41 25/32	1061	NPT 3" or 4"	5 7/8	149	6	152	45.5	20.6
6PWS230G250	41 25/32	1061	NPT 3" or 4"	5 7/8	149	6	152	45.5	20.6
6PWS230G250H	46 7/32	1174	NPT 3" or 4"	5 7/8	149	6	152	50.6	22.9
6PWS230G300	50 11/16	1287	NPT 3" or 4"	5 7/8	149	6	152	55.5	25.1
6PWS230G300H	55 1/8	1400	NPT 3" or 4"	5 7/8	149	6	152	60.5	27.4
6PWS230G400	68 15/32	1739	NPT 3" or 4"	5 7/8	149	6	152	75.8	34.3
6PWS230G500H	77 3/8	1965	NPT 3" or 4"	5 7/8	149	6	152	85.8	38.8
6PWS230G500SH	86 9/32	2191	NPT 3" or 4"	5 7/8	149	6	152	95.9	43.4
6PWS230G600	90 23/32	2304	NPT 3" or 4"	5 7/8	149	6	152	101.0	45.7
6PWS230G600HH	99 5/8	2530	NPT 3" or 4"	5 7/8	149	6	152	110.9	50.2

C\* : Pump maximum diameter when the pump is assembled with one power cord.  
 C\*\* : Pump maximum diameter when the pump is assembled with two power cords.

Fuente: Pearl Water Systems, Pearl 6PWS230G, 2018.

## ANEXO E

## Ficha técnica del motor eléctrico trifásico Pearl serie 6MWCP



Motores Sumergibles Encapsulados de 6"

Motores enfriados por agua, con estator encapsulado en resina.  
Dimensión de acople y brida cumplen con las normas NEMA.

## Características generales

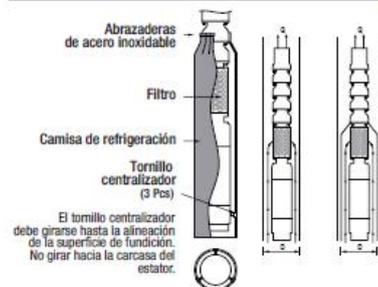
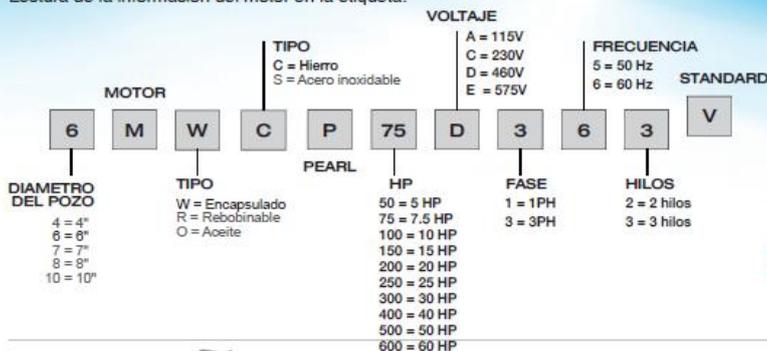
- 5,5-60 HP / 3PH. 220-230 Voltios / 60Hz
- Alta eficiencia garantiza ahorro en costos operacionales
- Carcasa y eje en acero inoxidable AISI304L (opcional: AISI316L)
- Soporte superior e inferior en hierro fundido con recubrimiento de alta resistencia (Opcional AISI304L / AISI316L).
- Rodamientos de empuje axial tipo Kingsbury lubricado por agua
- Protección IP68
- Deflector de arena
- Diafragma compensador de presión
- Aislamiento clase F
- Cable de alimentación removible
- Arranque directo DOL o de estrella/triángulo
- Revoluciones de funcionamiento variables por medio de variador de frecuencia (por encima de 30 Hz)
- Puede ser operado por Soft-Starter

## Límites de operación

- Máxima fluctuación de tensión:  $\pm 10\%$
- Temperatura máxima del agua: 95°F (35°C) con velocidad mínima de flujo de agua de 0,16 m/s (0,53 ft/s)
- Número máximo de arranques por hora: 20
- Profundidad máxima de inmersión: 1150 feet (350 m)
- Funcionamiento horizontal: 5 HP - 30 HP

## Nomenclatura

Lectura de la información del motor en la etiqueta.



## Uso de la camisa de refrigeración

El flujo de agua alrededor del motor permite la refrigeración de los motores sumergibles. Por esta razón el flujo de agua alrededor de motores tiene importancia vital durante la instalación de las bombas sumergibles. El caudal depende del diámetro y de la potencia del motor.

El factor más importante para una larga vida útil de trabajo en los motores sumergibles es una adecuada refrigeración del motor. La siguiente tabla muestra la velocidad de flujo requerida para enfriar de manera adecuada los motores.

Si se instala el motor en cuerpos de agua abiertos (por ejemplo en una piscina) o si el diámetro del pozo fuese mucho más ancho del diámetro del motor, hay que utilizar la camisa inductora de flujo para proporcionar las velocidades indicadas más abajo alrededor del motor.

Datos Eléctricos 60 Hz

6MWCP - MONOFASICO / 3 HILOS

MODELO	P <sub>n</sub>		CARGA AXIAL [kN]	VOLT. V	SF	I <sub>n</sub>			I <sub>n</sub> (SF)			N rpm	η %	Cos φ (% carga) cf	CABLE size	CABLE LC ft
	[kW]	[HP]				A			A							
					line	main	aux	line	main	aux						
6MWCP 75C163V	5.5	7.5	20	230	1.15	36.8	34.6	5.5	42.30	39.80	6.30	3445	73	0.89	3X10 AWG	12
6MWCP 100C163V	7.5	10	20	230	1.15	45.2	46.7	10.9	52.0	46.7	10.9	3450	75	0.94	3X10 AWG	12
6MWCP 150C163V	11	15	20	230	1.15	62.4	51.8	17.5	71.8	59.6	20.1	3460	78	0.96	3X10 AWG	12

CAPACITOR (μF)			WIRE / CABLE		US	PEARL
POWER	CAP. START	CAP. RUN				
7.5 HP	145	130	LINE OR COMMON WINDING		(Yellow) lead	(Black) lead
10 HP	280	140	MAIN WINDING		(Black) lead	(Gray) lead
15 HP	300	200	START OR AUXILIAR WINDING		(Red) lead	(Brown) lead
			GROUND		(Green) lead	(Yellow/Green) lead

6MWCP - TRIFASICO / 3 HILOS

MODELO	P <sub>n</sub>		CARGA AXIAL [kN]	VOLT. V	N rpm	I <sub>n</sub> A	I <sub>L</sub> A	η (% carga)			Cos φ (% carga)			TN Nm	TA Nm
	[HP]	[kW]						50	75	100	50	75	100		
6MWCP 50D363V	5.0	4	20	460	3470	7.8	32	71.1	75.9	77.7	0.73	0.79	0.83	10.9	18.1
6MWCP 50C363V				230	3455	16.3	66.9	70.0	75.0	77.0	0.73	0.79	0.83	11.2	19.0
6MWCP 75D363V	7.5	5.5	20	460	3430	9.8	52.5	73.5	78.6	80.0	0.79	0.83	0.88	15.2	29.2
6MWCP 75C363V				230	3415	20.5	109.8	72.5	77.5	79.0	0.79	0.83	0.88	15.5	30.1
6MWCP 100D363V	10	7.5	20	460	3460	14.2	75	69.6	75.6	78.1	0.74	0.81	0.85	20.5	44.8
6MWCP 100C363V				230	3445	29.7	156.8	69.0	74.7	77.1	0.79	0.83	0.88	20.8	45.7
6MWCP 150D363V	15	11	20	460	3490	18.0	97.2	72.6	78.1	85.5	0.75	0.81	0.90	30.1	71.0
6MWCP 150C363V				230	3475	37.6	203.2	71.6	77.2	84.5	0.75	0.81	0.90	30.4	71.9
6MWCP 200D363V	20	15	20	460	3485	26.4	195	72.3	77.9	80.1	0.77	0.81	0.86	41.1	98.0
6MWCP 200C363V				230	3470	55.2	407.7	71.5	77.0	79.2	0.77	0.81	0.86	41.4	98.9
6MWCP 250D363V	25	18.5	20	460	3490	34.1	265	71.8	77.5	80.0	0.74	0.80	0.85	50.5	138.0
6MWCP 250C363V				230	3475	71.3	554.1	70.9	76.5	79.0	0.74	0.80	0.85	50.8	138.9
6MWCP 300D363V	30	22	20	460	3485	39.5	300	74.4	79.3	81.1	0.75	0.80	0.86	60.2	157.0
6MWCP 300C363V				230	3470	82.6	627.3	73.4	79.3	80.1	0.75	0.80	0.86	60.5	157.9
6MWCP 400D363V	40	30	26.5	460	3490	55.6	444	73.1	78.4	80.7	0.74	0.80	0.84	81.6	240.0
6MWCP 500D363V	50	37	26.5	460	3480	69.0	516	73.4	78.6	80.8	0.70	0.78	0.83	100.7	249.0
6MWCP 600D363V	60	45	26.5	460	3480	81.0	559	75.4	80.1	81.9	0.73	0.80	0.85	123.5	286.0

P2: Potencia nominal  
 V: Tensión nominal  
 SF: Factor de servicio  
 I<sub>n</sub>: Corriente normal  
 I<sub>s</sub>/I<sub>n</sub>: Corriente de arranque-corriente nominal  
 Cs/Cn: Torque de arranque-Torque nominal  
 P1: Potencia absorbida  
 N: RPM Revoluciones por minuto  
 Cos φ: Factor de potencia  
 η: Rendimiento  
 C: Condensador  
 O: Sección del cable  
 LC: Longitud de cable

Fuente: Pearl Water Systems, Submersible Motors, 2023.

## ANEXO F

### Ficha técnica del gotero Click Tif

#### Click Tif - PC & PCNL

#### Additional Features

- **No Environmental and Chemical Effects** : UV stabilised does not have any environmental effects. Resistant to chemicals used in agriculture.
- **Assured Quality** : Conforming to Indian Standard IS13487 and International Standard ISO 9260.
- **Excellent CVm, Manufacturer's Coefficient of Variation**: Manufacturing coefficient of variation, CVm ≤ 4% ensures high field emission uniformity.
- **Color Coded Cap** : Color coded cap facilitates easy identification of emitter flow rate.



#### Applications

- For orchards, vineyards, greenhouses, nurseries and landscape.
- For pulse irrigation and irrigation in soilless conditions
- Prevents surplus drainage in low places (PCNL model)
- For areas with harsh topographical conditions.
- Subsurface installation protects dripper from animal damage
- For irrigation of pot-plants with single, two, four or multiple outlets.

#### Operating Specifications

- Maintain the operating pressure within the pressure regulating range.
- While using PCNL model, make sure that static pressure at the dripper shall not be more than closing pressure i.e. 0.3 kg/cm<sup>2</sup>.
- Shall be used with "Lateral Leakage Prevention Device (LLPD) for static head more than closing pressure.
- Filtration recommendation 130 micron or less. Actual quality of filtration can be decided by quality of source water.
- For multiple outlets through single dripper, use multioutlet connector alongwith stake dripper.
- Please refer to our "Maintenance Manual" for more details.

#### Specifications

Discharge (lph)	Discharge (gph)	Color of cover	Emitter exponent (x)	Flow coefficient (k)	Range of pressure regulation, kg/cm <sup>2</sup>
1.3	0.34	Grey	0.04	1.3	0.5 - 4.0
2.0	0.5	Brown	0.03	2.0	0.5 - 4.0
3.0	0.8	Blue	0.03	3.0	0.5 - 4.0
4.0	1.0	Black	0.04	4.0	0.5 - 4.0
8.0	2.1	Green	0.04	8.0	0.5 - 4.0
12.0	3.1	Red	0.04	12.0	0.5 - 4.0

Flow equation  $q = kH^x$ ,  $q$  = Discharge, lph,  $H$  = Pressure head, kg/cm<sup>2</sup>,  $k$  = Flow coefficient,  $x$  = Emitter exponent.

Note: Color of housing: Green - For PC option, Grey - For PCNL option

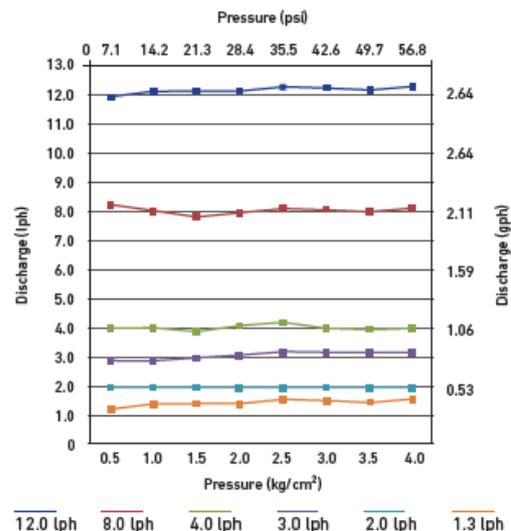
- For Click Tif - PCNL model

Opening Pressure - 0.8 kg/cm<sup>2</sup>

Closing Pressure - 0.3 kg/cm<sup>2</sup>

- Recommended punch size - 2.5 mm (Code-ITC)

#### Performance Graph



Note: Tested under standard test conditions.

#### Ordering Specifications

Taper lock		Barb outlet 3/5		Body	Flow
PC Green housing	PC CNL Grey housing	PC Green housing	PC CNL Grey housing	color	rate lph
CTPC13T	CTNL13T	CTPC13B	CTNL13B	Grey	1.3
CTPC20T	CTNL20T	CTPC20B	CTNL20B	Brown	2
CTPC30T	CTNL30T	CTPC30B	CTNL30B	Blue	3
CTPC40T	CTNL40T	CTPC40B	CTNL40B	Black	4
CTPC80T	CTNL80T	CTPC80B	CTNL80B	Green	8
CTPC12T	CTNL12T	CTPC12B	CTNL12B	Red	12

**Fuente:** Jain Irrigation Systems, Click Tif HD-PC & PCNL, 2021.

**ANEXO G**  
**Ficha técnica del inversor de bombeo solar JNP15KH**

Item \ Model	JNP11KH-V5	JNP15KH-V5	JNP18K5H-V5
<b>DC input</b>			
Max. input DC voltage	880V		
Recommended MPPT voltage	460~850V		
Max. input DC current	24.4A	33.3A	41.1A
MPPT efficiency	>99%		
Max. input DC voltage	1		
<b>AC input</b>			
AC input voltage range	330~460Vac (3PH)		
AC input voltage frequency	50Hz/60Hz		
<b>AC output</b>			
Max. applicable motor output power	11kW	15kW	18.5kW
Rated output voltage	380~460Vac (3PH)		

Output frequency range	0~50/60Hz		
Rated output current	21A	29A	36A
<b>Mechanical data</b>			
Weight	IP65		
Item \ Model	-25~60℃		
type of cooling	风冷		
Max. input DC voltage	LCD		
Recommended MPPT voltage	RS485/GPRS		
Max. input DC current	3000 米, 3000 米以上降额运行		
MPPT efficiency	<50dB		
<b>AC input</b>	EN 50178; IEC/EN 62109-1;IEC61800		
AC input voltage range	260/518,5/173(mm)		
AC input voltage frequency	17.5kg		

**Fuente:** Jntech Renewable Energy, Solar Pump Inverter - User Manual, 2021.

**ANEXO H**  
**Galería fotográfica**

Vista panorámica del Fundo Delicia



**Fuente:** El autor.

Cerco perimétrico del Fundo Delicia



**Fuente:** El autor.

Pozo de agua subterránea



**Fuente:** El autor.

## ANEXO I Datos hidrogeológicos del valle Zaña

### Morfología de la napa freática en el valle Zaña

Zona	Distritos	Sector	Sentido Flujo	Gradiente Hidráulica (%)	Rango Cota (msnm)
I	Oyotún	El Naranjo – Collao	SE - NO	1,10	200 – 178
		Chumbenique – San Carlos	NE - SO	0,70	148 – 134
	Nueva Arica	Culpón – Zapotal	SE - NO	0,55	160 – 150
		La Viña – Pampa San Pedro	NE - SO	0,62	120 – 106
II	Cayaltí	Viña Tercera – Guayaquil	NE - SO	0,57	98 – 88
		Ana María – Santa Luisa	NE - SO	0,40	74 – 64
		Santa Rosa	NE - SO	0,92	80 – 62
	Zaña	Popana Alto – Saltur	E - O	1,15	76 – 54
		Porvenir Alto – La Otra Banda	NE - SO	0,60	54 – 42
V	Lagunas	Úcupe – El Guabo	NE – SO	0,18	36 – 32
		Leonera – Rafan Pueblo	NE – SO	0,31	24 – 16
		Peroles - Chirinos	NE - SO	0,34	14 - 6

**Fuente:** Instituto Nacional de Recursos Naturales, 2006.

### Profundidad de los niveles estáticos en el valle Zaña.

Zona	Sector	Nivel Estático (m)
I	Huaca Quiñones – Chumbenique – San Carlos	2.09 – 8.90
	La Compuerta – Collao – Vista Alegre	1.15 – 15.00
	El Triunfo – Pampa Nueva Arica – El Naranjo	1.84 – 17.60
	Pampa San Pedro – Viña Segunda – Huaca La Ternera	1.85 – 12.30
II	Cafetal – Corral de Palos, Cojal Alto	0.50 – 13.42
	Cerro León – Cayaltí Pueblo – Santa Rosa	0.70 – 19.45
	Las Adelinas – Santa Sofía – La Curva	0.65 – 4.80
	Saltur – Popán Alto – Santa Rosa Baja	1.35 – 16.10
	Zaña Pueblo – Chacarilla – Naylamp – San Luis	0.15 – 23.20
	Salitral – Leonera – Porvenir Alto	1.35 – 5.05
III	San Nicolas – El Colocho – San Rafael	4.43 – 21.00
	Mocúpe Nuevo – Úcupe – Mocúpe Tradicional	0.43 – 13.28
	Rafán Pueblo – San Luis Carrizal – Comunidad Laguna	0.50 – 6.00

**Fuente:** Instituto Nacional de Recursos Naturales, 2006.

### Nivel estático en pozos en el distrito de Nueva Arica.

IRHS	NOMBRE DEL POZO	SECTOR	COTA TERRENO (m.s.n.m.)	PUNTO DE REFERENCIA (m)	MEDICIÓN (m)	PROFUNDIDAD DEL NIVEL ESTÁTICO (m)	COTA NIVEL ESTÁTICO
2	Centro Poblado Culpón	Centro Poblado Culpón	148.00	0.74	2.58	1.84	146.16
4	José Domingo Santa María Chapoñan	Cacerío Dos Corrales	177.90	0.60	7.53	6.93	170.97
8	Asociación Ganadera JJAB	Pampas de Nueva Arica	175.00	0.00	15.10	15.10	159.90
9	Manuel Cabrera Bautista	Viña de Zarrapo	132.00	0.00	12.30	12.30	119.70
13	Santos Cruzado	Zapotal	172.00	0.00	10.30	10.30	161.70
16	Jose Irene Silva Galvez	Collao - lote 15	182.00	0.20	8.00	7.80	174.20
19	Asociación Ganadera JJAB	Nueva Arica	184.00	-0.80	13.07	13.87	170.13
22	Pueblo de Nueva Arica	Nueva Arica	188.80	0.00	3.00	3.00	185.80
25	Elmer Rivasplata Mendoza	Nueva Arica	185.00	0.00	17.60	17.60	167.40
33	Empresa Agroindustrial Cayalti S.A.A	Viña Segunda	104.50	0.00	1.85	1.85	102.65
34	Empresa Agroindustrial Cayalti S.A.A	Viña Tercera	105.00	0.40	11.60	11.20	93.80
35	Empresa Agroindustrial Cayalti S.A.A	Guayaquil Bajo	86.00	0.00	4.00	4.00	82.00

**Fuente:** Instituto Nacional de Recursos Naturales, 2006.

### Parámetros hidráulicos de pozos en Nueva Arica – Oyotún.

Pozo IRHS	Transmisividad ( $T \times 10^{-2}$ )		Permeabilidad ( $K \times 10^{-4}$ )		s (%)
	Descenso (m <sup>2</sup> /s)	Recuperación (m <sup>2</sup> /s)	Descenso (m/s)	Recuperación (m/s)	
14/01/10 – 7 **	2,40	3,50			5,00

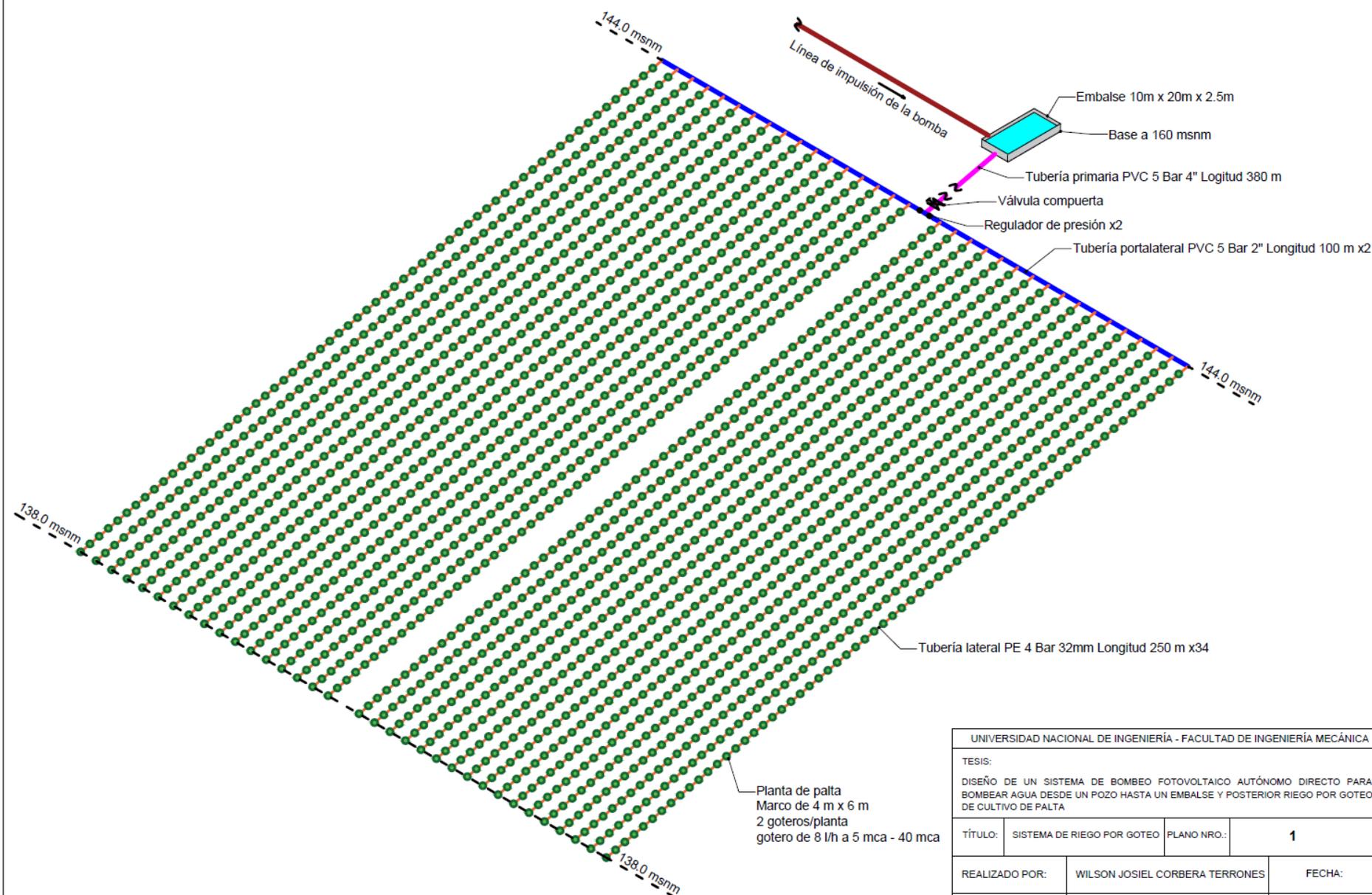
\* Prueba realizada por la IRH – 2005

\*\* Prueba ejecutada por la DGAS - 1974

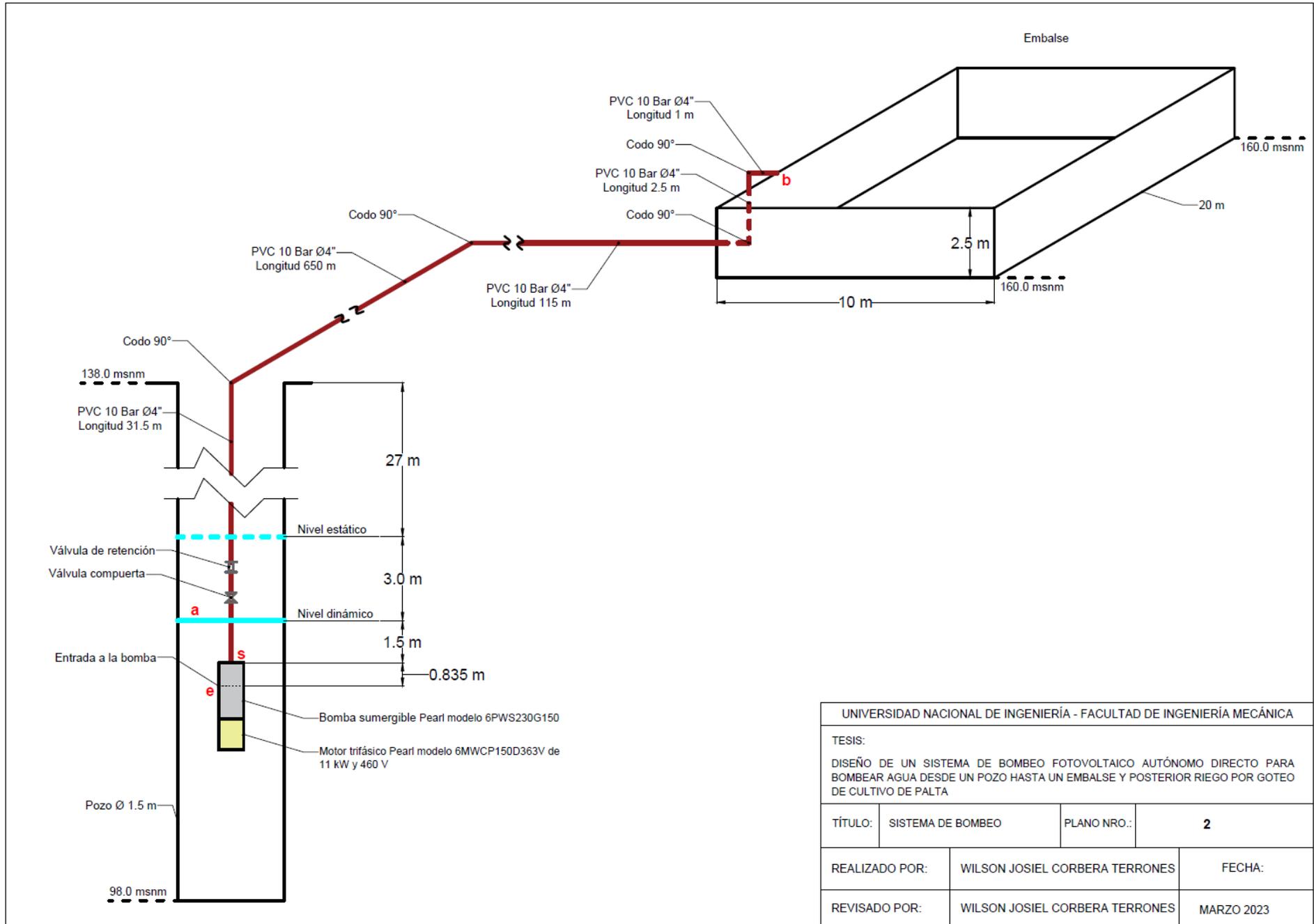
(P) Piezómetro

**Fuente:** Instituto Nacional de Recursos Naturales, 2006.

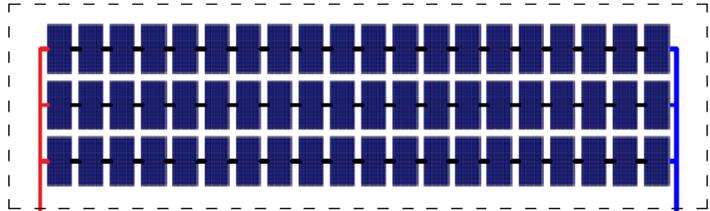
**ANEXO J**  
**Planos**



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA - FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA		
TESIS: DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO DIRECTO PARA BOMBEAR AGUA DESDE UN POZO HASTA UN EMBALSE Y POSTERIOR RIEGO POR GOTEIO DE CULTIVO DE PALTA		
TÍTULO:	SISTEMA DE RIEGO POR GOTEIO	PLANO NRO.: <b>1</b>
REALIZADO POR:	WILSON JOSIEL CORBERA TERRONES	FECHA:
REVISADO POR:	WILSON JOSIEL CORBERA TERRONES	MARZO 2023



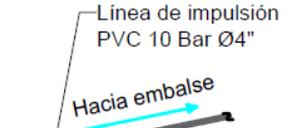
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA - FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA			
TESIS:			
DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO DIRECTO PARA BOMBEAR AGUA DESDE UN POZO HASTA UN EMBALSE Y POSTERIOR RIEGO POR GOTEO DE CULTIVO DE PALTA			
TÍTULO:	SISTEMA DE BOMBEO	PLANO NRO.:	<b>2</b>
REALIZADO POR:	WILSON JOSIEL CORBERA TERRONES	FECHA:	
REVISADO POR:	WILSON JOSIEL CORBERA TERRONES		MARZO 2023



60 paneles Bauer 370 W.  
 Serie: 20.  
 Paralelo: 3.  
 Potencia total nominal: 22.2 kW.



Inversor solar 15 kW.  
 880 V<sub>DC</sub> Max.  
 33.3 A<sub>DC</sub> Max.  
 Salida 380 V - 460 V Trifásica.



Línea de impulsión  
 PVC 10 Bar Ø4"  
 Hacia embalse



Bomba sumergible Pearl 6PWS230G150.  
 Motor: 11 kW.  
 Descarga: 4".

Motor eléctrico trifásico Pearl 6MWCP150D363V.  
 Potencia: 11 kW.  
 Voltaje: 460 V.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA - FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA			
TESIS:			
DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO DIRECTO PARA BOMBEAR AGUA DESDE UN POZO HASTA UN EMBALSE Y POSTERIOR RIEGO POR GOTEO DE CULTIVO DE PALTA			
TÍTULO:	SISTEMA FOTOVOLTAICO	PLANO NRO.:	<b>3</b>
REALIZADO POR:	WILSON JOSIEL CORBERA TERRONES	FECHA:	
REVISADO POR:	WILSON JOSIEL CORBERA TERRONES		MARZO 2023