



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**PROPUESTA DE DISEÑO PARA UN SISTEMA DE REGULACIÓN DE RIEGO POR GOTEO
ALIMENTADO POR ENERGÍA SOLAR**

Gabriel Antonio Avila Contreras

Asesorado por el Ing. Rodrigo Rafael Chang Papa

Guatemala, noviembre de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE DISEÑO PARA UN SISTEMA DE REGULACIÓN DE RIEGO POR GOTEO
ALIMENTADO POR ENERGÍA SOLAR**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

GABRIEL ANTONIO AVILA CONTRERAS

ASESORADO POR EL ING. RODRIGO RAFAEL CHANG PAPA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO EN ELECTRÓNICA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. Jose Francisco Gomez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
VOCAL III	Ing. Jose Milton De León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
EXAMINADORA	Inga. Wendy Nora Miranda López
EXAMINADOR	Ing. José Antonio de León Escobar
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

PROPUESTA DE DISEÑO PARA UN SISTEMA DE REGULACIÓN DE RIEGO POR GOTEO ALIMENTADO POR ENERGÍA SOLAR

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha julio de 2019.

Gabriel Antonio Avila Contreras

Guatemala 26 de mayo de 2021

Ingeniero Julio Cesar Solares
Coordinador del Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería

Señor Coordinador:

Por este medio tengo el gusto de informar a usted que he concluido con el asesoramiento del trabajo de graduación con título: **“PROPUESTA DE DISEÑO PARA UN SISTEMA DE REGULACIÓN DE RIEGO POR GOTEO ALIMENTADO POR ENERGÍA SOLAR”** desarrollado por el estudiante **Gabriel Antonio Avila Contreras** con carne **201020396**. Después de revisar su contenido final, considero que cumple con los requerimientos necesarios, y doy mi entera aprobación al mismo.

Agradeciendo su atención,


Rodrigo Rafael Chang Papa
Ingeniero Electrónico
Colegiado No. 14817

Ing. Rodrigo Rafael Chang Papa
Colegiado No. 14817



Guatemala, 7 de junio de 2021

Señor director
Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC

Estimado Señor director:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado: **PROPUESTA DE DISEÑO PARA UN SISTEMA DE REGULACIÓN DE RIEGO POR GOTEO ALIMENTADO POR ENERGÍA SOLAR**, desarrollado por el estudiante **Gabriel Antonio Avila Contreras**, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Una firma manuscrita en tinta azul, que parece ser la del Sr. Solares Peñate.

Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador de Electrónica



REF. EIME 159 2021.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; GABRIEL ANTONIO AVILA CONTRERAS titulado: PROPUESTA DE DISEÑO PARA UN SISTEMA DE REGULACIÓN DE RIEGO POR GOTEO ALIMENTADO POR ENERGÍA SOLAR , procede a la autorización del mismo.


Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo



GUATEMALA, 2 DE NOVIEMBRE 2,021.

DTG. 661-2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **“PROPUESTA DE DISEÑO PARA UN SISTEMA DE REGULACIÓN DE RIEGO POR GOTEO ALIMENTADO POR ENERGÍA SOLAR**, presentado por el estudiante universitario: **Gabriel Antonio Avila Contreras**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



ing. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, noviembre de 2021

AACE/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Creador de todo quien me da su amor, perdón y quien me llena de esperanza y alegría cada día de mi vida.
Mis padres	Leopoldo Avila y Aura Contreras, por brindarme su amor, su guía y su ejemplo que conduce mi vida.
Mi novia	Jennifer Tejeda, por ser un apoyo incondicional en mi vida.
Mi hermano	Luis Avila por apoyarme durante mi carrera.

AGRADECIMIENTOS A:

La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la casa de estudios que me permitió formarme como profesional de la ingeniería.
Facultad de Ingeniería	Por darme la oportunidad de expandir mis conocimientos y mi preparación como profesional.
Mis amigos de la carrera	Por haber compartido buenos y malos momentos durante los proyectos y estudios en el transcurso de la carrera junto a sus experiencias en especial a: Víctor Salazar, Francisco García, Hugo López, Abel Ramírez, Luis Herrera, Ángelo Caal, Daniel Oxom, Douglas Ixtecoc, Hector Cojulún, Óscar Milian y Jorge Illescas.
Ing. Rafael Chang	Por ser amigo, compañero de proyectos y haber asesorado este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	1
1.1. Riego localizado	1
1.1.1. Riego por goteo	2
1.2. Sistema de control.....	2
1.2.1. Elementos de un sistema de control.....	3
1.2.1.1. Perturbaciones.....	4
1.2.1.2. Variables controladas	4
1.2.1.3. Variables manipuladas	4
1.2.1.4. Variables de control.....	4
1.2.2. Clasificación de un sistema de control.....	5
1.2.2.1. Sistema de control de lazo abierto.....	5
1.2.2.2. Sistema de control de lazo cerrado	6
1.2.3. Sistema de control lazo cerrado proporcional e integral.....	7
1.2.3.1. Sistema de control proporcional	7
1.2.3.2. Sistema de control integral	9
1.3. Energía solar	12
1.3.1. Sistema de energía fotovoltaica.....	12

1.4.	Comunicación inalámbrica	13
1.4.1.	Redes inalámbricas de gran alcance	14
1.4.1.1.	Telefonía móvil	15
2.	PROCESO DEL SISTEMA DE RIEGO AUTOMATIZADO.....	17
2.1.	Proceso del sistema de regulación de riego por goteo alimentado por energía solar.....	17
2.1.1.	Descripción del terreno	18
2.1.2.	Sistema de energía fotovoltaica	19
2.1.2.1.	Panel solar y características.....	19
2.1.2.2.	Dimensionamiento del sistema fotovoltaico	21
2.1.2.2.1.	Cálculo consumo diario	22
2.1.2.2.2.	Determinar HPS.....	23
2.1.2.2.3.	Cálculo generador fotovoltaico.....	25
2.1.2.2.4.	Cálculo del número de paneles.....	25
2.1.2.2.5.	Cálculo del banco de baterías	26
2.1.2.2.6.	Cálculo del regulador	27
2.1.2.2.7.	Cálculo del inversor.....	28
2.1.3.	Sistema de control lazo cerrado proporcional e integral.....	29
3.	DISEÑO DEL SISTEMA DE RIEGO AUTOMATIZADO.....	33
3.1.	Diseño del sistema fotovoltaico	34
3.1.1.	Cálculo consumo diario	34

3.1.2.	Determinar HPS.....	36
3.1.3.	Cálculo de Inversor.....	36
3.1.4.	Cálculo consumo total	37
3.1.5.	Cálculo número de paneles	38
3.1.5.1.	Paneles en serie	39
3.1.5.2.	Paneles solares en paralelo.....	41
3.1.6.	Cálculo del banco de baterías	42
3.1.7.	Cálculo de regulador.....	43
3.1.8.	Diagrama del sistema fotovoltaico	45
3.2.	Diseño del sistema de control proporcional e integral	45
3.2.1.	Controlador	46
3.2.2.	Elemento final de control	47
3.2.2.1.	Demultiplexor.....	48
3.2.2.2.	Compuerta lógica OR	49
3.2.2.3.	Electroválvula	51
3.2.2.4.	Sensor	52
3.2.2.5.	Convertidor analógico-digital	55
3.2.2.6.	Resistencia	56
3.2.2.7.	Transistor.....	57
3.2.2.7.1.	Transistor TRIAC.....	57
3.2.3.	Diagrama del sistema de control proporcional e integral.....	58
3.2.3.1.	Conexiones Raspberry Pi	58
3.2.3.2.	Conexiones electroválvulas	59
3.2.3.3.	Conexión de sensores de humedad	63
3.2.3.4.	Conexión de ADC.....	63
3.2.3.5.	Diagrama eléctrico completo	64
3.3.	Diseño de comunicación inalámbrica	66
3.3.1.	Modulo Base de <i>LTE</i> para Raspberry Pi	66

3.3.2.	Módulo LTE para Raspberry Pi	68
3.3.3.	Antena para módulo <i>LTE</i>	69
3.3.4.	Diagrama de conexión Inalámbrica	71
3.4.	Diseño de la interfaz <i>web</i>	72
4.	ESCALABILIDAD DEL DISEÑO	75
4.1.	Capacidad de alimentación de energía	76
4.2.	Cantidad de tuberías secundarias.....	76
4.3.	Dimensionamiento de sensores	77
4.4.	Capacidad del controlador	77
CONCLUSIONES.....		79
RECOMENDACIONES		81
BIBLIOGRAFÍA.....		83
APÉNDICES.....		89

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Característica de riego para una planta.....	1
2.	Riego por goteo en superficie.....	2
3.	La salida del sistema debido a la interacción en la entrada	3
4.	Esquema de un sistema de control de lazo abierto	5
5.	Diagrama de bloques sistema de control de lazo cerrado.....	6
6.	Sistema de control proporcional	8
7.	Sistema de control integral	10
8.	Sistema de control proporcional e integral	11
9.	Transformación de energía fotovoltaica	13
10.	Ejemplo de comunicaciones inalámbricas.....	15
11.	Descripción del terreno.....	19
12.	Descripción de sistema solar fotovoltaico.....	21
13.	Sistema de control proporcional e integral	30
14.	Diseño de terreno.....	33
15.	Inversor Samlex modelo SAM-450-12.....	37
16.	Panel solar monocristalino	38
17.	Panel solar en serie.....	40
18.	Panel solar en paralelo.....	41
19.	Batería 12V y 200Ah	43
20.	Regulador MPPT	44
21.	Diagrama sistema fotovoltaico	45
22.	Raspberry Pi – GPIO.....	47
23.	Características Demultiplexor 74LS138	48

24.	Diagrama de conexión 74LS138.....	49
25.	Diagrama de conexión DC4071	51
26.	Electroválvula.....	52
27.	Sensor de humedad SEN0193	53
28.	Sensor de flujo de agua YF-S201	54
29.	Diagrama de conexión integrado ADC0800.....	56
30.	Resistencia	56
31.	Transistor tipo NPN.....	57
32.	Transistor tipo TRIAC Mosfet TO220	58
33.	Conexión Raspberry Pi	59
34.	Conexión electroválvula principal.....	60
35.	Sensor flujo de agua	60
36.	Conexión electroválvula secundaria.....	62
37.	Conexión de los sensores de humedad	63
38.	Conexión ADC	64
39.	Diagrama eléctrico	65
40.	Módulo base de LTE	68
41.	Módulo LTE.....	69
42.	Antena para módulo LTE	71
43.	Conexión Raspberry Pi y modulo SIM	72
44.	Página <i>WEB</i> - Inicio	73
45.	Estadísticas del consumo de agua.....	74
46.	Escalabilidad del diseño.....	75

TABLAS

I.	Telefonía móvil.....	16
II.	Consumo diario por equipo	34
III.	Características del panel solar	39

IV.	Especificaciones Raspberry Pi 4 modelo B	46
V.	Características CD4072	50
VI.	Características de la electroválvula.....	51
VII.	Características sensor de humedad.....	53
VIII.	Características sensor de flujo de agua	54
IX.	Características eléctricas ADC0800	55
X.	Tabla de la verdad para estado de electroválvulas	61

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperios
Ah	Amperio por hora
AC	Corriente alterna (<i>Alternate Current</i>)
DC	Corriente Directa (<i>Direct Current</i>)
dB<i>i</i>	Decibeles
kWh/m²	Kilowatt hora por metro cuadrado
L/min	Litros por minuto
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracker</i>
mca	Metro de columna de agua
mm	Milímetro
PCIe	<i>Peripheral Component Interconnect express</i>
4G	Telefonía móvil, cuarta generación
3G	Telefonía móvil, tercera generación
ohm	Unidad de la resistencia eléctrica
hp	Unidad de potencia (<i>Horsepower</i>)
W	Unidad de potencia (Watts)
Mpa	Unidad de presión (Megapascal)
bar	Unidad de presión
V	Voltaje
Wh	Watts por hora

GLOSARIO

Caudal	Cantidad de agua que lleva una corriente o que fluye de un manantial o fuente.
Conector u.FL	Es un conector de radio frecuencia (RF) en miniatura para señales de alta frecuencia .
Demultiplexor	Es un componente en la electrónica digital compuesto por un circuito combinacional que posee una única entrada de información de datos para n entradas de control que sirven para seleccionar una de las posibles salidas de 2^n .
Electromagnetismo	Es la parte de la física que observa y estudia los fenómenos eléctricos y magnéticos en una sola teoría.
Electroválvula	Son válvulas que responden a pulsos eléctricos para controlar el paso de un fluido por un conducto o tubería.
Exudante	Es un sistema de riego con que aporta agua a la tierra mediante un tubo textil que exuda agua por los poros del tejido.
Fotovoltaico	Es una fuente de energía renovable que produce electricidad, que se obtiene con contacto directo a

partir de la radiación solar mediante un dispositivo semiconductor.

Germanio

Es un elemento químico con símbolo *Ge* que en la tabla periódica indica que tiene número atómico 32, y masa atómica 72,59. Por sus características semiconductoras es utilizado en la fabricación de dispositivos electrónicos.

Inalámbrico

Es una comunicación que utiliza la modulación de ondas electromagnéticas a través del espacio.

Insolación

Es la cantidad de energía en forma de radiación que llega a un lugar de la Tierra en un día concreto.

Ohmios

Es la unidad derivada de resistencia eléctrica en el Sistema Internacional de Unidades.

Página *WEB*

Es un documento electrónico que puede tener como contenido texto, video, programas, sonido, imágenes entre otras, esta es adaptada para la llamada *World Wide Web* y que puede ser accedida mediante un navegador web a través de Internet.

Radiación

Es la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas a través del vacío o de un medio material.

Renovable	Se refiere a un recurso natural que puede ser dada por la gran cantidad de energía que poseen o porque son capaces de regenerarse por medios naturales.
Semiconductor	Es un material aislante que, cuando se le añaden una energía de una fuente externa, se vuelve conductor. Los más comunes son el silicio y el germanio.
Silicio Monocristalino	Es un material compuesto de silicio que en el entorno de la energía solar, el silicio monocristalino se utiliza para elaborar células fotovoltaicas dado que tiene una fácil capacidad de absorción para la radiación.
Silicio	Es un elemento químico con símbolo <i>Si</i> de número atómico 14 y masa atómica 28,086. Por sus características semiconductoras es utilizado en la fabricación de dispositivos electrónicos.

RESUMEN

En la actualidad los sistemas de control automático han tenido un gran impacto en la industria dado que pueden regular el comportamiento de un sistema o monitorear dicho sistema, con lo que proporcionan sistemas precisos y eficientes en actividades que requieren decisiones rápidas, sin tener un margen de error demasiado elevado. En este trabajo se presenta una propuesta de diseño de un sistema electrónico de riego por goteo que permita alcanzar una mayor efectividad y proporcionar mayor control en los tiempos que se requiere regar la plantación, consumo de agua y evitar algún tipo de desplazamiento de una persona a lugares alejados para regar el terreno.

La mencionada propuesta de diseño electrónico del sistema de riego utiliza un sistema de control proporcional e integral con lazo cerrado, el cual indicará la cantidad y tiempo de agua necesaria para un sector de la plantación, optimizando el método y los recursos.

Para la alimentación del sistema de control se propone la utilización de la energía solar dado que es una energía renovable, abundante y de fácil acceso además de tener un monitoreo a través de servicios *WEB*, utilizando el protocolo IP en una red *LAN* para tener fácil acceso a la herramienta, el cual ayudara a tener una visualización de los componentes asociados al sistema. Al utilizar la energía solar se obtiene una reducción de costo en la obra civil para la instalación cables de transmisión eléctrica y repercute también en una reducción en el consumo de materiales como el cobre, la tubería para la instalación eléctrica, los tableros eléctricos, entre otros.

OBJETIVOS

General

Elaborar una propuesta de diseño para un sistema automático de regulación de riego por goteo alimentado por energía solar para optimizar los recursos de energía y agua potable.

Específicos

1. Presentar los elementos y fundamentos teóricos que componen un sistema aislado de alimentación de energía solar y un sistema de control proporcional e integral.
2. Presentar los elementos de una red de comunicación inalámbrica y describir el diseño del acceso remoto al sistema de control de riego utilizando el internet.
3. Utilizar en el diseño la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi para dirigir el sistema de riego y la aplicación.

INTRODUCCIÓN

Cada día en la actualidad un sistema de control se está convirtiendo en un recurso indispensable para la industria debido a la versatilidad y fidelidad en los procesos automatizados que pueden llegar a representar estos sistemas, por lo que a continuación se desarrolla una propuesta para el diseño de un sistema de regulación de riego por goteo alimentado por energía solar, la cual tiene como objetivo proponer un método para optimizar el método riego por goteo de manera automática, y que al mismo tiempo sea alimentado con energía renovable..

La energía solar es una fuente de energía renovable y abundante que puede ser utilizada para la calefacción, iluminación, riego de plantaciones, generación de electricidad, entre otros. La energía solar, por ser una fuente utilizada para generar electricidad, se puede utilizar para proporcionar la potencia necesaria que requiere el sistema de riego por goteo.

En el sistema de control para el método de riego por goteo alimentado por energía solar se busca la eficiencia y la optimización de los recursos ya que se estará verificando el uso de agua necesario y los tiempos de riego requerido para el terreno, para ello se hará el uso de paneles solares y un sistema automatizado que permita mejorar el consumo de agua y gestionar su control con la ayuda de la tecnología Raspberry PI.

El sistema de riego por goteo se podrá monitorear a través de una herramienta remota usando el servicio WEB, este tipo de herramientas son muy utilizadas dado que permiten el fácil acceso a un sistema usando los protocolos TCP/IP y el uso de internet para la comunicación remota, por ejemplo, se puede

observar el comportamiento de en un sistema que se encuentra en el departamento de peten desde la ciudad de Guatemala, sin necesidad de ir físicamente al lugar. Por este motivo es crucial esta herramienta para el sistema de riego por goteo porque se puede obtener el consumo de agua que se está teniendo y el estado de los componentes del sistema.

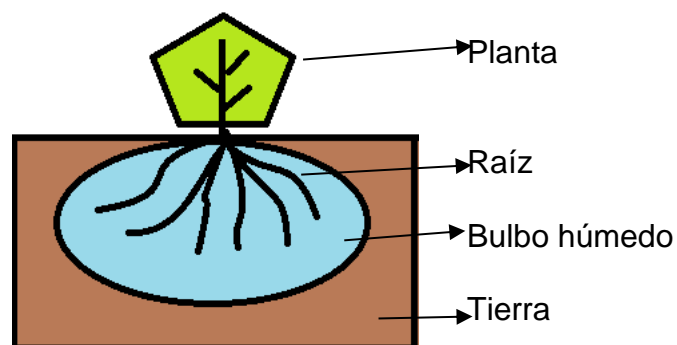
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En esta sección se describirá el concepto de lo que es un riego localizado, sistema de control, energía solar y comunicación inalámbrica, dado que estos componentes se estarán utilizando en el sistema de riego por goteo alimentado por energía solar.

1.1. Riego localizado

El riego localizado se radica en la capacidad de aplicar agua sobre la superficie del terreno en un determinado espacio, utilizando tuberías y emisores de diversas formas, permitiendo que sólo se humedezca un segmento de la superficie (suelo) lo más cercano a la planta. El agua que es aplicada por cada emisor riega un volumen de suelo que se denomina bulbo húmedo.

Figura 1. Característica de riego para una planta



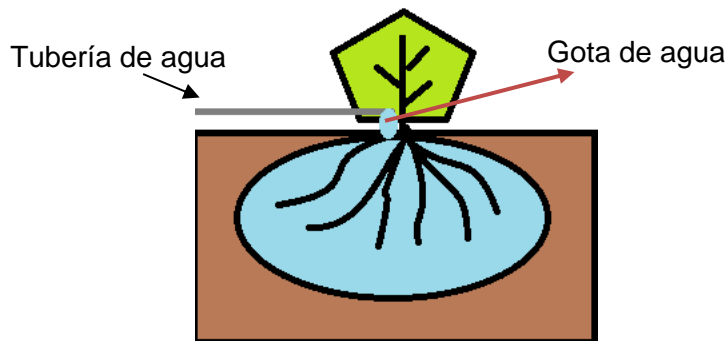
Fuente: elaboración propia, empleando Paint.

Los riegos localizados son pequeños caudales que proporcionan emisores de riego por lo que se suelen referirse como “riego por goteo” a los riegos localizados que tienen un caudal de baja presión utilizando tuberías gateadoras, o tuberías exudantes.

1.1.1. Riego por goteo

Es el sistema de riego localizado más utilizado y popular, dado que no requiere ningún sistema sofisticado para su uso. Este tipo de sistema de riego se centra en que el agua circule a presión por la instalación hasta llegar a los emisores o goteros con caudal que tiene una velocidad de salida gota a gota. Son utilizados normalmente en cultivos tales como el brócoli, maíz, frijol negro, limón, entre otros.

Figura 2. Riego por goteo en superficie



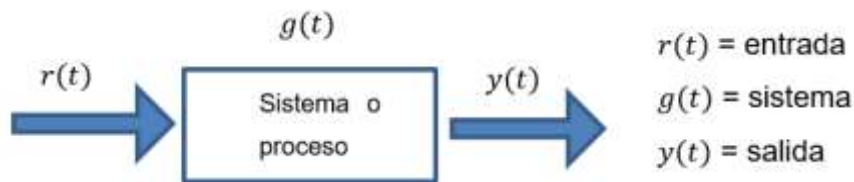
Fuente: elaboración propia, empleando Paint.

1.2. Sistema de control

Un sistema de control es un proceso automático que tiene varios elementos que se interconectan y llegan a formar un sistema determinado, así pues, el

arreglo resultante es capaz de controlar el procedimiento y su resultado. Estos sistemas y sus componentes son susceptibles para ser controlados, dado que al aplicar una señal de entrada se obtiene una respuesta o salida.

Figura 3. **La salida del sistema debido a la interacción en la entrada**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio 2016.

1.2.1. Elementos de un sistema de control

Los elementos básicos que constituyen parte de un sistema de control y permiten su correcto funcionamiento son los siguientes elementos:

- **Sensores:** dispositivos que permiten medir las variables que tiene el sistema.
- **Controlador:** utilizando los valores determinados por los sensores y la salida deseada (entrada), por lo que lleva un registro y permite evaluar la acción que debe adoptar para cambiar las variables de control.
- **Actuador:** es el mecanismo que efectúa la tarea calculada por el controlador y permite modificar las variables de control para obtener la salida deseada.

En un “sistema de control, se consideran cuatro grupos de variables: las perturbaciones, las variables controladas, las variables de control y las variables”¹ manipuladas.

1.2.1.1. Perturbaciones

Son generalmente desconocidas y no se pueden medir, pero sus efectos sobre el sistema y sus variables de control permiten detectar su existencia. El uso de un sistema de lazo cerrado tiene la posibilidad de corregir los inconvenientes que pueden presentar las perturbaciones en el sistema.

1.2.1.2. Variables controladas

Las variables controladas son aquellas que se pueden medir y se pueden corregir para aplicar los valores deseados que tenga un sistema.

1.2.1.3. Variables manipuladas

La variable manipulada es la porción o la condición que es manipulada por el controlador de tal forma que afecte únicamente el valor de la variable controlada que por lo general es la salida de un sistema.

1.2.1.4. Variables de control

La variable de control es la que realiza la medición del valor de la variable controlada del sistema e indica los cálculos necesarios que se debe de actuar

¹ Universidad Politécnica de Cataluña. *Capítulo 2. Sistemas de Control*. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3330/34059-5.pdf?sequence=5&isAllowed=y>. Consulta: marzo de 2021.

sobre la variable medida para corregir alguna desviación en el valor deseado de la salida del sistema.

1.2.2. Clasificación de un sistema de control

Los sistemas de control se clasifican en dos tipos:

- Sistema de control de lazo cerrado
- Sistema de control de lazo abierto

1.2.2.1. Sistema de control de lazo abierto

Es un sistema en el cual su salida es de alguna manera independiente a la entrada. Los elementos de un sistema a lazo abierto usualmente están divididos en dos partes, el controlador y el proceso controlado. El controlador hace referencia a aquel que verifica el sistema y corrige las perturbaciones por lo que manda una señal al proceso controlado por ende este último es aquel que sigue las ordenes proporcionadas por el controlador.

Figura 4. Esquema de un sistema de control de lazo abierto



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio 2016.

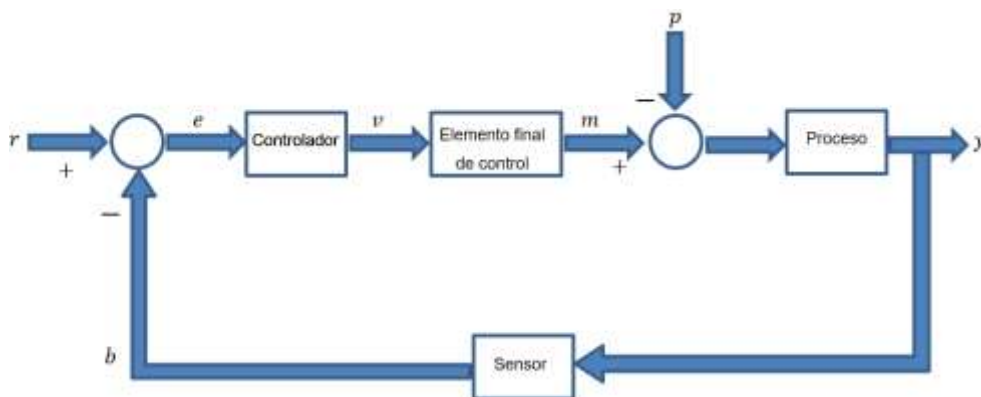
Se define las siguientes variables:

- $r(t)$ = entrada de referencia
- $u(t)$ = señal actuante
- $y(t)$ = variable Controlada

1.2.2.2. Sistema de control de lazo cerrado

Es un sistema en el cual su salida depende de alguna manera a la entrada y a su entorno por lo que estos tipos de sistema utilizan un sensor que detecta la respuesta real (salida del sistema) y realiza una comparación con una referencia de entrada, dada esta relación que existe en los sistemas de lazo cerrado también se les conoce como sistemas retroalimentados. Estos tipos de sistemas tienen la salida real que se compara con respecto al comportamiento deseado, de tal manera que el sistema puede llegar a corregir el proceso según sea necesario por lo que en la siguiente figura se muestra la configuración de un sistema retroalimentado.

Figura 5. Diagrama de bloques sistema de control de lazo cerrado



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio 2016.

Se define las siguientes variables:

- $r(t)$ = entrada de referencia.
- $e(t)$ = señal de error.
- $v(t)$ = variable regulada.
- $m(t)$ = variable manipulada.
- $p(t)$ = señal de perturbación.
- $y(t)$ = variable controlada.
- $b(t)$ = variable de retroalimentación como resultado de haber detectado la variable controlada por medio del sensor.²

El comparador y el controlador forman parte de una misma entidad por lo que recibe únicamente el nombre de controlador y por ese motivo el sistema de riego por goteo hace referencia solamente a ese nombre.

1.2.3. Sistema de control lazo cerrado proporcional e integral

En el sistema de control proporcional e integral se compone de las acciones de control proporcional e integral que pueden combinarse para producir una corrección en el sistema de manera que se suman las contribuciones individuales.

1.2.3.1. Sistema de control proporcional

La acción proporcional es un amplificador con ganancia ajustable. Este control reduce el tiempo de acción (subida), incrementa el sobretiro y disminuye

² VIÑANZACA, Víctor. *Introducción a los Sistemas de Control*. <https://idoc.pub/documents/introduccion-a-los-sistemas-de-control-2nv85j1mmdlk>. Consulta: abril de 2021.

el error de estado estable. Este tipo de sistema ejerce una acción en relación entre la la señal de error $e(t)$ y la salida del controlador $u(t)$ que esta dad por:

$$u(t) = K_p e(t)$$

Donde K_p es la ganancia proporcional que tiene el sistema.

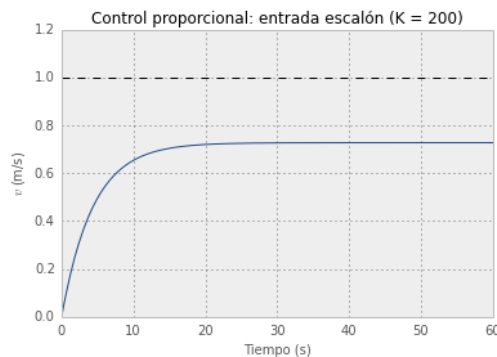
Si se aplica la transformada de Laplace se obtiene:

$$U(s) = K_p E(s)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \Rightarrow \text{Funcion de transferencia}$$

A continuación, una representación gráfica de un sistema de control proporcional:

Figura 6. **Sistema de control proporcional**



Fuente: pybonacci. *Teoría de control en Python con SciPy (II): Control PID*.
<https://pybonacci.org/2013/11/06/teoria-de-control-en-python-con-scipy-ii-control-pid/>. Consulta:
junio de 2020.

1.2.3.2. Sistema de control integral

La acción integral se denomina control de reajuste (*reset*) ya que tiene el objetivo de disminuir y suprimir el error en estado estacionario producido por el sistema proporcional. En estos tipos de controladores la relación entre la salida $u(t)$ y la señal de error $e(t)$ es:

$$\frac{u(t)}{dt} = K_i e(t)$$

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t)$$

Donde K_i es una constante ajustable y así poder eliminar la inestabilidad que pueda llegar a tener el sistema. Si el valor de $e(t)$ incrementa, el valor de la salida $u(t)$ va a ser más rápido por el factor que puede tener $e(t)$. Para un error de cero, el valor de $u(t)$ permanece estacionario.

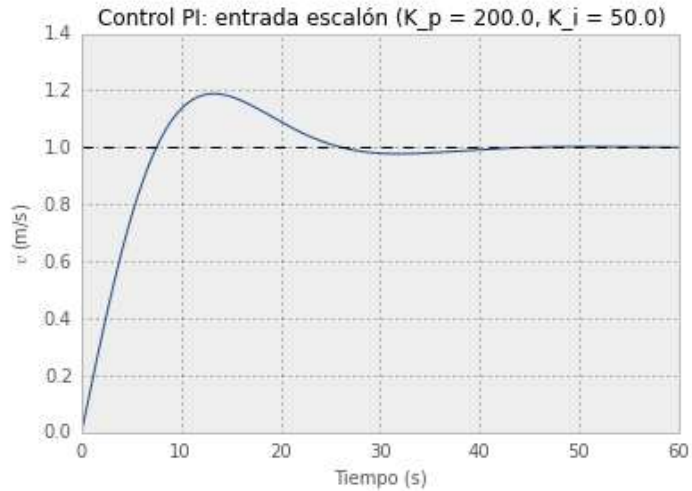
Si se aplica la transformada de Laplace se obtiene:

$$U(s) = \frac{K_i}{s} E(s)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \Rightarrow \text{Funcion de transferencia}$$

A continuación, una representación gráfica de un sistema de control integral:

Figura 7. Sistema de control integral



Fuente: pybonacci. *Teoría de control en Python con SciPy (II): Control PID.*

<https://pybonacci.org/2013/11/06/teoria-de-control-en-python-con-scipy-ii-control-pid/>. Consulta: junio de 2020.

Entonces, un sistema de control proporcional e integral se puede afirmar que este sistema decreta el tiempo de subida proporcionado por la acción proporcional y el tiempo de estabilización para el sistema. Estos tipos de sistema la relación entre la señal de salida del controlador $u(t)$ y la señal de error $e(t)$ es:

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

Donde K_p es la ganancia proporcional que tiene el sistema y T_i se denomina tiempo integral.

El tiempo integral ajusta la acción de control y el valor de K_p afecta las partes integral y proporcional de la acción de control. El inverso del tiempo integral T_i se denomina velocidad de reajuste. La velocidad de reajuste es la cantidad de veces por minuto

que se duplica la parte proporcional de la acción de control, esta velocidad de reajuste se mide en términos de las repeticiones por minuto.³

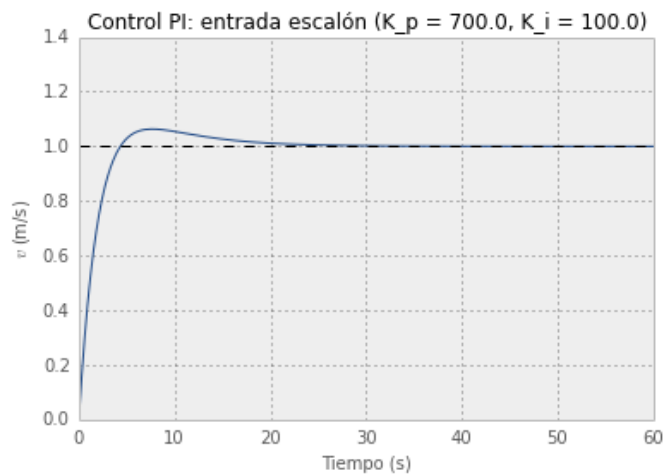
Si se aplica la transformada de Laplace se obtiene:

$$U(s) = K_p E(s) + \frac{K_p}{T_i(s)} E(s)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i(s)} \right) \Rightarrow \text{Funcion de transferencia}$$

A continuación, una representación gráfica de un sistema de control proporcional e integral:

Figura 8. **Sistema de control proporcional e integral**



Fuente: pybonacci. *Teoría de control en Python con SciPy (II): Control PID.*

<https://pybonacci.org/2013/11/06/teoria-de-control-en-python-con-scipy-ii-control-pid/>. Consulta:
junio de 2020.

³ VSIP. *Tipos de controladores.* <https://vsip.info/tipos-de-controladores-pdf-free.html>. Consulta: abril de 2021.

1.3. Energía solar

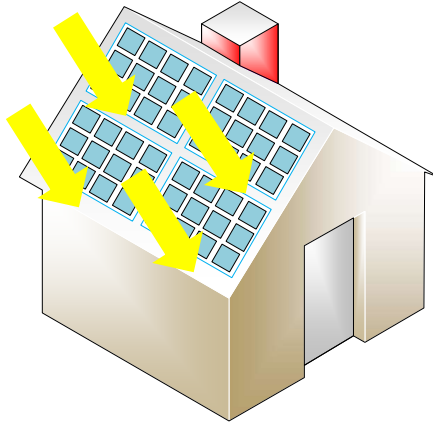
La energía solar está determinada por una radiación electromagnética procedente del sol que llega a la Tierra, principalmente como la luz, calor y rayos ultravioleta. Es una fuente de energía renovable con la que es posible generar calor y electricidad.

1.3.1. Sistema de energía fotovoltaica

Los rayos del sol se pueden transformar en electricidad mediante el proceso de conversión fotovoltaica el cual consiste en cambiar de manera directa la energía luminosa (rayos de sol) en energía eléctrica mediante el uso de paneles solares que están conformadas por células fotovoltaicas compuestas por los semiconductores de silicio o germanio.

Los paneles solares reciben los rayos del sol (ondas electromagnéticas) que generan electricidad, esto es debido al 'efecto fotovoltaico' que estimula la energía solar (en modo de fotones), originando cargas positivas y negativas en semiconductores provocando un campo eléctrico que producirá corriente eléctrica.

Figura 9. **Transformación de energía fotovoltaica**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio 2016.

Existen dos clasificaciones para los sistemas de energía fotovoltaica:

- **Sistemas aislados:** sistemas solares fotovoltaicos sin conexión a la red eléctrica, es decir que la energía proporcionada proviene del sol y no se comparte con la energía eléctrica.
- **Sistemas de autoconsumo:** sistemas solares fotovoltaicos con conexión a la red eléctrica, es decir que comparten energía proveniente del sol y la energía eléctrica.

1.4. Comunicación inalámbrica

La comunicación inalámbrica es aquella en la que se comunican un extremo a otro, es decir, desde el emisor hasta el receptor mediante el uso de ondas electromagnéticas.

A continuación, se determinan algunas ventajas que se puede llegar a tener con la utilización de la tecnología inalámbrica:

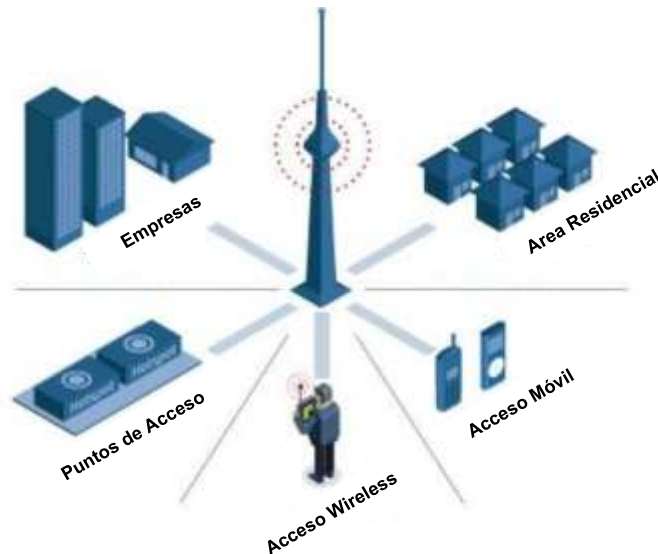
- **Accesibilidad y flexibilidad:** las comunicaciones inalámbricas pueden llegar a lugares donde se dificulta la instalación de algún tipo de cableado.
- **Costos:** las comunicaciones inalámbricas se puede ahorrar el costo de una instalación cableada y sus derivados de entorno físico.
- **Movilidad:** las comunicaciones inalámbricas permiten tener acceso a una red telefónica o internet en tiempo real.

1.4.1. Redes inalámbricas de gran alcance

Están redes también conocidas como WWAN (por sus siglas en inglés, *Wireless Wide Area Network*), las cuales permiten la conexión de redes y usuarios de zonas geográficamente distantes. Las redes WWAN móviles (MWWAN – *Mobile Wireless Wide Area Network*) son el sistema de comunicación inalámbrico más utilizado por las operadoras de telefonía móvil.

El Internet también se ha beneficiado de esta tecnología, lo que ha dado paso al Internet móvil, que permite conectividad a la red desde cualquier lugar y en cualquier momento, con ello se ha facilitado la aparición de nuevos servicios y aplicaciones que se pueden utilizar a través de dispositivos móviles.

Figura 10. **Ejemplo de comunicaciones inalámbricas**



Fuente: Blogger.com. *Medios de transmisión no guiados*. <http://veritohoyos.blogspot.com/2014/>.
Consulta: febrero de 2020.

1.4.1.1. Telefonía móvil

Para poder acceder los beneficios de la telefonía móvil en la actualidad se debe contar con una tarjeta SIM para que el dispositivo pueda tener comunicación hacia el exterior.

La tarjeta SIM (*Subscriber Identity Module*, Módulo de Identificación de Abonado) se trata de un chip integrado en una tarjeta de plástico que guarda de forma segura la clave de servicio del usuario para identificarse ante la red móvil de un operador de telefonía.

La evolución de las redes móviles, así como las principales características de cada una de ellas se describen en la siguiente tabla:

Tabla I. **Telefonía móvil**

Descripción	Primera Generación (1G)	Segunda Generación (2G)	Tercera Generación (3G)	Cuarta Generación (4G)
Inicio	1970	1980	1990	2000
Ancho de banda	1,9Kbps	14,4Kbps	2Mbps	200Mbps
Tecnología	Analógica	Digital	Banda Ancha (CDMA) y tecnología IP	LAN/WAN/PAN y WLAN
Servicio	Telefonía Móvil (Voz)	Voz digital y mensajes cortos (SMS)	Integración de alta calidad de audio, video y datos	Acceso a la información dinámica, dispositivos móviles

Fuente: FERNÁNDEZ, Yennifer. *Tecnología Móvil*.

<https://pt.slideshare.net/YenniferFernandez/tecnologia-mvil/9>. Consulta: junio de 2020.

La telefonía móvil de cuarta generación (4G) en muchas ocasiones se refieren a su estándar conocido como LTE debido a sus siglas en inglés, *Long Term Evolution*; evolución a largo plazo. Esta tecnología se estará empleando en la propuesta de proyecto del sistema de control de riego por goteo para tener acceso a internet, ya que actualmente es la que se está usando en Guatemala y que permite un rápido acceso al servicio *WEB* para monitorear el sistema.

2. PROCESO DEL SISTEMA DE RIEGO AUTOMATIZADO

A continuación, se describe el proceso del sistema de riego automatizado y el funcionamiento de cada bloque que lo conforma, asimismo, se listan los componentes y demás aspectos necesarios a considerar para dimensionar el sistema de control.

2.1. Proceso del sistema de regulación de riego por goteo alimentado por energía solar

El sistema de riego automatizado que se presenta se basa en un sistema de control de lazo cerrado que estará rectificando que la señal de salida sea la más eficiente posible; además, dicho sistema de control se encuentra alimentado por energía solar. De manera adicional también contará con un sistema denominado banco de baterías para que proporcione la energía necesaria en días nublados o con poco sol y con ello se garantiza el funcionamiento del sistema.

El proceso del sistema de riego automatizado se divide en 3 bloques principales:

- Descripción del terreno
- Sistema de energía fotovoltaica
- Sistema de control proporcional e integral

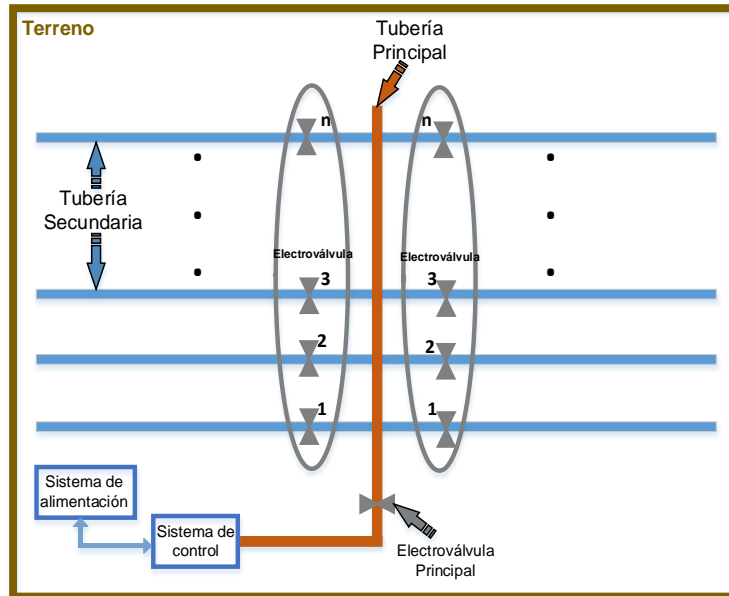
2.1.1. Descripción del terreno

Un terreno, en términos generales, tiene un sistema de riego automatizado que consta de los siguientes componentes:

- Sistema de alimentación: consiste en transportar el agua hacia las tuberías.
- Sistema de control: encargado de regular el sistema de riego e indica en donde es necesario transportar el agua.
- Tubería principal: encargado de transportar el agua hacia las tuberías secundarias.
- Tubería secundaria: encargado de transportar el agua hacia las plantas.
- Electroválvula: controla el paso del agua que conducen las tuberías, en la figura 8 se puede observar que hay electroválvula principal encargada del paso de agua en tubería principal y electroválvula secundaria encargada del paso de agua hacia las plantas.

A continuación, un esquema que describe los componentes necesarios del terreno:

Figura 11. Descripción del terreno



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio 2016.

2.1.2. Sistema de energía fotovoltaica

La energía fotovoltaica, es la encargada de mantener el sistema ejecutándose en todo momento dado que se encarga de regular y mantener la energía directa y energía alterna en los procesos que se requiere sustentar para el correcto funcionamiento.

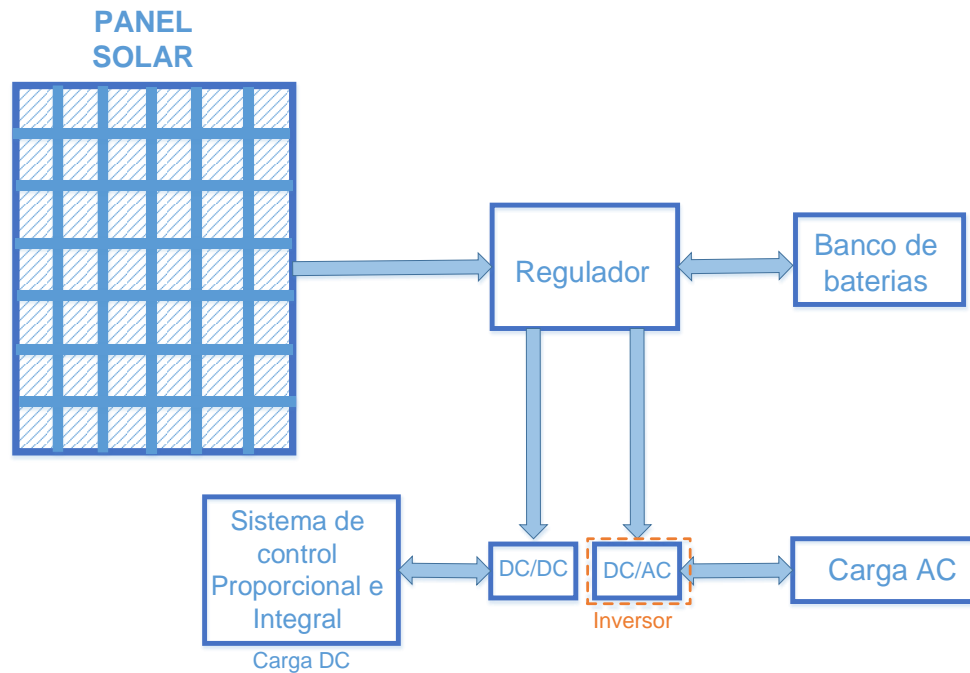
2.1.2.1. Panel solar y características

El sistema fotovoltaico por utilizar para el sistema de riego automatizado será el sistema aislado dado que en ningún momento se estará utilizando la energía eléctrica existente. Los componentes por utilizar para el proceso del sistema son:

- Panel Solar: encargado de transformar la energía solar a energía eléctrica DC.
- Regulador: encargado de distribuir la energía a carga DC, Inversor y banco de baterías.
- Banco de baterías: acumulan la energía que será utilizada durante momentos de baja o nula insolación.
- Carga DC: equipos que manejan únicamente energía DC
- Inversor: convierte la energía eléctrica DC a AC
- Carga AC: equipos que manejan únicamente energía AC

A continuación, un esquema que describe los componentes de la energía solar fotovoltaico aislado:

Figura 12. Descripción de sistema solar fotovoltaico



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio 2016.

2.1.2.2. Dimensionamiento del sistema fotovoltaico

Para dimensionar la capacidad del sistema autónomo fotovoltaico se debe de considerar lo siguiente:

- Cálculo de la energía consumida por día en Watts por hora (Wh): se debe de verificar el consumo total del sistema para proporcionar dicha información en el cálculo del generador fotovoltaico.
- Selección de las horas solar pico (HPS) para la aplicación: se debe de considerar el lugar en donde se va a colocar los paneles solares para determinar el punto de energía máximo en las horas solar pico.

- Generador fotovoltaico: para este cálculo se debe de tener en cuenta la energía total consumida por el sistema para determinar el número de paneles solares a utilizar y el tipo de interconexión, serie; paralelo o mixto.
- Banco de baterías: es necesario para proporcionar energía al sistema en el caso de que la energía solar no sea suficiente.
- Regulador: se debe considerar el consumo del sistema para determinar la cantidad de carga en amperios que debe de soportar.
- Inversor: se debe de verificar el consumo de la energía de corriente alterna para que soporte la carga de dicho equipo.

2.1.2.2.1. Cálculo consumo diario

La energía consumida en corriente continua (*DC*) en *Wh*:

$$E_{DC} = \sum_i P_{(DC)i}(t_{di})$$

Por lo que el consumo de la corriente continuad, E_{DC} , es la sumatoria de todas las energías consumidas de cada equipo individual, i , del sistema, donde $P_{(DC)i}$ es la potencia nominal del equipo i en *watts* (W) y t_{di} es el tiempo diario de uso en horas (h) para dicho equipo.

Energía consumida en corriente alterna (*AC*) en *Wh*:

$$E_{AC} = \sum_i P_{(AC)i}(t_{di})$$

Por lo que el consumo de la corriente alterna, E_{AC} , es la sumatoria de todas las energías consumidas de cada equipo individual, i , del sistema, donde $P_{(AC)i}$ es la potencia nominal del equipo i en *watts* (W) y t_{di} es el tiempo diario de uso en horas (h) para dicho equipo.

El consumo máximo diario en Wh es:

$$E_{max} = \frac{E_{DC}}{n_{BAT}} + \frac{E_{AC}}{(n_{BAT})(n_{INV})}$$

Donde n_{BAT} es la eficiencia de la batería y n_{INV} es la eficiencia del inversor que se van a utilizar en el sistema fotovoltaico.

Por ejemplo, supongamos que hay un sistema que tiene dos dispositivos en corriente continua que consumen $15W/h$ y otros dos dispositivos en corriente alterna que consumen $10W/h$ y están encendidos durante $4h$ con una eficiencia de la batería a usar de 0.7 y una eficiencia del inversor a 90% . El consumo máximo diario sería:

$$E_{max} = \frac{15W(4h) + 15W(4h)}{0,7} + \frac{10W(4h) + 10W(4h)}{(0,7)(90\%)} = 298,41Wh$$

Por lo que la energía requerida a utilizar por el sistema es de $298,41 Wh$.

2.1.2.2.2. Determinar HPS

Horas Pico Solar (HPS) es la energía solar que se recibe sobre la superficie durante un tiempo definido en horas. Esta energía se considera que está siendo transmitida a $1 kW/m^2$. Por ejemplo, se considera que en una superficie recibe

10 HPS; esta superficie estará recibiendo una energía de $10 \text{ kWh}/\text{m}^2$. La medida de HPS es muy importante dado que se encuentra relacionada a la capacidad que puede generar un panel solar durante el día.

La determinación de HPS puede ser determinada por:

- Adquisición de la tabla de radiación global diaria (kWh/m^2).
- Adquisición de la tabla de consumo diario de la energía total (kWh) que se alcanza en cada mes.
- Adquisición de la tabla diaria en relación con el consumo/radiación que se alcanza en cada mes.
- Identificación del máximo consumo/radiación según la inclinación del sol.

Para obtener la información de HPS se puede verificar en diversas herramientas:

- Herramienta usada por la NASA llamado Power Data Access Viewer que se encuentra disponible en <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.
- Herramienta usada por la unión europea llamada Solar Radiation Tool que se encuentra disponible en https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/tools.html

2.1.2.2.3. Cálculo generador fotovoltaico

El método más común es el de balance energético que forma parte de la conformidad entre la energía consumida y la energía generada en una jornada de 24 horas y está se encuentra dado de la siguiente manera:

$$E_{panel} = I_{panel}(HPS)(n_{panel})$$

Donde E_{panel} es la energía otorgada por el panel, I_{panel} es la corriente máxima que soporta el panel solar, HPS son las horas de pico solar y n es la eficiencia del panel solar. La eficiencia del panel solar generalmente es del 85 %-90 % dado que el sistema no es perfecto y por lo que está sujeto a tener pérdidas.

2.1.2.2.4. Cálculo del número de paneles

Cálculo de la cantidad total de paneles por balance energético necesarios esta dado por:

$$N_T = \frac{E_{max}}{P_{panel}(HPS)(n_{panel})}$$

Donde N_T es el número total de paneles a utilizar, E_{max} es la energía máxima que consume el sistema y P_{panel} es la potencia máxima que soporta el panel solar.

2.1.2.2.5. Cálculo del banco de baterías

Para dimensionar la capacidad del banco de baterías se debe de considerar los siguientes factores:

- Cantidad de energía mínima que debe proporcionar la batería a las cargas ΔE (Wh) según especificaciones de la instalación y considerando:
 - Días de autonomía (D): la cantidad de días consecutivos que, en escasez de sol, el sistema de baterías debe poder proporcionar:
 $\Delta E_{aut} = D(E_{max})$.
- Máxima profundidad descarga P_d (usualmente para baterías de plomo ácido $P_d = 0,7$).

La capacidad del sistema de almacenamiento que debe de tener el banco de baterías se determina de la siguiente manera:

$$C_n(Ah) = \frac{\Delta E}{V_{bat}(P_d)}$$

Donde C_n es la capacidad de acumulación de las baterías, ΔE es la energía que deben de tener el banco de baterías para poder cumplir con los días de autonomía, V_{bat} es el voltaje que tiene cada batería y P_d es la máxima profundidad de descarga.

2.1.2.2.6. Cálculo del regulador

Se debe calcular la máxima corriente I_R que debe ser capaz de mantener el correcto funcionamiento, también debe de ser mayor que la la corriente consumida por las cargas (I_C) y la corriente proporcionada por los paneles (I_G):

$$I_R = \max(I_G, I_C)$$

El valor de I_G esta dada de la siguiente manera:

$$I_G = I_{pmpP}(N_p)$$

Donde I_{pmpP} es la corriente máxima producida por cada rama en paralelo y N_p es el numero de ramas en paralelo.

El valor de I_C esta dada de la siguiente manera:

$$I_C = \frac{P_{DC}}{V_{BAT}} + \frac{P_{AC}}{110}$$

Donde P_{DC} es la potencia de consumo para corriente directa, V_{BAT} es el voltaje de la batería, P_{AC} es la potencia de consumo para corriente alterna y el valor de 110 es por la corriente alterna a utilizar.

Existen dos tipos de reguladores:

- Regulador MPPT (*Maximum Power Point Tracking*, seguidor punto de máxima potencia): es un dispositivo que convierte la corriente continua a corriente continua y que mantiene la potencia máxima para optimizar la salida de voltaje entre los paneles fotovoltaicos y el banco de baterías.

- Regulador PWM (*Pulse-width modulation*, modulación por ancho de pulsos): es un tipo de regulador solar fotovoltaico que funciona al reducir la corriente de la energía fotovoltaica en respecto a la condición de la batería y su recarga.⁴

2.1.2.2.7. Cálculo del inversor

El inversor es una parte fundamental dado que esta convierte la corriente continua en corriente alterna y se debe de considerar los siguientes factores para seleccionar el dispositivo:

- Potencia nominal (kW): ligeramente superior a E_{AC} y no conviene exagerarlo y con ello se consigue que se trabaje en la potencia que presenta una eficiencia de manera óptima.
- Tensión nominal de entrada (V): es el sistema de almacenamiento, pero se debe de establecer un pequeño margen de error ya que la tensión de las baterías cambia.
- Tensión nominal de salida (V_{ef}).
- Frecuencia de operación (Hz).
- Eficiencia del inversor (n_{INV}).

⁴ Generatuluz. ¿Qué es un regulador solar MPPT? <https://www.generatuluz.com/tu-propia-instalacion-aislada/controladores-carga/reguladores/que-es-un-regulador-solar-mppt/>. Consulta: mayo de 2021.

2.1.3. Sistema de control lazo cerrado proporcional e integral

Este tipo de sistema, sistema de control lazo cerrado proporcional e integral, tiene como objetivo agilizar la corrección y reducir el error cuando los sensores en el sistema produzcan retardos en el proceso con lo que se logra una mejor respuesta transitoria. Esto es posible por la función de transferencia dada por:

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

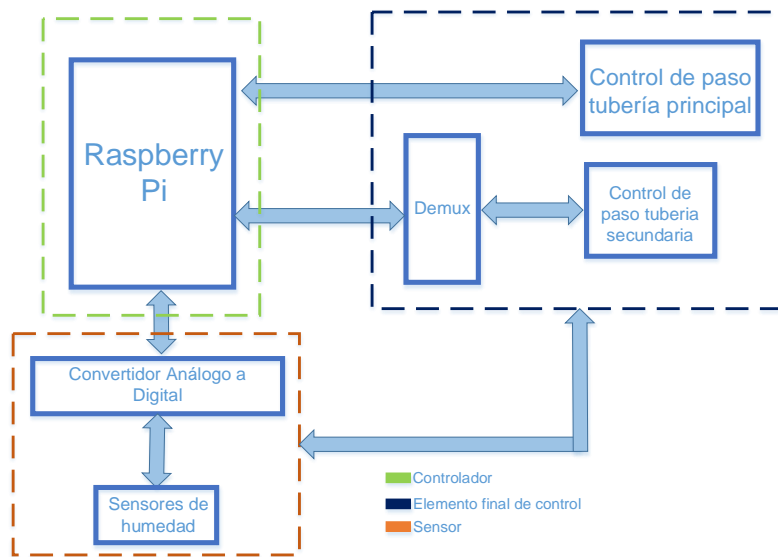
Dado que se va a utilizar un sistema de control lazo cerrado proporcional e integral, los componentes por utilizar y cumplir con el requerimiento del sistema son:

- Controlador
 - Raspberry Pi
- Elemento final de control
 - Demultiplexor
 - Control de paso tubería principal
 - Control de paso tubería secundaria
- Sensor
 - Sensores de humedad

- Convertidor Analógico - Digital (*ADC – Analog Digital Converter*)

A continuación, un esquema que describe los componentes del sistema de control proporcional e integral:

Figura 13. **Sistema de control proporcional e integral**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio 2016.

El funcionamiento de cada componente del sistema es el siguiente:

- Controlador
 - Raspberry Pi: es el encargado de manipular las variables controladas y efectuar el proceso de las acciones proporcional e integral.
- Elemento final de control

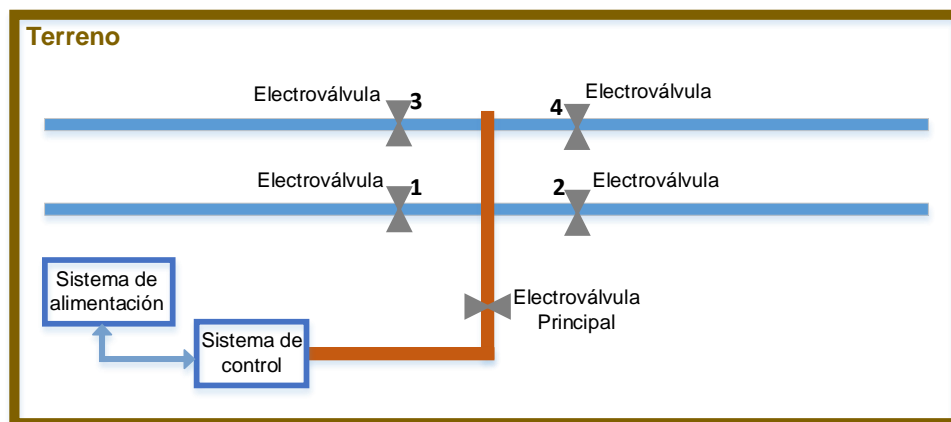
- Demultiplexor: variable manipulada para tomar acción sobre las electroválvulas.
- Control de paso tubería principal: electroválvula que controla el paso de agua.
- Control de paso tubería secundaria: electroválvula que controla el paso de agua.
- Sensor
 - Sensores de humedad: medición de la humedad de tierra
 - ADC: obtener datos en forma digital para enviarlos al controlador

3. DISEÑO DEL SISTEMA DE RIEGO AUTOMATIZADO

Se muestra el diseño y los componentes del equipo electrónico que conlleva el sistema de control de riego por goteo alimentado por energía solar, conformado por un sistema fotovoltaico, sistema de control proporcional e integral. El sistema de control va a controlar las electroválvulas (variable controlada) para permitir el paso de agua cuando sea necesario y de forma automatizada.

Para el diseño del terreno se va a limitar a 1 tubería principal y 4 tuberías secundarias, sobre cada tubería secundaria va a tener un límite de 7 plantas que el sistema de riego por goteo estará alimentando. El diseño propuesto considera un terreno de sembrado de dimensiones aproximadas de 5m por 3m. En el capítulo 4 se consideran algunas modificaciones a la propuesta de diseño para su escalabilidad en terrenos más grandes.

Figura 14. Diseño de terreno



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio 2016.

3.1. Diseño del sistema fotovoltaico

Como se describió en el capítulo anterior en la sección 2.1.2.2 se debe de considerar la capacidad del sistema, por lo que se estará describiendo cada punto según la descripción de la figura 13. En la figura se muestra lo que es el sistema de alimentación el cual abarca la bomba de agua a utilizar el sistema de almacenamiento de agua por lo que únicamente se estará tomando como punto de interés el consumo de energía utilizado por la bomba de agua.

3.1.1. Cálculo consumo diario

El consumo diario aproximado del sistema es el siguiente:

Tabla II. Consumo diario por equipo

Dispositivo (carga)	Potencia W	Cantidad	Potencia total W	Horas/día	Consumo $Wh/día$	Tipo de corriente
Raspberry Pi	15	1	15	24	360	AC
Bomba de agua	385	1	385	2	770	AC
Integrados	0,07	7	0,49	24	11,76	DC
Electroválvula	8	5	40	6	240	DC
Sensores	0,05	29	1,45	24	34,80	DC
Total fuente AC			400		1130	
Total fuente DC			41,94		286,56	
Total			441,94		1 416,56	

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel, Microsoft 365.

La descripción de cada equipo se enuncia a continuación:

- Raspberry Pi:
 - Modelo 4: base para montar el sistema de control y sistema de comunicación inalámbrica.

- Bomba de agua:
 - Se considera una bomba de corriente alterna con una fuerza de 1/4hp (*horse power* – caballo de fuerza) marca truper.

- Integrados:
 - Cuatro integrados ADC
 - Dos integrados de puertas lógicas AND de tres entradas
 - Un multiplexor

- Electroválvula:
 - Ocho válvulas solenoide 1/2", se considera el tamaño de los tubos de 1/2".

- Sensores:
 - Veintiocho sensores de humedad (uno por cada planta)
 - Un sensor para flujo de agua

3.1.2. Determinar HPS

En los registros otorgados por el ministerio de energía y minas de la república de Guatemala el valor promedio anual de radiación solar global para todo el país es de $5,3 \text{ kW}/\text{m}^2$ por día.

3.1.3. Cálculo de Inversor

Respecto a la sección 2.1.2.2.7, el inversor se debe de seleccionar tomando en cuanto los parámetros mencionados, por lo que el inversor debe de tener las siguientes características:

- Potencia Nominal aproximadamente de $400W$.
- Voltaje nominal de entrada: $12V \text{ DC}$
- Voltaje nominal de salida: $110 V \text{ AC}$
- Frecuencia de operación: 60 Hz
- Eficiencia del inversor: 85 a 90%

Dada las características mencionadas se estará utilizando un inversor de $450 W$ modelo SAM-450-12 marca Samlex.

Figura 15. **Inversor Samlex modelo SAM-450-12**



Fuente: D-SOL. *Inversor de onda modificada SAMLEX 12VDC, 450W SAM-450-12.*
<https://distribuidorsolar.mx/tienda/inversor-de-onda-modificada-samlex-12vdc-450w-sam-450-12/>. Consulta: septiembre de 2021.

3.1.4. Cálculo consumo total

El consumo total diario del sistema está dado por:

$$E_{max} = \frac{E_{DC}}{n_{BAT}} + \frac{E_{AC}}{(n_{BAT})(n_{INV})}$$

La eficiencia de la batería tipo plomo ácido-litio que se va a utilizar como una fuente de energía de alimentación secundaria es del 85 %.

Dado que ya se tienen los datos necesarios, se puede calcular la energía máxima que debe de tener el generador fotovoltaico:

$$E_{max} = \frac{286,56}{0,85} + \frac{1\ 130}{(0,85)(0,90)}$$

$$E_{max} \approx 1\ 720,70\ W$$

$$E_{max} \approx 1,72\ kW$$

3.1.5. Cálculo número de paneles

Respecto a la sección 2.1.2.2.4, la cantidad de paneles se calcula de la siguiente manera:

$$N_T = \frac{E_{max}}{P_{panel}(HPS)(n_{panel})}$$

En la potencia del panel solar es necesario conocer el tipo a utilizar, en este caso se estará utilizando un panel solar monocristalino de 12V.

Figura 16. **Panel solar monocristalino**



Fuente: MERKASOL. *Paneles Monocristalino*. <https://www.merkasol.com/Panel-Solar-Monocristalino-Merkasol-90w-12v-Alta-Eficiencia>. Consulta: junio de 2020.

Características del panel solar son:

Tabla III. **Características del panel solar**

Descripción	Valor
Potencia máxima en el valor pico	90 <i>W</i>
Corriente de máxima potencia	5,15 <i>A</i>
Voltaje de máxima potencia	17,50 <i>V</i>
Corriente de corto circuito	5,48 <i>A</i>
Voltaje de corto circuito	22,30 <i>V</i>
Tipo de célula	Monocristalino
Eficiencia	90 %

Fuente: MERKASOL. *Paneles Monocristalino*. <https://www.merkasol.com/Panel-Solar-Monocristalino-Merkasol-90w-12v-Alta-Eficiencia>. Consulta: junio de 2020.

El número de paneles para cumplir la capacidad de consumo viene dado por:

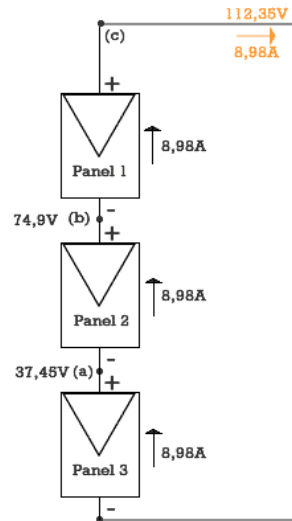
$$N_T = \frac{1.72 \text{ kW}}{0,09(5,3)(0,9)}$$
$$N_T \approx 4,01 \text{ paneles}$$

Dado que en el mercado no hay 4,01 paneles se debe de utilizar un total de 4, por otro lado, se debe de determinar si los paneles se colocan en serie, paralelo o mixto; para cumplir con los requerimientos se proceda a calcular la cantidad de paneles en serie o paralelo.

3.1.5.1. **Paneles en serie**

Los paneles en serie se comportan como la ley de Kirchhoff, indicando que el voltaje en serie se suma y la corriente es la misma.

Figura 17. **Panel solar en serie**



Fuente: SUNFIELDS. *Cómo dimensionar y calcular paneles solares fotovoltaicos necesarios.*
<https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/calcular-paneles-solares-necesarios/>. Consulta: junio de 2020.

El cálculo de la cantidad de paneles solares en serie es:

$$N_s = \frac{V_{BAT}}{V_p}$$

Donde N_s es la cantidad de paneles en serie, V_{BAT} el voltaje máximo de la batería y V_p es el voltaje máximo del panel.

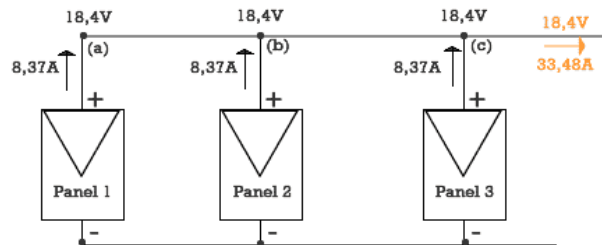
$$N_s = \frac{12 V}{17,5 V} = 0,68 \text{ paneles}$$

Se debe de utilizar 1 panel en serie.

3.1.5.2. Paneles solares en paralelo

Los paneles en paralelo se comportan de acuerdo con las leyes de Kirchhoff, de tal forma que el voltaje en paralelo es el mismo y la corriente se suma.

Figura 18. Panel solar en paralelo



Fuente: SUNFIELDS. *Cómo dimensionar y calcular paneles solares fotovoltaicos necesarios.*
<https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/calcular-paneles-solares-necesarios/>. Consulta: junio de 2020.

Dado que existe la siguiente relación:

$$N_p = \frac{N_T}{N_s}$$

Donde N_p es la cantidad de paneles en paralelo, N_T es la cantidad de paneles en total y N_s es la cantidad de paneles en serie.

$$N_p = \frac{4}{1}$$

$$N_p = 4 \text{ paneles}$$

Se debe de utilizar 8 paneles en paralelo.

3.1.6. Cálculo del banco de baterías

Respecto a la sección 2.1.2.2.5, la capacidad del banco de baterías se calcula de la siguiente manera:

$$C_n(Ah) = \frac{\Delta E}{V_{bat}(P_d)}$$

Se procede a calcular ΔE , en este caso los días de autonomía se considera que serán de 3 días:

$$\Delta E = 3(1,72kW)$$

$$\Delta E \approx 5,16 kW$$

La profundidad descarga P_d , usualmente para baterías de plomo ácido es de 0,7 y las baterías a utilizar son de 12 V, por lo que la capacidad de acumulación debe de ser:

$$C_n(Ah) = \frac{5160}{12(0,7)}$$

$$C_n \approx 595,24 Ah$$

Dado que el inversor es de 12 V DC a 110 V AC, la salida del banco de baterías debe ser de 12 V. Se escogió el modelo de la batería *Renogy Deep Cycle Pure Gel Battery* para 12V y 200Ah.

Figura 19. **Batería 12 V y 200 Ah**



Fuente: Solarshop.cl. *BATERÍA ULTRACELL 200AH 12V AGM CICLO PROFUNDO (UCG200-12)*. http://www.solarshop.cl/product.php?id_product=533/. Consulta: septiembre de 2021.

Por lo que para cubrir la capacidad de aproximadamente 595,24 Ah se necesita la cantidad de 3 baterías en paralelo para cubrir el requerimiento.

3.1.7. **Cálculo de regulador**

Respecto a la sección 2.1.2.2.6, la capacidad del regulador está dada por:

$$I_R = \max(I_G, I_C)$$

El valor de I_G será:

$$I_G = I_{pmpP}(N_p)$$

$$I_G = 5,15(4)$$

$$I_G = 20,6 A$$

El valor de I_c será:

$$I_c = \frac{P_{DC}}{V_{BAT}} + \frac{P_{AC}}{110}$$

$$I_c = \frac{286,56}{12} + \frac{1\ 130}{110}$$

$$I_c \approx 34,15\ A$$

Por lo que la carga debe de soportar una corriente máxima de aproximadamente 34,15 A.

Además, se estará utilizando un regulador tipo MPPT marca Galaxy modelo B384-XXA que soporta hasta 40 A, el cual estará controlando el voltaje de los paneles solares hacia el banco de baterías.

Figura 20. **Regulador MPPT**

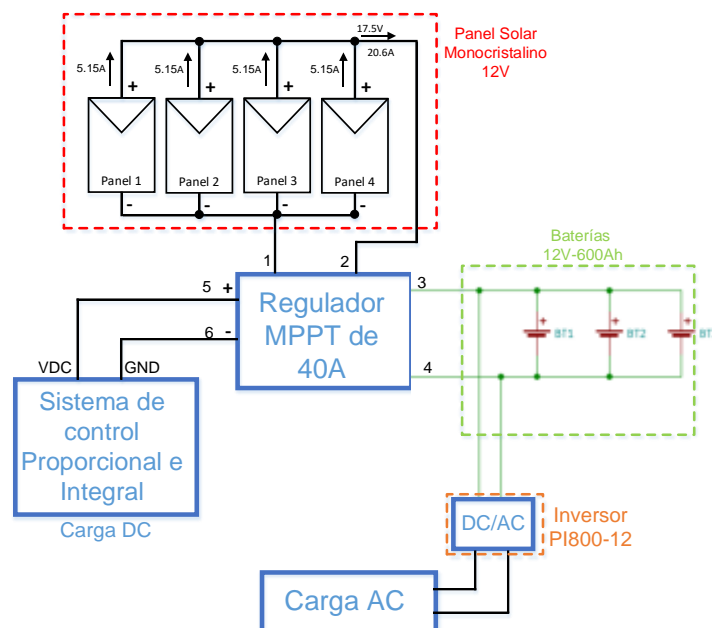


Fuente: IPANDEE. *Nuevo controlador de carga solar MPPT de sistema autónomo 20A-60A serie Explorer-M.* <https://www.solarcontroller-inverter.com/es/products/New-20A-60A-off-grid-system-MPPT-solar-charge-controller-Explorer-M-Series.html>. Consulta: junio de 2020.

3.1.8. Diagrama del sistema fotovoltaico

En la siguiente figura se muestra de manera general las conexiones que se deben de hacer entre los diferentes componentes que constituyen el sistema fotovoltaico.

Figura 21. Diagrama sistema fotovoltaico



Fuente: elaboración propia, empleando EAGLE y Microsoft Visio 2016.

3.2. Diseño del sistema de control proporcional e integral

El sistema de control consiste en un controlador, un elemento final de control y un sensor. En esta sección se describirá cada componente y la forma en cómo se utilizará en el sistema de regulación de riego por goteo alimentado por energía solar.

3.2.1. Controlador

El componente principal del controlador consiste en el ordenador Raspberry Pi 4 modelo B, el cual va a controlar el comportamiento del sistema proporcional e integral a través de un programa escrito en Python 3.7.4 para obtener información de los sensores y manejar las acciones correspondientes al sistema.

Tabla IV. **Especificaciones Raspberry Pi 4 modelo B**

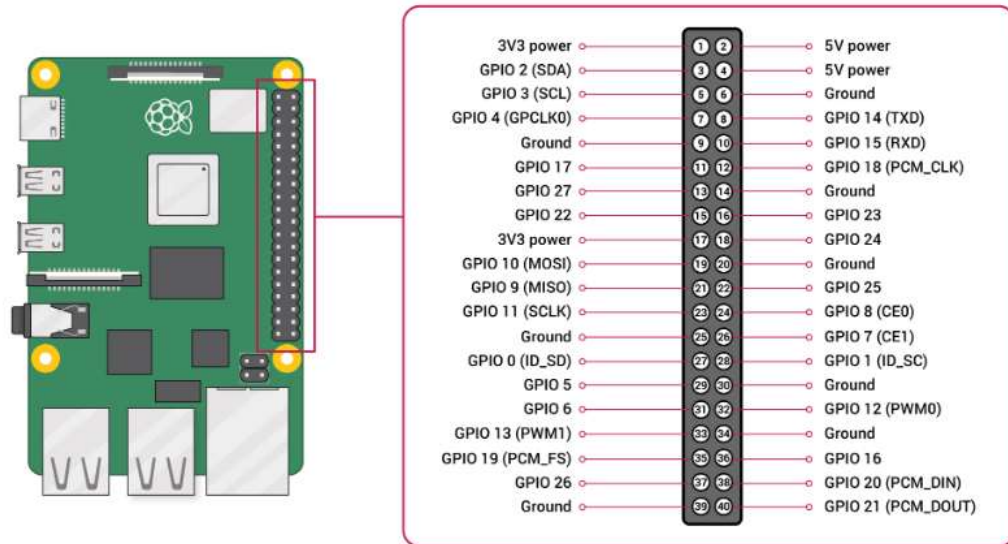
Chip	BCM54213PE (Ethernet)
CPU	Broadcom BCM2711 Cortex-A72 1,5GHz Quad-Core 64bits
GPU	Broadcom <i>VideoCore VI</i> 500MHz
Memoria	4GB LPDDR4-2400 SDRAM
Sistema operativo	Raspbian (imagen de LINUX optimizada para el ordenador)
Alimentación de poder	5V 3A vía USB-C, GPIO o PoE (con <i>HAT</i> opcional)
Conectividad de red	<i>Ethernet</i> 10/100/1000, <i>WiFi Dual-Band</i> 2.4G/5G b/g/n/ac, <i>Bluetooth</i> 5 BLE
USB	2x USB 3.0 + 2x USB 2.0
Interfaz I/O	40 pines que suplen 27 pines de entrada/salida y alimentación partida de 3,3V y 5V
Bluetooth	5.0 BLE

Fuente: Tiendatec. RASPBERRY PI 4 - MODELO B - 4GB (r1.4).

<https://www.tiendatec.es/raspberry-pi/placas-base/1100-raspberry-pi-4-modelo-b-4gb-765756931182.html>. Consulta: junio de 2020.

Las interfaces o puertos de entrada y salida (I/O, por sus siglas en inglés) se conocen como GPIO (*General Purpose Input/Output*) y son utilizadas para la comunicación entre periféricos y el sistema de control.

Figura 22. **Raspberry Pi – GPIO**



Fuente: Raspberry Pi. *Raspberry Pi Documentation*.

<https://www.raspberrypi.org/documentation/usage/gpio/>. Consulta: junio de 2020.

3.2.2. Elemento final de control

Es el elemento que va a proporcionar la señal de salida y sus componentes por controlar son los siguientes:

- Demultiplexor
- Electroválvula
- Sensor
- Convertidor analógico-digital

3.2.2.1. Demultiplexor

El circuito demultiplexor se encarga de recibir información del controlador Raspberry Pi, para indicar cuál de las electroválvulas debe de permitir el paso del agua, por lo que se necesita un demultiplexor de 3 bits, y para ello, se va a utilizar el integrado 74LS138 y sus características son las siguientes:

Figura 23. Características Demultiplexor 74LS138

DM74LS138 Recommended Operating Conditions					
Symbol	Parameter	Min	Nom	Max	Units
V_{CC}	Supply Voltage	4.75	5	5.25	V
V_{IH}	HIGH Level Input Voltage	2			V
V_{IL}	LOW Level Input Voltage			0.8	V
I_{OH}	HIGH Level Output Current			-0.4	mA
I_{OL}	LOW Level Output Current			8	mA
T_A	Free Air Operating Temperature	0		70	°C

DM74LS138 Electrical Characteristics						
over recommended operating free air temperature range (unless otherwise noted)						
Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ (Note 3)	Max	Units
V_I	Input Clamp Voltage	$V_{CC} = \text{Min}, I_I = -18 \text{ mA}$			-1.5	V
V_{OH}	HIGH Level Output Voltage	$V_{CC} = \text{Min}, I_{OH} = \text{Max}, V_{IL} = \text{Max}, V_{IH} = \text{Min}$	2.7	3.4		V
V_{OL}	LOW Level Output Voltage	$V_{CC} = \text{Min}, I_{OL} = \text{Max}, V_{IL} = \text{Max}, V_{IH} = \text{Min}$		0.35	0.5	V
	Output Voltage	$I_{OL} = 4 \text{ mA}, V_{CC} = \text{Min}$		0.25	0.4	
I_I	Input Current @ Max Input Voltage	$V_{CC} = \text{Max}, V_I = 7V$			0.1	mA
I_{IH}	HIGH Level Input Current	$V_{CC} = \text{Max}, V_I = 2.7V$			20	μA
I_{IL}	LOW Level Input Current	$V_{CC} = \text{Max}, V_I = 0.4V$			-0.36	mA
I_{OS}	Short Circuit Output Current	$V_{CC} = \text{Max}$ (Note 4)	-20		-100	mA
I_{CC}	Supply Current	$V_{CC} = \text{Max}$ (Note 5)		6.3	10	mA

Note 3: All typicals are at $V_{CC} = 5V, T_A = 25^\circ C$.

Note 4: Not more than one output should be shorted at a time, and the duration should not exceed one second.

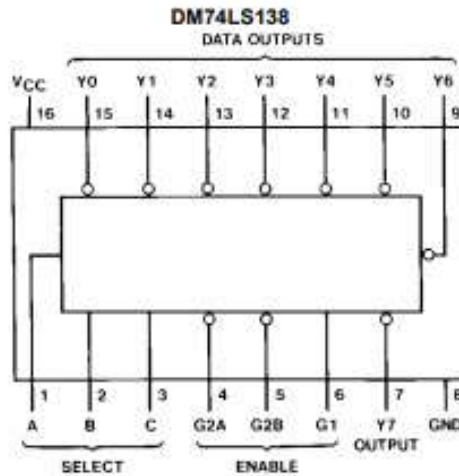
Note 5: I_{CC} is measured with all outputs enabled and OPEN.

Fuente: SYC. *Manual del usuario.*

https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/74LS138%20Datasheet.pdf

. Consulta: junio de 2020.

Figura 24. Diagrama de conexión 74LS138



Fuente: SYC. *Manual del usuario.*

https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/74LS138%20Datasheet.pdf. Consulta: junio de 2020.

3.2.2.2. Compuerta lógica OR

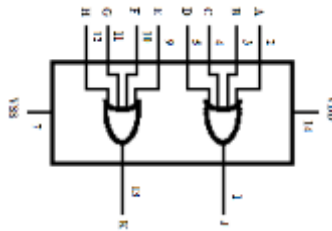
Se necesita una compuerta lógica OR de 4 entradas, CD4071, para terminar de indicar el estado, permitir o impedir el paso de agua, a utilizar por las electroválvulas. A continuación, se presenta sus características:

Tabla V. Características CD4072

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	NOTES	TEMPERATURE	LIMITS		UNITS
					MIN	MAX	
Supply Current	IDD	VDD = 5V, VIN = VDD or GND	1, 2	-55°C, +25°C	-	0.25	μA
				+125°C	-	7.5	μA
		VDD = 10V, VIN = VDD or GND	1, 2	-55°C, +25°C	-	0.5	μA
				+125°C	-	15	μA
		VDD = 15V, VIN = VDD or GND	1, 2	-55°C, +25°C	-	0.5	μA
				+125°C	-	30	μA
Output Voltage	VOL	VDD = 5V, No Load	1, 2	+25°C, +125°C, -55°C	- 5	0	mV
Output Voltage	VOL	VDD = 10V, No Load	1, 2	+25°C, +125°C, -55°C	- 5	0	mV
Output Voltage	VOH	VDD = 5V, No Load	1, 2	+25°C, +125°C, -55°C	4.95	-	V
Output Voltage	VOH	VDD = 10V, No Load	1, 2	+25°C, +125°C, -55°C	9.95	-	V
Output Current (Sink)	IOL5	VDD = 5V, VOUT = 0.4V	1, 2	+125°C	0.36	-	mA
				-55°C	0.64	-	mA
Output Current (Sink)	IOL10	VDD = 10V, VOUT = 0.5V	1, 2	+125°C	0.9	-	mA
				-55°C	1.6	-	mA
Output Current (Sink)	IOL15	VDD = 15V, VOUT = 1.5V	1, 2	+125°C	2.4	-	mA
				-55°C	4.2	-	mA
Output Current (Source)	IOH5A	VDD = 5V, VOUT = 4.6V	1, 2	+125°C	-	-0.36	mA
				-55°C	-	-0.64	mA
Output Current (Source)	IOH5B	VDD = 5V, VOUT = 2.5V	1, 2	+125°C	-	-1.15	mA
				-55°C	-	-2.0	mA
Output Current (Source)	IOH10	VDD = 10V, VOUT = 9.5V	1, 2	+125°C	-	-0.9	mA
				-55°C	-	-2.6	mA
Output Current (Source)	IOH15	VDD = 15V, VOUT = 13.5V	1, 2	+125°C	-	-2.4	mA
				-55°C	-	-4.2	mA
Input Voltage Low	VIL	VDD = 10V, VOH > 9V, VOL < 1V	1, 2	+25°C, +125°C, -55°C	-3		V
Input Voltage High	VIH	VDD = 10V, VOH > 9V, VOL < 1V	1, 2	+25°C, +125°C, -55°C	7-		V

Fuente: ALLDATASHEET.ES. CD4072 Datasheet(PDF) 4 Page - Intersil Corporation.
<https://html.alldatasheet.es/html-pdf/66445/INTERSIL/CD4072/1295/4/CD4072.html>. Consulta:
 julio de 2020.

Figura 25. Diagrama de conexión DC4071



Fuente: ALLDATASHEET.ES. *CD4072 Datasheet(PDF) 4 Page - Intersil Corporation.*
<https://html.alldatasheet.es/html-pdf/66445/INTERSIL/CD4072/1295/4/CD4072.html>. Consulta:
 julio de 2020.

3.2.2.3. Electroválvula

Las electroválvulas en la propuesta de diseño tienen las siguientes características descritas en la Tabla VI.

Tabla VI. Características de la electroválvula

Voltaje de operación	12V DC
Corriente de operación	0,6A
Potencia consumo	8W
Temperatura de funcionamiento	5°C a 100°C
Presión de funcionamiento mínima	0,02 MPa (0,2 Bar = 2,04 mca)
Presión de funcionamiento máximo	0,8 MPa (8 Bar = 81,6 mca)
Tiempo de respuesta (apertura)	≤ 0,15 s
Tiempo de respuesta (cerrado)	≤ 0,3 s
Conector tubería	Rosca externa 1/2"

Fuente: Naylamp Mechatronics. *VÁLVULA SOLENOIDE 1/2" 12VDC.*
<https://naylampmechatronics.com/valvulas/314-valvula-solenoide-12-12vdc.html>. Consulta: julio
 de 2020.

Las especificaciones técnicas de las electroválvulas que son de interés para la propuesta del sistema de control son: la potencia de consumo, que es un dato importante para determinar el consumo que debe de tener el panel solar; y la presión de funcionamiento para medir y obtener un promedio del consumo de agua que se tiene sobre el terreno.

Figura 26. **Electroválvula**



Fuente: Naylamp Mechatronics. *VÁLVULA SOLENOIDE 1/2" 12VDC*.
<https://naylampmechatronics.com/valvulas/314-valvula-solenoid-12-12vdc.html>. Consulta: julio de 2020.

3.2.2.4. Sensor

Se incluyen en la propuesta de diseño dos tipos de sensores:

- Sensor de humedad: se utilizará para medir la saturación de la tierra, es decir que tan mojada se encuentra la tierra con la finalidad de indicar al controlador en cual sección del terreno se requiere agua si es necesario.

- Sensor de flujo de agua: el cual medirá el flujo de agua en la tubería principal con la finalidad de indicar al controlador la cantidad de agua consumida por el terreno.

Los sensores de humedad por utilizar, *Capacitive Soil Moisture Sensor* SEN0193, tienen las siguientes características:

Tabla VII. **Características sensor de humedad**

Voltaje de operación	3.3 – 5.5V DC
Voltaje de salida	0 – 3.0V DC
Corriente de operación	5mA
Interfaz	PH2.0-3P
Dimensiones	3.86 x 0.905 pulgadas (Largo x Ancho)
Peso	15gramos

Fuente: DF ROBOT. SKU:SEN0193.

https://wiki.dfrobot.com/Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN0193. Consulta: julio de 2020.

Figura 27. **Sensor de humedad SEN0193**



Fuente: DF ROBOT. SKU:SEN0193.

https://wiki.dfrobot.com/Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN0193. Consulta: julio de 2020.

El sensor de flujo de agua por utilizar, YF-S201, tiene las siguientes características:

Tabla VIII. **Características sensor de flujo de agua**

Modelo	YF-S201
Voltaje de operación	5 – 18 V DC
Consumo de corriente	15 mA (5 V)
Capacidad de carga	10 mA (5 V DC)
Salida	Onda cuadrada pulsante
Rango de Flujo	1-30 L/min
Volumen promedio por pulso	2,25 mL
Pulsos por litro	450
Factor de conversión	7,5
Rosca externa	1/2"
Presión de trabajo máx.	1,75 MPa (17 bar)
Temperatura de funcionamiento	-25 °C a 80 °C

Fuente: Naylamp Mechatronics. *VÁLVULA SOLENOIDE 1/2" 12VDC.*

<https://naylampmechatronics.com/valvulas/314-valvula-solenoid-12-12vdc.html>. Consulta: julio de 2020.

Figura 28. **Sensor de flujo de agua YF-S201**



Fuente: LLAMAS, Luis. *Medir caudal y consumo de agua con Arduino y caudalímetro.*

<https://www.luisllamas.es/caudal-consumo-de-agua-con-arduino-y-caudalimetro/>. Consulta: julio de 2020.

3.2.2.5. Convertidor analógico-digital

Se necesita un convertidor ADC de 8 bits para recopilar la información del estado de cada planta y poder enviársela al controlador para que verifique el estado de humedad en la tierra, por lo que se va a utilizar el circuito integrado ADC0800 y sus características son las siguientes:

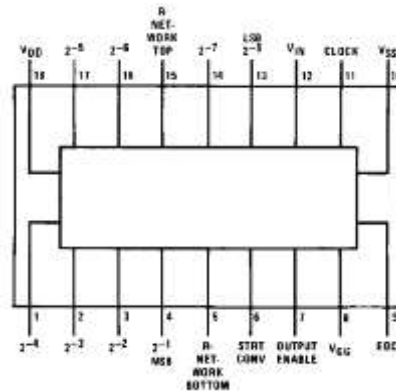
Tabla IX. Características eléctricas ADC0800

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
Non-Linearity	$T_A = 25^\circ\text{C}$, (Note 8) Over Temperature, (Note 8)			± 1	LSB
				± 2	LSB
Differential Non-Linearity				$\pm \frac{1}{2}$	LSB
Zero Error				± 2	LSB
Zero Error Temperature Coefficient	(Note 9)			0.01	%/ $^\circ\text{C}$
Full-Scale Error				± 2	LSB
Full-Scale Error Temperature Coefficient	(Note 9)			0.01	%/ $^\circ\text{C}$
Input Leakage				1	μA
Logical "1" Input Voltage	All Inputs	$V_{SS} - 1.0$		V_{SS}	V
Logical "0" Input Voltage	All Inputs	V_{GG}		$V_{SS} - 4.2$	V
Logical Input Leakage	$T_A = 25^\circ\text{C}$, All Inputs, $V_{IL} = V_{SS} - 10\text{V}$			1	μA
Logical "1" Output Voltage	All Outputs, $I_{OH} = 100 \mu\text{A}$	2.4			V
Logical "0" Output Voltage	All Outputs, $I_{OL} = 1.6 \text{ mA}$			0.4	V
Disabled Output Leakage	$T_A = 25^\circ\text{C}$, All Outputs, $V_{OL} = V_{SS} @ 10\text{V}$			2	μA
Clock Frequency	$0^\circ\text{C} \leq T_A \leq +70^\circ\text{C}$ $-55^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$	50		800	kHz
		100		500	kHz
Clock Pulse Duty Cycle		40		60	%
TRI-STATE Enable/Disable Time				1	μs
Start Conversion Pulse	(Note 10)	1		$3\frac{1}{2}$	Clock Periods
Power Supply Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$			20	mA

Fuente: Findchips. *ADC0800 8-Bit A/D Converter*.

<https://www.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/321/ADC0800-pdf.php>. Consulta: julio de 2020.

Figura 29. Diagrama de conexión integrado ADC0800



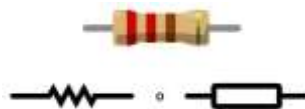
Fuente: Findchips. *ADC0800 8-Bit A/D Converter.*

<https://www.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/321/ADC0800-pdf.php>. Consulta: julio de 2020.

3.2.2.6. Resistencia

La resistencia es un dispositivo eléctrico que tiene la particularidad de oponerse al flujo de la corriente, la unidad de medición es el Ohm y se representa por la letra griega Ω . Se estarán utilizando con los transistores para la protección del componente entre los valores de 330Ω a $1\ 000 \Omega$.

Figura 30. Resistencia



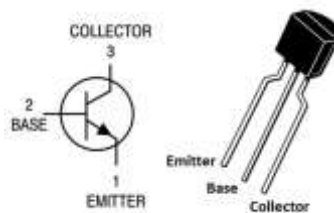
Fuente: TuElectronica.es. *Resistencia eléctrica. Electrónica básica.*

<https://tuelectronica.es/resistencia-electrica/>. Consulta: julio de 2020.

3.2.2.7. Transistor

Es un tipo de dispositivo electrónico semiconductor, capaz de modificar una señal eléctrica de salida como respuesta a una de entrada, sirviendo como amplificador, conmutador, oscilador o rectificador de la misma. Se estarán utilizando los transistores tipo NPN 3904 como un conmutador para permitir el paso de energía cuando sea necesario.

Figura 31. Transistor tipo NPN



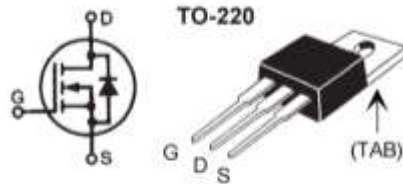
Fuente: Proto Supplies. *2N3904 NPN General Purpose Transistor (10-Pack)*.

<https://protosupplies.com/product/transistor-npn-general-purpose-2n3904-5-pack/>. Consulta: julio de 2020.

3.2.2.7.1. Transistor TRIAC

Es un tipo de dispositivo electrónico semiconductor con la característica que es para uso de corriente alterna y tiene una funcionalidad parecida a la de un interruptor, dado que es capaz de permitir el paso de la corriente alterna cuando se activa la terminal denominada “Puerta” (por su significado de la palabra en inglés “*Gate*”). Se estará utilizando los transistores TRIAC Mosfet TO220 de 3,5 A y 200 V para controlar el tiempo de funcionamiento de la bomba.

Figura 32. **Transistor tipo TRIAC Mosfet TO220**



Fuente: SUCONEL. *Transistor De Potencia Mosfet Canal N Encapsulado TO-220 De 3 Pines IXTP75N10P*. <https://suconel.com/product/transistor-de-potencia-mosfet-canal-n-encapsulado-to-220-de-3-pines-ixtp75n10p/>. Consulta: julio de 2020.

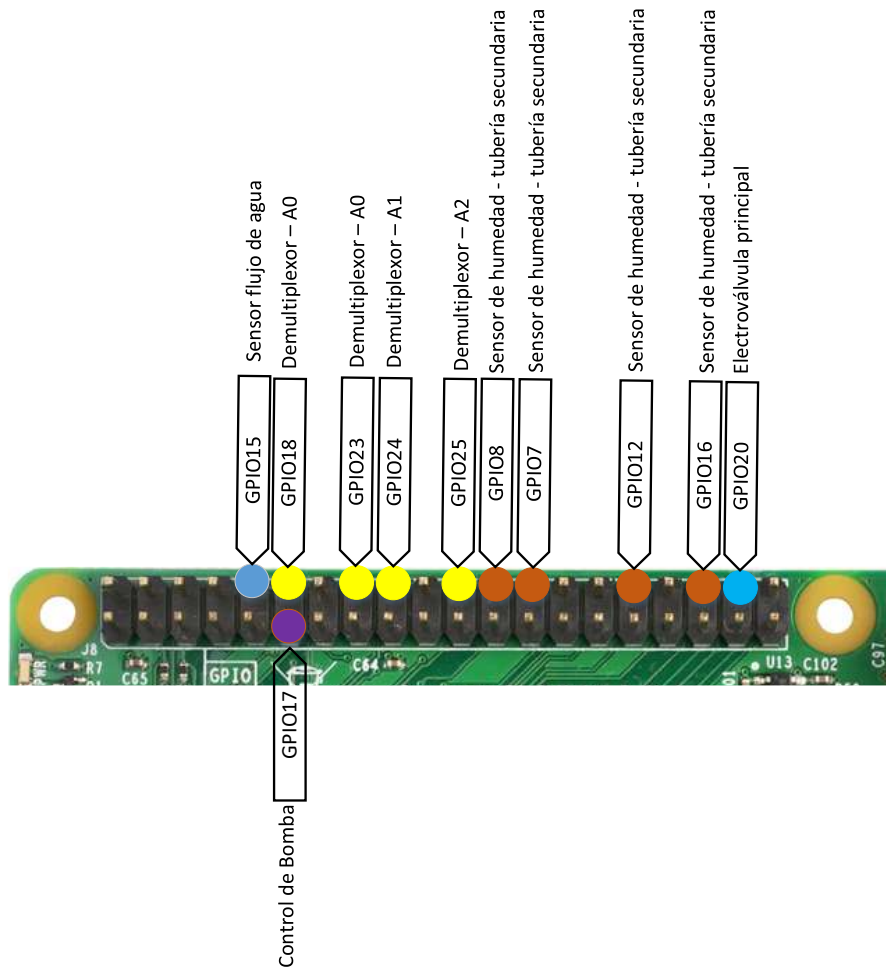
3.2.3. Diagrama del sistema de control proporcional e integral

El diagrama del sistema de control para el riego por goteo alimentado por energía solar, tomando en consideración las características de los componentes mencionados y su funcionalidad en conjunto es el siguiente:

3.2.3.1. Conexiones Raspberry Pi

Las conexiones que deben de tener el sistema en los puertos entrada/salida del componente Raspberry Pi para determinar su correcto funcionamiento son:

Figura 33. **Conexión Raspberry Pi**

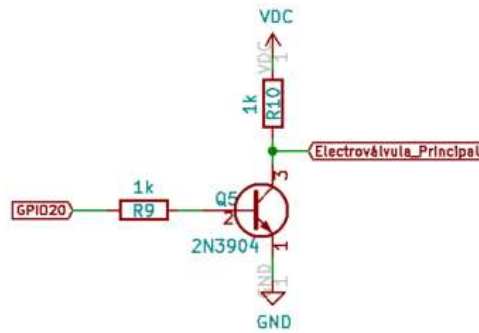


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio 2016

3.2.3.2. **Conexiones electroválvulas**

Las conexiones para controlar las electroválvulas y permitir el paso de agua cuando sea necesario son las siguientes:

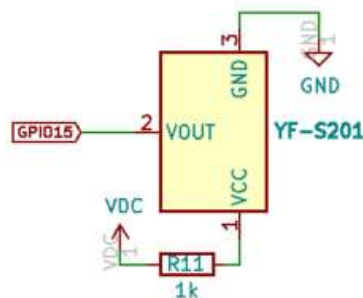
Figura 34. **Conexión electroválvula principal**



Fuente: elaboración propia, empleando programa KiCad

De manera adicional, se agrega el sensor para el flujo de agua para poder obtener un cálculo aproximado del consumo de agua que se tiene durante el sistema de riego por goteo.

Figura 35. **Sensor flujo de agua**



Fuente: elaboración propia, empleando KiCad.

El funcionamiento de las electroválvulas se encuentra representado por estados lógicos digitales, ceros y unos, por lo que si la electroválvula tiene estado uno significa que si permite el paso de agua dado contrario con ceros indica que

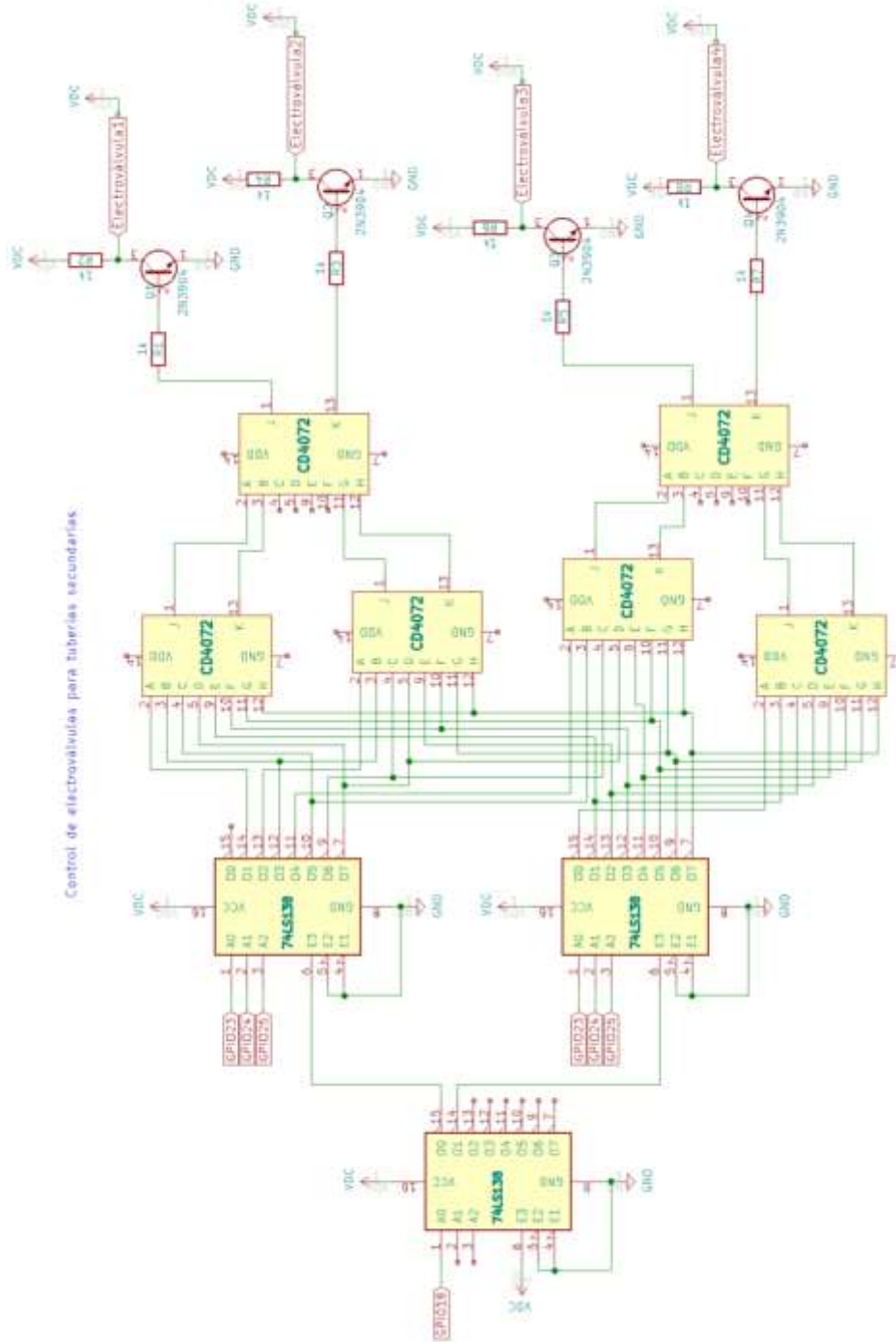
no se permite el paso de agua. En la siguiente tabla se muestran los posibles estados que pueden llegar a representar.

Tabla X. **Tabla de la verdad para estado de electroválvulas**

Salida demultiplexor	Electroválvula 4	Electroválvula 3	Electroválvula 2	Electroválvula 1
A0	0	0	0	0
A1	0	0	0	1
A2	0	0	1	0
A3	0	0	1	1
A4	0	1	0	0
A5	0	1	0	1
A6	0	1	1	0
A7	0	1	1	1
A8	1	0	0	0
A9	1	0	0	1
A10	1	0	1	0
A11	1	0	1	1
A12	1	1	0	0
A13	1	1	0	1
A14	1	1	1	0
A15	1	1	1	1

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel, Microsoft 365.

Figura 36. Conexión electroválvula secundaria

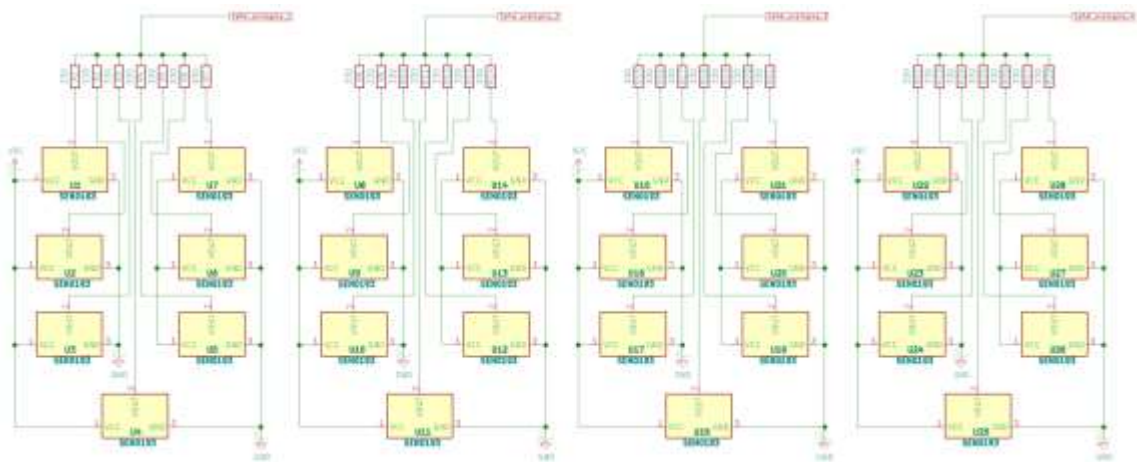


Fuente: elaboración propia, empleando KiCad.

3.2.3.3. Conexión de sensores de humedad

Dado que son 4 tuberías secundarias con 7 plantas cada uno, se debe de utilizar 7 sensores de humedad (1 por cada planta), para luego leer esa información en los ADC. A continuación, se describen las conexiones para cada tubería secundaria:

Figura 37. Conexión de los sensores de humedad

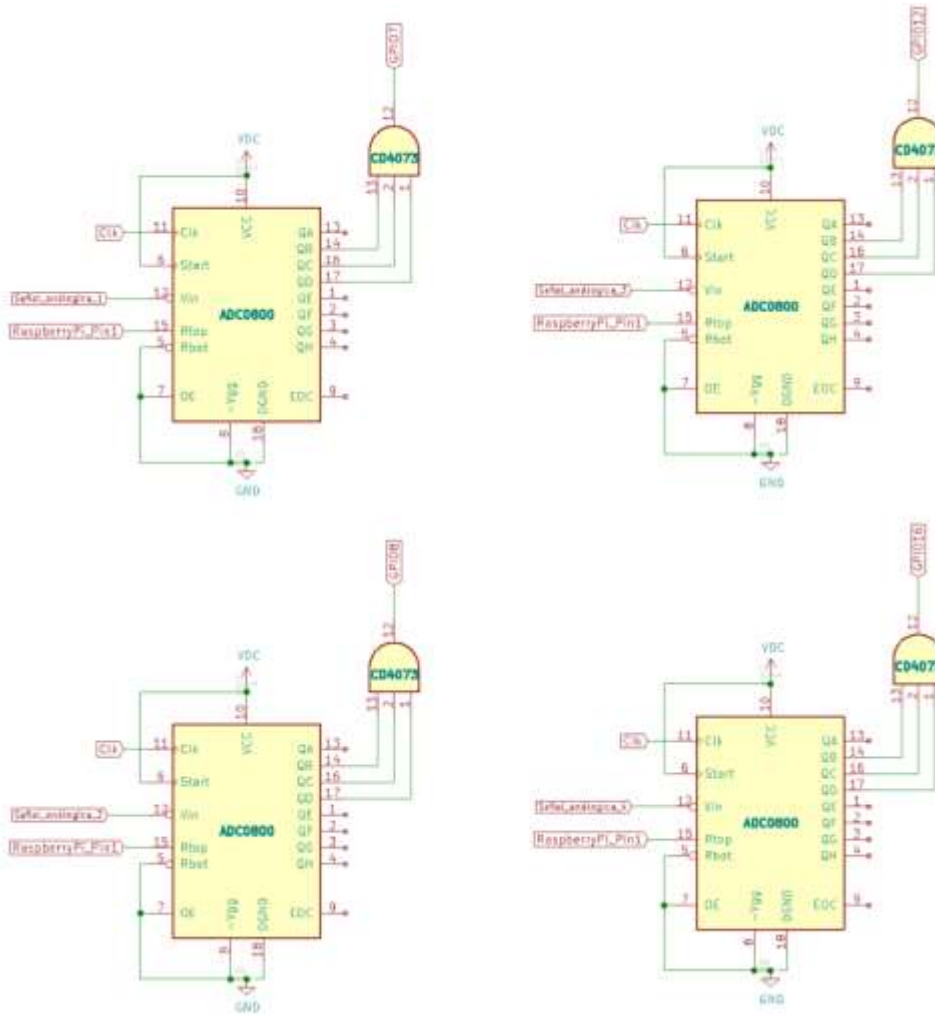


Fuente: elaboración propia, empleando KiCad.

3.2.3.4. Conexión de ADC

Dado que son 4 tuberías secundarias con 7 plantas cada uno, se debe de utilizar 4 bloques de ADC y poder enviar esa información a Raspberry Pi y poder determinar el control de las variables manipulas, electroválvulas. A continuación, se describen las conexiones para cada tubería secundaria:

Figura 38. **Conexión ADC**

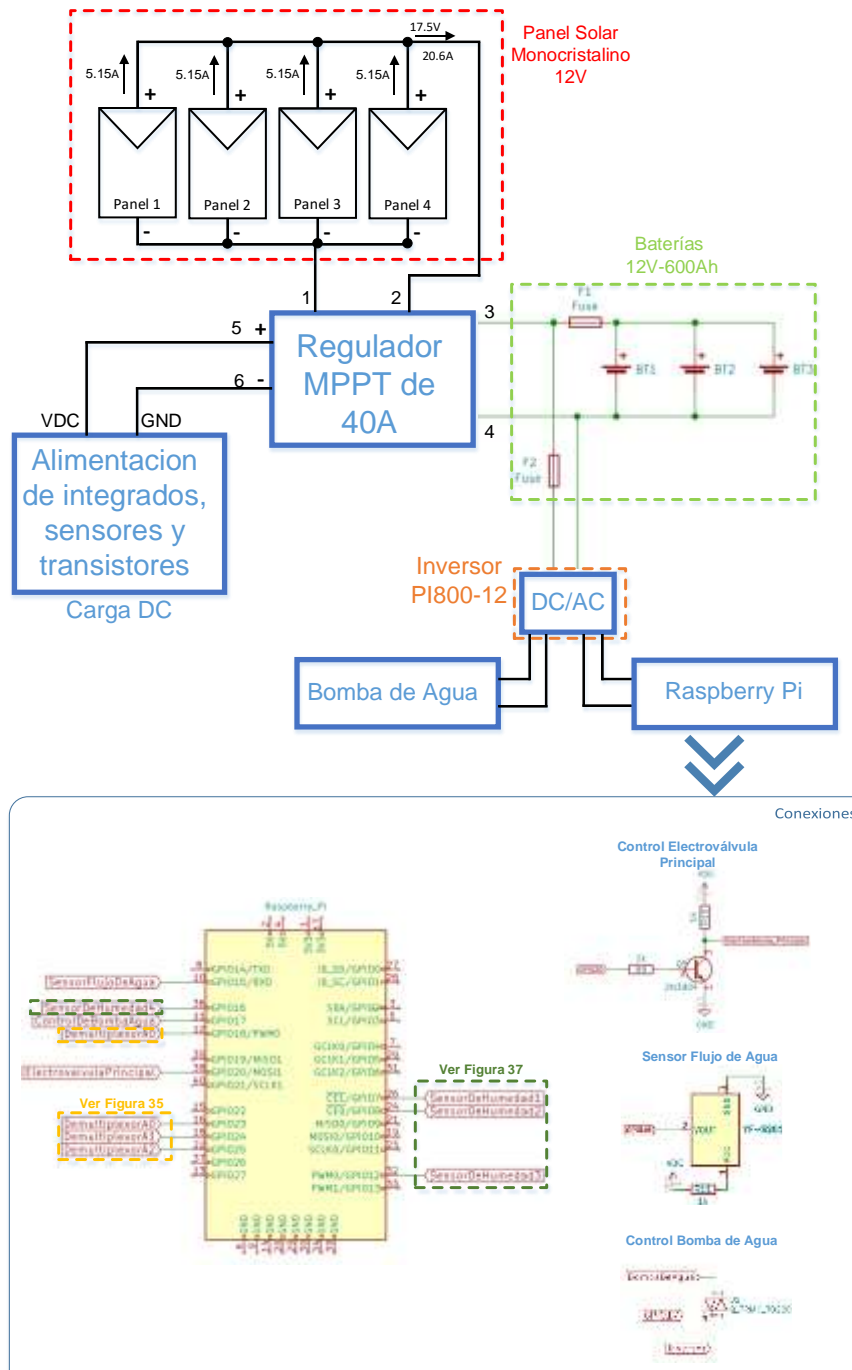


Fuente: elaboración propia, empleando KiCad.

3.2.3.5. Diagrama eléctrico completo

En el siguiente diagrama se muestra las conexiones del sistema de regulación de riego por goteo alimentado por energía solar, el cual determina como se deben de conectar los componentes para que el sistema se ejecute de manera correcta.

Figura 39. Diagrama eléctrico



Fuente: elaboración propia, empleando KiCad y Microsoft Visio 2016.

3.3. Diseño de comunicación inalámbrica

Una característica importante del sistema de regulación de riego por goteo alimentado por energía solar es que sea posible acceder de manera remota al controlador a través de la red inalámbrica existente, brindada por los proveedores de servicios de internet del país, utilizando una tarjeta *SIM*.

Se va a poder acceder a través de una página web para ver el consumo de agua que se está teniendo o alguna alarma relacionada al sistema, en la siguiente sección se describirá la funcionalidad de la página *web*.

Para que el controlador, Raspberry Pi 4 *modelo B*, tenga una comunicación inalámbrica con el proveedor de servicio de internet se va a utilizar una tarjeta *SIM*.

Los requerimientos para utilizar una tarjeta *SIM* en la Raspberry Pi 4 *modelo B* son:

- Raspberry Pi 3G/4G & LTE Base HAT
- Quectel EC25 Mini PCIe 4G/LTE Module
- LTE Main & Diversity & GNSS Triple Port Antenna – 100mm

3.3.1. Modulo Base de LTE para Raspberry Pi

El módulo base de LTE, 3G/4G & LTE Base HAT, es usado por la Raspberry Pi para colocar el módulo LTE EC25 el cual es usado para procesar la

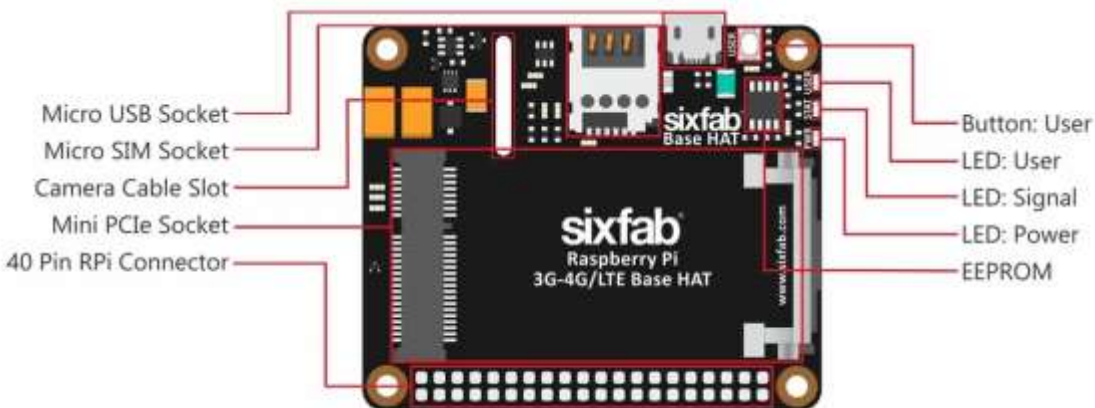
información que se requiere utilizar en este tipo de tecnología 4G. Las características del módulo base son:

- Es completamente compatible con los modelos Raspberry Pi que tienen el encabezado GPIO de 40 pines (4, 3, 2, B +, A +, Zero).
- Fácil de usar, configuración simple, *plug-and-play*.
- Conector mini PCIe con clip compatible con cobertura mundial *LTE*.
- El zócalo de la tarjeta *Micro SIM* se puede alcanzar fácilmente desde la parte superior del sombrero (*HAT*).
- El sombrero (*HAT*) puede alimentarse desde una fuente externa de 5 V mediante pines de alimentación expuestos, directamente desde los encabezados GPIO Raspberry Pi 5 V, a través de micro USB o un conector JST opcional en la parte inferior de la placa. Se incluye un cable micro USB de ángulo recto de 90 grados especialmente diseñado para el paquete.
- El circuito de energía de corriente eficiente y baja en reposo puede contener hasta 3 amperios.
- Los comandos opcionales Enviar / Recibir *AT* a través del puerto *UART* de Raspberry Pi están disponibles.
- La potencia de toda la electrónica de la placa se puede desactivar para casos de uso de bajo consumo de energía.

- Rango de temperatura de trabajo: $-40^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$

El diseño del módulo es el siguiente:

Figura 40. **Modulo base de LTE**



Fuente: Sixfab. Raspberry Pi 3G/4G & LTE Base HAT. <https://sixfab.com/product/raspberry-pi-base-hat-3g-4g-lte-minipcie-cards/>. Consulta: julio de 2020.

3.3.2. Módulo LTE para Raspberry Pi

El módulo LTE a utilizar es *Quectel EC25 Mini PCIe 4G/LTE Module*, el cual tiene la capacidad de utilizar la tecnología más reciente de las telefonías móviles. Las características del módulo son:

- Con *Sixfab Base* (Modulo base de LTE), se puede usar fácilmente EC25.
- Receptor GNSS de múltiples constelaciones disponible para aplicaciones que requieren soluciones rápidas y precisas en cualquier entorno.

- La tecnología *MIMO* satisface las demandas de velocidad de datos y confiabilidad de enlace en los sistemas de comunicación inalámbrica modernos.
- Ancho de banda: 1,4 / 3/5/10/15 / 20 MHz.
- Rango de temperatura: -40 ° C ~ + 80 ° C.
- Voltaje de suministro: 3,0V ~ 3,6 V.

El diseño del módulo es el siguiente:

Figura 41. **Módulo LTE**



Fuente: Sixfab. *Quectel EC25 Mini PCIe 4G/LTE Module*. <https://sixfab.com/product/quectel-ec25-mini-pcie-4glte-module/>. Consulta: julio de 2020.

3.3.3. Antena para módulo LTE

Las antenas por utilizar son *LTE Main & Diversity & GNSS Triple Port Antenna*, las cuales ayudan al módulo de LTE a tener una mejor recepción de la tecnología 4G, además que tiene la capacidad de indicar su ubicación debido al

protocolo GNSS (*Global Navigation Satellite System*, Sistema global de navegación por satélite) utilizado por el módulo *LTE EC25*. Las características de la antena son:

- Impedancia de 50 ohmios.
- Longitud del cable de 100 mm.
- Cobertura 2G / 3G / 4G *LTE*.
- Rango de frecuencia admitido: 698-960 / 1427.9-1510.9 / 1559-1610 / 1695-2200 / 2300-2700 / 3400-3600 MHz.
- Las ganancias máximas están entre 3.4dBi-4.2dBi en las bandas *LTE* (1695 -3600 MHz) y 0.8dBi para el GNSS (1570-1610MHz).
- conectores u.FL.
- Cinta adhesiva

Figura 42. **Antena para módulo *LTE***

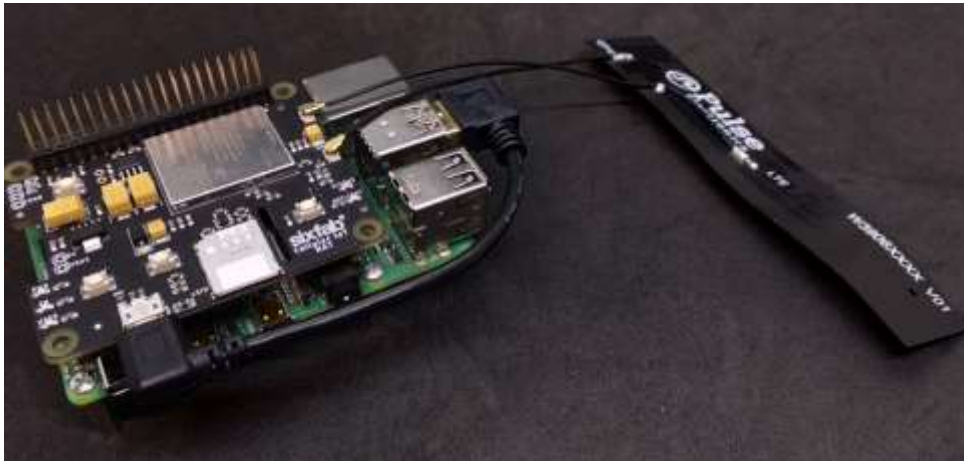


Fuente: Sixfab. *LTE Main & Diversity & GNSS Triple Port u.FL Antenna – 100mm*.
<https://sixfab.com/product/lte-main-diversity-gnss-triple-port-u-fl-antenna-100mm/>. Consulta: julio de 2020.

3.3.4. Diagrama de conexión Inalámbrica

La conexión entre los diferentes módulos que utiliza Raspberry Pi 4 *modelo B* y la tarjeta *SIM* sería el siguiente:

Figura 43. **Conexión Raspberry Pi y modulo SIM**



Fuente: Sixfab. *Getting started*. <https://docs.sixfab.com/docs/raspberry-pi-cellular-iot-hat-getting-started>. Consulta: julio de 2020.

3.4. **Diseño de la interfaz web**

La interfaz *web* es un servicio que está presente sobre un ordenador, Raspberry Pi, el cual ofrece a un usuario poder acceder al contenido, navegar e interactuar con la plataforma.

Para la creación de este servicio web es necesario contar con el siguiente software y librerías:

- *Python*: es el lenguaje de programación que se utiliza para montar el servidor de la página web y acceder a la base de datos. Se utiliza la versión 3.7.4
- *Flask*: es una librería de *Python* para el montaje de páginas web en pequeños servidores.

- *SQLAlchemy*: es una librería de *Python* para crear la base de datos, cuyo propósito es el de almacenar los datos del sistema de riego y obtener estadísticas del consumo de agua.

Una vez definidos los componentes y herramientas necesarias para el diseño web, se puede crear la interfaz con el contenido necesario para mostrar los datos de consumo de agua en el sistema de regulación de riego por goteo alimentado por energía solar y posibles fallas del sistema.

Para acceder a la página web, se utiliza la conexión inalámbrica (*LTE*) configurada en el ordenador, Raspberry Pi, con acceso a internet para poder verificar el sistema de control desde cualquier ubicación y mediante una dirección llamada IP que identifica al ordenador.

Figura 44. **Página WEB - Inicio**



Fuente: elaboración propia empleando lenguaje de programación Python, versión 3.7.4.

Figura 45. Estadísticas del consumo de agua

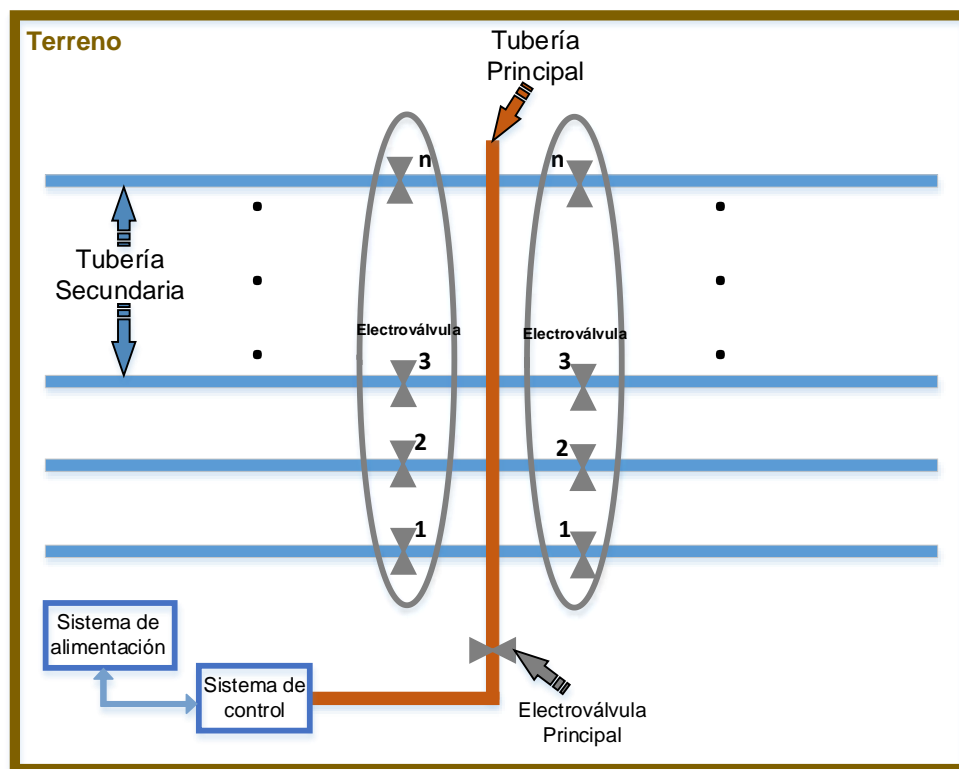


Fuente: elaboración propia empleando Python, versión 3.7.4.

4. ESCALABILIDAD DEL DISEÑO

El diseño de control para un sistema de regulación de riego por goteo alimentado por energía solar puede soportar un control para un terreno más extenso tomando en cuenta las capacidades del controlador, Raspberry Pi y los componentes que forman el sistema. En la siguiente figura se muestra cómo puede llegar a ser el dimensionamiento del terreno para una mayor cobertura con el sistema de control.

Figura 46. Escalabilidad del diseño



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio 2016.

Se debe de considerar los siguientes componentes para dimensionar el nuevo sistema de control y así poder soportar el nuevo terreno por cubrir:

- Capacidad de energía proporcionada por los paneles solares y banco de baterías.
- Cantidad de tuberías secundarias.
- Dimensionamiento de sensores de humedad para verificar la saturación del terreno.
- Capacidad del controlador, Raspberry Pi modelo 4

4.1. Capacidad de alimentación de energía

Al momento de incrementar y cubrir un mayor terreno se debe de verificar nuevamente el consumo que tendrá el sistema, dado que va a tener un mayor consumo de energía. Los componentes por considerar deben de ser la cantidad de sensores de humedad y cantidad de electroválvulas que se van a adicionar.

Dado que existe un incremento en el consumo de energía, se debe de volver a dimensionar la capacidad de los paneles solares monocristalinos y la capacidad del nuevo banco baterías para que el sistema funcione sin inconvenientes.

4.2. Cantidad de tuberías secundarias

En el momento que se requiere cubrir un terreno más extenso conlleva a una mayor cantidad de tuberías secundarias para que el sistema de riego por

goteo abarque regar todas las plantas. Hay que considerar una electroválvula para cada tubería secundaria para el control del paso de agua hacia las plantas.

4.3. Dimensionamiento de sensores

Si se tiene una mayor cantidad de tuberías secundarias y una mayor cantidad de plantas para el sistema de riego por goteo, se debe de tomar en cuenta que al incrementar las tuberías secundarias se incrementa el manejo de las electroválvulas desde el demultiplexor y si cambia la cantidad de plantas se encontrara un aumento en los sensores de humedad y en el convertidor análogo-digital para poder enviar la información al controlador, *Raspberry-Pi*.

4.4. Capacidad del controlador

El controlador, *Raspberry Pi*, tiene la capacidad de controlar 27 interfaces de entrada o salida por lo que se debe de tomar en cuenta los puertos para manipular entradas y salidas en el manejo de las electroválvulas secundarias con el demultiplexor y los sensores con los convertidores analógicos-digitales. Además, de considerar los servicios de base de datos y página *WEB* para el procesamiento de datos.

Además, se debe considerar la distancia en la comunicación entre las electroválvulas y sensores hacia el controlador, dado que, si es necesario abarcar distancias muy grandes, se recomienda colocar un segundo controlador para que no exista perdidas en la transmisión de datos y pueda operar de manera eficiente el sistema de regulación de riego por goteo alimentado por energía solar.

CONCLUSIONES

1. La energía solar es una fuente abundante para generar un sistema fotovoltaico en lugares donde no existe un sistema eléctrico, su uso es muy conveniente para lugares remotos.
2. Para efectuar el dimensionamiento del sistema fotovoltaico se debe conocer el consumo de potencia que tendrán los equipos junto al sistema auxiliar de energía, compuesto por el banco de baterías, para poder proporcionar la energía que requiera el sistema.
3. El uso del sistema auxiliar de energía, compuesto por el banco de baterías y su sistema de regulación en el sistema fotovoltaico permite mantener la potencia que consumen los equipos en los días nublados o durante la noche.
4. Un sistema de control lazo cerrado, de tipo proporcional e integral permite agilizar la corrección y reducir el error cuando los sensores en el sistema produzcan retardos en el proceso con lo que se logra una mejor respuesta transitoria y dando como resultado un sistema de control más eficiente y estable.
5. El controlador Raspberry Pi en conjunto con un sistema de control lazo cerrado realimentado, de tipo proporcional e integral, permite realizar de manera automática el control de riego por goteo garantizando la estabilidad.

6. Desarrollar el sistema de control con el lenguaje de programación *Python* permite una flexibilidad en la comunicación de los datos provenientes del exterior para poder utilizarse con aplicaciones tales como base de datos y páginas web.

7. El uso de comunicación inalámbrica facilita el monitoreo del estado del sistema desde cualquier ubicación con acceso a Internet en que se encuentre el operario.

RECOMENDACIONES

1. Iniciar el diseño del sistema fotovoltaico se debe de tomar en cuenta qué tipo de paneles se requiere utilizar, así como la capacidad del banco de baterías y su durabilidad, para poder dimensionar de manera más precisa los componentes necesarios.
2. Considerar la escalabilidad del diseño dado que se debe tomar en cuenta la cantidad de electroválvulas a controlar puede ser limitada por la cantidad de puertos, entrada y salida de la Raspberry Pi.
3. Considerar la ubicación física de la instalación, dado que hay lugares en donde la radiación es insuficiente y los paneles solares no logran generar la energía fotovoltaica que se necesita en el sistema de manera sostenida, por lo que el dimensionamiento del banco de baterías debe de adecuarse a la cantidad de días que no pueda llegar el sol a los paneles solares.
4. Diseñar el servicio WEB en el sistema de control: considerar asignar un nombre al ordenador que proporciona la página WEB para que el usuario pueda acceder al sistema de monitoreo de manera sencilla y eficaz usando la comunicación inalámbrica.
5. Analizar el sistema de control: para el operario encargado de monitorear, se recomienda supervisar el sistema por lo menos una vez al día para determinar el correcto funcionamiento o posibles errores que se puedan ocasionar.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALLDATASHEET.ES. *CD4072 Datasheet(PDF) 4 Page - Intersil Corporation*. [en línea]. <<https://html.alldatasheet.es/html-pdf/66445/INTERSIL/CD4072/1295/4/CD4072.html>>. [Consulta: julio de 2020].
2. Blogger.com. *Medios de transmisión no guiados*. [en línea]. <<http://veritohoyos.blogspot.com/2014/>>. [Consulta: febrero de 2020].
3. DF ROBOT. *SKU:SEN0193*. [en línea]. <https://wiki.dfrobot.com/Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN0193>. [Consulta: julio de 2020].
4. D-SOL. *Inversor de onda modificada SAMLEX 12VDC, 450W SAM-450-12*. [en línea]. <<https://distribuidorsolar.mx/tienda/inversor-de-onda-modificada-samlex-12vdc-450w-sam-450-12/>>. [Consulta: septiembre de 2021].
5. FERNÁNDEZ, Yennifer. *Tecnología Móvil*. [en línea]. <<https://pt.slideshare.net/YenniferFernandez/tecnologia-mvil/9>>. [Consulta: junio de 2020].
6. Findchips. *ADC0800 8-Bit A/D Converter*. [en línea]. <<https://www.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/321/ADC0800-pdf.php>>. [Consulta: julio de 2020].

7. Generatuluz. *¿Qué es un regulador solar MPPT?* [en línea]. <<https://www.generatuluz.com/tu-propia-instalacion-aislada/controladores-carga/reguladores/que-es-un-regulador-solar-mppt/>>. [Consulta: mayo de 2021].
8. IPANDEE. *Nuevo controlador de carga solar MPPT de sistema autónomo 20A-60A serie Explorer-M.* [en línea]. <<https://www.solarcontroller-inverter.com/es/products/New-20A-60A-off-grid-system-MPPT-solar-charge-controller-Explorer-M-Series.html>>. [Consulta: junio de 2020].
9. Luis Llamas. *Medir caudal y consumo de agua con Arduino y caudalímetro.* [en línea]. <<https://www.luisllamas.es/caudal-consumo-de-agua-con-arduino-y-caudalimetro/>>. [Consulta: julio de 2020].
10. MERKASOL. *Paneles Monocristalino.* [en línea]. <<https://www.merkasol.com/Panel-Solar-Monocristalino-Merkasol-90w-12v-Alta-Eficiencia>>. [Consulta: junio de 2020].
11. Naylamp Mechatronics. *VÁLVULA SOLENOIDE 1/2" 12VDC.* [en línea]. <<https://naylampmechatronics.com/valvulas/314-valvula-solenoid-12-12vdc.html>>. [Consulta: julio de 2020].
12. Proto Supplies. *2N3904 NPN General Purpose Transistor (10-Pack).* [en línea]. <<https://protosupplies.com/product/transistor-npn-general-purpose-2n3904-5-pack/>>. [Consulta: julio de 2020].

13. pybonacci. *Teoría de control en Python con SciPy (II): Control PID*. [en línea]. <<https://pybonacci.org/2013/11/06/teoria-de-control-en-python-con-scipy-ii-control-pid/>>. [Consulta: junio de 2020].
14. _____. *Teoría de control en Python con SciPy (II): Control PID*. [en línea]. <<https://pybonacci.org/2013/11/06/teoria-de-control-en-python-con-scipy-ii-control-pid/>>. [Consulta: junio de 2020].
15. Raspberry Pi. *Raspberry Pi Documentation*. [en línea]. <<https://www.raspberrypi.org/documentation/usage/gpio/>>. [Consulta: junio de 2020].
16. Sixfab. *Getting started*. [en línea]. <<https://docs.sixfab.com/docs/raspberry-pi-cellular-iot-hat-getting-started>>. [Consulta: julio de 2020].
17. _____. *LTE Main & Diversity & GNSS Triple Port u.FL Antenna – 100mm*. [en línea]. <<https://sixfab.com/product/lte-main-diversity-gnss-triple-port-u-fl-antenna-100mm/>>. [Consulta: julio de 2020].
18. _____. *Quectel EC25 Mini PCIe 4G/LTE Module*. [en línea]. <<https://sixfab.com/product/quectel-ec25-mini-pcie-4glte-module/>>. [Consulta: julio de 2020].
19. _____. *Raspberry Pi 3G/4G & LTE Base HAT*. [en línea]. <<https://sixfab.com/product/raspberry-pi-base-hat-3g-4g-lte-minipcie-cards/>>. [Consulta: julio de 2020].

20. Solarshop.cl. *BATERÍA ULTRACELL 200AH 12V AGM CICLO PROFUNDO (UCG200-12)*. [en línea]. <http://www.solarshop.cl/product.php?id_product=533/>. [Consulta: septiembre de 2021].
21. SUCONEL. *Transistor De Potencia Mosfet Canal N Encapsulado TO-220 De 3 Pines IXTP75N10P*. [en línea]. <<https://suconel.com/product/transistor-de-potencia-mosfet-canal-n-encapsulado-to-220-de-3-pines-ixtp75n10p/>>. [Consulta: julio de 2020].
22. SUNFIELDS. *Cómo dimensionar y calcular paneles solares fotovoltaicos necesarios*. [en línea]. <<https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/calcular-paneles-solares-necesarios/>>. [Consulta: junio de 2020].
23. SYC. *Manual del usuario*. [en línea]. <https://components101.com/sites/default/files/component_datash eet/74LS138%20Datasheet.pdf>. [Consulta: junio de 2020].
24. Tiendatec. *RASPBERRY PI 4 - MODELO B - 4GB (r1.4)*. [en línea]. <<https://www.tiendatec.es/raspberry-pi/placas-base/1100-raspberry-pi-4-modelo-b-4gb-765756931182.html>>. [Consulta: junio de 2020].
25. TuElectronica.es. *Resistencia eléctrica. Electrónica básica*. [en línea]. <<https://tuelectronica.es/resistencia-electrica/>>. [Consulta: julio de 2020].

26. Universidad Politécnica de Cataluña. *Capítulo 2. Sistemas de Control*. [en línea].
<<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3330/34059-5.pdf?sequence=5&isAllowed=y>>. [Consulta: marzo de 2021].
27. VIÑANZACA, Víctor. *Introducción a los Sistemas de Control*. [en línea].
<<https://idoc.pub/documents/introduccion-a-los-sistemas-de-control-2nv85j1mmdlk>>. [Consulta: abril de 2021].
28. VSIP. *Tipos de controladores*. [en línea]. <<https://vsip.info/tipos-de-controladores-pdf-free.html>>. [Consulta: abril de 2021].

APÉNDICES

Apéndice 1. **Presupuesto del sistema de riego de regulación de riego por goteo alimentado por energía solar**

En la siguiente tabla se muestra el presupuesto del sistema en la moneda de dólar ya que es una moneda internacional y facilita manejar un precio redondo que no tiene variación sobre la moneda local del país.

Cantidad	Descripción	Precio Individual	Precio Total
3	Batería	\$ 448,50	\$ 1 345,50
1	Inversor	\$ 57,50	\$ 57,50
1	MPPT	\$ 116,83	\$ 116,83
4	Panel solar	\$ 134,34	\$ 537,36
1	Raspberry Pi	\$ 35,00	\$ 35,00
5	Electroválvula	\$ 25,00	\$ 125,00
7	Integrados	\$ 1,72	\$ 12,04
29	Sensores	\$ 5,90	\$ 171,10
1	Bomba de agua	\$ 133,00	\$ 133,00
1	TRIAC	\$ 2,16	\$ 2,16
5	Transistores	\$ 0,26	\$ 1,30
40	Resistencia	\$ 0,13	\$ 5,20
2	Fusibles	\$ 11,17	\$ 22,34
Total			\$ 2 564,33

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel, Microsoft 365.

Apéndice 2. **Programa para el control del sistema de riego de regulación de riego por goteo alimentado por energía solar**

Código principal para manejo del sistema de control PI

```
import random
import time
from scipy import signal # Importar libreria para utilizar en ecuacion de sistema de control PI
import RPi.GPIO as GPIO # Importar libreria para uso de GPIO
import serial # Importar libreria para utilizar puerto serial

initial_time = time.time()
#Para usar los numeros de pines de RPi
GPIO.setmode(GPIO.BCM)

#Iniciar el puerto serial
port = serial.Serial("/dev/ttyAMA0", baudrate = 9600, timeout = 1)
port.open()

# Puertos
ev1 = 23 #electrovalvula 1
ev2 = 24 #electrovalvula 2
ev3 = 25 #electrovalvula 3
ev4 = 18 #electrovalvula 4
sh1 = 8 #sensor humedad para tuberia 1
sh2 = 7 #sensor humedad para tuberia 2
sh3 = 12 #sensor humedad para tuberia 3
sh4 = 16 #sensor humedad para tuberia 4

#Indicar los puertos como entrada o salida
entrada = [sh1,sh2,sh3,sh4]
salida = [ev1,ev2,ev3,ev4]
for pin_e in entrada:
    GPIO.setup(pin_e, GPIO.IN)
for pin_s in salida:
    GPIO.setup(pin_s, GPIO.OUT, initial = GPIO.LOW)

#variables
Data_list = []
sample = 60
dict_binario = { 0: [0,0,0,0], 1: [0,0,0,1], 2: [0,0,1,0], 3: [0,0,1,1], 4: [0,1,1,0], 5: [0,1,0,1],
                 6: [0,1,1,0], 7: [0,1,1,1], 8: [1,0,0,0], 9: [1,0,0,1], 10: [1,0,1,0],
                 11: [1,0,1,1], 12: [1,1,0,0], 13: [1,1,0,1], 14: [1,1,1,0], 15: [1,1,1,1]}
```


Continuación del apéndice 2.

```
#Lectura de señal de los sensores
def binario(e4,e3,e2,e1):
    lista = [e4,e3,e2,e1]
    for key in dict_binario:
        valor = dict_binario.get(key)
        if valor == lista:
            return valor

#Estabilizacion del sistema para la funcion de transferencia
kp = 200 #Ganancia del sistema proporcional
ki = 100 #Ganancia del sistem integral
sistema = signal.lti(1,[4,promedio])
sistema_pi = series([(kp,ki],[1,0]),sistema)

#Opera mientras el sistema se encuentre estable
while 0.9 < sistema_pi < 1.10:
    data_serie = []
    rcv = port.read()#Lectura de datos en el puerto serial
    data_serie.append(rcv)
    if len(data_serie) == 60:
        for x in range(sample):
            flujo_agua = data_serie[x]/7.5 #Calculo del flujo de agua en
L/min
            Data_list.append(round(flujo_agua),2)

            #Se calcula el promedio para el consumo de agua en L/min
            promedio = round(sum(Data_list)/len(Data_list),2)

    #Lectura de los estados de electrovalvulas y manipulacion de las mismas
    GPIO.OUT(led,True)
    valor_OUT =
binario(GPIO.input(sh4),GPIO.input(sh3),GPIO.input(sh2),GPIO.input(sh1))
    for pin, bit in zip(salida,valor):
        GPIO.output(pin,bit)

    #Medir el tiempo de la bomba, si excede 2h se apaga la bomba
    if valor_OUT != 0:
        GPIO.setup(17, GPIO.OUT, initial = GPIO.HIGH)
        end_time = time.time()
        if (end_time - initial_time) > 2:
            GPIO.setup(17, GPIO.OUT, initial = GPIO.LOW)

    #Apagar motor si ya no es necesario el flujo de agua en las tuberias
    if (GPIO_OUT.input(sh1) == 1 and GPIO_OUT.input(sh2) == 1 and
GPIO_OUT.input(sh3) == 1 and GPIO_OUT.input(sh4) == 1):
```

Continuación del apéndice 2.

```
else:
    GPIO.setup(17, GPIO.OUT, initial = GPIO.LOW)
    GPIO.setup(17, GPIO.OUT, initial = GPIO.HIGH)
```

Fuente: elaboración propia, empleando Bloc de Notas.

Apéndice 3. **Configuración de módulo LTE para Raspberry Pi**

Instalación de librería para utilizar el módulo LTE:

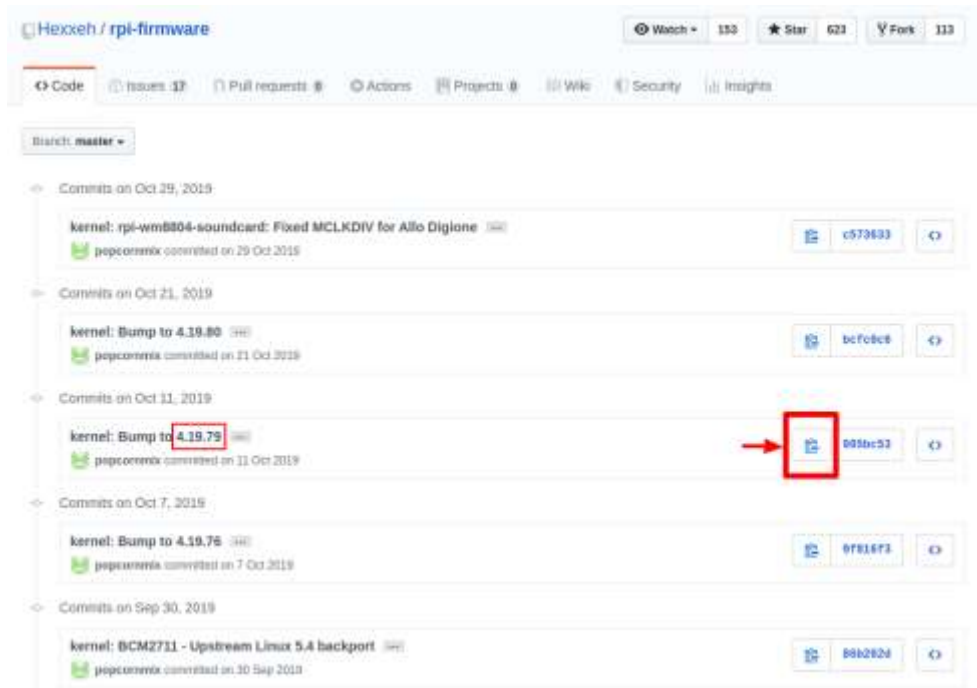
1. Descargar el repositorio de la librería:
 - a. `git clone https://github.com/sixfab/Sixfab_RPi_CellularIoT_Library.git`
2. Dirigirse a la siguiente ubicación:
 - a. `cd Sixfab_RPi_CellularIoT_Library`
3. Completar la instalación:
 - a. `sudo python3 setup.py install`

Configuración de modulo para aceptar redes LTE:

1. Desconectar el cable USB desde el módulo base para LTE hacia la Raspberry Pi
2. Actualizar el equipo Raspberry Pi
 - a. `sudo apt update && sudo apt upgrade -y`
3. Instalar la interface del firmware necesario para QMI
 - a. `sudo apt-get install raspberrypi-kernel-headers`
4. Verificar los paquetes de QMI
 - a. `ls /usr/src`

Continuación del apéndice 3.

5. Navegar al repositorio que se encuentra en github, <https://github.com/Hexxeh/rpi-firmware/commits/master> y verificar la versión instalada para copiar el ID correspondiente, como se muestra en la siguiente imagen:



6. Actualizar el firmware para la version del modulo
 - a. `sudo rpi-update <ID>`
7. Reiniciar el equipo, Raspberry Pi
8. Instalar el archivo correspondiente de QMI
 - b. `wget https://raw.githubusercontent.com/sixfab/Sixfab_RPi_3G-4G-LTE_Base_Shield/master/tutorials/QMI_tutorial/qmi_install.sh`

Continuación del apéndice 3.

9. Cambiar los permisos del archivo

c. `sudo chmod +x qmi_install.sh`

10. Iniciar el servicio

d. `sudo ./qmi_install.sh`

11. Reiniciar el equipo nuevamente y volver a conectar el módulo base de LTE

12. Navegar a los archivos Quectel

e. `cd files/quectel-CM`

13. Iniciar el servicio

f. `sudo ./quectel-CM -s internet`

14. Verificar que exista una interfaz llamada wwan0 el cual corresponde al módulo LTE.

g. `ifconfig`

Para que el módulo quede funcionando de manera permanente se debe de seguir los siguientes pasos:

1. Obtener el archivo de instalación:

a. `wget`

`https://raw.githubusercontent.com/sixfab/Sixfab_RPi_3G-4G-LTE_Base_Shield/master/tutorials/QMI_tutorial/install_auto_connect.sh`

2. Hacer el archivo ejecutable

a. `sudo chmod +x install_auto_connect.sh`

3. Instalar el scrip

a. `sudo ./install_auto_connect.sh`

Continuación del apéndice 3.

1. Durante la instalación preguntara, ¿Que es PAN? El cual únicamente se presiona *Enter* para continuar con el proceso y automáticamente se activará el servicio de LTE.
2. Verificar el servicio se encuentre arriba:
 - a. `sudo systemctl status qmi_reconnect.service`

Fuente: elaboración propia, empleando Bloc de Notas.

Apéndice 4. Programa para el servicio de página web desde Python

Código principal para manejo de página WEB

```
from flask import Flask, render_template, url_for, flash, redirect, flash, request
from flask_sqlalchemy import SQLAlchemy
from sqlalchemy.orm import sessionmaker
from forms import RegistrationForm, LoginForm
from datetime import datetime
import pygal
#from raspberry import Data_list, sample, promedio

# Inicializar la pagina WEB junto a la base de datos llamada proyecto.db
app = Flask(__name__)
app.config['SQLALCHEMY_DATABASE_URI'] = 'sqlite:///proyecto.db'
app.config['SECRET_KEY'] = '1234567890ABC'
db = SQLAlchemy(app)
session = sessionmaker()

#Creacion de objetos para los usuarios de autenticacion
class Usuario(db.Model):
    id = db.Column(db.Integer, primary_key = True)
    username = db.Column(db.String(20), unique = True, nullable = False)
    password = db.Column(db.String(60), nullable = False)

    def __repr__(self):
        return f"User('{self.username}', '{self.password}')"

#Pagina Inicial
@app.route('/', methods = ['GET', 'POST'])
```

Continuación del apéndice 4.

```
def Index():
    if request.method == 'POST':
        usuario = Usuario(username = request.form['usuario'], password =
request.form['password'])
        print(usuario)
        if usuario.username == "Gabriel" and usuario.password == 'usac':
            return redirect('/sistema')
        else:
            return redirect('/')
    return render_template('index.html',title='Home')

#Pagina del sistema de control, luego de la autenticacion
@app.route('/sistema')
def sistema():
    try:
        graph = pygal.Line()
        graph.title = 'Consumo de agua (L/min).'
        graph.add('Python', Data_list)
        graph_data = graph.render_data_uri()
        return render_template('SistemaPI.html', graph_data = graph_data,
promedio = promedio)
    except Exception as e:
        return(str(e))

#Iniciar el servicio indefinido
if __name__ == '__main__':
    app.run(port = 3000, debug = True)
```

Código base para manejar el diseño de la página web

```
<!-- configuracion de la plantilla pagina web -->
<!DOCTYPE html>
<html>
<head>
    <!-- Requerimientos de las etiquetas denominadas "meta tags" -->
    <meta charset="utf-8/">
    <meta name="/viewport/" content="/width=device-width, initial-scale=1, shrink-to-fit=yes">

    <!-- Bootstrap CSS / Estilo de la pagina web utilizando codigo abierto de Bootstrap CSS -->
    <link rel="/stylesheet_1/"
href="https://maxcdn.bootstrapcdn.com/bootstrap/4.0.0/css/bootstrap.min.css"
integrity="sha384-
Gn5384xqQ1aoWXA+058RXPxPg6fy4IWvTNh0E263XmFcJISAwGgFaw/dAiS6JXm"
crossorigin="Anonymous_project">
```

Continuación del apéndice 4.

```
<link rel="/stylesheet/" type="/text/css/" href="{{ url_for('static', filename='main.css') }}">
    {% if title %}
        <title>Sistema de Control - {{title}} </title>
        <h1>Sistema de Regulación de riego por goteo alimentado por energía
solar</h1>
    {% else %}
        <title>Sistema de Control</title>
        <h1>Sistema de Regulación de riego por goteo alimentado por energía
solar</h1>
    {% endif %}
</head>
<body>
    <!-- Configuración del cuerpo de la página web -->
    <header class="/site-header/">
        <nav class="/navbar navbar-expand-md navbar-white bg-dark fixed-top">
            <div class="/container">
                <a class="/navbar-brand_mr-4" href="/">Inicio</a>
                <button class="/navbar-toggler/" type="/button/" data-toggle="/collapse/" data-
target="/#navbarToggle" aria-controls="/navbarToggle/" aria-expanded="/false." aria-
label="/Toggle navigation/">
                    <span class="navbar-toggler-icon"></span>
                </button>
            </div>
        </nav>
    </header>
    <main role="main" class="container">
        <div class="row">
            <div class="col-md-8">
                {% block content %}{% endblock %}
            </div>
        </main>
    <!-- Bootstrap para formato de página web en línea -->
    <script src="https://code.jquery.com/jquery-3.2.1.slim.min.js" integrity="sha384-
KJ3o2DKtlkvYIK3UENzmM7KCKRr/rE9/Qpg6aAZGJwFDMVNA/GpGFF93hXpG5KkN"
crossorigin="anonymous"></script>
    <script src="https://cdn.jsdelivr.net/npm/popper.js@1.12.9/dist/umd/popper.min.js"
integrity="sha384-
ApNbgH9B+Y1QKtv3Rn7W3mgPxhU9K/ScQsAP7hUibX39j7fakFPskvXusvfa0b4Q"
crossorigin="anonymous"></script>
    <script src="https://maxcdn.bootstrapcdn.com/bootstrap/4.0.0/js/bootstrap.min.js"
integrity="sha384-
JZR6Spejh4U02d8jOt6vLEHfe/JQGiRRSQQxSfFWpi1MquVdAjYUar5+76PVCmYI"
crossorigin="anonymous"></script>
</body>
```

Continuación del apéndice 4.

Código base para la página de Inicio

```
<!-- Pagina Inicio -->
{% extends "layout.html" %}
{% block content %}
    <h1>
        <!-- Imagen de pagina inicial -->
        <image src="{{ url_for('static', filename='inicio.png') }}">
    </h1>
    <div class="col-md-10">
<div class="content-section">
    <!-- Creacion de parametros para autenticacion -->
    <h3>Autenticación</h3>
    <p class='text-muted'>Favor de ingresar las credenciales para el acceso al servicio.
    <ul class="list-group">
        <form action="/" method="POST">
            <input type="text" name="usuario"
placeholder="usuario">
            <input type="password" name =
"password" placeholder="contraseña">
            <button type="submit">
                Save
            </button>
        </form>
    </ul>
    </p>
</div>
</div>
{% endblock content %}
```

Código base para la página de sistema de control, el cual se muestra después de efectuar a la autenticación exitosa al sistema.

```
<!-- Pagina del sistema de control -->
{% extends "layout.html" %}
{% block content %}
    <div class="container" align="left">
        <embed type="image/svg+xml" src="{{graph_data|safe}}
style='max-width:1000px'/>
    </div>
    <div class="container">
        <div class="content-section">
```


Continuación del apéndice 4.

```
        <!-- Creacion de parametros para autentificacion -->
        <h3>Consumo Promedio de agua</h3>
        <p class='text-muted'> Consumo de agua es de: {{ promedio }}
<i>L/min</i>.
        </p>
    </div>
</div>
{% endblock content %}
```

Fuente: elaboración propia, empleando Bloc de Notas.

