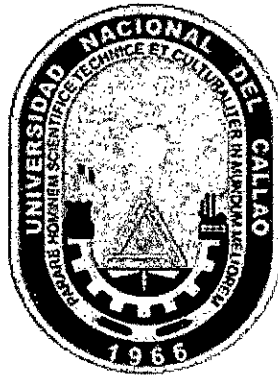


ABR 2019



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN



INFORME FINAL DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
“CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELO
(MBPC) APLICADO A UN SISTEMA DE BOMBEO
SOLAR FOTOVOLTAICO”

AUTOR: DR. ING. NICANOR RAÚL BENITES SARAVIA

(PERIODO DE EJECUCIÓN: Del 01/03/2018 al
28/02/2019)

(RESOLUCIÓN RECTORAL N° 226-2018-R)

CALLAO, (2019)

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación está dedicado a mi amada Silvia, a mis pequeños hijos Thiago y Liam, y a mi querida madre Margarita Saravia de Benites, por sus consejos y ejemplo de vida.



AGRADECIMIENTO

A mi Dios por darme la vida, salud, energía y entereza para seguir adelante.

A la memoria de mi padre Nicanor Benites, quien fue ejemplo de bondad y sabiduría.



ÍNDICE	1
TABLAS DE CONTENIDO	1
CONTENIDO DE FIGURAS	4
CONTENIDO DE TABLAS	7
RESUMEN	8
ABSTRACT	9
INTRODUCCIÓN	10
I. Planteamiento del Problema	11
1.1 Descripción de la realidad problemática	11
1.2 Formulación del problema	11
1.3 Objetivos	12
1.3.1 Objetivo general	12
1.3.2 Objetivos específicos	12
1.4 Limitantes de la investigación	13
II MARCO TEÓRICO	14
2.1 Antecedentes	14
2.1.1 Antecedentes internacionales	14
2.1.2 Antecedentes nacionales	15
2.2 Bases teóricas	16
2.2.1 Energía solar	16
2.2.2 Sistema de bombeo solar fotovoltaico	32
2.2.3 Control Proporcional Integral Derivativo (PID)	54
2.2.4 Control Predictivo Basado en Modelo (MBPC)	63
2.3 Marco conceptual	74
2.4 Definición de términos básicos	75
III HIPÓTESIS Y VARIABLES	77
3.1 Hipótesis	77
3.1.1 Hipótesis general	77
3.1.2 Hipótesis específicas	77
3.2 Definición conceptual de variables	77
3.2.1 Operacionalización de las variables	78

IV.	DISEÑO METODOLÓGICO	80
4.1	Tipo y diseño de investigación	80
4.1.1	Modelado del Generador Solar Fotovoltaico	80
4.1.2	Diseño del regulador de carga para la alimentación de la bomba solar DC	88
4.1.3	Dimensionamiento y modelado del sistema hidráulico	91
4.1.4	Diseño del Controlador PID de nivel de agua en el tanque de almacenamiento	100
4.1.5	Diseño del Control Predictivo Basado en Modelo (MBPC) de nivel de agua en el tanque de almacenamiento	103
4.2	Método de investigación	105
4.3	Población y muestra	105
4.4	Lugar de estudio y periodo desarrollado	105
4.5	Técnicas e instrumentos para la recolección de la información	105
4.6	Análisis y procesamiento de datos	106
V.	RESULTADOS	107
5.1	Resultados del modelado del del generador solar fotovoltaico	107
5.2	Resultados del Control PID del convertidor DC/DC Buck	108
5.3	Resultados del Control PID de nivel de agua	110
5.4	Resultados del Control MBPC de nivel de agua	110
VI	DISCUSION DE RESULTADOS	112
6.1	Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	112
6.1.1	Del modelado del sistema de generación solar fotovoltaica	112
6.1.2	De la aplicación del control PID al modelo del sistema de Acondicionamiento DC/DC	113
6.1.3	De la aplicación del Control Predictivo Basado en Modelo (MBPC) al modelo de un sistema hidráulico	113
6.2	Contrastación de los resultados con otros estudios similares	114
6.3	Responsabilidad ética de acuerdo con los reglamentos vigentes	115

CONCLUSIONES	116
RECOMENDACIONES	117
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	118
ANEXOS	121
• ANEXO A: Matriz de consistencia	122
• ANEXO B: Modelado del generador solar fotovoltaico	123
• ANEXO C: Hoja de datos del panel solar fotovoltaico CORA-250	124
• ANEXO D: Características eléctricas de bombas solares de superficie GREALTEC.	127
• ANEXO E: Programa de Control PID del convertidor Buck (elaboración propia)	128
• ANEXO F: Programa de Control PID de nivel de agua (elaboración propia)	129
• ANEXO G: Programa de Control MBPC de nivel de agua (elaboración propia)	130

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura N° 2.1 Zonas de simulación de las 8 estaciones base	22
Figura N° 2.2: Componentes de una instalación fotovoltaica	23
Figura N° 2.3: Generación eléctrica debido al efecto fotoeléctrico en la unión p-n de una celda fotovoltaica	25
Figura N° 2.4: Disposición de paneles solares en serie y paralelo	26
Figura N° 2.5: Batería de plomo usada en aplicaciones de energía renovable	29
Figura N° 2.6: Batería de GEL 12V 22Ah	30
Figura N° 2.7: Batería de AGM 12V 22Ah	31
Figura N° 2.8: Inversor comercial de 1000W	32
Figura N° 2.9: Detalle de la capa freática de un pozo	33
Figura N° 2.10: Etapas de un sistema de bombeo FV	34
Figura N° 2.11: Etapas de un sistema de bombeo FV	35
Figura N° 2.12: Instalación conectada a la red eléctrica	36
Figura N° 2.13: Instalación aislada de la red eléctrica	37
Figura N° 2.14: Elementos de una bomba centrífuga	40
Figura N° 2.15: Alturas para considerar en una instalación con bomba centrífuga	41
Figura N° 2.16: Bomba centrífuga de superficie Pedrollo	42
Figura N° 2.17: Bomba centrífuga sumergible SCS 10-165-60 BL	42
Figura N° 2.18: Bomba flotante VL 36	43
Figura N° 2.19: Estructura básica de los convertidores estáticos de potencia	45
Figura N° 2.20: Pozo en una formación acuífera	50
Figura N° 2.21: Diagrama de bloques simplificado del Control PID en L.C.	54
Figura N° 2.22: Diagrama de bloques del Controlador PID y las señales asociadas	55

Figura N° 2.23: Diagrama de bloques detallado del sistema de Control PID ideal	56
Figura N° 2.24: Estructura del sistema de control PI-D	57
Figura N° 2.25: Estructura del sistema de control I-PD	59
Figura N° 2.26: Estructura del sistema de control PID	61
Figura N° 2.27: Estructura del MBPC	68
Figura N° 2.28: Diagrama de bloques del Controlador Predictivo	73
Figura N° 2.29: Diagrama de bloques general del sistema de bombeo FV	74
Figura N° 4.1: Circuito eléctrico de una celda fotovoltaica con carga	81
Figura N° 4.2: Modelo simplificado de una celda fotovoltaica	83
Figura N° 4.3: Modelo simplificado compacto del generador solar fotovoltaico	86
Figura N° 4.4: Model Properties de Matlab para el generador solar fotovoltaico	87
Figura N° 4.5: Esquema de un convertidor DC/DC Buck	88
Figura N° 4.6: Esquema en lazo cerrado del convertidor Buck	90
Figura N° 4.7: Esquema de Control PID del Convertidor Buck en Simulink	90
Figura N° 4.8: Esquema del sistema hidráulico con conexión al generador solar fotovoltaico	93
Figura N° 4.9: Diagrama esquemático del tanque de almacenamiento	96
Figura N° 4.10: Diagrama de bloque del sensor de nivel	99
Figura N° 5.1: Respuesta V-I del panel fotovoltaico	107
Figura N° 5.2: Respuesta P-V del panel fotovoltaico	107
Figura N° 5.3: Respuesta V-I del Generador Solar Fotovoltaico	108
Figura N° 5.4: Respuesta a una referencia de 24 voltios	109
Figura N° 5.5: Respuesta a una referencia variante de 10 a de 24 voltios	109
Figura N° 5.6: Respuesta del controlador PI frente a la respuesta de lazo abierto	110

Handwritten mark

Figura N° 5.7: Altura controlada mediante Control Predictivo
Basado en Modelo (MBPC) y la tensión generada por el MBPC

111



CONTENIDO DE TABLAS

Tabla N° 2.1: Ubicación geográfica, récord histórico y tipo de instrumento de irradiación solar utilizado	20
Tabla N° 2.2: Valores de las principales variables climáticas de las estaciones base	21
Tabla N° 2.3: Eficiencia de las tecnologías de celdas fotovoltaicas más comerciales	25
Tabla N° 2.4: Valores del coeficiente de Hazen-Williams para diferentes tipos de tuberías	52
Tabla N° 3.1: Operacionalización de las variables	79
Tabla N° 4.1: Características eléctricas del panel solar monocristalino SFM 90W de Singfo Solar Energy Sci & Tech Co., Ltd	81
Tabla N° 6.1: Resumen de resultados de simulación de las dos técnicas de control	114

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación, se aborda el diseño y la simulación de un sistema de Control Predictivo Basado en Modelo (MBPC) aplicado a un sistema de bombeo solar fotovoltaico, para zonas o poblados alejados de los lugares de servicio de agua y de electricidad, conformando un sistema autónomo.

El trabajo consta de varias partes, que se pueden resumir en el modelado de un generador solar fotovoltaico, el modelado y diseño de un regulador de carga controlado por PID, un banco de baterías, el modelado del sistema hidráulico de bombeo, compuesto por el tanque de extracción, el tanque de almacenamiento, la bomba, el sensor de nivel de agua y finalmente el MBPC. Uno de los objetivos fundamentales es el control de nivel del tanque de almacenamiento del sistema de bombeo fotovoltaico, usando para ello el MBPC, que comparado con la respuesta de un controlador PI, tiene una respuesta óptima.

La aplicación de las herramientas matemáticas de modelado y diseño de cada una de las partes del sistema, se han tratado adecuadamente, con la finalidad de lograr su interrelación e integración. Las simulaciones del comportamiento del sistema de control se realizan usando Matlab y Simulink.

El presente trabajo se considera como una primera fase de un proyecto mayor, que sería el de no solo simular; sino implementar en poblados de bajos recursos, y en el que el líquido elemento es vital.

PALABRAS CLAVES: Generador solar fotovoltaico, Regulador de carga Buck, Sistema hidráulico, Control PID y MBPC.

ABSTRACT

In the present work of investigation, the design and the simulation of a system of Predictive Control Based on Model (MBPC) applied to a system of photovoltaic solar pumping, for zones or towns away from the places of service of water and electricity is approached, forming an autonomous system.

The work consists of several parts, which can be summarized in the modeling of a photovoltaic solar generator, the modeling and design of a charge controller controlled by PID, a bank of batteries, the modeling of the hydraulic pumping system, composed of the tank of extraction, the storage tank, the pump, the water level sensor and finally the MBPC. One of the fundamental objectives is the level control of the storage tank of the photovoltaic pumping system, using the MBPC, which, compared to the response of a PI controller, has an optimal response.

The application of the mathematical tools of modeling and design of each one of the parts of the system, have been adequately treated, in order to achieve their interrelation and integration. Simulations of the behavior of the control system are made using Matlab and Simulink.

The present work is considered as a first phase of a larger project, which would be to not only simulate; but to implement in villages with low resources, and in which the liquid element is vital.

KEYWORDS: Photovoltaic solar generator, Buck charge regulator, Hydraulic system, PID control and MBPC.

INTRODUCCION

En el Perú actual, a pesar de los esfuerzos en reducir las brechas de desigualdad, particularmente en los servicios de agua para consumo humano, regadío y otros, ha sido insuficiente. Tanto en la costa como en la sierra del Perú existen necesidades apremiantes de agua de calidad para consumo humano y para regadío en zonas desiertas o zonas alejadas de los lugares de atención de la sociedad de regantes.

El presente trabajo de investigación va dirigido a una primera fase que es la de diseño y simulación de sistemas de bombeo usando Control Predictivo Basado en Modelo (MBPC), que abarca varias etapas, desde el diseño del generador solar fotovoltaico, el diseño del regulador de carga, el diseño del sistema hidráulico y el control de nivel de agua en el tanque de almacenamiento, que para efectos comparativos con el Control MBPC de nivel de agua, se diseña y simula el control PI correspondiente.

Espero que este trabajo de investigación sirva para que, en un futuro trabajo, se pueda implementar en alguna zona sensible, en la que la necesidad del líquido elemento pueda satisfacer necesidades de agua potable, extraído de pozos de filtración subterránea.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad problemática

En muchos lugares remotos del Perú, particularmente en la costa, no se cuenta con el suministro de agua, sea esta para consumo humano o regadío, lo que dificulta el asentamiento de mayor número de pobladores en estas zonas, haciendo difícil por no decir imposible su desarrollo.

Particularmente en diferentes zonas de la costa del Perú, existen asociaciones que sueñan con disponer de agua para consumo humano y para regadío de sus plantaciones; sin embargo, la realidad es dura, toda vez que muchas de estas asociaciones o grupos humanos no cuentan con medios económicos para hacer realidad sus proyectos, entre ellas, un sistema de bombeo de agua desde el subsuelo, que les permita el desarrollo agropecuario y/o agroindustrial.

El uso de agua de cisterna para tareas de regadío, resultan demasiado costoso, por lo que su uso generalmente es limitado, lo que resulta en que los costos de inversión son mucho mayores a los ingresos brutos de la producción. Por otro lado, la opción diésel tampoco resulta atractivo, debido a varias desventajas, tales como: combustible caro, suministro intermitente, problemas de ruido, suciedad y humos entre otras. Todo esto conlleva a la desmoralización, cansancio y abandono de las tierras por parte de los pobladores y pequeños agricultores.

1.2 Formulación del problema

La necesidad de contar con un sistema de bombeo de agua para abastecer el consumo humano, suministro de agua para ganado y regadío de pequeños grupos de usuarios, financiados por ONGs, municipalidades o gobiernos regionales, con características de funcionamiento autónomas,

plantea la necesidad de diseñar y simular un sistema de Control Predictivo de bombeo solar fotovoltaico.

Problema general

¿El diseño y simulación del Control Predictivo Basado en Modelo (MBPC) permitirá un desempeño óptimo en el control de nivel de agua de un sistema de bombeo fotovoltaico?

Problemas específicos

P.E.1: ¿Es posible modelar y simular el sistema de generación solar fotovoltaica?

P.E.2: ¿Es posible diseñar y simular el sistema de acondicionamiento de potencia en DC, usando Control PID?

P.E.3: ¿Es posible diseñar y simular el sistema de Control Predictivo Basado en Modelo (MBPC) de nivel de agua?

1.3 Objetivos y Alcances de la Investigación

1.3.1 Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo es diseñar y simular un Sistema de Bombeo Fotovoltaico.

1.3.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos del presente trabajo son:

O.E.1. Modelar y simular el sistema de generación solar fotovoltaica.

O.E.2. Diseñar y simular el sistema de Control PID del sistema de acondicionamiento de potencia en DC.

O.E.3. Diseñar y simular el sistema de Control Predictivo de nivel de agua en el tanque de almacenamiento.

1.4 Limitantes de la investigación

La única limitante que podría mencionarse es que, no existe información precisa sobre el tema del presente trabajo de investigación, que permita una mejor comparación sobre los resultados propios con las de otros autores.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

2.1.1 Antecedentes internacionales

Entre algunos trabajos internacionales relacionados al presente trabajo de investigación podemos citar:

1. En la Tesis Doctoral "Modelado y análisis de sistemas fotovoltaicos", de Daniel Guash Murillo, Barcelona, abril del 2003, se formulan modelos de sistemas fotovoltaicos, que involucra paneles solares, baterías, reguladores del bus de continua y alterna, controladores de conexión a la red eléctrica, planteados de la forma mas general; así como las estructuras de implementación de sistemas autónomos y conectados a la red eléctrica. Para efectos de simulación, usa Matlab.
2. En el Proyecto de Fin de Carrera "Modelo del generador de un sistema de bombeo fotovoltaico", de Bruno Ramos Sánchez, Madrid, setiembre del 2014, se plantea el modelo simplificado del panel solar y que lo contrasta con datos del fabricante. Asimismo, presenta un diseño de sistema de bombeo fotovoltaico directo, es decir sin el uso de controladores.
3. En el Proyecto de fin de carrera "Prototipo de sistema de bombeo fotovoltaico para proyectos de cooperación al desarrollo con tecnologías apropiadas", de David Arijá González, Madrid, 2010, se presenta el diseño y la implementación de un prototipo de bombeo fotovoltaico usando bombas centrífugas sumergibles en AC.
4. En la tesis de pregrado "Diseño e implementación del control predictivo en tanques acoplados", de Edison Oswaldo Moromenacho Oscullo y Cristina Zulay Rosero, Quito, abril del 2010, presenta el diseño y la implementación de un sistema de dos tanques de agua

acoplados, siendo controlada la altura del segundo tanque, mediante Control Predictivo en forma adecuada.

2.1.2 Antecedentes nacionales

Entre los trabajos a nivel nacional, podemos citar los siguientes:

1. En la tesis de pregrado "Análisis y modelamiento para un módulo fotovoltaico, basado en un sistema de generación de energía renovable microgrid en la ciudad de puno", de Wilmer Sagua Mamani, Puno, Perú 2017, presenta el modelamiento y análisis de sistemas fotovoltaicos y su integración en una microgrid a pequeña escala, para ello hace uso de Matlab.
2. En la tesis "Desarrollo de un Controlador Predictivo Basado en Modelo para plataforma industrial", de José Carlos Oviden Semino, Piura, Perú mayo del 2016, presenta el modelo y la implementación de dos módulos, el primero que es un sistema de cuatro tanques, y el segundo es un secador de disco rotatorio usado en la industria de harina de pescado. Sus resultados de simulación son interesantes debido al desempeño de dos técnicas de Control Predictivo.
3. En la tesis "Modelación, Simulación, Control PID y Control Predictivo de un secador rota disco en la industria pesquera", de César Augusto Vallejos Romaña, Piura, Perú abril del 2013, presenta el diseño de controladores PID con una estructura del Predictor Smith y un control predictivo lineal, denominado GPC (Control Predictivo Generalizado), para el control de humedad del secador rota disco, con muy buenos resultados.
4. En el artículo "Modelado, Simulación y Validación de un Sistema Híbrido (fotovoltaico-batería) Autónomo para suministrar energía eléctrica a una vivienda con estación de bombeo de agua para uso doméstico y agrícola: parte 1", de Serafin F. Sosa Barrera y Oswaldo

M. Morales Taquiri, se presenta un resultado interesante en la parte del generador solar; sin embargo, no muestra resultados para el sistema de bombeo.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Energía Solar

El sol es la principal fuente de vida en la tierra, y por consiguiente la principal fuente de energía, de la cual solo consumimos la millonésima parte.

Perpiñán (2013) sostiene que:

"La radiación emitida por el Sol atraviesa el espacio vacío en todas direcciones. No sufre pérdidas apreciables por interacción con medios materiales. Sin embargo, la irradiancia solar, definida como la densidad de flujo radiante solar¹, es atenuada de acuerdo con el cuadrado de la distancia. Parte de esta irradiancia solar es interceptada por el planeta Tierra. Dada la relación entre la distancia con el Sol y el tamaño de nuestro planeta, es razonable asumir que su valor es constante en toda la superficie exterior de nuestra atmósfera" (2013, p. 25).

Si consideramos la superficie interior de nuestra atmósfera, se conoce que la distancia entre la Tierra y el Sol varía a lo largo del año debido a la excentricidad de la elipse; por lo que dicha variación influye en la irradiancia solar que alcanza la atmósfera.

Características de la radiación solar

La radiación solar que atraviesa la atmósfera es sometida a una combinación de procesos de reflexión, atenuación y difusión que alteran sus características. La *reflexión* en las nubes disminuye la radiación incidente en la superficie terrestre, mientras que la *absorción* por vapor de agua, ozono y CO₂ produce una modificación de las características

espectrales de la radiación. Por otro lado, el efecto de la *dispersión* por partículas modifica la distribución espacial de la radiación (Perpiñán, 2013).

En tal sentido, la energía solar es la energía contenida en la radiación solar, que es captada y transformada mediante sensores de conversión, para su utilidad en forma térmica o eléctrica. Por lo que la energía solar se puede dividir en:

- a) Energía solar térmica
- b) Energía solar fotovoltaica

Antes de proseguir, es necesario precisar la diferencia entre radiación e irradiación solar. Según el Atlas Solar (2003), "El término radiación se aplica al cuerpo que radia, mientras que el término irradiación al objeto expuesto a la radiación". Sin embargo, suele usarse el término radiación para referirse a la irradiación.

Por otro lado, podemos decir que, en el cálculo de la irradiación total o global, se pueden considerar tres aportes de energía, según la siguiente ecuación:

$$G = B + D + R \quad (2.1)$$

Donde:

G: irradiancia global

B: Radiación directa

D: Radiación difusa

R: Radiación del albedo (radiación procedente de la reflexión del suelo)

La medición de la radiación solar es importante para cualquier proyecto de implementación o de desarrollo usando energía solar, para ello se usan piranómetros que miden la radiación global, instalados en las estaciones meteorológicas terrestres.

En el Perú, existen estaciones meteorológicas distribuidas en todas las regiones, formando una red. Estas estaciones miden diferentes variables, entre ellas la temperatura, humedad relativa, radiación solar, etc.

A nivel global (la tierra), la cobertura espacial que ofrece la red de estaciones terrestres es muy limitada por lo que frecuentemente se recurre a interpolaciones entre varias estaciones (aproximación válida sólo cuando existe una distancia mínima) o a imágenes satelitales. Las imágenes procedentes de satélites geoestacionarios meteorológicos pueden ser interpretadas para estimar la radiación incidente en la superficie terrestre.

La información recogida por las redes de estaciones suele estar disponible en páginas de Internet; sin embargo, es necesario indicar que el valor obtenido es una medida indirecta a través de un algoritmo de análisis, con el consiguiente error asociado. No obstante, su alta cobertura espacial y disponibilidad han fomentado su uso en los últimos años.

En el Perú se cuenta con el satélite PerúSAT-1, que es un satélite de observación más no meteorológico, el cual tiene como misión la observación de la tierra. Nuestro satélite envía diariamente imágenes del territorio peruano y de todo el mundo, las cuales son programadas desde el Centro Nacional de Operaciones de Imágenes Satelitales – CNOIS. Las imágenes adquiridas por el satélite peruano son descargadas y procesadas en el CNOIS. Las imágenes adquiridas son utilizadas para aplicaciones en planificación, agricultura, geología, gestión del riesgo de desastres, entre otras.

En general, existen cuatro tipos de satélites:

1. **Satélites de Comunicaciones**, cuya finalidad es permitir un enlace de telecomunicaciones entre diversos lugares del planeta para brindar servicios como televisión, telefonía o internet.
2. **Satélites de Observación**, cuya finalidad es “observar” el territorio, tomando y enviando imágenes, contando para ello de un telescopio que capta imágenes a medida que orbita nuestro planeta, cuando pasa sobre zonas iluminadas por el Sol.
3. **Satélites para Navegación Global**, cuya finalidad es transmitir permanentemente desde el espacio señales para que los dispositivos receptores en tierra puedan determinar la posición en la que se encuentran (ejemplos: GPS, GLONASS).
4. **Satélites Meteorológicos**, los cuales se encuentran en una órbita ecuatorial y Geoestacionaria (GEO) a 36,000 km de distancia de la tierra y son utilizados principalmente para registrar el tiempo atmosférico con la finalidad principal de efectuar monitoreo y pronóstico; así como alimentar modelos del clima de la tierra.

Según información del Atlas Solar del Perú (2003), para efectos de medición de la irradiación solar, particularmente para los procesos de calibración de los métodos de estimación, se utilizó una red de 10 estaciones con registros piranométricos y se utilizaron 5 estaciones con registros actinográficos, distribuida en todo el territorio peruano abarcando las tres regiones (costa, sierra y selva). La información sobre ubicación geográfica, récord histórico y el tipo de instrumento de medición utilizado en las estaciones base, se muestra en la Tabla N° 2.1. Asimismo, en la Tabla N° 2.2 se presenta valores de las principales variables climáticas por estación base.

Modelos de estimación de la irradiación solar

Entre los modelos de estimación de la irradiación solar mencionados en el Atlas Solar del Perú (2003), tenemos:

- a) Modelo Ångström-Prescott
- b) Modelo Bristow-Campbell
- c) Modelo de interpolación

Tabla N° 2.1

Ubicación geográfica, récord histórico y tipo de instrumento de irradiación solar utilizado

Estación meteorológica	Latitud (°S)	Longitud (°W)	Altitud (msnm)	Récord histórico	Instrumento de medición
Miraflores	5,17	80,62	30	1 979-1 992	Piranómetro
San Ramón SM	5,56	76,05	184	1 972-1 982	Actinógrafo
El Porvenir	6,35	76,19	230	1 964-1 971	Actinógrafo
Bambamarca	6,40	78,31	2 536	1 967-1 977	Actinógrafo
Bellavista	7,03	76,33	247	1 971-1 973	Actinógrafo
Weberbauer	7,17	78,50	2 536	1 980-1 985	Piranómetro
Huayao	12,03	75,32	3 308	1 977-1 996	Piranómetro
A. Von Humboldt	12,08	76,95	238	1 968-1 999	Piranómetro
Cosmos	12,15	75,57	4 575	1 986-1 988	Piranómetro
Granja Kcayra	13,55	71,87	3 219	1 980-1 988	Piranómetro
San Camilo	14,07	75,72	398	1 978-1 988	Piranómetro
Chuquibambilla	14,78	70,73	3 971	1 980-1 984	Piranómetro
Puno	15,83	70,02	3 820	1 977-1 993	Piranómetro
Characato-La Pampilla	16,45	71,48	2 451	1 978-1 987	Piranómetro
La Joya	16,58	71,92	1 295	1 967-1 993	Actinógrafo

Fuente: MINEM (2003); Atlas Solar del Perú

De los tres modelos indicados, para el Perú, el modelo de interpolación es el que mejor aproximación presenta, dentro de él el modelo digital de elevación (DEM).

El modelo utiliza las coberturas correspondientes:

- Al modelo digital de elevación (DEM)
- El mapa digital de pendientes y
- El mapa digital de aspecto

Tabla N° 2.2
Valores de las principales variables climáticas de
las estaciones base

Estación meteorológica	Energía solar diaria (kW h/m ²)	Heliofanía relativa (%)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Precipitación total (mm/año)
Costa					
Miraflores	5,75	56	30,7	19,3	216
A. Von Humboldt	4,06	40	23,3	15,5	16
San Camilo	5,92	61	28,7	13,4	11
La Joya	7,03	75	27,0	10,1	77
Sierra					
Bambamarca	4,56	44	19,4	9,5	737
Weberbauer	4,92	49	21,3	7,6	644
Cosmos	4,92	46	9,2	-0,7	1 047
Huayao	6,00	56	19,6	4,4	765
Granja Kcayra	5,44	53	20,7	3,7	674
Chuquibambilla	6,08	59	16,8	-2,4	715
Puno	6,36	70	14,7	2,0	753
Characato	6,50	73	22,8	6,8	78
Selva					
San Ramón SM	4,67	41	31,3	20,8	2 158
El Porvenir	3,89	41	32,5	20,4	1 041
Bellavista	4,78	40	32,2	20,9	928

Fuente: MINEM (2003); Atlas Solar del Perú

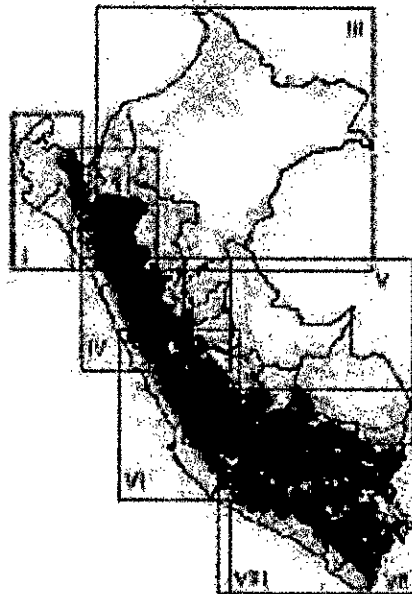
Las zonas (8 zonas homogéneas), que se simularon por separado durante el período 1975-1990 (16 años), son:

- I. Costa Norte
- II. Sierra Norte
- III. Selva Norte
- IV. Sierra Central
- V. Selva Sur
- VI. Costa Central
- VII. Sierra Sur
- VIII. Costa Sur

Las áreas de traslape entre zonas, sirvieron como áreas de interfase para el empalme final (ver Figura N° 21).

Según el Atlas Solar del Perú (2003), todo este trabajo de simulación se realizó utilizando el software de Sistemas de Información Geográfica (SIG), promediando los 16 años de simulación; permitiendo así, primero, producir un mapa digital promedio por cada zona, para luego empalmar las 8 zonas digitalmente, y para finalmente producir un mapa digital de todo el territorio peruano. Debido a que este procedimiento se realizó mensualmente, se obtuvieron 12 mapas mensuales; en consecuencia, para obtener el mapa digital promedio anual de energía solar para todo el territorio peruano, se procedió a obtener la media aritmética de los 12 mapas.

Figura N° 2.1
Zonas de simulación de las 8 estaciones base



Fuente: MINEM (2003); Atlas Solar del Perú

Energía solar fotovoltaica

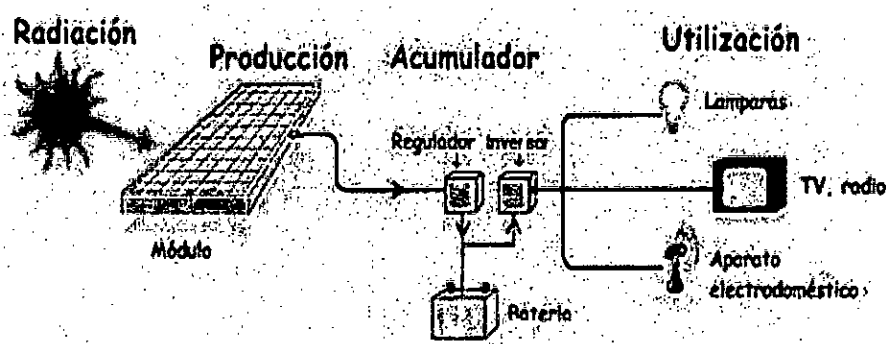
La energía solar fotovoltaica es una de las tecnologías de energía renovable más populares, que consiste en la transformación de la energía solar en energía eléctrica. El dispositivo que hace posible tal conversión es la célula o celda solar fotovoltaica, material semiconductor, cuya propiedad es el llamado efecto fotoeléctrico. El silicio suele ser el material base para su fabricación.

Estas celdas o colectores son semiconductores sensibles a la luz solar; de manera que cuando se expone a esta, se produce en las celdas una circulación de corriente eléctrica entre sus dos caras. Los componentes de un sistema fotovoltaico dependen del tipo de aplicación conectada o no a la red y de las características de instalación (Díaz y Díez, 2007).

Una instalación fotovoltaica aislada está formada por los equipos destinados a producir, regular, acumular y transformar la energía eléctrica, según se puede apreciar en la Figura N° 2.2.

Figura N° 2.2

Componentes de una instalación fotovoltaica



Fuente: Universidad Autónoma de Occidente (2007);
Díaz N. y Díez C.

ds

A continuación, se realiza una descripción breve de cada uno de los componentes:

a) Módulo fotovoltaico

Compuesto por paneles fotovoltaicos, y cada panel fotovoltaico compuesto por celdas fotovoltaicas.

a1) Celda fotovoltaica

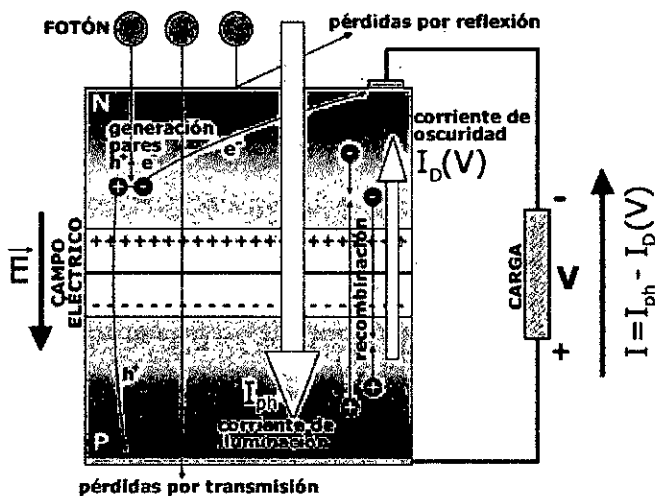
Una celda fotovoltaica está formada fundamentalmente por silicio cristalino. Este material es modificado químicamente para dar lugar a dos estructuras eléctricamente distintas entre sí, denominadas semiconductor tipo p y semiconductor tipo n, los cuales se ponen en contacto en una sola unidad física.

Debido al efecto fotovoltaico, cuando un fotón incide sobre un material, éste emite electrones libres, a la vez que se crea un hueco. Pero, en vez de dejar que se recombinen, se les obliga a separarse mediante un campo eléctrico creado por el dopado de semiconductores tipo p y n, permitiendo que aparezca una diferencia de potencial entre la cara superior e inferior de la célula solar, como en una pila, de forma que, si se conectan ambos extremos a una carga, circulará una corriente continua, tal como se ilustra en la Figura N° 2.3.

El reto de las empresas de fabricación es el de encontrar materiales o combinación de materiales más eficientes, que permitan a su vez reducir el costo, y permitir su masificación y aplicaciones a gran escala. Hasta el momento se han llegado a producir celdas solares con una eficiencia del 30% aproximadamente.

Figura N° 2.3

Generación eléctrica debido al efecto fotoeléctrico en la unión p-n de una celda fotovoltaica



Fuente:

http://www.ujaen.es/investigamain_frame/03_celula/01_basico/images/func_cel.gif/solar/07cursosolar/home

En la Tabla N° 2.3 se presenta la comparación de la eficiencia de las diferentes tecnologías más usadas.

Tabla N° 2.3

Eficiencia de las tecnologías de celdas fotovoltaicas más comerciales

TIPO DE TECNOLOGÍA	EFICIENCIA DE REFERENCIA
Silicio Monocristalino	25.6% ± 0.5%
Silicio Policristalino	20.8% ± 0.5%
Silicio Amorfo	10.5% ± 0.3%

Fuente: wileyonlinelibrary.com (2015); Green, Emery, Hishikawa, & Warta

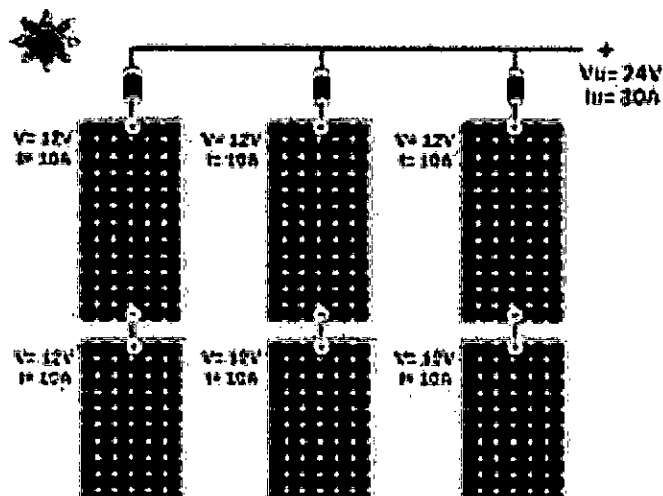
a2) Panel fotovoltaico

Un panel fotovoltaico es el agrupamiento serie-paralelo de celdas fotovoltaicas. El agrupamiento de celdas en serie produce el incremento de voltaje, y el agrupamiento en paralelo permite el incremento de la corriente. Este agrupamiento es necesario, debido a que la potencia de consumo de cargas es mayor en comparación a la potencia generada por una celda fotovoltaica.

En la Figura N° 2.4 se presenta una configuración serie-paralelo de paneles solares fotovoltaicos.

Figura N° 2.4

Disposición de paneles solares en serie y paralelo



Fuente: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRjgV3LMrJWtER5g8giGPCEzG8U6dVUIOS85RFASHQA0ESe4y39rw>

Otra cosa importante es, si queremos aprovechar al máximo la eficiencia de los paneles fotovoltaicos (PFV), es necesario considerar la ubicación de los paneles de acuerdo con la ubicación

y latitud, buscando una mayor radiación solar sobre los paneles. Sin embargo, considerando que la radiación solar varía durante el día, entonces su ángulo de incidencia sobre el panel también varía; por lo que en muchas aplicaciones es conveniente una disposición móvil, que permita un seguimiento a la radiación solar, incrementando así su eficiencia respecto a una instalación fija.

b) Regulador de carga o convertidor DC/DC

Es un dispositivo que convierte una tensión continua de determinado nivel a otra tensión continua de otro nivel, permitiendo obtener una tensión o voltaje regulado o estable en la salida.

Tiene por función proteger a las baterías contra las sobrecargas y las descargas, produciendo una diferencia de potencial (voltaje) estable a la salida del convertidor DC/DC.

Existen tres tipos de convertidores DC:

- Convertidor reductor (convertidor Buck)
- Convertidor elevador (convertidor Boost)
- Convertidor reductor-elevador (Buck-Boost, Flyback, Cuk)

c) Batería

Son dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica. Estas pueden cargarse de energía en el día y descargarse en la noche. Entre las baterías para aplicaciones solares y eólicas, podemos considerar a las:

- Baterías de **plomo**, también denominadas baterías de ácido-plomo (acumuladores), muy usados en vehículos convencionales y eléctricos.

- **Baterías de Ion de Litio (Li-Ion)** de tamaños más grandes que pueden sustituir a las de plomo en sistemas de energías renovables. Estas baterías usan una sal de litio que ayuda a la reacción electroquímica facilitando que la corriente fluya fuera de la batería.

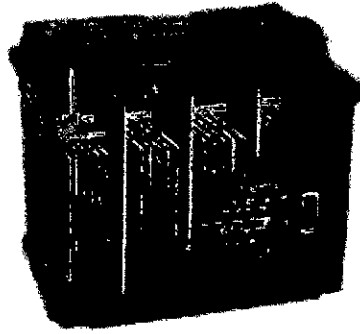
Baterías de plomo para aplicaciones en energías renovables Se pueden clasificar en dos tipos:

- **Baterías líquidas**

Son baterías con capacidad de almacenamiento mayor y con precios económicos. Se les llama baterías líquidas porque funcionan a altas temperaturas para que electrolito y electrodos permanezcan en estado líquido, siendo necesarios una temperatura de alrededor de 500 grados centígrados. Además, son menos problemáticos cuando se sobrecargan y tienen mayor durabilidad.

En aplicaciones solares y eólicas, las baterías tienen que dar la energía en un tiempo relativamente largo, y frecuentemente se descargan a niveles más bajos. Estas baterías de tipo **ciclo profundo** tienen capas de plomo gruesas que las hacen relativamente grandes y pesadas; sin embargo, tiene la ventaja de prolongar su vida útil. Son compuestas de celdas de 2 voltios nominales que, agrupadas en serie, llegan a fabricarse baterías de 6, 12 o más voltios para aplicaciones específicas. Estas baterías son parecidas a las usadas en autos y camiones. En la Figura N° 2.5 se presenta una batería de plomo.

Figura N° 2.5
Batería de plomo usada en aplicaciones
de energía renovable

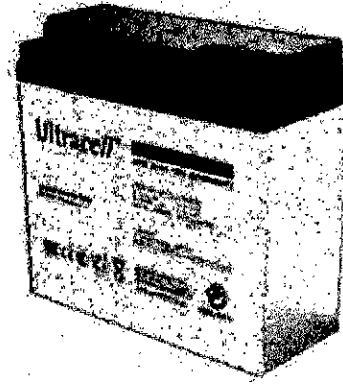


Fuente:

https://deltavolt.pe/images/thumbaibateria_plomo-200x179.jpg

- **Baterías tipo VRLA (Valve Regulated Lead Acid battery)** Es una batería ácido-plomo regulada por válvula y recargable. No se encuentran completamente selladas, pero contienen una tecnología que recombinan el oxígeno e hidrógeno que sale de las placas durante la carga y así eliminan la pérdida de agua si no son sobrecargadas. Estas baterías se dividen en:
 - ✓ **Baterías de Gel:** En estas baterías 'selladas', el ácido tiene la forma de gel, lo que impide que se pierda líquido y funcionen en cualquier posición. Entre otras ventajas podemos anotar que en este tipo de baterías se reduce la corrosión, son resistentes a temperaturas bajas y su vida útil es mayor que en las baterías líquidas. A diferencia de las baterías líquidas, las de gel presentan una resistencia interna poco más alta que reduce el flujo máximo de la corriente, y son más caras (ver Figura N° 2.6)

Figura N° 2.6
Batería de GEL 12V 22Ah



Fuente:

https://autosolar.es/images/baterias-gel/bateria-gel-12v-22ah-ultracell-ucg-22-12_thumb_list.jpg

- ✓ **Baterías tipo AGM (Absorbed Glass Mat):** En estas baterías se cuentan con una malla de fibra de vidrio entre las placas de la batería, que sirve para contener el electrolito (ácido). También son llamadas baterías “secas” por su reducida cantidad de ácido. Este tipo de batería son muy resistentes a bajas temperaturas, su auto descarga es mínimo y su eficiencia es más alta que las baterías de plomo, llegando hasta el 95%. Debido a su baja resistencia interna, permite corrientes altas. Entre sus desventajas está el precio y su vulnerabilidad más alta a descargas profundas. En la Figura N° 2.7 se muestra la batería tipo AGM.

Figura N° 2.7
Batería de AGM 12V 22Ah



Fuente: https://autosolar.es/images/baterias-agm/bateria-agm-12v-22ah-ultracell-ul-22-12_thumb_list.jpg

d) Inversor

Convierte la tensión o voltaje DC regulada (12, 24 o 48 voltios) a tensión AC (220 voltios a 60 Hz.), que es utilizada en nuestro País. En caso sea una instalación aislada, su dimensionamiento requiere disponer de información relativa al consumo previsto de energía y de la disponibilidad media de radiación solar a lo largo del año.

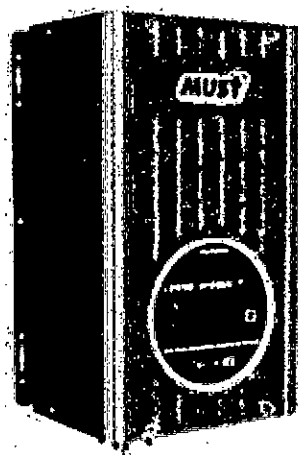
Se pueden clasificar en monofásicos y trifásicos ((Rashid, 1995), (Mohan, 2009)). Asimismo, de acuerdo con su topología se pueden clasificar en:

- Topología Push-Pull
- Topología medio puente
- Topología puente completo

Para obtener tensiones de salida elevadas a la salida del inversor, se suele emplear una primera etapa de elevación DC/DC o bien una etapa posterior de elevación AC/AC (Un transformador). En la Figura N° 2.8 se puede apreciar un inversor comercial de 1000 W.

Figura N° 2.8

Inversor comercial de 1000W



Fuente: <https://autosolar.es/inversores-cargadores-12v/inversor-cargador-1000w-12v-mppt-40a-must-solar>

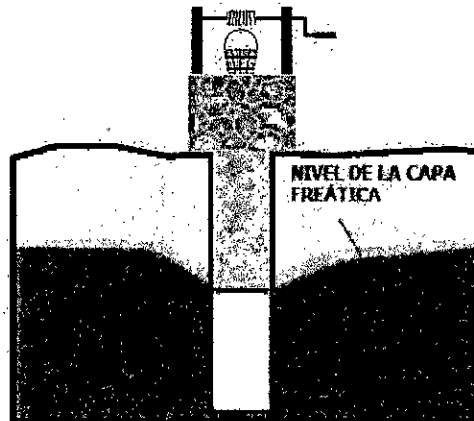
2.2.2 Sistema de bombeo solar fotovoltaico

El bombeo solar fotovoltaico consiste en la extracción de agua de un pozo, río o lago, mediante un sistema motor-bomba alimentado por un grupo de paneles solares, cuya salida va conectada a un regulador de carga, el cual alimenta con tensión DC estabilizada a un sistema motor-bomba DC; y en el caso que se utilice un sistema motor-bomba en AC, entonces la salida del regulador de carga va conectada a la entrada del inversor (convertidor DC/AC).

El pozo de agua es en sí una excavación que alcanza el nivel freático. El agua pura para extraer es aquella que se puede extraer luego de retirar una cantidad de tierra de dicha capa freática. En la Figura N° 2.9 se muestra el detalle de la capa freática.

Figura N° 2.9

Detalle de la capa freática de un pozo



Fuente: <https://www.sitiosolar.com/wp-content/uploads/2014/01/pozo3.png>

Un sistema de bombeo solar fotovoltaico comprende varias etapas que se pasan a anotar:

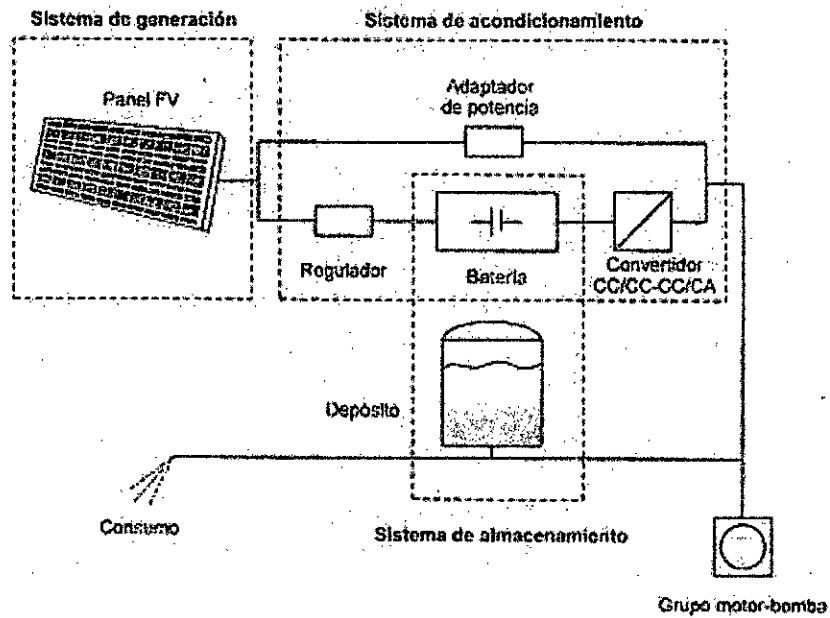
1. Generador fotovoltaico
2. Sistema motor-bomba
3. Sistema de acondicionamiento de potencia (Convertidor DC/DC y/o convertidor DC/AC)
4. Sistema de acumulación (baterías)
5. Pozo hidráulico
6. Sistema de tuberías

La disposición de las bombas puede variar, pudiendo ser bombas de superficie y flotantes, o la más usual, bombas sumergibles.

En la Figura N° 2.10 se puede observar las etapas de un sistema de bombeo fotovoltaico.

Figura N° 2.10

Etapas de un sistema de bombeo FV



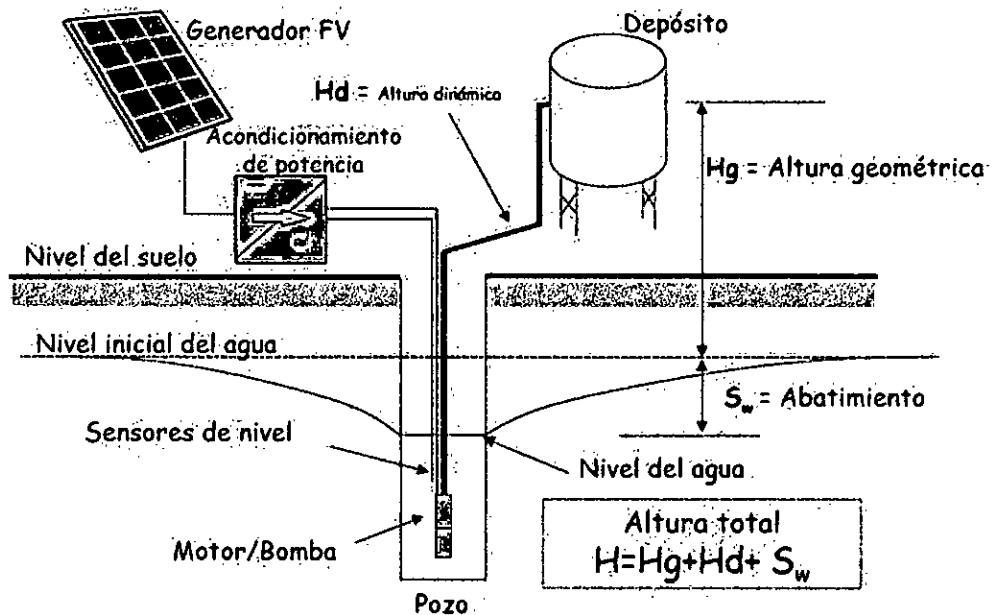
Fuente: Universidad Carlos III de Madrid (2010); Arija G.

Un esquema típico ilustrativo de un sistema de bombeo fotovoltaico se presenta en la Figura N° 2.11.

El rendimiento de un sistema de bombeo fotovoltaico depende en gran medida del adecuado dimensionamiento del sistema, es decir se necesitan datos concretos sobre:

- Volumen de agua en el pozo
- Altura total a la cual se dispondrá de un tanque de almacenamiento (depósito)
- Ubicación
- Patrón de demanda de agua
- Consideraciones de épocas de sequía

Figura N° 2.11
Esquema de un sistema de bombeo FV



Fuente: CIEMAT (s.f.); Alonzo, M. y Chenlo, F.

Todo esto nos permitirá un adecuado cálculo de la potencia requerida de las bombas, lo que conlleva a determinar el nivel de potencia que debe entregar el generador solar fotovoltaico y el sistema de acondicionamiento de potencia (Madridsolar, 2006).

❖ Generador solar fotovoltaico

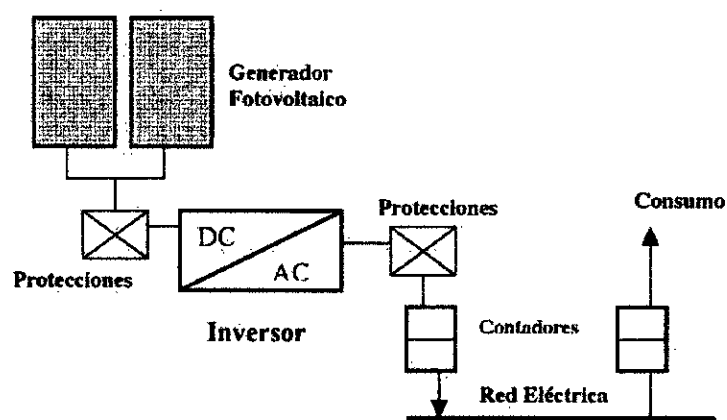
En principio un generador solar fotovoltaico es un agrupamiento serie paralelo de paneles solares fotovoltaicos. El tipo de generador se clasifica de acuerdo con su instalación:

- **Instalación conectada a la red eléctrica**

En este caso, la corriente eléctrica generada por una instalación fotovoltaica puede ser entregada a la red eléctrica como si fuera una central de producción de energía eléctrica. El usuario sigue

comprando energía eléctrica a la empresa que la distribuye, independientemente de ser propietaria de la central solar fotovoltaica. En la Figura N° 2.12 se muestra el esquema de una instalación conectada a red.

Figura N° 2.12
Instalación conectada a la red eléctrica



Fuente: Caja Madrid (2006); Madridsolar 2006

- **Instalación aislada de la red eléctrica**

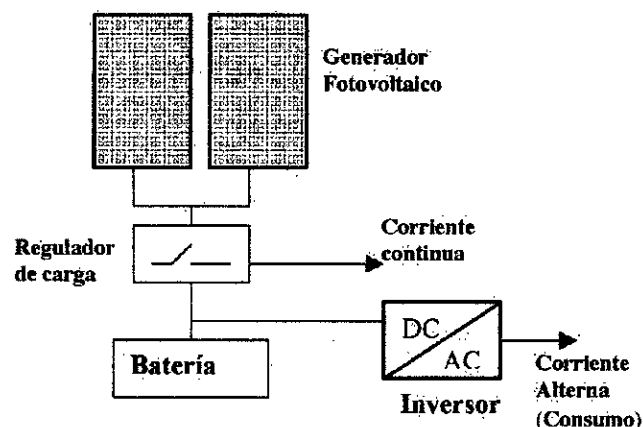
Este tipo de instalaciones se utilizan en lugares o zonas alejadas de las instalaciones de la red eléctrica. En este caso resulta más económico instalar un sistema fotovoltaico que tender una línea entre la red y el punto de consumo. La electricidad generada se destina a autoconsumo. El esquema de instalación se muestra en la Figura N° 2.13.

Entre las aplicaciones del generador solar fotovoltaico se pueden citar:

- Electrificación de viviendas y edificios, principalmente para iluminación y electrodomésticos de baja potencia
- Bombeo y tratamiento de agua

- Alumbrado público
- Aplicaciones agropecuarias y ganaderas
- Alimentación de antenas de telefonía aisladas de la red
Señalización y comunicaciones, entre otras.

Figura N° 2.13
Instalación aislada de la red eléctrica



Fuente: Caja Madrid (2006); Madridsolar 2006

Este tipo de instalaciones es el que se considera para el presente trabajo.

❖ Sistema motor-bomba

El accionamiento del sistema de bombeo fotovoltaico es la acción de dos elementos muy importantes, como son el motor y la bomba, que se pasan a describir brevemente:

- **Motores:** Los motores que accionan la bomba pueden ser motores de corriente continua (DC) con escobillas o sin escobillas, o motores de corriente alterna (AC). Convierten energía eléctrica en energía mecánica. En el caso de motores de corriente alterna pueden ser de imán permanente (con o sin escobillas), serie, shunt o compuesta.

Asimismo, pueden ser monofásicos o trifásicos, síncronos o asíncronos (Mohan, 2009).

- **Bomba:** La bomba es una máquina capaz de convertir la energía mecánica con la que es accionada en energía hidráulica, existiendo dos tipos básicos de bomba (Perpiñán, 2013):
 - a) Bombas de desplazamiento positivo o volumétricas
 - b) Bombas centrífugas

En las **bombas de desplazamiento positivo**, la transferencia de energía al fluido es hidrostática. En la transferencia de energía hidrostática, un cuerpo de desplazamiento reduce el espacio de trabajo lleno de fluido y bombea el fluido a la tubería. Estas bombas pueden ser de desplazamiento positivo oscilante y de desplazamiento positivo rotatoria.

Ventajas de las bombas de desplazamiento positivo:

- ✓ El caudal depende escasamente de la altura de elevación; por lo tanto, son ideales para bombas de inyección y dosificadoras.
- ✓ Apropriadas para altos incrementos de presión y bajos caudales.
- ✓ Excelente capacidad de aspiración.
- ✓ Adecuadas para viscosidad altas (pastas).
- ✓ Caudal ajustable con gran exactitud.

Desventajas de las bombas de desplazamiento:

- ✓ Requiere una válvula de seguridad o limitadora de presión.
- ✓ Las bombas de desplazamiento positivo oscilante son poco apropiadas para números de revoluciones altos.
- ✓ Necesitan un elevado par de arranque; por lo que no pueden ser acopladas directamente al generador.

- ✓ Mayor número de piezas de desgaste que en las bombas centrífugas.

Las bombas centrífugas mueven una cantidad de volumen de líquido entre dos niveles, es decir, el líquido o fluido entra por el centro del rodete, que dispone de unos álabes para conducir el fluido, y por efecto de la fuerza centrífuga es impulsado hacia el exterior, donde es recogido por la carcasa o cuerpo de la bomba. En consecuencia, son máquinas que transforman energía mecánica en hidráulica ((Díaz, 2007), (Perpiñán, 2013).

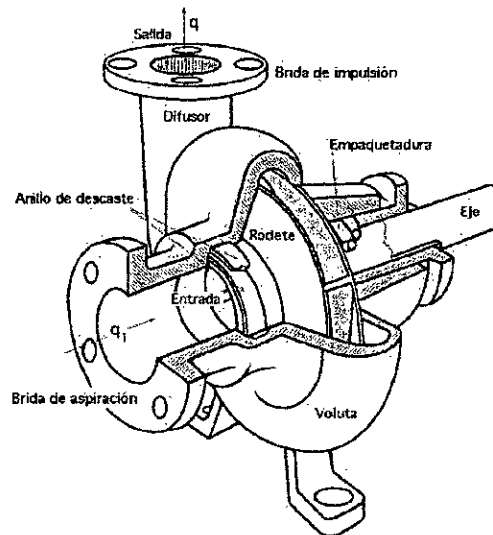
Los elementos de que consta una instalación con bombas centrífugas dependen de su construcción y tipo; sin embargo, los elementos principales son:

- a) **Una tubería de aspiración**, que concluye prácticamente en la brida de aspiración.
- b) **El impulsor o rodete**, formado por una serie de álabes radiales y semi axiales que giran dentro de una carcasa circular. El rodete es accionado por un motor, y va unido al eje y es la parte móvil de la bomba.
- c) **La voluta**, es un órgano fijo que está dispuesta en forma de caracol alrededor del rodete, con una separación pequeña en la parte superior entre ella y el rodete, y va aumentando hasta que las partículas líquidas se encuentran frente a la abertura de impulsión. Su función es la de recoger el líquido que abandona el rodete a gran velocidad, y direccionarla hacia la brida de impulsión de la bomba.
- d) **La carcasa**, es la parte que protege a todos los mecanismos internos que permiten el accionar de la bomba. La mayoría de ellas son fabricadas en hierro fundido para agua potable, también se fabrican de bronce o acero inoxidable para líquido altamente corrosivo.

- e) **Una tubería de impulsión**, instalada a la salida de la voluta, que sirve para evacuar el líquido a la velocidad y presión producidas por la bomba.

En la Figura N° 2.14 se muestran los elementos de una bomba centrífuga.

Figura N° 2.14
Elementos de una bomba centrífuga



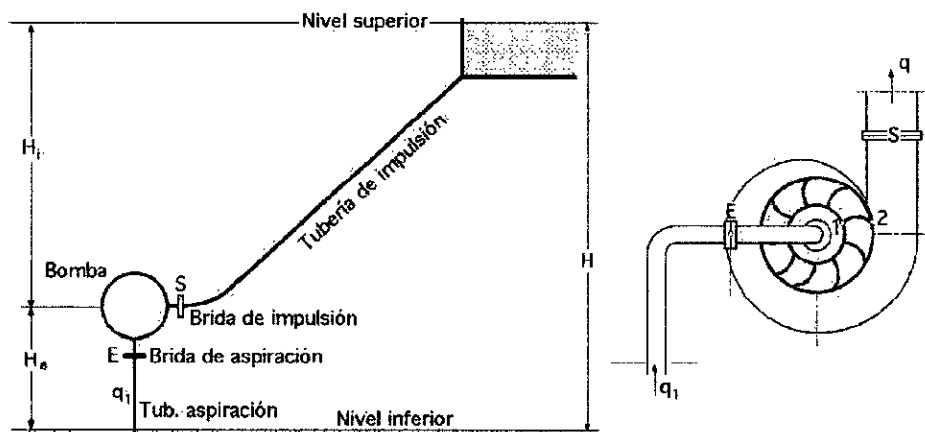
Fuente: Universidad Autónoma de Occidente (2007); Díaz, H.

Haciendo una comparación entre los dos tipos de bombas, podemos decir que, las bombas centrífugas están diseñadas para una altura manométrica más o menos fija y proporcionan generalmente mayor caudal que las bombas de desplazamiento positivo.

Las bombas de desplazamiento positivo son apropiadas para altos incrementos de presión y bajos caudales, mientras que las bombas centrífugas proporcionan caudales elevados con bajas alturas manométricas y nos son recomendables para profundidades de aspiración mayores de 5 a 6 metros.

En la Figura N° 2.15 se puede observar las alturas para considerar en una instalación con bomba centrífuga.

Figura N° 2.15
Alturas para considerar en una instalación
con bomba centrífuga



Fuente: Universidad Autónoma de Occidente (2007); Díaz, H.

Donde:

H_a : altura o nivel de aspiración, altura existente entre el eje de la bomba y el nivel inferior del líquido

H_i : altura de impulsión, altura existente entre el eje del rodete y el nivel superior del líquido

H : desnivel o altura geométrica existente entre los niveles mínimo y máximo del líquido.

Según la instalación, las bombas se pueden clasificar en:

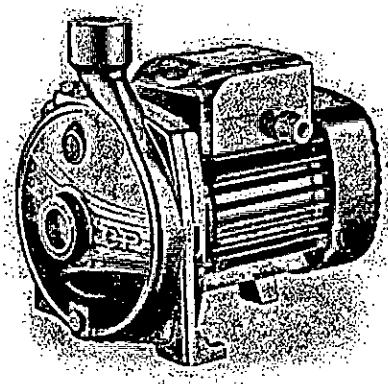
- a) Sumergibles
- b) Flotantes

c) De superficie

En la Figura N° 2.16 se muestra una bomba centrífuga de superficie de la marca Pedrollo, en la Figura N° 2.17 se presenta una bomba centrífuga sumergible.

Figura N° 2.16

Bomba centrífuga de superficie Pedrollo



Fuente: http://www.hidraulicaperu.com/electrobombas_pedrollo.html

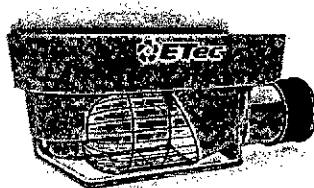
Figura N° 2.17

Bomba centrífuga sumergible SCS 10-165-60 BL



Fuente: <http://www.sunpumps.com/Category/SCS%20-%20Submersible%20Pumps/>

Figura N° 2.18
Bomba flotante VL 36



Fuente: <http://etecsa.com/es/bomba-flotante-vl36.aspx>

Las bombas sumergibles suelen utilizarse en pozos profundos de pequeño diámetro, y normalmente están directamente conectados al motor. Las bombas flotantes dependen de un flotador que permite su instalación en ríos, lagos o pozos de gran diámetro, flotando en la superficie del agua. Las bombas de superficie se instalan a nivel del suelo, facilitando su mantenimiento; no obstante, la profundidad de succión no debe exceder los 8 metros.

Necesidades hidráulicas

Es muy importante determinar las diferentes demandas de consumo para el lugar de aplicación, pudiendo ser:

- ✓ Agua para consumo humano
- ✓ Agua para consumo de animales
- ✓ Agua para regadío

Dependiendo del número de personas, animales y cultivos, el consumo diario estaría completamente determinado.

Requerimientos hidráulicos de la bomba

Si las necesidades hidráulicas están definidas, es decir si conocemos el caudal diario (Q_d) expresado en $m^3/día$, obtendremos el caudal medio horario (Q_{mh}) expresado en $m^3/hora$.

$$Q_{mh} = \frac{Q_d}{24} \quad (2.2)$$

Por consiguiente, el caudal mínimo que debe ser suministrado por la bomba es:

$$Q_B = 1.8 Q_{mh} \quad (2.3)$$

La energía hidráulica diaria (E_H) necesaria viene representada por:

$$E_H = \frac{K Q_d H}{\eta_{mb}} \quad (2.4)$$

Siendo:

H: altura de bombeo o altura equivalente total (m)

η_{mb} : eficiencia del motor-bomba

K: constante = 2.725

Otra fórmula alternativa a la (2.4) es la siguiente:

$$E_H = \rho g V H \quad (2.5)$$

Siendo:

ρ : densidad del agua (1000 Kg/m^3)

G: aceleración de la gravedad (m/s^2)

V: volumen de agua (m^3)

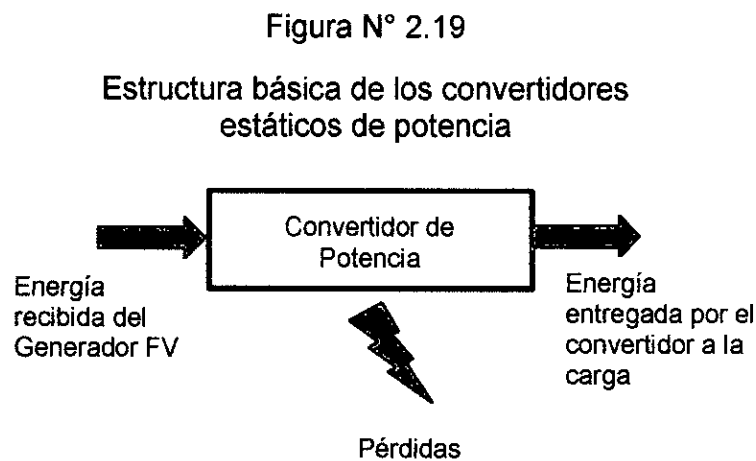
Por consiguiente, la potencia hidráulica (P_H), necesaria para bombear agua en función de la altura de bombeo es:

$$P_H = \rho g Q_{mh} H \quad (2.6)$$

$$P_H = 2.725 Q_{mh} H \quad (2.7)$$

❖ Sistema de acondicionamiento de potencia

Entre los sistemas de acondicionamiento de potencia están los llamados convertidores estáticos, cuya estructura básica ligada a su eficiencia, fiabilidad, tecnología, por citar algunas, se muestra en la Figura N° 2.19.



Fuente: UNAC (2019); elaboración propia

Veamos brevemente los tipos de convertidores de potencia ((Rashid, 1995), (Practical Action, s.f.):

1. Convertidor AC/DC

El convertidor AC/DC, denominado también rectificadores de línea, convierten la tensión AC en DC, pudiendo ser esta conversión monofásica o trifásica, no controlada o controlada.

Este convertidor debe proporcionar una salida DC con bajo contenido de armónico, manteniendo la corriente de entrada tan sinusoidal como sea posible y en fase con la tensión o voltaje de entrada, de tal forma que el factor de potencia esté cercano a la unidad.

2. Convertidor DC/DC

Estos convertidores convierten voltaje DC de entrada (regulado o no) a otro voltaje DC regulado o controlado de salida. Su uso es muy frecuente en sistemas de suministro de energía en DC regulados de modo de conmutación y en aplicaciones de accionamientos motrices.

En aplicaciones de bombeo fotovoltaico, el propósito principal es mantener tanto al generador solar fotovoltaico como a la carga en su punto de máxima potencia (MPPT), para incrementar el rendimiento del sistema de bombeo durante horas del día.

Entre los convertidores DC/DC podemos citar los siguientes:

- Convertidor reductor (Buck)
- Convertidor elevador (Boost)
- Convertidor reductor/elevador (Buck-Boost)
- Convertidor Cúk
- Convertidor de puente completo.

Muchos de los convertidores DC/DC, conocidos también como reguladores de carga en aplicaciones de energías renovables, pueden ser del tipo reductor (Buck), donde el voltaje de salida es menor al de entrada ($V_o < V_i$), o del tipo elevador (Boost), donde el voltaje de salida es mayor al de entrada ($V_o > V_i$). Asimismo, es usual trabajar con convertidores reductores/elevadores (Buck-Boost). En el mercado electrónico se disponen de convertidores de seguimiento del punto de máxima potencia, así como de convertidores de tensión de operación fija del generador SFV.

La eficiencia o rendimiento del convertidor DC/DC es la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada, así:

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \quad (2.8)$$

3. Convertidor DC/AC

Denominado también **inversor** de potencia, y tiene la función de convertir el voltaje continuo (DC) a voltaje alterno (AC), con la funcionalidad adicional de controlar la frecuencia y el voltaje eficaz de la salida, de tal forma de alimentar cargas de corriente alterna, en particular motores AC.

Los inversores pueden ser monofásicos o trifásicos, controlados en frecuencia y voltaje. En aplicaciones de bombeo la frecuencia de salida del inversor suele ser variable, que permite a los motores operar a los motores a operar a velocidades distintas de su velocidad nominal (50/60 Hz), y de esta manera lograr reducir el umbral de irradiancia solar para el arranque de la bomba.

4. Convertidor AC/AC

Son dispositivos que convierten usualmente la corriente alterna de un determinado voltaje a otro nivel de corriente alterna de diferente nivel de voltaje. El voltaje de salida puede ser mayor o menor que el voltaje de entrada; sin embargo, existen convertidores donde el voltaje de salida es el mismo que el de entrada, usados como aisladores físicos y acopladores eléctricos. Pueden además ser controlados o no controlados.

Una aplicación particular de los convertidores AC/A son los llamados variadores de frecuencia. El variador de frecuencia convencional transforma una señal alterna con tensión y frecuencia

determinadas en otra señal alterna con tensión y frecuencia diferentes. Es decir, están constituidos por un convertidor AC/DC (rectificador) y un convertidor DC/AC (inversor) conectados en cascada a través del bus común de continua.

❖ Sistema de acumulación de baterías

En sistemas aislados de generación de energía solar fotovoltaica, en particular en sistemas de bombeo solar fotovoltaico, la energía producida es la obtenida durante las horas de sol, con irradiancias superiores a la irradiancia umbral; por lo que por debajo del umbral el sistema de generación FV no tiene importancia; por consiguiente, se hacen uso de acumuladores, en particular de baterías. Estas acumulan energía durante horas de sol, y entregan energía en su ausencia, permitiendo una alimentación permanente. Sin embargo, esta alimentación "ininterrumpida" viene limitada por el tiempo de autonomía de las baterías, ligada a la tecnología de fabricación.

En sistemas de bombeo FV, una forma alternativa de almacenar energía en forma indirecta es con el uso de depósitos de almacenamiento de agua, los cuales pueden proporcionar, dependiendo de su capacidad, el déficit de agua cuando el caudal bombeado no alcance el consumo demandado.

$$\text{Capacidad} = (\text{consumo diario} \times \text{días de autonomía}) / \text{profundidad de descarga} \quad (2.9)$$

Por ejemplo, suponiendo un consumo diario de 20Ah/día, con 5 días de autonomía y una profundidad de descarga del 40%, entonces, la capacidad de almacenamiento será:

$$\text{Capacidad} = \left(\frac{20 \text{ Ah}}{\text{día}} \times 5 \text{ días} \right) / 0.4 = 250 \text{ Ah} \quad (2.10)$$

Esto significa que si no hay generación FV durante 5 días consecutivos (baja irradiancia solar u horas nocturnas), la batería suministrará el 40% de los 250 Ah, que hacen 100 Ah, y quedará todavía en la batería 150 Ah (60% del total acumulado).

❖ Pozo hidráulico

Según las páginas web <https://educalingo.com/es/dic-es/> y <https://es.wiktionary.org/wiki/>, consultado el 21/12/2018, la palabra pozo proviene del latín "puteus", que viene a ser "hoyo profundo, orificio, túnel vertical o perforación que se realiza en la tierra". Es decir, un pozo es un agujero, excavación o túnel vertical que se realiza en la tierra, hasta una profundidad suficiente para alcanzar, sea la reserva de agua subterránea de una capa freática o fluidos como el petróleo. En nuestro caso, el objetivo es agua. En la Figura N° 2.20 se ilustra un pozo en una formación acuífera.

Según Donado L. (Capítulo 8, noviembre de 1999) y Alonso M.(s.f.), detallan conceptos referidos a la altura de los pozos, necesarios para su análisis y determinación de la altura total del pozo. Veamos dichos conceptos:

▪ Nivel Estático

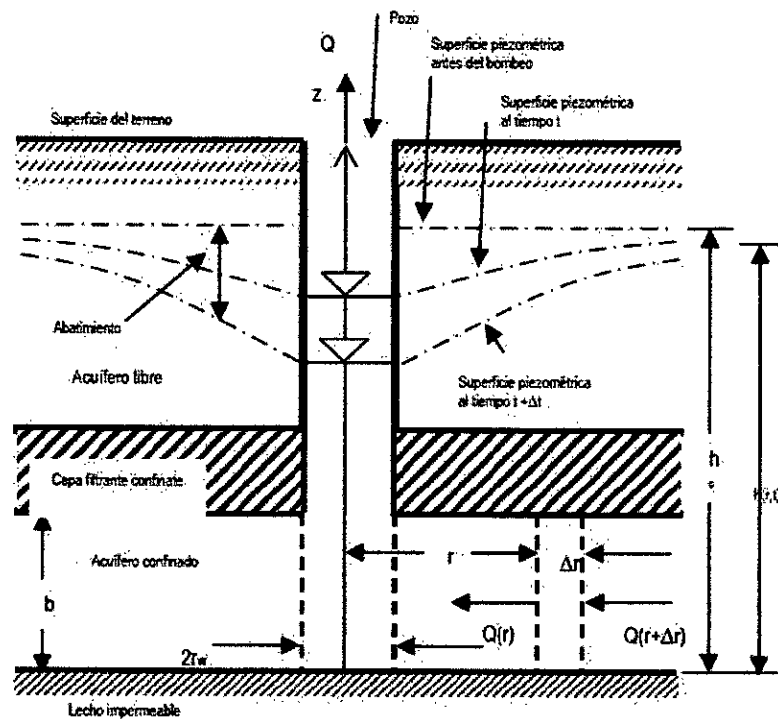
Denominado también nivel o altura geométrica (H_g), es el nivel de agua existente antes de comenzar el bombeo, y se ve afectado por efectos naturales (meteorológicos: precipitación, infiltración) que son propios de las estaciones y cambio climático, o por efectos externos (cargas adicionales: edificaciones, descarga producida por pozos cercanos). Concretamente, es la distancia desde el nivel del agua en el pozo hasta el punto más elevado hasta el cual debe bombearse el agua. Al producirse el bombeo, el nivel del agua desciende hasta una profundidad en la que el caudal de salida se hace igual al de entrada.

- **Nivel Dinámico**

Denominada también altura dinámica de bombeo (H_d), porque es producido cuando comienza la descarga del acuífero por el pozo, y depende del caudal de bombeo, del tiempo de bombeo y de las características hidrogeológicas del acuífero. En concreto, corresponden a pérdidas por caída de presión cuando el agua circula por el interior de una tubería (fricción).

Figura N° 2.20

Pozo en una formación acuífera



Fuente:

<https://www.researchgate.net/publication/269112987>
(Donado L. 1999)

La altura dinámica puede estimarse con la siguiente fórmula de Darcy-Weisbach:

$$H_d = f \frac{L}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (2.11)$$

Siendo:

H_d : altura dinámica o pérdida de carga (m)

f : coeficiente de fricción

L : longitud de tubería (m)

V : velocidad media del fluido m/s

d : diámetro hidráulico interno de la tubería (m)

g : aceleración de la gravedad (m/s^2)

Considerando la constante $K = f \frac{L}{d}$, la ecuación (2.11) puede reescribirse así:

$$H_d = K \frac{v^2}{2g} \quad (2.12)$$

Resolver la ecuación de Darcy-Weisbach puede resultar tediosa para el coeficiente de fricción, que es función del número de Reynolds (Re). Por consiguiente, es preferible usar la ecuación de Hazen-Williams, dada por:

$$H_d = \frac{10.674}{c^{1.852} d^{4.78}} Q^{1.85} L \quad (2.13)$$

Los parámetros de la ecuación de Hazen-Williams son:

Q : flujo de líquido (m^3/s), en nuestro caso agua

L : longitud de tubería (m)

d : diámetro interno de la tubería (m)

C: coeficiente de rugosidad (coeficiente de Hazen-Williams), que tiene un valor de 150 para tuberías de PVC.

En la Tabla N° 2.4 se presentan los valores del coeficiente de Hazen-Williams para diferentes tipos de tuberías.

Tabla N° 2.4
Valores del coeficiente de Hazen-Williams
para diferentes tipos de tuberías

Material	C _{HW}
Acero corrugado	60
Acero galvanizado (nuevo y usado)	125
Acero remachado (nuevo)	110
Acero remachado (usado)	85
Acero soldado o con remache avellanado (nuevo)	120
Acero soldado o con remache avellanado (usado)	90
Hierro fundido limpio (nuevo)	130
Hierro fundido sin incrustaciones (usado)	110
Hierro fundido con incrustaciones (viejo)	90
Plástico	150
Asbesto-cemento (nuevo)	135
Cobre o latón	130
Acabado interior en cemento pulido	100
Concreto, acabado liso	130
Concreto, acabado común	120
Tubos de barro vitrificado	110
Madera cepillada	120

Fuente: Universidad Autónoma de México (2011); Patiño M.

▪ Abatimiento

Se entiende por abatimiento al descenso del nivel de agua durante el bombeo, es decir la variación de altura cuando no hay extracción ($Q = 0$) hasta la extracción ($Q \neq 0$). Dependiendo del tipo de acuífero (libre, confinado, semiconfinado), el abatimiento tendrá un determinado valor, lo cual se traduce a variaciones en las ecuaciones correspondientes.

Bajo condiciones de extracción normales, el abatimiento se puede calcular con la siguiente expresión:

$$S_w = \frac{Ln t}{4\pi T} Q + K_w Q + D_w Q^2 \quad (2.14)$$

Siendo:

S_w : abatimiento dentro del pozo de bombeo (m)

K_w : constante que representa la suma de los coeficientes de las componentes lineales constantes de abatimiento debidas a las características del acuífero no alterado, los efectos de las zonas de desarenado, los efectos del empaque de grava y los efectos de las pérdidas de carga en la rejilla y la camisa. Se expresa en s/m^2 . D_w : constante que representa la suma de los coeficientes constantes de las componentes cuadráticas del abatimiento, dadas en s^2/m^5 .

T : coeficiente de transmisividad del acuífero.

t : tiempo de bombeo en segundos.

Q : caudal en m^3/s .

Habiendo determinado cada una de las ecuaciones para las alturas estática, dinámica y abatimiento, podemos escribir la ecuación que describe la altura total de bombeo, dada por:

$$H = H_d + H_g + S_w \quad (2.15)$$

❖ Sistema de tuberías

Aquí es necesario considerar el material, la longitud y el diámetro de las tuberías de las tuberías. El diámetro de las tuberías debe ser calculado de acuerdo con las pérdidas de carga o altura dinámica (H_d). Considerando pérdidas de carga y la longitud total (L), el diámetro de estas puede ser

estimadas mediante tablas o gráficos, en las que expresen las pérdidas de carga en función del caudal y el tipo de material utilizado.

2.2.3 Control Proporcional Integral Derivativo (PID)

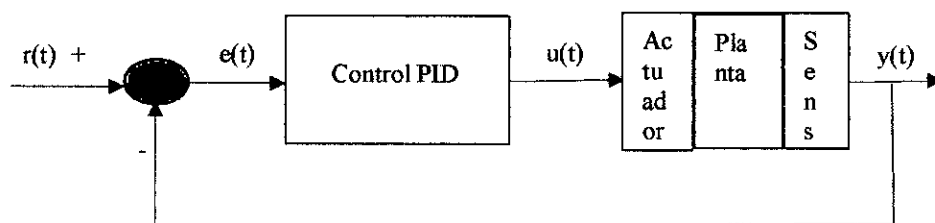
Una de las técnicas de control más populares a nivel industrial y académico es el Control Proporcional Integral Derivativo (PID). En control de procesos el más habitual es el Control Proporcional Integral (PI).

El tipo de controlador a usar se decide en base a la naturaleza de la planta y las condiciones de operación, incluyendo consideraciones tales como seguridad, costo, disponibilidad, confiabilidad, exactitud, peso y tamaño.

El diagrama de bloques de un controlador PID, se muestra en la Figura N° 2.21.

Figura N° 2.21

Diagrama de bloques simplificado del Control PID en L.C.



Fuente: UNAC (2019); elaboración propia

El diseño de controladores PID puede obtenerse usando respuesta en frecuencia o respuesta en el tiempo. En nuestro caso usaremos la respuesta en el tiempo, que es el más usado.

Debido a que esta técnica de control es muy conocida, se evitará hacer anotaciones básicas sobre ventajas y desventajas; por lo que se pasará directamente a plantear el algoritmo de control y la metodología de diseño para determinar los parámetros K_p , T_i y T_d .

El algoritmo de Control PID en tiempo continuo viene dado por:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.16)$$

Siendo:

K_p : Ganancia proporcional

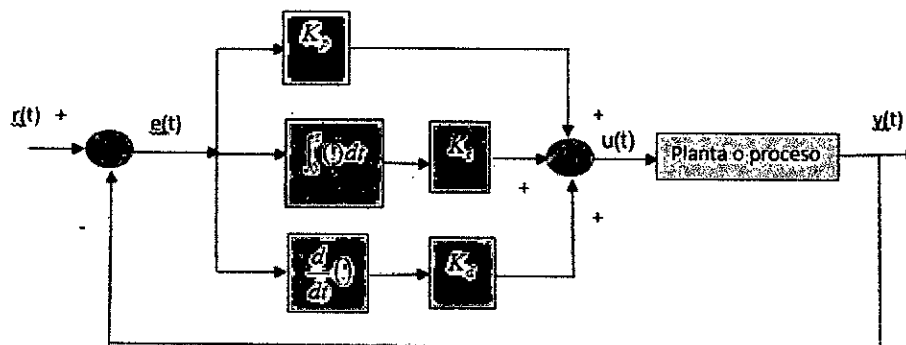
T_i : Tiempo integral o tiempo de retardo o retraso

T_d : Tiempo derivativo o tiempo de adelanto

El diagrama de bloques del controlador PID se muestra en la Figura N° 2.22.

Figura N° 2.22

Diagrama de bloques del Controlador PID y las señales asociadas



Fuente: UNAC (2019); elaboración propia

Aplicando transformada de Laplace a la ecuación (2.16), se obtiene la siguiente función de transferencia:

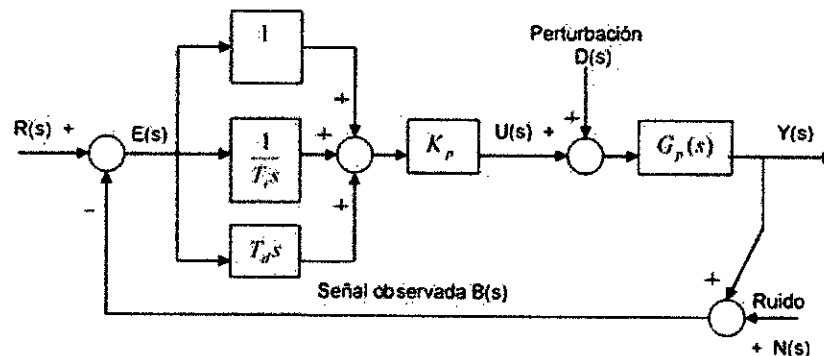
$$G_p(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.17)$$

La ley de control PID dada por la ecuación (2.16), asume un sistema ideal; sin embargo, no existe en la práctica un derivador puro; por lo que se estila usar una estructura de control modificado, para evitar el efecto de derivador y los problemas que podría acarrear la componente proporcional.

El diagrama de bloques detallado del sistema de control PID ideal en Laplace se muestra en la Figura N° 2.23.

Figura N° 2.23

Diagrama de bloques detallado del sistema de Control PID ideal



Fuente: UNAC (2019); elaboración propia

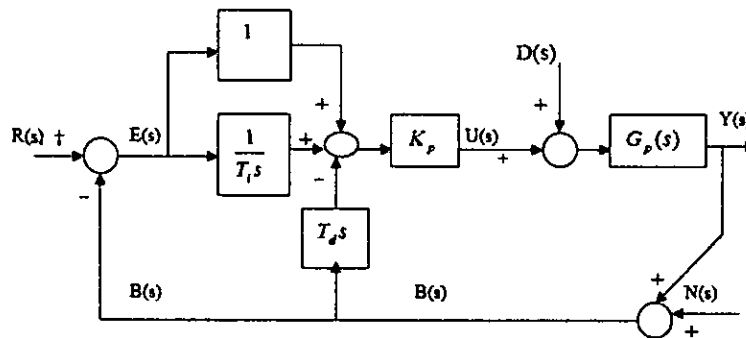
A continuación, se mostrarán las modificaciones realizadas al diagrama de Control PID básico o ideal de la Figura N° 2.23.

Controlador PI-D:

En este caso la componente derivativa ingresa por la retroalimentación, tal como se puede observar en la Figura N° 2.24.

Figura N° 2.24

Estructura del sistema de control PI-D



Fuente: UNAC (2019); elaboración propia

De la Figura N° 2.24 se observa que la señal manipulada $U(s)$ se obtiene así:

$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) R(s) - K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) B(s) \quad (2.18)$$

En ausencia de perturbaciones y ruido, la función de transferencia en lazo cerrado del sistema de control PID básico (ideal) de la Figura N° 2.23 es:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \frac{K_p G_p(s)}{1 + \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) K_p G_p(s)} \quad (2.19)$$

Consiguientemente, la función de transferencia en lazo cerrado del sistema de control PI-D de la Figura N° 2.24 es:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \frac{K_p G_p(s)}{1 + \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) K_p G_p(s)} \quad (2.20)$$

Asimismo, la función de transferencia en lazo cerrado entre la salida $Y(s)$ y la perturbación $D(s)$ en ausencia de la entrada $R(s)$ y la entrada de ruido $N(s)$ es igual en cualquier de los casos, y está dada por:

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_p(s)}{1 + K_p G_p(s) \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right)} \quad (2.21)$$

El efecto de la perturbación en la salida en tiempo estacionario debe tender a "0". Tal afirmación se puede demostrar así:

Considerando: $K_p G_p(s) \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \gg 1$, la ecuación (2.21) pasa a ser:

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_p(s)}{K_p G_p(s) \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right)} = \frac{G_p(s) T_i s}{K_p G_p(s) (T_i s + 1 + T_i T_d s^2)}$$

Entonces, si tomamos límites cuando $s \rightarrow 0$ (tiempo estacionario), obtenemos:

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{Y(s)}{D(s)} = 0 \quad (2.22)$$

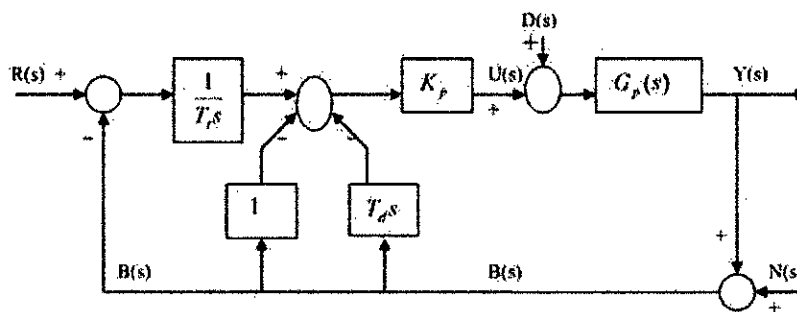
Confirmando lo que se había afirmado líneas arriba.

Controlador I-PD

Los controles PID y PI-D implican una función escalón en la señal manipulada (referencia). Tales cambios escalón en la señal manipulada pueden ser grandes, produciendo saturación dentro del sistema. El criterio básico para evitar este inconveniente es llevar las acciones de control proporcional y derivativo a la trayectoria de realimentación, que permitan

elegir valores más altos para K_p y T_d . El esquema de control I-PD se muestra en la Figura N° 2.25.

Figura N° 2.25
Estructura del sistema de control I-PD



Fuente: UNAC (2019); elaboración propia

De la Figura N° 2.25, se puede determinar que la señal manipulada está dada por:

$$U(s) = K_p \left(\frac{1}{T_i s} \right) R(s) - K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) B(s) \quad (2.23)$$

En ausencia de la perturbación y ruido, la función de transferencia en lazo cerrado $Y(s)/R(s)$ está dada por:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \left(\frac{1}{T_i s} \right) \frac{K_p G_p(s)}{1 + \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) K_p G_p(s)} \quad (2.24)$$

Asimismo, en ausencia de las señales de referencia y ruido, la función de transferencia en lazo cerrado de la salida frente a la perturbación es:

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_p(s)}{1 + K_p G_p(s) \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)} \quad (2.25)$$

que es la misma para los controladores PID y PI-D. En forma idéntica que al PI-D, se puede demostrar que el efecto de la perturbación en la salida en tiempo estacionario es nulo.

Para el presente trabajo consideramos la configuración PI-D en su forma discreta; por lo que a continuación se reescribe la ecuación del controlador en Laplace:

$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) E(s) - K_p T_d s Y(s) \quad (2.26)$$

Como se mencionó líneas arriba, otra modificación importante es filtrar la acción derivativa del controlador PID original (ideal) mediante un filtro de primer (o segundo) orden para disminuir el ruido derivativo. Esta característica limita la amplificación del ruido de medición de alta frecuencia en la salida del controlador, haciendo que la señal de control sea menos ruidosa y la ganancia en alta frecuencia permanezca dentro de un rango de valores apropiadas.

Un término derivativo práctico, ya que un derivador puro no es realizable exactamente, puede aproximarse por un sistema de primer orden con una constante de tiempo T_f que a menudo se normaliza con respecto al tiempo derivativo T_d . Por consiguiente, el derivador del algoritmo PID (ecuación 2.26) se modifica como:

$$T_d s \quad \text{por} \quad \frac{T_d s}{1 + T_f s}$$

Siendo $T_f = \frac{T_d}{N}$, y donde N es la denominada cota de la ganancia derivativa (constante que varía entre 3 a 10).

Reemplazando estas modificaciones en la ecuación (2.26), obtenemos:

$$U(s) = K_p(s) + \frac{K_p}{T_i s} E(s) - \frac{K_p T_d s}{1+T_f s} Y(s) \quad (2.27)$$

En la ecuación (2.27) se puede observar las tres componentes del controlador:

$$P(s) = K_p E(s); \quad I(s) = \frac{K_p}{T_i s} E(s); \quad D(s) = -\frac{K_p T_d s}{1+T_f s} Y(s)$$

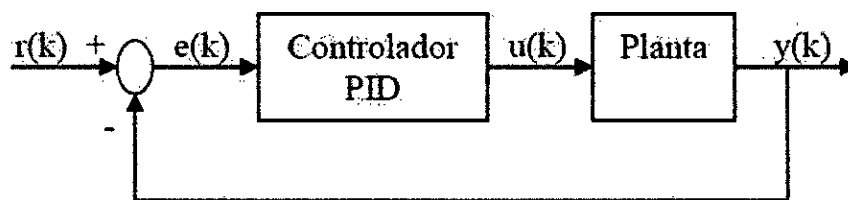
Controlador PID Discreto

En este caso usaremos el método del rediseño, consistente determinar los parámetros del controlador PID discreto a partir de los parámetros del controlador PID de tiempo continuo.

En la Figura N° 2.26 se presenta el diagrama de bloques simplificado del controlador PID en tiempo discreto.

Figura N° 2.26

Estructura del sistema de control PID



Fuente: UNAC (2019); elaboración propia

Las componentes del controlador PID discreto son:

- **Componente proporcional**

La componente proporcional está determinada por la ganancia K_p .

$$P(k) = K_p e(k) \quad (2.28)$$

▪ **Componente integral**

Para esta componente, es preferible partir de su representación en el tiempo, así:

$I(t) = \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt$, entonces aplicando la representación trapezoidal de la componente integral, se obtiene:

$$I(k) = \frac{K_p}{T_i} \sum_{i=1}^k \frac{T}{2} = \frac{K_p}{T_i} \sum_{i=1}^{k-1} \frac{T}{2} [e(i) + e(i-1)] + \frac{K_p}{T_i} \frac{T}{2} [e(k) + e(k-1)]$$

$$I(k) = I(k-1) + \frac{K_p}{T_i} \frac{T}{2} [e(k) + e(k-1)] \quad (2.29)$$

▪ **Componente derivativa**

Partimos de la ecuación de la componente derivativa en Laplace, dada por:

$$D(s) = -\frac{K_p T_d s}{1 + T_f s} Y(s)$$

Operando y convirtiendo al tiempo obtenemos:

$$D(t) + T_f \dot{D}(t) = -K_p T_d \dot{y}(t)$$

$$D(t) + T_f \left[\frac{D(k) - D(k-1)}{T} \right] = -K_p T_d \left[\frac{y(k) - y(k-1)}{T} \right]$$

Despejando $D(k)$ y considerando $T_f = \frac{T_d}{N}$, la componente derivativa discreta viene dada por:

$$D(k) = -\frac{K_p T_d N}{(NT + T_d)} [y(k) - y(k-1)] + \frac{T_d}{(NT + T_d)} D(k-1) \quad (2.30)$$

En conclusión, los parámetros del controlador PI-D discreto, considerando que en tiempo continuo: $K_i = \frac{K_p}{T_i}$, $K_d = K_p T_d$, son:

$$K_{pdisc} = K_p ; K_{idisc} = \frac{K_i T}{2} ; K_{disc} = \frac{K_d N}{(NT + T_d)}$$

2.2.4 Control Predictivo Basado en Modelo (MBPC)

Actualmente, los altos niveles de competencia que existe en la industria, al igual que el creciente interés de la sociedad por la preservación y defensa del medio ambiente, con la finalidad de mitigar los efectos de contaminación generados por la industria, presenta una doble tarea: la primera es la de apostar por la preservación del nivel de vida, y la otra por aplicar estrategias de control con alto grado de eficiencia y flexibilidad. En el caso de la primera tarea, con este trabajo se está apostando en el uso de energías renovables (energía limpia), y en el segundo caso, se está considerando el diseño del Control Predictivo, como una de las técnicas de control fiables, en este caso aplicable a un sistema de bombeo solar fotovoltaico.

El Control Predictivo Basado en Modelo (MBPC) constituye una poderosa herramienta para afrontar este reto, ya que acepta cualquier tipo de modelo, funciones de costo o restricciones, convirtiéndose en la metodología que refleja de mejor manera los múltiples criterios de funcionamiento en la industria de procesos.

El control predictivo ha sido impulsado principalmente por la industria, y ha sido la comunidad académica la que ha ido apoyando, tratando de darle un sustento teórico adecuado. Si bien los controladores predictivos tienen su origen en el control óptimo (Kwon y Pearson, Lee y Markus, Propoi), fue la industria, principalmente la industria petroquímica y

de procesos, la que logró avances sustanciales en cuanto a su aplicación. La necesidad de controlar procesos en puntos de operación en donde las variables permanecen saturadas o cercanas a la saturación promovió la aparición de controladores predictivos basados en modelos sencillos, orientados a la resolución de problemas de control asociados, tales como la consideración de restricciones, incertidumbre y no linealidades ((Camacho, 2003), (Liuping, 2009)). A continuación, se mencionan algunas de las formulaciones más conocidas:

- ✓ IDCOM o MPHC: (Identification-Command o Model Predictive Heuristic Control) propuesto por Richalet et al., utiliza como modelo de predicción la respuesta al impulso (Finite Impulse Response, FIR), función de costo cuadrática, y restricciones en las entradas y salidas.
- ✓ DMC: (Dynamic Matrix Control) propuesto por Cutler y Ramaker, utiliza como modelo de predicción la respuesta al cambio escalón, lo cual limita su aplicación a plantas estables, considera un costo cuadrático penalizando el esfuerzo de control. Este controlador no considera restricciones en la optimización.
- ✓ QDMC: (Quadratic Dynamic Matrix Control) propuesto por García y Morshedi, surge de la extensión del DMC al caso con restricciones. Este controlador forma parte de la segunda generación de controladores predictivos y cuenta con dos tipos de restricciones: duras y blandas, permitiendo la violación de estas últimas durante algún periodo de tiempo.
- ✓ SMOC : (Shell Multivariable Optimizing Control) propuesto por Marquis y Broustail, forma parte de la tercera generación de controladores predictivos. Permite la utilización de modelos en espacios de estados e incorpora observadores y modelos de perturbaciones. Introduce también restricciones duras, blandas y con niveles de prioridad.
- ✓ GPC : (Generalized Predictive Control) propuesto por Clarke et al. y

Clarke et al., utiliza como modelo de predicción la formulación CARIMA, que incorpora una perturbación modelada como ruido blanco. Incorpora restricciones y existen resultados asociados a la estabilidad.

Una lectura más profunda sobre todos estos controladores se puede encontrar en Camacho y Bordons, donde se analizan tanto los aspectos prácticos, como los relativos a la estabilidad y robustez. Un aspecto importante para remarcar es que en la mayoría de los controladores predictivos la estabilidad no está garantizada, por lo que se requiere un ajuste específico para cada caso.

El Control Predictivo Basado en Modelo (MBPC), en realidad es una familia de algoritmos que se basan en el modelo del proceso; por lo que en general, dependerá de la precisión del modelo de predicción para obtener un buen diseño del controlador y tener resultados satisfactorios. Una forma de asegurar la aplicación del Control Predictivo es, identificar experimentalmente el modelo de la planta, para luego diseñar el controlador para el modelo identificado.

La familia de algoritmos de Control Predictivo Basado en Modelo, adicionalmente a las indicadas líneas arriba, que se encuentran en plena aplicación es:

1. Model Predictive Heuristic Control (MPHC), más tarde conocido como Control Algorítmico Basado en Modelo (MAC)
2. Predictor-Based Self-Tuning Control (PBSTC)
3. Extended Horizon Adaptive Control (EHAC)
4. Extended Prediction Self Adaptive Control (EPSAC)
5. Multistep Multivariable Adaptive Control (MMAC)
6. Predictive Functional Control (PFC)

7. Robust Multivariable Predictive Control (RMPC).

Esta familia de controladores usa principios que son comunes entre ellos, entre los que podemos citar:

1. Uso explícito de un modelo para predecir la evolución en instantes de tiempo futuro (modelo de predicción).
2. Minimización de una función de costo o función objetivo "J".
3. Uso de un horizonte de control, horizonte de predicción, y probablemente restricciones en el proceso.

El nombre de Control Predictivo lleva ese nombre, debido a que permite predecir la salida del proceso; por lo que, debido a ello, se genera una señal de control de predicción, que permite controlar en forma óptima la salida del proceso, contando para ello de una función de costo.

A continuación, se lista la notación usada:

- t , denota el índice de tiempo discreto ($t = 0, 1, 2, \dots$).
- $y(t)$, es la salida del proceso (variable controlada).
- $u(t)$, denota la entrada al proceso (variable manipulada o variable de control)
- $w(t)$, representa la trayectoria deseada ("set point").
- $r(t)$, denota la trayectoria de referencia (dentro del bucle de control).
- $u(t+k/t)$, denota los valores futuros de la entrada (variable manipulada: MV) en el tiempo $t+k$ postulados en el tiempo t .
- $y(t+k/t)$, denota los valores futuros de la salida (variable controlada: CV) basado en las mediciones disponibles en el tiempo t :

$$\{ y(t), y(t-1), \dots, u(t-1), u(t-2), \dots \}$$

y en los valores futuros de la entrada postulados en el tiempo t :

$$\{ u(t/t), u(t+1/t), \dots \}.$$

Ventajas:

El Control Predictivo presenta una serie de ventajas sobre otros métodos de control, entre ellas podemos anotar:

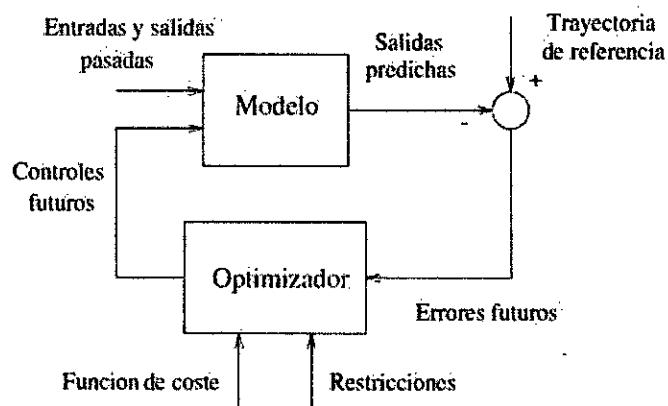
- Los principios de funcionamiento son intuitivos y los parámetros de diseño están orientados al desempeño, permitiendo que los conceptos puedan ser asimilados fácilmente.
- Se pueden aplicar a procesos de control multivariables y no lineal de una manera sencilla.
- Permite controlar procesos con comportamientos dinámicos poco usuales, tales como procesos de fase no-mínima, procesos altamente oscilatorios y procesos inestables.
- Su carácter predictivo lo hace compensar intrínsecamente los tiempos muertos.
- Introduce un control anticipativo, y de forma natural se compensan las perturbaciones medibles.
- Aunque se basa en ciertos principios básicos, es una metodología abierta que permite contribuciones, alternativas y mejoras para el futuro.

Desventajas:

- Pese a que su implementación no es compleja, resulta más difícil que la de los clásicos controladores PID.
- Si la dinámica del proceso es variable, la exigencia computacional para realizar los cálculos se incrementa; no obstante, con la potencia de los computadores actuales esta no es realmente una dificultad infranqueable.

La estructura del MBPC puede ser visualizada en la Figura N° 2.27.

Figura N° 2.27
Estructura del MBPC



Fuente: London (2003); Camacho & Bordons

Modelo de Predicción

El modelo de predicción del proceso o planta puede ser representado por dos modelos de implementación:

1. Modelo paralelo
2. Modelo serie paralelo

El **modelo paralelo** sólo puede ser usado para procesos estables y es el que se implementa por defecto. En este caso la salida $y(t)$ se realimenta a sí misma. Su expresión es:

$$y(t) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(t) + \frac{1}{1 - z^{-1}} e(t)$$

$$= x(t) + n(t) \quad (2.31)$$

Con:

$$C(z^{-1}) = 1, \quad D(z^{-1}) = (1 - z^{-1})$$

$$n(t) = \frac{1}{1-z^{-1}} e(t) ; \quad x(t) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(t)$$

Siendo $x(t)$ la componente de la salida sin perturbación, y $n(t)$ la componente de la perturbación.

La componente de la salida sin perturbación $x(t)$, considerando los polinomios descritos, puede escribirse en su forma no predictiva para cualquier t :

$$\begin{aligned} x(t) &= (1 - A(z^{-1})x(t) + B(z^{-1})u(t) \\ &= -a_1x(t-1) - \dots - a_{n_a}x(t-n_a) \\ &\quad + b_1u(t-1) + \dots + b_{n_b}u(t-n_b) \end{aligned} \quad (2.32)$$

Siendo su expresión predictiva genérica:

$$\begin{aligned} x(t+k/t) &= -a_1x(t+k-1/t) - \dots \\ &\quad - a_{n_a}x(t+k-n_a/t) + b_1u(t+k-1/t) + \dots \\ &\quad + b_{n_b}u(t+k-n_b/t) \end{aligned} \quad (2.33)$$

La expresión genérica predictiva para la perturbación $n(t)$ es:

$$n(t+k/t) = n(t+k-1/t) + e(t+k/t) \quad (2.34)$$

El modelo serie-paralelo puede ser usado en procesos estables e inestables. En este caso, la perturbación $n(t)$ se escoge diferente al del modelo paralelo, como sigue:

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t) + \frac{A(z^{-1})}{1-z^{-1}} e(t) \quad (2.35)$$

Siendo:



$$C(z^{-1}) = A(z^{-1}), \quad D(z^{-1}) = (1 - z^{-1})$$

La componente de la salida sin perturbación $x(t)$ toma entonces la forma:

$$\begin{aligned} x(t) &= (1 - A(z^{-1})y(t) + B(z^{-1})u(t) \\ &= -a_1y(t-1) - \dots - a_{n_a}y(t-n_a) \\ &\quad + b_1u(t-1) + \dots + b_{n_b}u(t-n_b) \end{aligned} \quad (2.36)$$

Por consiguiente, su expresión genérica predictiva del modelo serie/paralelo es:

$$\begin{aligned} x(t+k/t) &= -a_1y(t+k-1/t) - \dots - a_{n_a}y(t+k-n_a/t) \\ &\quad + b_1u(t+k-1/t) \\ &\quad + \dots + b_{n_b}u(t+k-n_b/t) \end{aligned} \quad (2.37)$$

El Controlador Predictivo

El objetivo del controlador predictivo es determinar el vector de control $u(t+k/t)$, con $k = 0, \dots, N_2-1$, que minimice la siguiente función de costo ((Camacho, 2003), (Liuping, 2009)):

$$J = \sum_{k=N_1}^{N_2} [r(t+k/t) - y(t+k/t)]^2 + \lambda \sum_{k=0}^{N_u-1} [\Delta u(t+k/t)]^2 \quad (2.38)$$

donde:

$$\Delta u(t+k/t) = u(t+k/t) - u(t+k-1/t) \quad (2.39)$$

Por consiguiente, los parámetros de diseño a considerar son:

N_1 : Horizonte de predicción mínimo.

N_2 : Horizonte de predicción máximo (por defecto $N_2 = N_1+1 \dots N_1+10$)

N_u : Horizonte de control (por defecto $N_u=1$)

λ : Parámetro de ponderación o sintonía; por defecto se considera cero.

α : Parámetro de filtraje (por defecto se considera cero).

La trayectoria de referencia dentro del bucle de control está representada por la ecuación:

$$r(t + k/t) = \alpha r(t + k - 1/t) + (1 - \alpha)\omega(t + k/t) \quad (2.40)$$

Aplicando transformada Z a la ecuación (2.40) se obtiene la función transferencia pulso entre la referencia dentro del bucle de control y la trayectoria de referencia fuera del bucle de control:

$$\frac{r(z)}{\omega(z)} = \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha z^{-1}} \quad (2.41)$$

De la ecuación (4.41) se puede observar que dicha relación corresponde a un filtro de primer orden, que permite rechazar el ruido y suavizar la salida del sistema de control frente a señales de referencia escalón.

Respuesta libre y respuesta forzada del proceso

Conceptualmente, la respuesta futura o de predicción $y(t+k/t)$ puede ser considerada como el resultado acumulativo de dos efectos, denominados "respuesta libre" y "respuesta forzada", que vienen representados por la siguiente ecuación en diferencias:

$$y(t + k/t) = y_{libre}(t + k/t) + y_{forzada}(t + k/t) \quad (2.42)$$

donde:

$y_{libre}(t+k/t)$: es el efecto del control pasado

$y_{forzada}(t+k/t)$: es el efecto de la acción de control futuro y a una secuencia de entradas escalón.

El efecto acumulativo de todos los escalones viene representado por:

$$y_{forz}(t + k/t) = g_k \Delta u(t/t) + g_{k-1} \Delta u(t + 1/t) + \dots + g_{k-N_u+1} \Delta u(t + N_u - 1/t) \quad (2.43)$$

donde los parámetros g_1, g_2, \dots, g_{N_2} son los coeficientes de la respuesta del sistema al escalón unitario.

De la ecuación (2.43) se puede obtener la siguiente expresión matricial para la componente forzada:

$$Y_{forz} = GU \quad (2.44)$$

donde:

$$y_{forz} = \begin{bmatrix} y_{forz}(t+N_1/t) \\ y_{forz}(t+N_1+1/t) \\ \dots \\ y_{forz}(t+N_2/t) \end{bmatrix}; \quad G = \begin{bmatrix} g_{N_1} & g_{N_1-1} & g_{N_1-2} & \dots \\ g_{N_1+1} & g_{N_1} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{N_2} & g_{N_2-1} & \dots & g_{N_2-N_u+1} \end{bmatrix}$$

$$U = \begin{bmatrix} \Delta u(t/t) \\ \Delta u(t+1/t) \\ \dots \\ \Delta u(t+N_u-1/t) \end{bmatrix}$$

Ley de Control matricial

Para sistemas multivariables, la ley de control matricial, como consecuencia de la minimización de la función de costo, viene dada por la ecuación (2.45).

$$U^* = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T (R - Y) \quad (2.45)$$

Es importante indicar que:

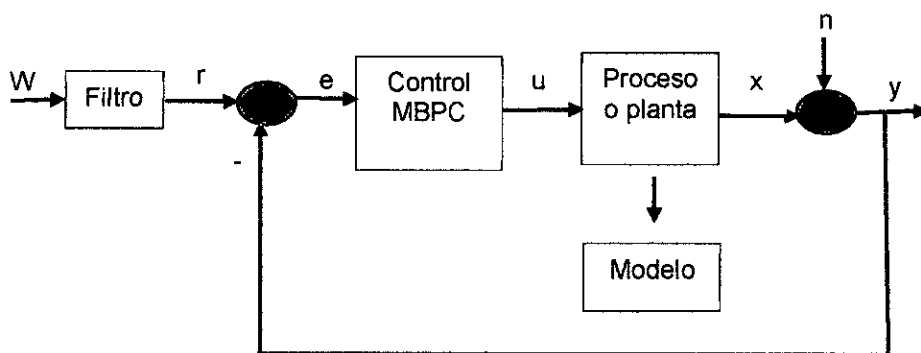
- ✓ Solamente el primer elemento de $\Delta u(t/t)$ de U^* es necesario para computar la entrada de control actual $u(t) = u(t-1) + \Delta u(t/t)$. El mismo procedimiento se repite para la nueva medición $y(t+1)$ en el próximo instante de tiempo $t+1$.
- ✓ La matriz $[G^T G + \lambda I]$ a ser invertida tiene dimensión $N_u \times N_u$. Para el caso por defecto $N_u = 1$, se obtiene una ley de control escalar (con muy buenos resultados en muchos casos prácticos) de la forma:

$$\Delta u(t) = \frac{\sum_{k=N_1}^{N_2} g_k [r(t+k/t) - y_{libre}(t+k/t)]}{\left(\sum_{k=N_1}^{N_2} g_k^2 + \lambda \right)} \quad (2.46)$$

El diagrama de bloques del sistema de control predictivo se muestra en la Figura N° 2.28.

Figura N° 2.28

Diagrama de bloques del Controlador Predictivo



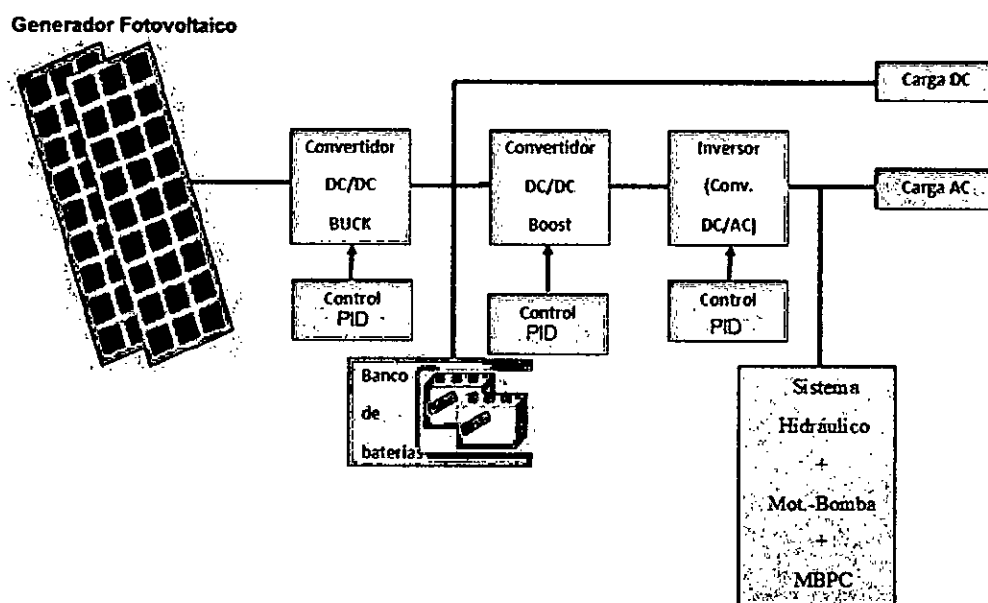
Fuente: UNAC (2019); elaboración propia

2.3 Marco conceptual

Es de vital importancia concatenar los diferentes aspectos teóricos con los que se desea presentar y desarrollar en el presente trabajo de investigación. En tal sentido, luego de tratar la teoría fundamental en la que se basa el sistema de bombeo solar fotovoltaico, en la Figura N° 2.29 se presenta un esquema de principio y de aplicación más general; pero al mismo tiempo específico.

Figura N° 2.29

Diagrama de bloques general del sistema de bombeo FV



Fuente: UNAC (2019); elaboración propia

En dicho esquema se puede apreciar las siguientes componentes del sistema:

1. El generador fotovoltaico.
2. El convertidor DC/DC Buck controlado por PID, que regula la tensión proveniente del generador solar.

3. Un banco de baterías para almacenar tensión, y sr usada cuando no hay energía solar.
4. Un convertidor DC/DC Boost, que permite convertir una tensión DC de bajo nivel a otro de mayor nivel de voltaje, necesario para alimentar la entrada del inversor.
5. El inversor, que convierte la tensión DC proveniente del convertidor Boost a una tensión alterna, que permite alimentar a una bomba AC.
6. Un sistema hidráulico, motor-bomba y controlador Predictivo Basado en Modelo (MBPC).

De todos los componentes anotados, los únicos que no se consideran en el presente trabajo de investigación, es el convertidor DC/DC Boost y el inversor, debido a que en nuestro caso consideramos una bomba solar DC.

2.4 Definición de términos básicos

- ✓ **Generador solar fotovoltaico:** es un generador eléctrico que transforman los rayos solares en energía eléctrica. Uno de los componentes principales es el módulo fotovoltaico (panel solar fotovoltaico).
- ✓ **zonas aisladas:** son lugares o pueblos distantes de las ciudades, que generalmente no tienen acceso a los mercados y a los servicios básicos de la "modernidad", tales como el comercio, la electricidad y el agua, fundamentalmente.
- ✓ **Control Proporcional Integral Derivativo (PID):** es una técnica de control clásica muy popular en aplicaciones de control de procesos industriales; que sin embargo, para aplicaciones de alto rendimiento, multivariables y con parámetros inciertos, no logran un control adecuado sobre las variables.
- ✓ **Control Predictivo Basado en Modelo (MBPC):** es una técnica de control que se basa en el modelo matemático del proceso a controlar para predecir el comportamiento futuro de dicho

sistema, y en base a este comportamiento futuro puede predecir la señal de control futura.

- ✓ **Control Fuzzy:** es una técnica de control que se basa en la selección adecuada de funciones de pertenencia y del establecimiento de una serie de reglas basadas en una lógica multivaluada. Esta lógica presupone por ejemplo que, si hablamos de la temperatura, ésta puede considerar diferentes niveles.
- ✓ **Control Neuronal:** es una técnica de control basada en el modelo de una neurona artificial, que permite reconocer patrones, así como el de aplicarse en tareas de control para sistemas lineales y no lineales, muchas veces difíciles de controlar con técnicas convencionales.
- ✓ **Convertidor DC/DC Buck:** es un circuito electrónico que convierte la tensión DC a otra tensión DC de menor nivel en voltaje (reductor de tensión).
- ✓ **Convertidor DC/DC Boost:** es un circuito electrónico que eleva la tensión DC de su entrada, obteniendo entonces una mayor tensión en su salida (elevador de tensión).

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis

3.1.1 Hipótesis general

En función del planteamiento del problema, de las interrogantes planteadas del problema, de los antecedentes técnicos, así como de los objetivos generales y específicos que se persigue, es que se plantea la siguiente hipótesis general:

“El diseño de un Controlador Predictivo Basado en Modelo (MBPC), permitirá un desempeño óptimo en el control del sistema de bombeo fotovoltaico”.

3.1.2 Hipótesis específicas

H.E.1: “El modelado del sistema de generación solar fotovoltaica, permitirá apreciar el comportamiento de la potencia generada”.

H.E.2: “La aplicación de algoritmos de Control PID al modelo del sistema de acondicionamiento DC/DC, permitirá contar con energía eléctrica regulada en DC, necesaria para alimentar un sistema motor-bomba”.

H.E.3: “La aplicación del algoritmo de Control Predictivo Basado en Modelo (MBPC) al modelo de un sistema hidráulico, permitirá controlar el nivel de agua en forma óptima”.

3.2 Definición conceptual de variables

Considerando que el objetivo central del presente trabajo de investigación es controlar el nivel de agua en un sistema de bombeo fotovoltaico, es entonces necesario precisar que para tal efecto se necesita generar

señales de control adecuadas. En tal sentido, las variables que se consideran son:

Variables dependientes (Y):

- ✓ Energía DC generada por el sistema de conversión DC/DC del sistema de energía solar fotovoltaica
- ✓ Altura de agua del tanque de almacenamiento

Variables independientes (X):

- ✓ Señal de control generada por el Controlador PID en el bus de continua, es decir señal actuante sobre el convertidor DC/DC.
- ✓ Señal de control generada por el Controlador Predictivo Basado en Modelo (MBPC) para el control de nivel de agua en el tanque de almacenamiento.

3.2.1 Operacionalización de las variables

La relación entre las variables independientes (X) y dependientes (Y) en el presente trabajo de investigación, establecen relaciones y conexiones internas entre ellas, determinándose los indicadores. Tal relación se presenta en la Tabla N° 3.1.

Tabla N° 3.1

Operacionalización de las variables

Variables	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores
Señal de control generada por el Controlador PID en su variante PI en el bus de continua, es decir señal actuante sobre el convertidor DC/DC.	El convertidor DC/DC Buck tiene disponible una puerta de control por mosfet, al que se aplica la señal de control PID. La salida del convertidor DC/DC Buck viene a ser el bus de continua.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Modelar y describir el funcionamiento básico de un convertidor DC/DC Buck, sin aplicación del algoritmo de Control PID, en su variante PI. 2. Diseñar el controlador PI y aplicar a la entrada de control del convertidor DC/DC Buck. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tensión (V) generado por el controlador PI.
Señal de control generada por el Controlador Predictivo Basado en Modelo (MBPC) para el control de nivel de agua en el tanque de almacenamiento.	La señal del MBPC es un algoritmo de control que se aplica a la bomba hidráulica para controlar el flujo, e indirectamente controlar el nivel de agua en el tanque de almacenamiento.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Modelar y describir el funcionamiento de un sistema hidráulico, aun sin la aplicación de una acción de control. 2. Diseñar el MBPC y aplicar a la entrada de control de la bomba hidráulica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tensión (V) generado por el Controlador Predictivo Basado en Modelo (MBPC).
Energía DC generada por el sistema de conversión DC/DC del sistema de energía solar fotovoltaica	Tensión DC regulada a la salida del convertidor DC/DC Buck	Determinar si la aplicación del control PI , regulará la tensión de salida del convertidor DC/DC Buck, el cual es alimentado por un generador solar FV.	<ul style="list-style-type: none"> • Tensión (V) regulada a la salida del convertidor DC/DC Buck.
Altura de agua del tanque de almacenamiento	Nivel de agua en el tanque de almacenamiento, que es controlado por el algoritmo del MBPC.	Determinar si la aplicación del MBPC a la bomba hidráulica, controlará en forma óptima el nivel de agua en el tanque.	<ul style="list-style-type: none"> • Altura (m.) regulada del tanque de almacenamiento.

IV. DISEÑO METODOLÓGICO

4.1 Tipo y diseño de investigación

El tipo de investigación es básica.

La metodología empleada es la siguiente:

1. Modelado del Generador Solar Fotovoltaico.
2. Diseño del regulador de carga para la alimentación de la bomba solar DC.
3. Dimensionamiento y modelado del sistema hidráulico
4. Diseño del Controlador PID de nivel de agua en el tanque de almacenamiento.
5. Diseño del Controlador Predictivo Basado en Modelo (MBPC) de nivel de agua en el tanque de almacenamiento.

4.1.1 Modelado del Generador Solar Fotovoltaico

Considerando que existen una variedad de fabricantes de paneles solares fotovoltaicos, en este trabajo de investigación se hará uso del panel solar fotovoltaico SFM 90W, usado en (Benites, 2017), de cuya hoja de especificaciones proporcionada por el fabricante Singfo Solar Energy Sci & Tech Co., se ha extraído los datos más importantes, tal como se muestra en la Tabla N° 4.1.

El modelo de la celda fotovoltaica se puede representar de diferentes formas. Uno de ellos es el presentado en (Benites, 2017).

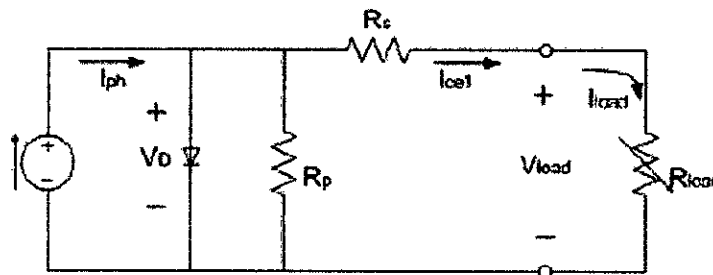
Tabla N° 4.1
 Características eléctricas del panel solar monocristalino SFM
 90W de Singfo Solar Energy Sci & Tech Co., Ltd

Potencia máxima (P_{max})	90W
Voltaje en P_{max} (V_{mpp})	18.1V
Corriente en P_{max} (I_{mpp})	4.98A
Corriente en corto circuito (I_{sc})	5.47A
Voltaje en circuito abierto (V_{oc})	21.8V
Rango de temperatura	-40 a 85°C

Fuente: UNAC (2017); Benites, N.

En dicho trabajo de investigación el modelo de una celda fotovoltaica es representada según se muestra en la Figura N° 4.1.

Figura N° 4.1
 Circuito eléctrico de una celda fotovoltaica con carga



Fuente: UNAC (2017); Benites, N.

De la figura en mención se puede deducir que R_s es la resistencia en serie que se conecta con la carga y R_p es la resistencia de los cristales

de la unión pn que constituyen la celda solar fotovoltaica. En tal sentido, el modelo eléctrico de la celda solar fotovoltaica se puede expresar por la ecuación (4.1), así:

$$I_{cell} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q}{AKT}(V_{load} + I_{cell}R_s)} - 1 \right] - \left(\frac{V_{load} + I_{cell}R_s}{R_p} \right) \quad (4.1)$$

Siendo:

I_{cell} : Corriente de salida de la celda

I_{ph} : Corriente generada por la luz

I_0 : Corriente de saturación de la celda

q : Carga eléctrica

V_{load} : Voltaje de salida de la carga

A : Constantes ideales

K : Constante de Boltzmann = $1.381 \times 10^{-23} J/^{\circ}K$

T : Temperatura de la celda en $^{\circ}K$

Es usual conocer la respuesta V-I y P-V de un panel solar, que en nuestro caso corresponde al Panel Solar SFM 90W, por lo que, mediante un sencillo programa en Matlab, podemos obtener dicha respuesta. El programa en mención se presenta a continuación:

```
% RESPUESTA V-I Y P-V DEL PANEL SOLAR SFM 90W
% SFM90Panel.m
% AUTOR: DR. ING. NICANOR RAÚL BENITES SARAVIA
clear all;
% DATOS:
Vmpp=18.1; Isc=5.47; Impp=4.98; Voc=21.8;
Rsm=0.74; Rpm=44.49; b=0.0703;

% VOLTAJE Y CORRIENTE OPTIMA GENERADO POR EL PANEL
Vop=Voc+b*Voc*log(b-b*exp(-1/b));
Iop=(Isc-Isc*exp(Vop/(b*Voc)-1/b)/(1-exp(-1/b)));

% POTENCIA MÁXIMA GENERADA POR EL PANEL
Pmax=Vop*Iop;

% CORRIENTE Y VOLTAJE GENERADO POR EL PANEL
```

```

N=23;
for k=1:N

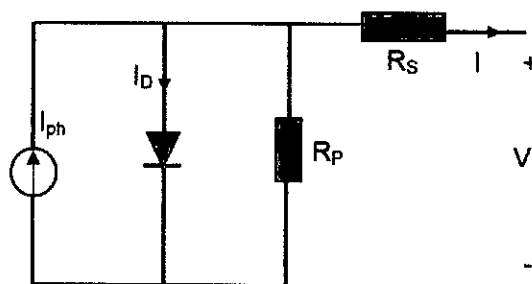
Vpv=[0;1;2;3;4;5;6;7;8;9;10;11;12;13;14;15;16;17;18;19;20;21;21.8]
;
    I=(Isc-Isc*exp(Vpv/(b*Voc)-1/b))/(1-exp(-1/b));
    V=Vpv;
    %P=(V(k)*Isc-V(k)*Isc*exp(Vpv/(b*Voc)-1/b))/(1-exp(-1/b));
    P(k)=V(k)*I(k);
end
figure;
plot(V,I)
xlabel('V: voltaje (V)');
ylabel('I: corriente (A)');
grid
figure;
plot(V,P)
xlabel('V: voltaje (V)');
ylabel('P: potencia (W)');
grid

```

Un modelo simplificado; pero que recoge parámetros importantes que permiten contrastar con la curva de respuesta real de una celda fotovoltaica, se puede encontrar en (Habbati, 2014), por lo que puede representarse mediante el circuito eléctrico de la Figura N° 4.2.

Figura N° 4.2

Modelo simplificado de una celda fotovoltaica



Fuente: UNAC (2019); elaboración propia

De la Figura N° 4.2 se puede encontrar la expresión de la corriente generada por la celda, dada por la ecuación (4.2).

$$I = I_{ph} - I_D - I_{Rp} \quad (4.2)$$

La ecuación (4.2) en forma explícita, puede reescribirse por la ecuación (4.3), así:

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left[e^{\left(\frac{V+I.R_s}{n.V_{th}} \right) - 1} \right] - \frac{(V + I.R_s)}{R_p} \quad (4.3)$$

Donde:

I: corriente de salida de a celda

n: factor de idealidad del diodo

V: Tensión de salida de la celda

V_{th}: Tensión térmica: $V_{th} = \frac{kT}{q}$

Considerando condiciones de cortocircuito, es decir $I = I_{sc}$, $V = 0$, y aplicadas a la ecuación (4.3), se obtiene:

$$I_{ph} = I_0 \cdot \left[e^{\left(\frac{I_{sc}.R_s}{n.V_{th}} \right) - 1} \right] + I_{sc} \cdot \frac{(R_s + R_p)}{R_p} \quad (4.4)$$

Por otro lado, si consideramos algunas aproximaciones, como:

- El término exponencial es próximo a 1
- $I_0 \ll I_{ph}$

La ecuación (4.4) queda reformulada por la siguiente ecuación:

$$I_{ph} = I_{sc} \cdot \frac{(R_s + R_p)}{R_p} \quad (4.5)$$

Ahora, si evaluamos la ecuación (4.5) en condiciones estándar de prueba (STC), que son:

- Temperatura de célula: $T_{cel} = 298 \text{ } ^\circ K$

- Irradiancia: $G = 800 \text{ W/m}^2$

Se obtiene:

$$I_{ph,ref} = I_{sc,ref} \cdot \frac{(R_s + R_p)}{R_p} \quad (4.6)$$

Y por consiguiente, la ecuación de la corriente generada por la luz solar es:

$$I_{ph}(G, T) = I_{ph,ref} \cdot \frac{G}{G_{ref}} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{1/6} \quad (4.7)$$

La ecuación de la corriente inversa de saturación viene dada por:

$$I_0 = C \cdot T_{cel}^3 \cdot e^{\left(\frac{-V_{g0}}{n \cdot V_{th}} \right)} \quad (4.8)$$

Siendo:

- V_{g0} la barrera de potencial, que para el silicio cristalino tiene un valor de 1.21 voltios.
- C : constante que es función de la corriente inversa de saturación de referencia, la temperatura de referencia y de otros parámetros.

La expresión de C viene dada por:

$$C = \frac{I_{0,ref}}{T_{ref}^3} e^{\left(\frac{-V_{g0}}{n \cdot V_{th,ref}} \right)} \quad (4.9)$$

La ecuación de la corriente inversa de saturación de referencia es:

$$I_{0,ref} = \frac{I_{sc,ref} \cdot (R_s + R_p) - V_{oc,ref}/NCS}{R_p} \cdot e^{\left(\frac{-V_{oc,ref}/NCS}{n \cdot V_{th,ref}} \right)} \quad (4.10)$$

La ecuación (4.4) bajo condiciones de circuito abierto, viene dada por:

$$I_{ph} = I_0 \cdot \left[e^{\left(\frac{V_{oc}}{n \cdot V_{th}} \right) - 1} \right] + \frac{V_{oc}}{R_p} \quad (4.11)$$

Asimismo, la corriente de cortocircuito I_{sc} depende de la irradiancia y temperatura; pero también de R_s y R_p , tal como se muestra a continuación:

$$I_{sc}(G, T, R_s, R_p) = I_{ph}(G, T) \cdot \frac{R_p}{R_s + R_p} \quad (4.12)$$

Bajo condiciones de circuito abierto ($I = 0$), considerando la ecuación (4.11), la tensión de circuito abierto es:

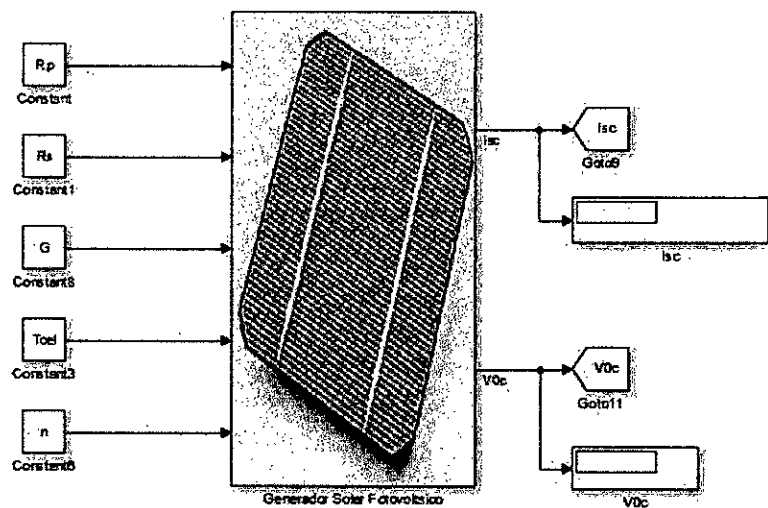
$$V_{oc}(G, T, R_p) = n \cdot V_{th} \cdot \ln \left[\frac{(I_L + I_0) R_p - V_{oc}}{I_0 \cdot R_p} \right] \cdot NCS \cdot NumPaneles \quad (4.13)$$

Siendo:

- NCS: número de células en serie de cada módulo
- NumPaneles: número de paneles solares en serie

Las ecuaciones (4.6) a (4.13) pueden representarse mediante el diagrama compacto en Simulink, mostrada en la Figura N° 4.3.

Figura N° 4.3
Modelo simplificado compacto del generador solar fotovoltaico



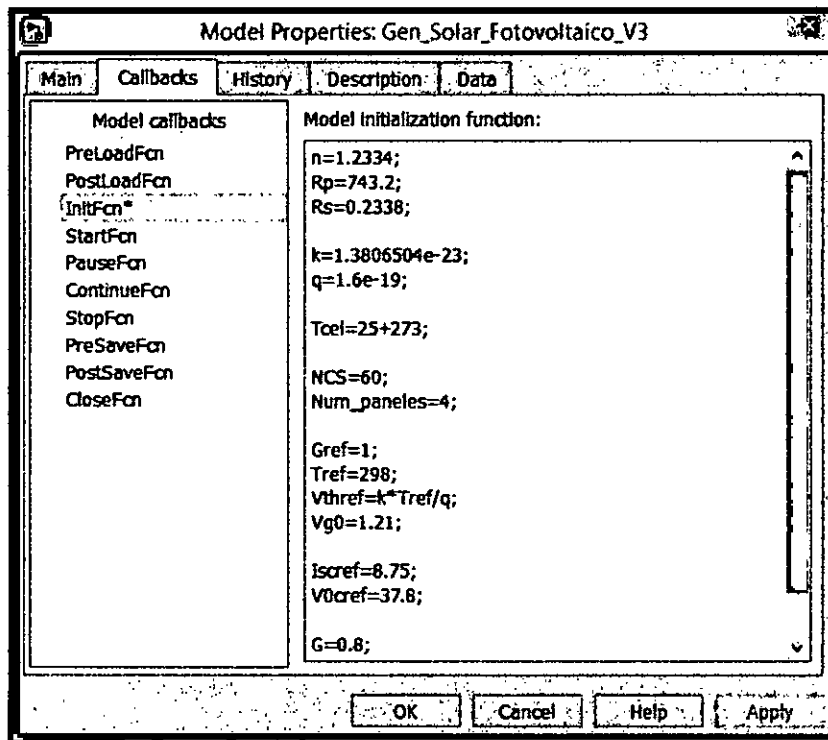
Fuente: UNAC (2019); elaboración propia

El diagrama de la Figura N° 4.3 está compuesto por subsistemas, los cuales se presentan en detalle en el Anexo B.

Ingresando a la opción Model Properties/Callbacks/InitFcn de Matlab, se tiene acceso al ingreso de datos de los parámetros del Generador Solar Fotovoltaico, tal como se muestra en la Figura N° 4.4.

Figura N° 4.4

Model Properties de Matlab para el generador solar fotovoltaico



Fuente: UNAC (2019); elaboración propia

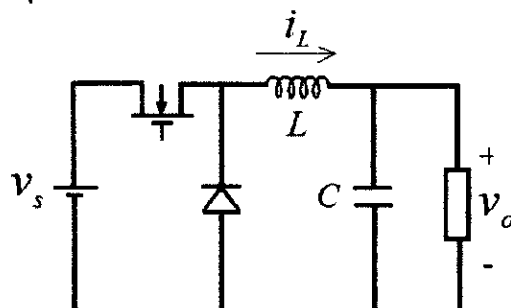
4.1.2 Diseño del regulador de carga para la alimentación de la bomba solar DC

Diseño del convertidor DC/DC Buck

El convertidor DC/DC Buck es un circuito electrónico, cuya salida V_0 es menor o igual que la tensión de entrada V_s , es decir es un convertidor reductor de tensión, el cual debe mantenerse constante en el supuesto que se use un capacitor C muy grande como filtro de salida. La Figura N° 4.5 muestra el convertidor Buck, en la que se puede apreciar la disposición de la puerta de entrada de control del mosfet.

Figura N° 4.5

Esquema de un convertidor DC/DC Buck



Fuente: PROMEP (s.f.); Campos D.

La tensión de salida V_0 viene dada por:

$$V_0 = U \cdot V_s \quad (4.14)$$

El modelado matemático del convertidor Buck se realiza asumiendo que este trabaja en modo continuo de conducción (MCC) (Campos), es decir la corriente en el inductor y el voltaje en el capacitor poseen un valor constante, y una parte fluctuante alrededor de un valor promedio. Esta condición de operación está ligada a los valores de la inductancia, la resistencia de carga del convertidor y a la frecuencia de conmutación, como

se puede ver en (Campos). En tal sentido, se usará los resultados finales de dicho modelado, representado por la ecuación (4.15).

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{V_s}{L} \\ 0 \end{pmatrix} \hat{u} + \begin{pmatrix} \frac{U}{L} \\ 0 \end{pmatrix} \hat{v}_s \quad (4.15)$$

$$y = (0 \quad 1) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad (5.16)$$

Aplicando transformada de Laplace a las ecuaciones (4.15) y (4.16), y aplicando el teorema de superposición debido a la existencia de dos entradas (\hat{u} , \hat{v}), se obtienen las siguientes funciones de transferencia:

$$G_1(s) = \frac{\hat{v}_0(s)}{\hat{u}(s)} = \frac{V_0}{U} \cdot \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \quad (4.17)$$

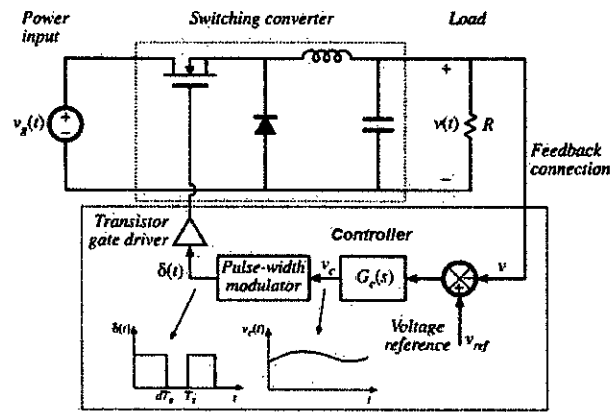
$$G_2(s) = \frac{\hat{v}_0(s)}{v_s(s)} = U \cdot \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \quad (4.18)$$

Diseño del Controlador PID del convertidor DC/DC Buck

El esquema del sistema de control genérico para el convertidor Buck, se muestra en la Figura N° 4.6, en el que se muestra el convertidor Buck (en este caso la planta) y el sistema de control realimentado, conformado por el bloque de diferencia entre el setpoint (referencia) y la señal sensada (salida a controlarse), así como el bloque controlador propiamente dicho, el PWM y el driver de gatillado o disparo para la puerta del mosfet (Erickson, 2004).

Figura N° 4.6

Esquema en lazo cerrado del convertidor Buck

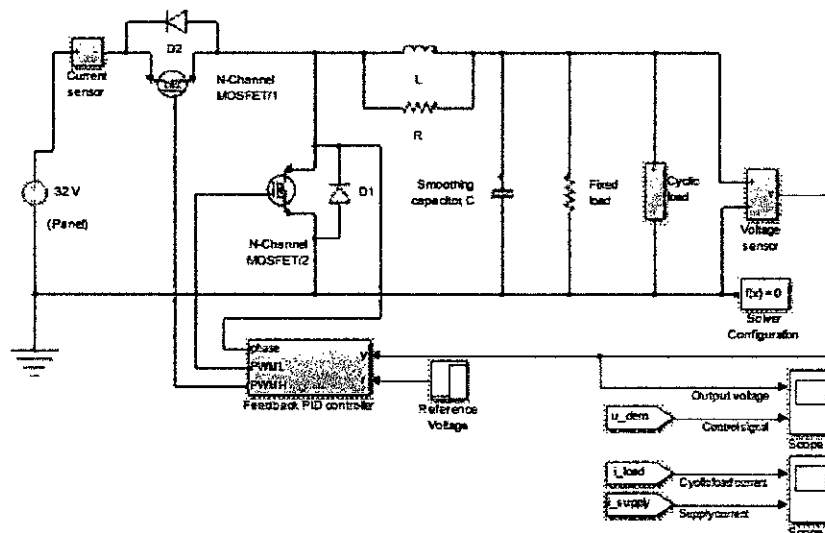


Fuente: Universidad Tecnológica de Pereyra (2015); Cardona, H.

Considerando las ecuaciones obtenidas para el controlador PID del Capítulo II, la simulación del control PID de la tensión de salida del convertidor Buck se ha realizado en Simulink, tal como se muestra en la Figura N° 4.7.

Figura N° 4.7

Esquema de Control PID del Convertidor Buck en Simulink



Fuente: UNAC (2019); elaboración propia

La alimentación de la bomba solar DC proviene de la tensión de salida del regulador de carga (convertidor Buck), por lo que para la implementación del control PID del convertidor Buck en la plataforma Simulink (MathWorks, 2015), se han considerado las siguientes pruebas con los consiguientes datos:

- Tensión de entrada al regulador de 32 VDC
- Tensión de referencia para el controlador PID: 24 V.
- Tensión de referencia para el controlador PID: de 10 a 24 V.

4.1.3 Dimensionamiento y modelado del sistema hidráulico

Antes de abordar el diseño de los controladores PID y MBPC para el nivel de agua en el tanque de almacenamiento, es necesario dimensionar el sistema en base a las ecuaciones obtenidas en el Capítulo II y mostrar la interacción con los demás componentes, tal como puede observarse en la Figura N° 4.8.

Cálculo de la altura total de bombeo

Para determinar las tres componentes de altura del sistema hidráulico, reescribamos la ecuación de la altura total de bombeo:

$$H = H_d + H_g + S_w \quad (4.19)$$

- **Altura estática (H_g)**

Para el presente trabajo, se considera una altura estática o de carga de 10m.

- **Altura dinámica (H_d)**

La fórmula empleada en el cálculo de la altura dinámica es la Hazen-Williams, dada por:

$$H_d = \frac{10.674}{C^{1.852} d^{4.78}} Q^{1.85} L \quad (4.20)$$

Siendo:

Q: flujo de agua = 0.0002314815 m³/s

L: longitud de tubería = 5 m

d: diámetro interno de la tubería = 4" = 0.1 m

C: coeficiente de rugosidad = 150

Reemplazando valores en la ecuación (5.20), obtenemos:

$$H_d = \frac{10.674}{150^{1.852} (0.1)^{4.78}} (0.0002314815)^{1.85} \times 5 = 0.1072303 \text{ m}$$

Como se podrá apreciar, las pérdidas son muy pequeñas.

- **Abatimiento (S_w)**

El abatimiento o descenso del nivel de agua durante el bombeo, se calcula con la ecuación que fue presentada en el Capítulo IV, y que se reescribe:

$$S_w = \frac{Ln t}{4\pi T} Q + K_w Q + D_w Q^2 \quad (4.21)$$

Para nuestro caso, este término lo consideraremos despreciable; por consiguiente, la altura total de bombeo es:

$$H = H_d + H_g + S_w$$

$$H = 0.1072303 + 10 + 0 = 10.1072303 \text{ m}$$

Cálculo de la energía hidráulica diaria requerida

Para el cálculo de la Energía hidráulica diaria, usamos la siguiente ecuación:

$$E_H = \frac{K Q_d H}{\eta_{mb}} \quad (4.22)$$

Siendo:

H: altura de bombeo o altura equivalente total = 10.1072303 m

η_{mb} : eficiencia del motor-bomba = 50%

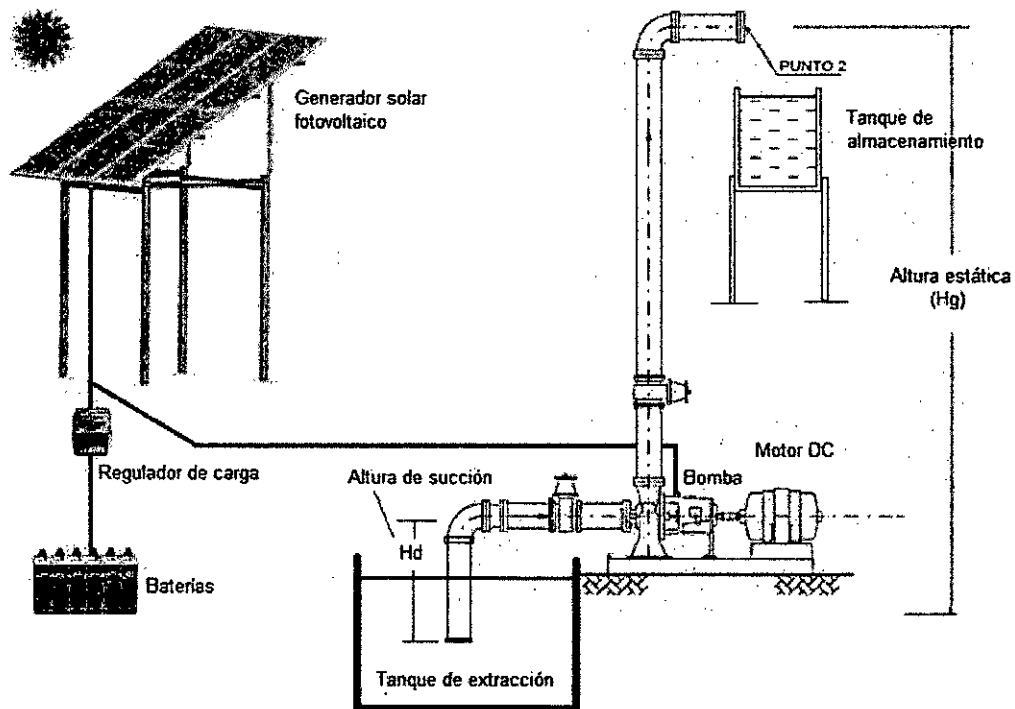
K: constante = 2.725

Reemplazando los datos y evaluando se obtiene:

$$E_H = \frac{2.725 * 20 * 10.1072303}{0.50}$$
$$E_H = 0.2286 \text{ KWh/dia}$$

Figura N° 4.8

Esquema del sistema hidráulico con conexión al generador solar fotovoltaico



Fuente: UNAC (2019); elaboración propia

Potencia eléctrica del generador solar fotovoltaico

Para determinar la potencia pico eléctrica del generador solar fotovoltaico, usaremos la siguiente fórmula:

$$P_p = \frac{E_H}{\eta_{mb} F_m [1 - \delta(T_c - T_c^*)]} G^* G_{dm} \quad (4.23)$$

Donde:

E_H : Energía hidráulica = 0.2286 KWh/día

η_{mb} : eficiencia media del sistema = 40%

F_m : factor de acoplo medio = 0.9

G^* : irradiancia solar = 1000 W/m²

G : irradiancia media diaria mensual, equivalente al número de horas de sol = 6.195

T_c : temperatura media diaria de los módulos solares durante las horas de sol = 40°C

T_c^* : temperatura ambiente = 25°C

δ : coeficiente de variación de la potencia con la Temp. de las células = 0.005/°C

Reemplazando valores, obtenemos:

$$P_p = \frac{0.2286}{0.4} \frac{1000}{0.9[1 - 0.005(40 - 25)]6.195} = 110.813 \text{ W}$$

Por consiguiente, la potencia eléctrica del convertidor DC/DC Buck, así como la potencia del motor es la misma que la del generador.



Modelado del sistema de bombeo y nivel de agua

La planta está compuesta por la bomba, el tanque de almacenamiento de agua y el sensor de nivel. En consecuencia, obtendremos el modelo matemático de cada uno de los componentes del sistema, con la finalidad de obtener su función de transferencia.

▪ **Modelo de la bomba**

Calculemos primero el caudal requerido por la bomba. Para ello consideraremos que el caudal diario promedio requerido es $Q=20 \text{ m}^3/\text{día}$, entonces, el caudal medio horario es:

$$Q_{mh} = \frac{Q_d}{24} = \frac{20\text{m}^3}{24}$$
$$Q_{mh} = 0.833\text{m}^3/\text{h}$$

Por consiguiente, el caudal mínimo que debe ser suministrado por la bomba es:

$$Q_B = 1.8 Q_{mh}$$
$$Q_B = 1.8 * 0.833$$
$$Q_B = 1.49 \text{ m}^3/\text{h}$$

Por otro lado, sabemos que la bomba es accionada por un motor DC, por lo que la ecuación de la bomba puede representarse aproximadamente en su zona lineal con la siguiente ecuación:

$$Q_B = K_b V_{in} = 1.49 V_{in} \quad (4.24)$$

Donde:

K_b : pendiente de la curva característica de la bomba centrífuga = 1.49 l.p.m./V

V_{in} : voltaje de entrada a la bomba (V: voltios)

Considerando que el caudal debe estar representado en m^3/h , entonces debemos efectuar la siguiente conversión:

$$Q_B = 1.49 * 0.001 * 60 V_{in}$$

$$Q_B = 0.0894 V_{in}$$

Por consiguiente, $K_b = 0.0894 m^3/h/v$

Finalmente, aplicando Transformada de Laplace a la última expresión para el caudal, encontramos la siguiente función de transferencia de la bomba:

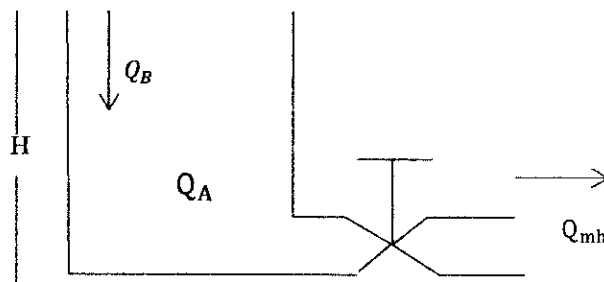
$$G_p(s) = \frac{Q_B(s)}{V_{in}(s)} = 0.0894$$

▪ **Modelo del tanque de almacenamiento**

El diagrama esquemático simplificado del tanque de almacenamiento se puede observar en la Figura N° 4.9.

Figura N° 4.9

Diagrama esquemático del tanque de almacenamiento



Fuente: UNAC (2019); elaboración propia

Los datos del sistema son:

$Q_B =$ Caudal de entrada al tanque m^3/h

$Q_{mh} =$ Caudal de salida del tanque m^3/h

$Q_A =$ Caudal almacenado en el tanque m^3/h

El flujo o caudal de salida en el tanque puede escribirse mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{mh} = K_v \cdot \sqrt{H} \quad (4.25)$$

Donde:

- altura máxima del tanque: $H_{max} = 4m$
- área del tanque: $A = 40 m^2$
- constante de la válvula: $K_v = 09288 m^3/h$

El caudal almacenado o acumulado viene dada por:

$$Q_A = A \frac{dH}{dt} \quad (4.26)$$

El caudal neto, viene a ser la diferencia entre el caudal de entrada y el de salida, y viene a ser el caudal acumulado, representado por:

$$Q_B - Q_{mh} = A \frac{dH}{dt} \quad (4.27)$$

Reemplazando la ecuación (4.25) en la ecuación (4.27), se obtiene:

$$\begin{aligned} Q_B - K_v \sqrt{H} &= A \frac{dH}{dt} \\ \dot{H} &= \frac{1}{A} Q_B - \frac{K_v}{A} \sqrt{H} \end{aligned} \quad (4.28)$$

Siendo la ecuación (4.2) una ecuación no lineal, pasamos a realizar el proceso de linealización, para lo cual consideraremos el caudal de entrada en el punto de operación $\bar{Q}_B = 20 \text{ m}^3/\text{dia} = 0.8333 \text{ m}^3/\text{h}$.

$$0 = \frac{1}{A} \bar{Q}_B - \frac{K_v}{A} \sqrt{\bar{H}}$$

$$\bar{H} = \frac{\bar{Q}_B^2}{K_v^2}$$

Determinando la matriz jacobiana A, B, C y D de la ecuación (4.28):

$$A = \frac{\partial f}{\partial H} = -\frac{1}{2} \frac{K_v}{A} H^{-1/2} = -\frac{1}{2} \frac{K_v^2}{A \bar{Q}_B}$$

$$B = \frac{\partial f}{\partial Q_B} = \frac{1}{A}; \quad C = 1; \quad D = 0$$

Entonces el sistema linealizado en términos de variables residuales es:

$$\dot{h} = -\frac{1}{2} \frac{K_v^2}{A \bar{Q}_B} h + \frac{1}{A} q_B \quad (4.29)$$

Aplicando transformada de Laplace a la ecuación (4.29) se encuentra que:

$$\frac{H(s)}{Q_B(s)} = \frac{1/A}{(s + K_v^2/2A\bar{Q}_B)}$$

▪ Modelo del sensor de nivel

Se considera un sensor de nivel de presión diferencial junto con su etapa de acondicionamiento, siendo representado por el diagrama de bloque, mostrado en la Figura N° 4.10.

Figura N° 4.10

Diagrama de bloque del sensor de nivel



Fuente: UNAC (2019); elaboración propia

La salida del sensor de presión diferencial viene dada por la ecuación (4.3).

$$V_{out} = K_s H \quad (4.30)$$

Donde:

$K_s = 0.1273 [V/cm.]$: pendiente de la curva característica del sensor de presión diferencial y su acondicionamiento. Convirtiendo a V/m, obtenemos:

$$\begin{aligned} V_{out} &= 0.1273 H \\ V_{out} &= 0.1273 \frac{V}{cm} \times \frac{cm}{0.01 m} H(m) \\ V_{out} &= 12.73 H [V] \end{aligned}$$

$$\frac{V_{out}(s)}{H(s)} = 12.73$$

Por lo tanto, la función de transferencia del sistema es:

$$G_p(s) = \frac{V_{out} H(s)}{H(s) Q_B(s) V_{in}(s)} \frac{Q_B}{V_{in}(s)} = 12.72 \times \frac{1/A}{(s + K_v^2/2A\bar{Q}_B)} \times 0.0894$$

$$G_p(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{1.1372/A}{(s + K_v^2/2A\bar{Q}_B)}$$

La función de transferencia obtenida luego de reemplazar valores de los parámetros es:

$$G_p(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{0.02843}{(s + 0.012941)}$$

El programa en Matlab que permite determinar su respuesta ante una entrada escalón unitario en lazo abierto, se lista a continuación:

```
% MODELADO DEL SISTEMA HIDRÁULICO
% tanque_almacena.m
% Autor: Dr. Ing. Nicanor Raúl Benites Saravia
% DATOS
A=40; % m2: area del tanque de almacenamiento
Kv=0.9288; % constante de la válvula
Qb_barra=0.8333; % Caudal de la bomba en el punto de operación
H_barra=Qb_barra^2/Kv^2; N=1 % magnitud del escalon para Vin=N
voltios.
% SIMULACIÓN EN LAZO ABIERTO
num=[1.1372/A];
den=[1 Kv^2/(2*A*Qb_barra)];
printsys(num,den)
%step(num* N/12.73,den)
step(num,den)
grid
ylabel('Altura (m)')
xlabel('Tiempo')
```

4.1.4 Diseño del Controlador PID de nivel de agua en el tanque de almacenamiento

En el capítulo II se presentó la teoría del controlador PID. Este controlador es usual utilizarlo en plantas y procesos cuya función de transferencia es de orden 2 o mayor a 2; sin embargo, nuestra planta simplificada es de primer orden, por lo que le corresponde el diseño del Control PI, que pasamos a determinar.

El algoritmo de control PID (Ogata, 1998) a considerar, es el presentado en el capítulo II, que se vuelve a reescribir, a efectos de determinar sus parámetros.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.31)$$

La que se usa en este proyecto es el PI, una modificación del PID, en el cual la componente derivativa es nula, debido a que la planta es de primer orden. Es necesario precisar que el haber escogido un PI es debido a que la función de transferencia del sistema hidráulico no presenta integrador; por lo que se necesita incorporar un integrador en el controlador, y, en consecuencia, el PI es el que cuenta con la componente integral (I). Este requisito es importante debido a que necesitamos obtener un perfecto seguimiento a determinadas consignas o referencias; es decir debemos obtener error estacionario nulo. En tal este sentido, la expresión del algoritmo PI se presenta en la ecuación (4.32).

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (4.32)$$

La función de transferencia del controlador PI en tiempo continuo viene dada por:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \frac{\left(s + \frac{1}{T_i}\right)}{s} \quad (4.33)$$

Por consiguiente, la función de transferencia directa viene expresada por:

$$G(s) = G_p(s)G_c(s) = \frac{0.02843K_p \left(s + \frac{1}{T_i}\right)}{s(s + 0.012941)} \quad (4.34)$$

Por lo que, la función de transferencia de lazo cerrado es:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{0.02843K_p \left(s + \frac{1}{T_i} \right)}{s^2 + 0.012941s + 0.02843K_p s + 0.02843K_p/T_i} \quad (4.35)$$

En tal sentido, la ecuación característica de lazo cerrado viene a ser:

$$s^2 + 0.012941s + 0.02843K_p s + 0.02843K_p/T_i = 0 \quad (4.36)$$

Ahora, considerando las siguientes especificaciones de funcionamiento de lazo cerrado, determinamos la ecuación característica deseada que permite la obtención de los parámetros del controlador PI.

$$t_s = 600 \text{ seg.} ; \quad \xi = 0.8$$

Considerando el criterio de error del 2%, obtendremos:

$$t_s = \frac{4}{\xi \omega_n} = 600 \Rightarrow \xi \omega_n = 0.0067 ; \quad \omega_n = 0.0084 \text{ rad/seg}$$

Por lo tanto, la ecuación característica deseada de lazo cerrado, viene representada por:

$$s^2 + 0.0134s + 0.00007056 = 0 \quad (4.37)$$

Igualando las ecuaciones (4.36) y (4.37), obtenemos los parámetros del Controlador PI, así:

$$0.012941 + 0.02843K_p = 0.0134 \Rightarrow K_p = 0.0161$$

$$0.02843 \frac{K_p}{T_i} = 0.00007056 \Rightarrow T_i = 6.487 \text{ seg.}$$

4.1.5 Diseño del Control Predictivo Basado en Modelo (MBPC) de nivel de agua en el tanque de almacenamiento

En esta sección se presenta en primer lugar el modelo de predicción de la planta, el cual se usa para el diseño del Controlador Predictivo Basado en Modelo (MBPC).

Diseño del modelo de predicción de la planta

Recordemos que el modelo de la planta (bomba + tanque + sensor) obtenida en el capítulo II es:

$$G_p(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{0.02843}{(s + 0.012941)}$$

Para obtener el modelo en Z, aplicamos la siguiente fórmula:

$$G_p(z) = \frac{y(z)}{u(z)} = \frac{(z-1)}{z} Z \left[\frac{G_p(s)}{s} \right] \quad (4.38)$$

Reemplazando $G_p(s)$ en la ecuación (5.38) y operando, se obtiene:

$$G_p(z) = \frac{y(z)}{u(z)} = \frac{0.00024998}{z - 0.99987}$$

Que es de la forma:

$$G_p(z) = \frac{y(z)}{u(z)} = \frac{b_1}{z + a_1}$$

Siendo:

$$a_1 = -0.99987; b_1 = 0.00024998$$

Operando se obtiene:

$$\begin{aligned} y(z) + a_1 z^{-1} y(z) &= b_1 z^{-1} u(z) \\ y(k) + a_1 y(k-1) &= b_1 u(k-1) \end{aligned} \quad (4.39)$$

Respuesta libre

De la ecuación (4.39) obtenemos la respuesta libre de la planta:

$$y_{libre}(t+k) = -a_1 y_{libre}(t+k-1) + b_1 u(t-1) \quad (4.40)$$

Respuesta forzada

Los coeficientes g_k de la respuesta al escalón se determina de la ecuación (4.39), así:

$$g(k) + a_1 g(k-1) = b_1 u(k-1) \quad (4.41)$$

Evaluando la ecuación (5.41) para $k \geq 0$:

$$g(0) = 0$$

$$g(1) = -a_1 g(0) + b_1 u(0) = b_1 ; \quad u(k) = 1 \text{ para } k \geq 0$$

$$g(1) = -a_1 g(0) + b_1 u(0) = b_1$$

$$g(2) = -a_1 g(1) + b_1 u(1) = -a_1 b_1 + b_1$$

$$g(3) = -a_1 g(2) + b_1 u(2) = -a_1 g(2) + b_1$$

$$g(4) = -a_1 g(3) + b_1 u(3) = -a_1 g(3) + b_1$$

Generalizado para $k \geq 3$:

$$g(k) = -a_1 g(k-1) + b_1 = -a_1 g(2) + b_1$$

Ley de control escalar predictiva

Reescribimos la ecuación de la ley de control escalar:

$$\Delta u(t) = \frac{\sum_{k=N_1}^{N_2} g_k [r(t+k/t) - y_{libre}(t+k/t)]}{\left(\sum_{k=N_1}^{N_2} g_k^2 + \lambda \right)} \quad (4.42)$$

Considerando:

- ✓ El horizonte de predicción mínimo $N_1=1$

- ✓ El horizonte de predicción máximo = 12
- ✓ El horizonte de control = $N_u = 1$ (control escalar)
- ✓ Parámetro de peso = $\lambda = 0.005$
- ✓ Parámetro de filtraje = $\alpha = 0.01$

se puede obtener y evaluar la ley de control de la ecuación (4.42).

Asimismo, la variación o desviación de la ley de control viene dada por:

$$du(t) = u(t) - u(t - 1) \quad (4.43)$$

De (4.43) se obtiene la actualización de la ley de control dada por:

$$u(t) = u(t - 1) + du(t) \quad (4.44)$$

4.2 Método de investigación

Cuasiexperimental, debido a que se basa en pruebas de simulación de las técnicas de control aplicadas al modelo del sistema de bombeo solar; pero no se trabaja con datos experimentales.

4.3 Población y muestra

No es aplicable a este trabajo de investigación.

4.4 Lugar de estudio y periodo desarrollado

El lugar donde se desarrolló este trabajo es en la Unidad de Investigación FIEE. El periodo de desarrollo fue del 01/03/2018 al 28/02/2019.

4.5 Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

No es aplicable a este trabajo de investigación.

4.6 Análisis y procesamiento de datos

Se hace un análisis de los resultados de simulación. Los programas de simulación se ejecutaron usando Matlab y Simulink.



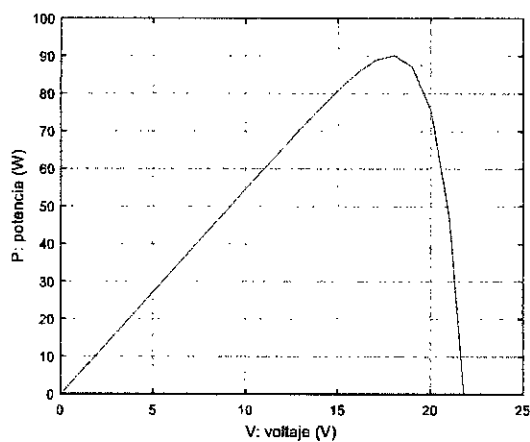
V RESULTADOS

5.1 Resultados del modelado del Generador Solar Fotovoltaico

De la sección 2.2, podemos obtener en primer lugar la respuesta V-I y P-V del panel solar, tal como se muestra en la Figura N° 5.1 y en la Figura N° 5.2.

Figura N° 5.1

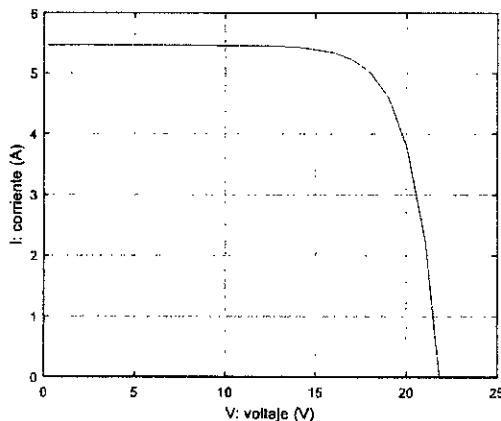
Respuesta V-I del panel fotovoltaico



Fuente: UNAC (2019); elaboración propia

Figura N° 5.2

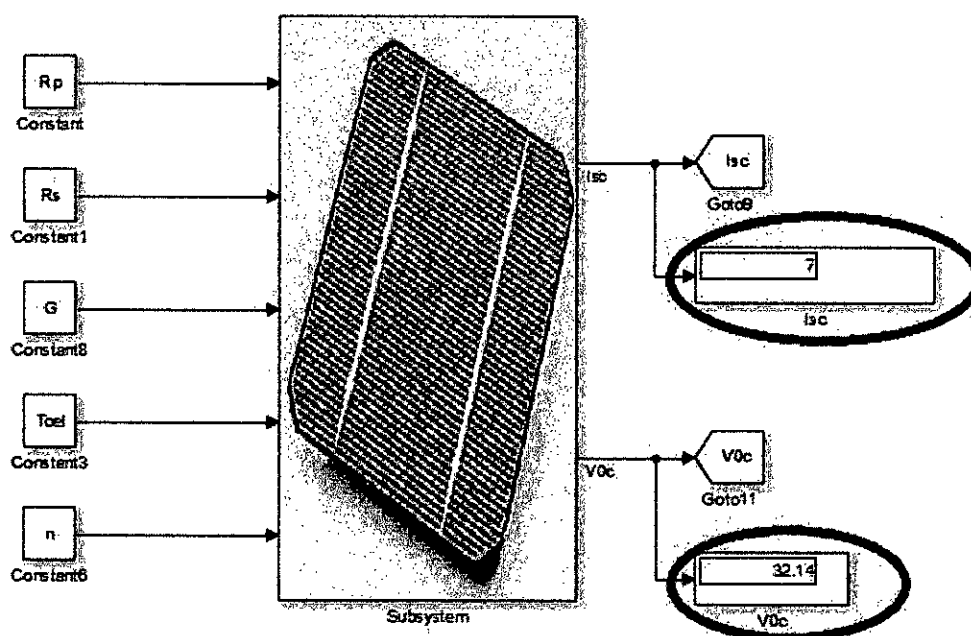
Respuesta P-V del panel fotovoltaico



Fuente: UNAC (2019); elaboración propia

Al correr el programa en Simulink para el Generador Solar Fotovoltaico de la Figura N° 4.3 (capítulo IV), podemos observar los resultados en los displays correspondientes a la corriente de saturación y voltaje de circuito abierto, tal como se visualiza en la Figura N° 5.3.

Figura N° 5.3
Respuesta V-I del Generador Solar Fotovoltaico



Fuente: UNAC (2019); elaboración propia

5.2 Resultados del Control PID del convertidor DC/DC Buck

La respuesta del modelo en Simulink para el convertidor DC/DC Buck tiene dos partes:

1. Respuesta para una referencia de 24 voltios

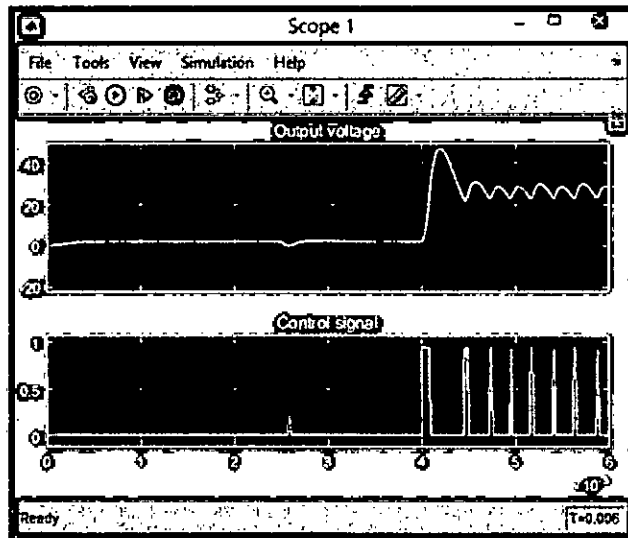
La salida del regulador de carga ante una entrada de referencia de 24 voltios puede visualizarse en la Figura N° 5.4.

2. Respuesta a una referencia de 10 a 24 voltios.

La salida del regulador de carga ante una entrada de referencia

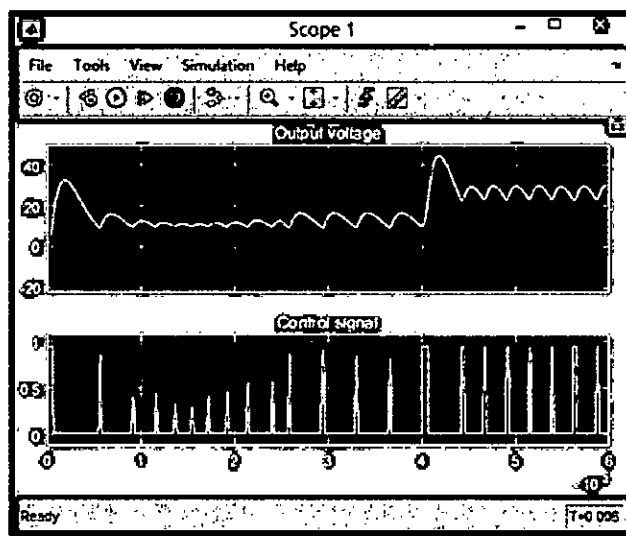
variante entre 10 a 24 voltios, puede visualizarse en la Figura N° 5.5.

Figura N° 5.4
Respuesta a una referencia de 24 voltios



Fuente: UNAC (2019); elaboración propia

Figura N° 5.5
Respuesta a una referencia variante de 10 a de 24 voltios



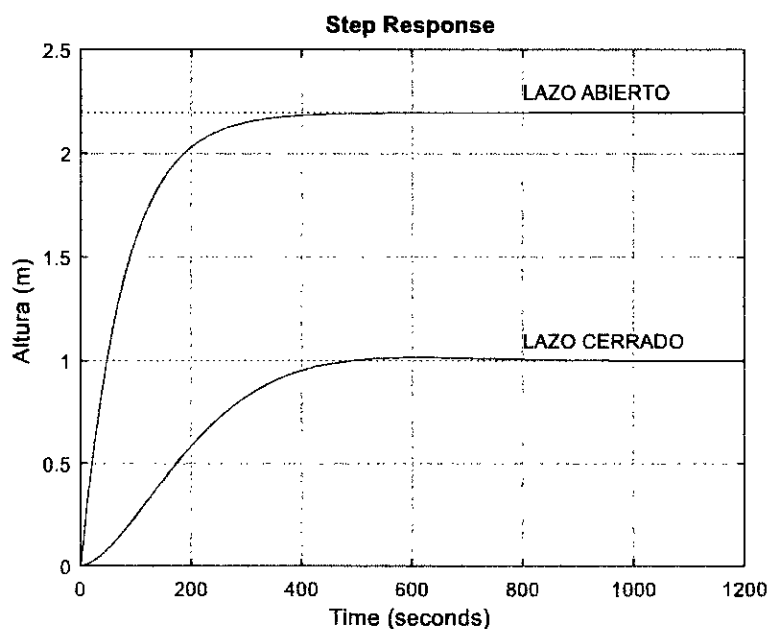
Fuente: UNAC (2019); elaboración propia

5.3 Resultados del Control PID de nivel de agua

Al correr el programa en Matlab del control PI para una referencia escalón de 1m de altura, se obtiene el resultado gráfico mostrado en la Figura N° 5.6. La gráfica de color azul corresponde a la respuesta de la planta en lazo abierto, es decir a una entrada de prueba escalón unitario (1 metro de altura de agua). La línea de rojo corresponde a la respuesta del sistema de control en lazo cerrado, es decir con el controlador PI actuando sobre la planta.

Figura N° 5.6

Respuesta del controlador PI frente a la respuesta de lazo abierto



Fuente: UNAC (2019); elaboración propia

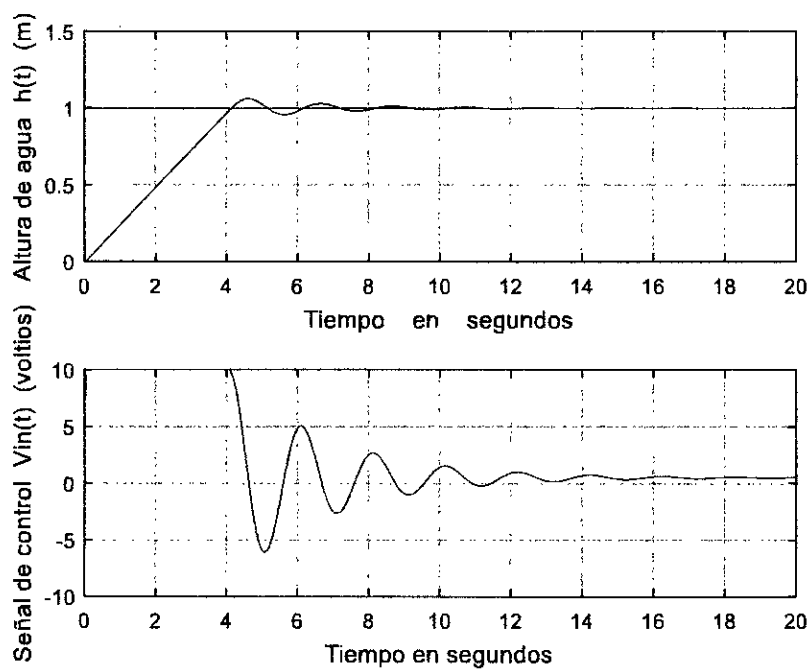
5.4 Resultados del Control MBPC de nivel de agua

Al correr el programa en Matlab del control MBPC para una referencia escalón de 1m de altura, se obtiene el resultado gráfico mostrado en la

Figura N° 5.7. En dicha figura también se muestra la señal de control generada por el controlador.

Figura N° 5.7

Altura controlada mediante Control Predictivo Basado en Modelo (MBPC) y la tensión generada por el MBPC



Fuente: UNAC (2019); elaboración propia

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación han permitido cumplir con los objetivos planteados, particularmente con las hipótesis específicas; por lo que a continuación se precisan cada uno de ellos, permitiendo comparar los resultados con otros estudios similares y mostrar el aporte de este trabajo a los ya existentes a nivel internacional y nacional.

6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados.

6.1.1 Del modelado del sistema de generación solar fotovoltaica

De los resultados obtenidos en la sección 5.1 se puede verificar que:

- Las curvas características V-I y P-V obtenidas son idénticas a las curvas características de la hoja de datos de diferentes fabricantes; por lo que, como ejemplo comparativo, se presentan en el Anexo C la hoja de datos del panel solar fotovoltaico CORA-250.
- Los valores mostrados en los displays de la Figura N° 5.3, corresponden a la corriente de cortocircuito I_{sc} y la tensión de circuito abierto V_{oc} de un conjunto de módulos fotovoltaicos, que permiten obtener tensiones y corrientes máximas disponibles para alimentar a la bomba hidráulica, de acuerdo con sus requerimientos.

Por lo que, habiéndose podido mostrar la potencia, corriente y voltaje generados por el sistema de generación solar fotovoltaica, compuesto por paneles solares, se puede decir que la hipótesis específica N° 1 ha sido cumplida.

6.1.2 De la aplicación de algoritmos de Control PID al modelo del sistema de acondicionamiento DC/DC.

La aplicación del Control PID en su variante PI aplicado al convertidor Buck DC/DC, ha permitido obtener la respuesta esperada, es decir, la generación de una tensión de salida de 24 voltios DC (ver Figura N° 5.4) y una tensión ente 10 a 24 voltios DC (ver Figura N° 5.5), necesaria para aplicar a bombas solares centrífugas de superficie DC que pueden alimentarse con tensiones en el rango indicado.

Los resultados gráficos de la Figura N° 5.4 y Figura N° 5.5 presentan sobrepico en la etapa transitoria; sin embargo, se estabilizan y llegan a la tensión o tensiones referenciadas, si bien es cierto con cierto nivel de rizado. En tal sentido se cumple con la hipótesis específica N° 2.

En el Anexo D se presenta las características eléctricas de bombas solares de superficie GREALTEC.

6.1.3 De la aplicación del Control Predictivo Basado en Modelo (MBPC) al modelo de un sistema hidráulico

Del resultado gráfico de la Figura N° 5.7, se puede ver que se logra optimizar el tiempo de respuesta del MBPC, y controlar la altura del tanque de almacenamiento a una altura de referencia de 1 metro, frente al tiempo de respuesta del Controlador PI (ver Figura N° 5.6). Si bien es cierto que el sobrepico en la respuesta del MBPC es 10% de la referencia, mayor que el sobrepico de la respuesta del PI (5%), esta diferencia no es significativa en aplicaciones de control nivel de sistemas de bombeo de agua. En tal sentido, la hipótesis específica N° 3 ha sido cumplida.

En la tabla 6.1 se presenta un resumen de los resultados de simulación, aplicando las dos estrategias de control.

Tabla N° 6.1
Resumen de resultados de simulación de las dos
técnicas de control

Técnicas de control	t_s (Seg.)	Sobrepico (%) de las salidas controladas
Control Proporcional Integral (PI)	600	5
Control Predictivo Basado en Modelo (MBPC)	10	10

Fuente: UNAC (2019); elaboración propia

6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios similares

De acuerdo con la información obtenida y descrita en la sección 2.1 sobre antecedentes internacionales y nacionales, se anota que:

- La tesis de Bruno Ramos Sánchez, titulada "Modelo del generador de un sistema de bombeo fotovoltaico", a nivel del sistema de simulación del generador solar, se puede decir que hay cierta similitud; sin embargo, en lo concerniente al sistema de bombeo, solo queda en un control directo (aplicación directa sin controlador), lo que difiere con el presente trabajo de investigación.
- En la tesis de Edison Moromenacho Oscullo y Cristina Zulay Rosero, titulada "Diseño e Implementación del Control Predictivo en tanques acoplados", se presentan resultados similares en el control de altura del segundo tanque; sin embargo, la señal de control generada es excesiva; lo que significaría que tendrían que limitarla, y al hacer eso, el tiempo de establecimiento o de control se incrementaría, haciendo que la altura se controle en más tiempo, con lo que dichos resultados no serían "óptimos".

6.3 Responsabilidad ética de acuerdo con los reglamentos vigentes

El suscrito, Dr. Ing. Nicanor Raúl Benites Saravía, suscribo que este trabajo de investigación es de mi autoría; por lo que faculto para que se realicen las verificaciones que se ameriten, en resguardo del cumplimiento del Estatuto, los reglamentos y directivas concernientes al desarrollo de trabajos de investigación y tesis.



CONCLUSIONES

De los resultados mostrados en el capítulo V y la contrastación de dichos resultados con la hipótesis y otros trabajos similares, podemos concluir que:

1. Se obtuvieron resultados esperados respecto al modelado en Matlab y Simulink del generador solar fotovoltaico.
2. La salida de la tensión del convertidor DC/DC Buck controlada por el PI es aceptable, a pesar del sobrepico en el transitorio.
3. La altura de agua en el tanque de almacenamiento fue controlada óptimamente por el Controlador Predictivo Basado en Modelo (MBPC). Para efectos de comparación se diseñó el Controlador Proporcional Integral (PI), cuyos resultados, si bien es cierto están dentro del tiempo esperado; no son óptimos frente al MBPC.

En conclusión, el trabajo ha sido satisfactorio.

RECOMENDACIONES

De las conclusiones presentadas de este trabajo de investigación, se puede recomendar lo siguiente:

1. Aplicar técnicas de control moderna al convertidor DC/DC Buck, que permita mejorar la respuesta del controlador PI.
2. Aplicar técnicas de control inteligentes, como el Fuzzy y control Neuronal al control de nivel del sistema de bombeo fotovoltaico.
3. Se recomienda implementar el sistema de bombeo fotovoltaico, para así satisfacer necesidades apremiantes de agua de sectores de bajos recursos en zonas aisladas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, M., Chenlo, F. (s.f.). *Sistema de Bombeo Fotovoltaico*. España: CIEMAT.
- Arija González, D. (2010). *Prototipo de sistema de bombeo fotovoltaico para proyectos de cooperación al desarrollo con tecnologías apropiadas*. (Proyecto Fin de Carrera). Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España.
- Benites, N. (2017). *Identificación del modelo y control de velocidad de un motor DC alimentado mediante panel solar*. (Proyecto de investigación). Universidad Nacional del Callao, Callao, Perú.
- Camacho, E. & Bordons, C. (2003). *Model Predictive Control*. (2nd. ed.). London, Canadá: Springer.
- Campos, D. (s.f.). *Experimentos en Teoría de Control: Convertidores CD-CD*. PROMEP (Proyecto para la Generación y Aplicación del Conocimiento).
- Cardona, H., Ospina, S. (2015). *Construcción de Módulo Convertidor CC-CC Elevador, para Prácticas en el Laboratorio del Programa Ingeniería Mecatrónica Universidad Tecnológica de Pereira*. (Tesis de maestría). Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
- Díaz, H. y Díez, F. (2007). *Análisis, Modelado, Simulación y Validación de un sistema de generación de energía solar autónomo-Caso: Universidad Autónoma de Occidente*. (Tesis de pregrado). Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, Colombia.
- Donado, L. (1999). *Hidráulica de Pozos*. En L. Donado. Autor Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/269112987>
- Erickson, R., Maksimovic, D. (2004). *Fundamentals of Power Electronics*. (2nd. ed.). New York, EE.UU: Kluwer Academic Publishers.

- Guasch Murillo, D. (2003). *Modelado y análisis de sistemas fotovoltaicos*. (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- Habbati, B., Ramdani, Y. & Moulay, F. (2014). *A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB*. NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, 3, 53-61.
- Liuping, G. (2009). *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB*. London, Canadá: Springer.
- Loret de Mola, A. et al. (2003). *Atlas de Energía Solar del Perú*. Lima, Perú: SENAMHI.
- Madridsolar. (2006). *Guía de la Energía Solar*. Caja Madrid, Madrid, España: Industrias Graficas el Instalador, S. L.
- MathWorks. (2015). *Simulink Getting Started Guide*. Matlab & Simulink. MathWorks, Inc.
- Mohan, N., Underland, T. y Robbins, W. (2009). *Electrónica de Potencia: Convertidores, aplicaciones y diseño*. (3ª. ed.). Colonia Desarrollo Santa Fe, México: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Moromenacho Oscullo, E. y Rosero Mata, C. (2010). *Diseño e implementación del control predictivo en tanques acoplados*. (Proyecto previo a la obtención del título de ingeniero en Electrónica y Control). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Ogata, K. (1998). *Ingeniería de Control Moderna*. (3a. ed.). Pearson Educación.
- Oliden Semino, J. (2016). *Desarrollo de un Controlador Predictivo Basado en Modelo para plataforma industrial*. (Tesis de maestría). Universidad de Piura, Piura, Perú.
- Perpiñán L. (2013). *Energía Solar Fotovoltaica*. Recuperado de <http://procomun.wordpress.com/documentos/libroesf>

- Patiño Moisés, J. (2011). *Pérdidas menores de energía en redes de tubería de agua potable*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Practical Action. (s.f.). *Bombeo de agua mediante energía solar fotovoltaica*. Recuperado de www.practicalaction.org
- Ramos Sánchez, B. (2014). *Modelo del generador de un sistema de bombeo fotovoltaico*. (Proyecto Fin de Carrera). Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España.
- Rashid, M. (1995). *Electrónica de Potencia*. (2ª. ed.). Naulcalpan de Juárez, Edo. de México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A.
- Sagua Mamani, W. (2017). *Análisis y Modelamiento para un Módulo Fotovoltaico, basado en un Sistema de Generación de Energía Renovable Microgrid en la ciudad de Puno*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Sosa, S. y Morles, O. (s.f.). Modelado, Simulación y Validación de un Sistema Híbrido (fotovoltaico-batería) Autónomo para suministrar energía eléctrica a una vivienda con estación de bombeo de agua para uso doméstico y agrícola: parte 1. (10 páginas).
- Vallejos Romaña, C. (2013). *Modelación, simulación, control PID y control predictivo de un secador rota disco en la industria pesquera*. (Tesis de pregrado). Universidad de Piura, Piura, Perú.

ANEXOS

db

ANEXO A
Matriz de Consistencia

Título: "CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELO (MBPC) APLICADO A UN SISTEMA DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO"

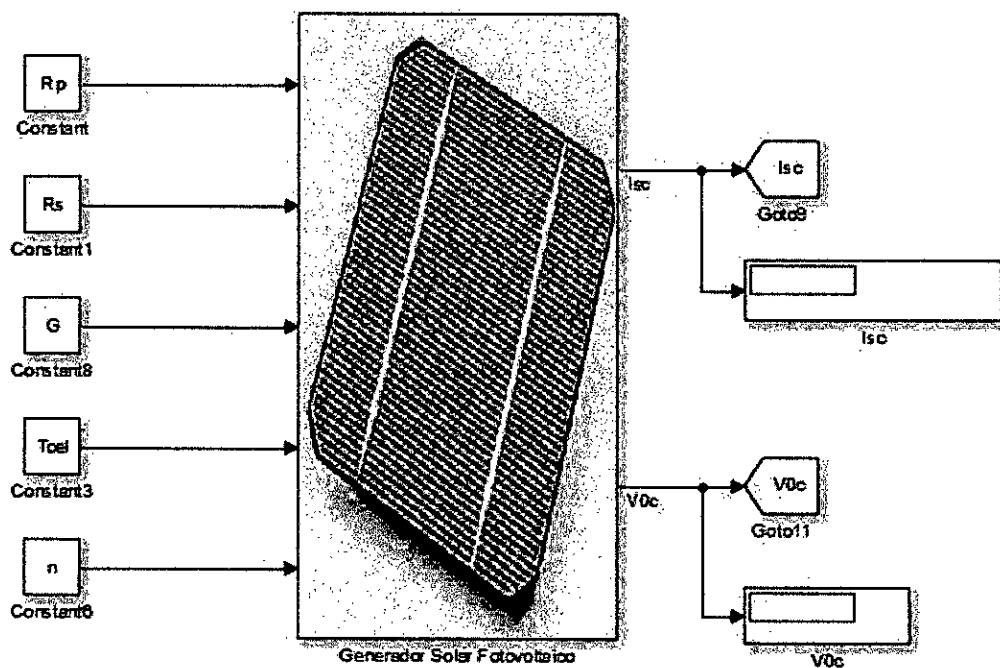
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	DISEÑO METODOLÓGICO
<p>General</p> <p>En muchas aplicaciones, el control de motores DC implica por un lado la exactitud en el control de velocidad o posición, y ello exige diseñar un controlador adecuado, y este a su vez necesita contar con un modelo muy cercano al comportamiento real. Determinar el modelo matemático mediante métodos analíticos, exige conocer sus parámetros, como la inercia, constante de torque, resistencia de armadura o de campo, etc.</p> <p>Otro de los problemas que se presenta en el control de motores o de cualquier otra aplicación, es que la energía que se consume proviene de energías fósiles, así como el incremento del costo, a lo que hay que sumarle el aumento de la contaminación ambiental, situación que estaría contraviniendo las recomendaciones de mitigar el efecto invernadero.</p>	<p>Objetivo general</p> <p>El objetivo general del presente trabajo es diseñar y simular un Sistema de Bombeo Fotovoltaico.</p> <p>Objetivos específicos</p> <p>Los objetivos específicos del presente trabajo son:</p> <p>OE1. Modelar y simular el sistema de generación solar fotovoltaica.</p> <p>OE2. Diseñar y simular el sistema de Control PID del sistema de acondicionamiento de potencia en DC.</p> <p>OE3. Diseñar y simular el sistema de Control Predictivo de nivel de agua en el tanque de almacenamiento.</p>	<p>Hipótesis general</p> <p>"El diseño de un Controlador Predictivo Basado en Modelo (MBPC), permitirá un desempeño óptimo en el control del sistema de bombeo fotovoltaico".</p> <p>Hipótesis específicas</p> <p>H.E.1: "El modelado del sistema de generación solar fotovoltaica, permitirá apreciar el comportamiento de la potencia generada".</p> <p>H.E.2: "La aplicación de algoritmos de Control PID al modelo del sistema de acondicionamiento DC/DC, permitirá contar con energía eléctrica regulada en DC, necesaria para alimentar un sistema motor-bomba".</p> <p>H.E.3: "La aplicación del algoritmo de Control Predictivo Basado en Modelo (MBPC) al modelo de un sistema hidráulico, permitirá controlar el nivel de agua en forma óptima".</p>	<p>Variables dependientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Energía DC generada por el sistema de conversión DC/DC del sistema de energía solar fotovoltaica. • Altura de agua del tanque de almacenamiento. <p>Variables independientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Señal de control generada por el Controlador PID en el bus de continua. • Señal de control generada por el Controlador Predictivo Basado en Modelo (MBPC) para el control de nivel de agua. 	<p>1. Tipo de investigación El tipo de investigación es básica.</p> <p>2. Método de investigación Cuasiexperimental, debido a que se basa en pruebas de simulación de las técnicas de control aplicadas al modelo del sistema de bombeo solar; pero no se trabaja con datos experimentales.</p> <p>3. Población y muestra No es aplicable a este trabajo de investigación.</p> <p>4. Lugar de estudio y periodo desarrollado Unidad de Investigación FIEE. Del 01/03/2018 al 28/02/2019.</p> <p>5. Técnicas e Instrumentos para la recolección de la información No es aplicable a este trabajo de investigación.</p> <p>6. Análisis y procesamiento de datos Se hace un análisis de los resultados de simulación.</p>

ANEXO B

Modelado del generador solar fotovoltaico

Figura N° B.1

Modelo simplificado compacto del generador solar fotovoltaico



Fuente: UNAC (2019); elaboración propia

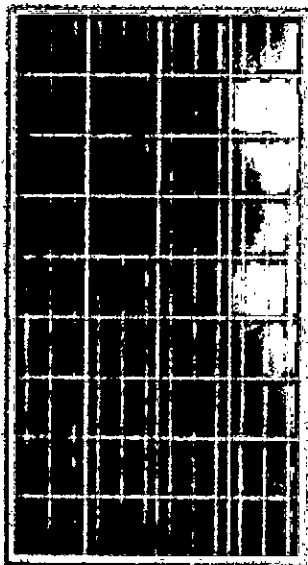
ANEXO C

Hoja de datos del panel solar fotovoltaico CORA-250

Introducción

G CORADIR S.A.

Panel Solar Fotovoltaico CORA 250W



Los paneles solares se han convertido en una opción rentable para negocios y particulares en todo el país utilizando energía renovable y limpia.

Funcionamiento general:

El funcionamiento del sistema consiste en captar mediante paneles solares, y transformar los rayos del sol (fotones) en energía eléctrica. Con un dispositivo denominado inversor, se transforma la corriente continua de 12 o 24 voltios en corriente alterna de 220 voltios, la cual se distribuye a través de la red eléctrica de la casa, donde están conectados los artefactos de consumo.

Entre los beneficios más importantes de la energía solar se puede destacar que:

Es una energía no contaminante.

Es energía limpia y renovable, que no cuesta dinero.

Proviene de una fuente de energía inagotable.

Los paneles solares no tienen partes móviles y por ello no necesitan mantenimiento.

Se trata de una solución inmejorable en zonas aisladas que, de otra forma, no tendrían acceso a la electricidad.

Independiente, porque solo depende del sol, no se necesita la conexión a la red eléctrica pública, ni combustibles.

Permite fijar costos de consumo. Evita los incrementos en los costos de electricidad.

Garantías

- Garantía producto: 1 año.
- Garantía 90% potencia nominal: 10 años.
- Garantía 80% potencia nominal: 25 años.

Datos Técnicos

CORADIR S.A.

Marco

Aluminio anodizado. Robusto y resistente a la corrosión. Toma a tierra incorporada. Orificios para el drenaje del agua.

Caja de conexión

Sellada, robusta para favorecer la disipación del calor generado por el sol. Grado Protección IP65.

Conectores

MCA (resistentes a radiación UV, de cierre automático/IP67)

Panel Frontal

Vidrio templado 3.2 mm de espesor. De alta transmisión y bajo en hierro.

Celdas

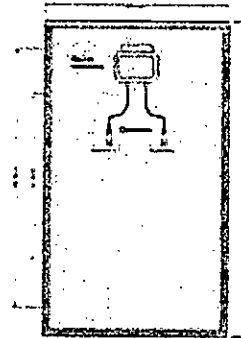
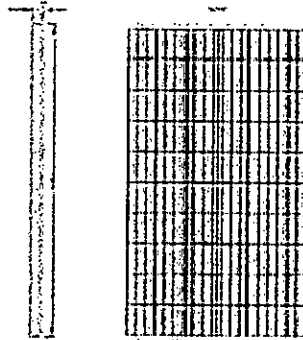
60 (6x10). Policristalino 156x156 mm.

Dimensiones

1640x992x40 mm.

Peso

19.5 Kg.

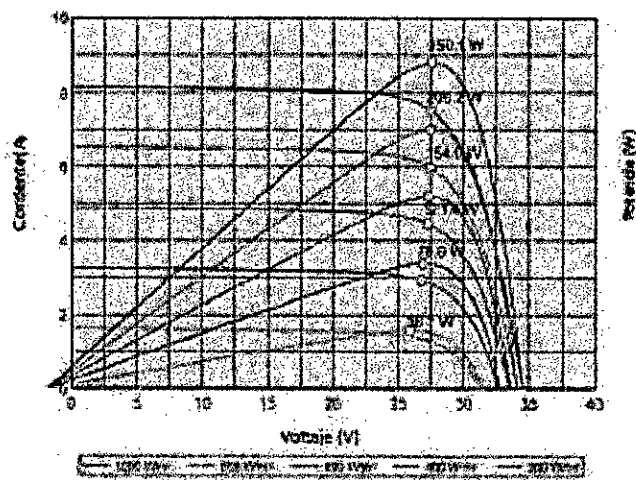


Propiedades Técnicas	
Potencia máxima nominal (P _{max})	250W
Voltaje a P _{max} (V _{mp})	30.63V
Corriente a P _{max} (I _{mp})	8.17A
Voltaje a circuito abierto (V _{oc})	37.8V
Corriente de cortocircuito (I _{sc})	8.74A
Eficiencia de Celdas (η)	17.40%
Eficiencia del Módulo	13.30%
Temperatura de operación (C°)	-40C° a 85C°
Voltaje máximo del sistema	DC 1000V (UL) / DC 600V (UL)
Fusible serie máximo	15A
Tolerancia a oxígeno máximo	13%
Coefficiente de Temperatura a P _{max}	(-0.43±0.03)%/C°
Coefficiente de Temperatura a V _{oc}	(0.035±0.01)%/C°
Coefficiente de Temperatura a I _{sc}	(-0.33±0.03)%/C°
NOTA	(7.11)/C°

Test en condiciones estándar 1000W/m². Temp. del módulo 25°C, AM = 1.5

Rendimiento Eléctrico

Rendimiento eléctrico (Temperatura de Celda 25°C)



ANEXO D

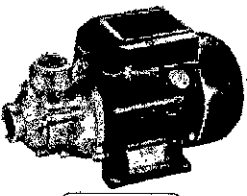
Características eléctricas de bombas solares de superficie

GREALTEC

Español

HOME GREALTEC PRODUCTOS NOTICIAS CONTACTO DESCARGAS

Inicio >> BOMBAS SOLARES DC >> DE SUPERFICIE >> Bomba solar GATQB y GATSGJ



Bomba solar GATQB y GATSGJ

COMPARTIR EN FACEBOOK
 ENVIAR A UN AMIGO
 IMPRIMIR

Bomba solar de corriente continua, de superficie, de las series GATQB y GATSGJ

Caudal máx. (m³/h):

Altura máx. (m):

Modelo:

CONSULTAR PRECIO (PÚBLICO)

AÑADIR A MI WISHLIST

CATEGORÍAS

- > FOTOVOLTAICA
- > PANELES SOLARES
- > MONOCRISTALINOS
- > POLICRISTALINOS
- > PANELES DE INTEGRACIÓN (BIPV)
- > SISTEMAS ANTIRROBO
- > KIT EV ANTIRROBO
- > SEGURIDAD PERIMETRAL
- > ESTRUCTURAS Y SOPORTES
- > ILUMINACIÓN LED
- > RESIDENCIAL
- > URBANA
- > BOMBAS SOLARES DC
- > SUMERGIBLES
- > MANTENIMIENTO
- > DE PISCINA

Mostrar todas las imágenes

MÁS
DESCARGAR
COMENTARIOS

Las series GATQB y GATSGJ de bombas solares GREALTEC de corriente continua están formadas por bombas de superficie con cuerpo de acero inoxidable.

Nuestras bombas ofrecen una solución económica y funcional en lugares aislados donde no llega la corriente eléctrica o con problemas en el suministro de energía (interrupciones del sistema o altos costes eléctricos).

Son óptimas para bombeo de agua potable o irrigación en cultivos.

Disponibles en una amplia gama de potencia desde los 120W hasta los 750W. Altura máxima de bombeo desde 25 m hasta 37 metros.

Todas las bombas incluyen los accesorios necesarios para su instalación como cables, conectores y sensores de nivel del agua.

VENTAJAS

- Para uso directo o indirecto en DC (corriente continua), sin necesidad de inversor.
- Regulador con función MPPT y accesorios incorporados en el precio.
- Pueden ser alimentadas directamente con nuestros paneles fotovoltaicos.
- Nuestro departamento logístico se ocupa de entregar los componentes o kits completos de bombeo solar (bomba + regulador + panel + batería opcional) en el punto de destino de elección de nuestros clientes, lo que evita sobrecostos en transporte y gestiones de aduana.
- Todas las bombas cuentan con el certificado CE.

Disponibles un novedoso sistema antirrobo, de monitorización y gestión remota para las instalaciones de bombeo solar. Consulte con nuestro departamento técnico.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

MODELO	TENSIÓN (V)	POTENCIA (W)	V. DE TILLO MÁX. (m ³ /h)	ALTURA MÁX. (m)	TAMANO DE SALIDA (")
GATQB 2.0 15 24(12)	24	120	2.0	25	TK1
GATQB 3.2 18 24(12)	24	180	3.2	25	TK1
GATSGJ 3.2 18 24(12)	24	120	3.2	18	TK1
GATSGJ 3.2 18 40(12)	24	180	3.2	18	TK1
GATSGJ 3.2 18 75(12)	24	750	3.2	30	TK1

PRODUCTOS RELACIONADOS

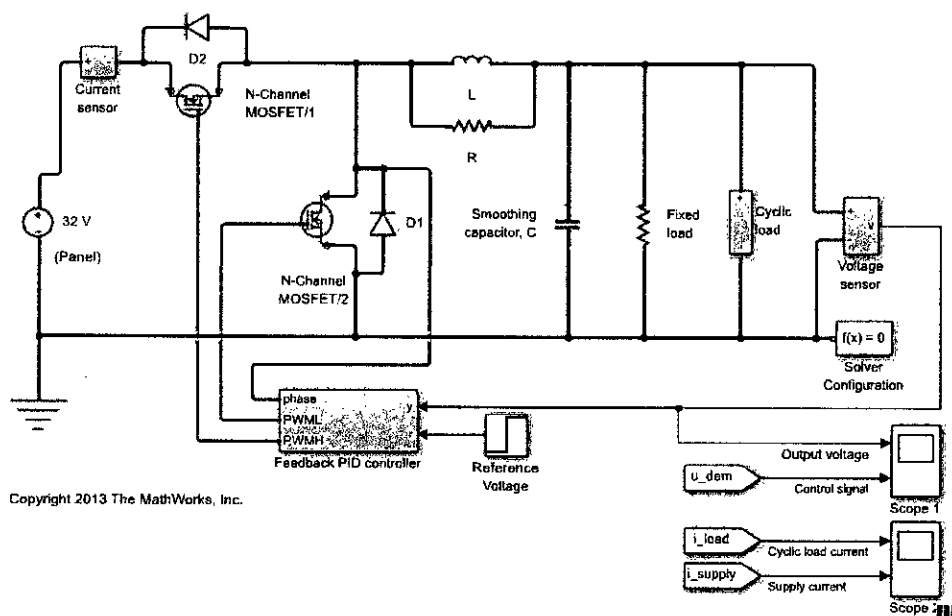
Me gusta ES

ANEXO E

Programa de Control PID del convertidor Buck (elaboración propia)

Figura N° E.1

Programa en Simulink de control PID del convertidor Buck



Fuente: UNAC (2019); elaboración propia

ANEXO F

Programa de Control PI de nivel de agua (elaboración propia)

```
% CONTROL PI DEL DE BOMBEO DE AGUA
% pi_bombeo.m
% Autor: Dr. Ing. Nicanor Raúl Benites Saravia
% DATOS
A=40; % m2: area del tanque de almacenamiento
Kv=0.9288; % constante de la válvula
Qb_barra=0.8333; % Caudal de la bomba en el punto de operación
H_barra=Qb_barra^2/Kv^2; N=1 % magnitud del escalon para Vin=N
voltios
% SIMULACIÓN EN LAZO ABIERTO
num=[1.1372/A];
den=[1 Kv^2/(2*A+Qb_barra)];
printsys(num,den)
%step(num* N/12.73,den)
step(num,den)
%grid
```

ANEXO G

Programa de Control MBPC de nivel de agua (elaboración propia)

```
% pred_tanque.m
% SIMULACION DEL SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO
% Autor: Dr. Ing. Nicanor Raúl Benites Saravia
clear all
% PARAMETROS DEL PROCESO LINEALIZADO DEL TANQUE DE AGUA
A=40; % m2: area del tanque de almacenamiento
Kv=0.9288; % constante de la válvula
Qb_barra=0.8333; % Caudal de la bomba en el punto de operación
H_barra=Qb_barra^2/Kv^2;
% MODELO NO LINEAL DEL PROCESO CONTINUO DE SEGUNDO ORDEN
Ac = [-1/(2*A)*Kv^2/Qb_barra];
Bc = [1/A];
Cc = [1]; Dc = [0];
% MODELO LINEAL DISCRETO DEL PROCESO DE SEGUNDO ORDEN
T = 0.01; % PERIODO DE MUESTREO
[G,H,C,D]=c2dm(Ac,Bc,Cc,Dc,T,'zoh');
[num,den]=ss2tf(G,H,C,D);
printsys(num,den,'z')
a1 = den(2); b1 = num(2);
% HORIZONTES
N1 = 1; N2 =12; Nu =1; % CONTROL ESCALAR
% RESPUESTA AL ESCALON
g(1) = b1; g(2) = -a1*b1 + b1;
for k=3:N2
    g(k) = -a1*g(k-1) + b1;
end
% CONDICIONES INICIALES
yf(1)=0; yf(2)=0; r(1)=0; r(2)=0; r(3) =0;
u(1) =0; u(2) =0; w(1)=0; w(2)=0; w(3) =0;
q(1) =0; q(2) =0;
alf = 0.01; lambda = 0.005; frec = 0.0063; GW = 1;
MM = 2000;
%MM = 15000;
% LAZO DE CONTROL
for t = 2:MM+2
    for k = 1:N2
        %W(t+k) = GW*sign(sin(frec*(t))); % referencia onda cuadrada
        W(t+k) = 1; % referencia escalón unitario (1m)
        r(t+k) = alf*r(t+k-1) + (1-alf)*W(t+k);
        yf(t+k) = -a1*yf(t+k-1)+b1*u(t-1);
    end
end
% LEY DE CONTROL
du(t) = (g(1)*(r(t+1)-yf(t+1))+g(2)*(r(t+2)-yf(t+2)) + ...
        g(3)*(r(t+3)-yf(t+3))+g(4)*(r(t+4)-yf(t+4)) + ...
        g(5)*(r(t+5)-yf(t+5))+g(6)*(r(t+6)-yf(t+6)) + ...
        g(7)*(r(t+7)-yf(t+7))+g(8)*(r(t+8)-yf(t+8)) + ...
        g(9)*(r(t+9)-yf(t+9))+ g(10)*(r(t+10)-yf(t+10)) + ...
        g(11)*(r(t+11)-yf(t+11))+ g(12)*(r(t+12)-yf(t+12)))/...
        (g(1)^2 + g(2)^2 + g(3)^2+ g(4)^2 + g(5)^2 + ...
        g(6)^2 + g(7)^2 + g(8)^2+ g(9)^2 + g(10)^2 + ...
        g(11)^2 + g(12)^2 + lambda);
```

```

u(t) = u(t-1) + du(t); % LEY DE CONTROL ACTUAL
% LIMITANDO FUERZA DE CONTROL
fu = 10; % voltios (tensión DC a la entrada de la bomba)
if(u(t) > 0 & u(t) > fu)
    u(t) = fu;
elseif(u(t) < 0 & u(t) < -fu)
    u(t) = -fu;
end
% PROCESO LINEAL
q(t+1) = -a1*q(t) + b1*u(t-1);
end
% GRAFICOS
ejex = (3:MM); ejex = ejex*T;
subplot(2,1,1)
plot(ejex,W(3:MM),ejex,q(3:MM)); grid
ylabel('Altura de agua h(t) (m)')
xlabel('Tiempo en segundos')
subplot(2,1,2)
plot(ejex,u(3:MM)); grid
ylabel('Señal de control Vin(t) (voltios)')
xlabel('Tiempo en segundos')
print -f -deps dispred1

```