



Diseño e implementación de un sistema de riego inteligente para incrementar el rendimiento en los cultivos basado en energía solar fotovoltaica.

Montaluisa Torres, Thalía Lizbeth y Vargas Toca, Félix Gabriel

Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Ingeniería en Electromecánica.

Trabajo de titulación, previo a la obtención del Título de
Ingeniero en Electromecánica

Ing. Ortiz Villalba, Diego Edmundo

Latacunga, 15 de marzo del 2021



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA
CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo titulado **"DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RIEGO INTELIGENTE PARA INCREMENTAR EL RENDIMIENTO EN LOS CULTIVOS BASADO EN ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA."** fue realizado por los estudiantes **Montaluisa Torres, Thalía Lizbeth y Vargas Toca, Félix Gabriel**, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 15 de marzo del 2021



**DIEGO EDMUNDO
ORTIZ VILLALBA**

**Ing. Ortiz Villalba, Diego Edmundo
C.C.: 1803225414**

REPORTE DE VERIFICACIÓN URKUND



ORTIZ VILLALBA, DIEGO EDMUNDO <ddortiz5@espe.edu.ec>

[Urkund] 2% de similitud - ddortiz5@espe.edu.ec

1 mensaje

noreply@urkund.se <noreply@urkund.se>
Para: ddortiz5@espe.edu.ec

15 de marzo de 2021, 19:32

Documento(s) entregado(s) por: ddortiz5@espe.edu.ec
Documento(s) recibido(s) el: 16/03/2021 1:30:00
Informe generado el 16/03/2021 1:32:12 por el servicio de análisis documental de Urkund.

Mensaje del depositante:

Documento : TESIS MONTALUISA VARGAS.pdf[D98470115]
¡¡¡IMPORTANTE! El análisis contiene 1 warning(s).
Alrededor de 2% de este documento se compone de texto más o menos similar al contenido de 87 fuente(s) considerada(s) como la(s) más pertinente(s). La más larga sección comportando similitudes, contiene 46 palabras y tiene un índice de similitud de 75% con su principal fuente.

TENER EN CUENTA que el índice de similitud presentado arriba, no indica en ningún momento la presencia demostrada de plagio o de falta de rigor en el documento.
Puede haber buenas y legítimas razones para que partes del documento analizado se encuentren en las fuentes identificadas.
Es al corrector mismo de determinar la presencia cierta de plagio o falta de rigor averiguando e interpretando el análisis, las fuentes y el documento original.

Haga clic para acceder al análisis:
<https://secure.orkund.com/view/93957377-398989-436264>

Haga clic para descargar el documento entregado:
<https://secure.orkund.com/archive/download/98470115-436371-950709>

UN PROBLEMA CON UN DOCUMENTO?



Firmado digitalmente por:
DIEGO EDMUNDO
ORTIZ VILLALBA

Ing. Ortiz Villalba, Diego Edmundo
C.C.: 1803225414



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA
RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, **Montaluisa Torres, Thalía Lizbeth y Vargas Toca, Félix Gabriel** declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RIEGO INTELIGENTE PARA INCREMENTAR EL RENDIMIENTO EN LOS CULTIVOS BASADO EN ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.”**, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecido por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetado los derechos intelectuales de terceros y referenciando en las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Latacunga, 15 de marzo del 2021

Montaluisa Torres, Thalía Lizbeth
C.C.: 1751457092

Vargas Toca, Félix Gabriel
C.C.: 0503836728



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA**

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros, **Montaluisa Torres, Thalía Lizbeth y Vargas Toca, Félix Gabriel** autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RIEGO INTELIGENTE PARA INCREMENTAR EL RENDIMIENTO EN LOS CULTIVOS BASADO EN ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 15 de marzo del 2021

Montaluisa Torres, Thalía Lizbeth
C.C.: 1751457092

Vargas Toca, Félix Gabriel
C.C.: 0503836728

Dedicatoria

Esta investigación está dedicada al desocupado lector, aquel investigador incansable, pero primordialmente a todos aquellos apasionados por la energía renovable, al emprendedor y al soñador, para todo aquel que busca crear empresa, para aquel que cada día se despierta por cumplir un sueño, para aquellas personas altruistas que contribuyen con la sociedad para tener un mundo con menos contaminación, espero poderles brindar respuestas a sus preguntas.

Actualmente el mundo necesita personas como tú para poder generar soluciones.
¡Tú puedes!

Montaluisa Torres, Thalía Lizbeth

Dedicatoria

Con inmenso amor y afecto dedico el presente trabajo de titulación:

A Dios por brindarme salud, no desampararme e iluminar mi camino con su gran sabiduría.

A la Madre Dolorosa del Colegio, Santa Marianita de Jesús por cobijarme siempre con su manto protector.

A mi madre, María Clemencia quien ha estado a mi lado, ha sido mi fortaleza, mi guía y mi refugio que a pesar del cansancio físico siempre tuvo tiempo para mí, para escucharme, brindarme consejos y ante todo tenerme mucha paciencia en este largo camino que me ha traído hasta aquí.

A mis abuelitos María y Manuel que a pesar de no haber podido compartir mucho tiempo conmigo han sido un ejemplo para mí por los valores que han inculcado en mi familia.

A mi núcleo familiar más cercano por compartir sus sabias experiencias conmigo, estar pendientes de mí, brindarme la oportunidad de aprender un poco más cada día.

Vargas Toca, Félix Gabriel

Agradecimientos

Agradezco principalmente a Dios, a mis padres, abuelitos y hermanas por estar en los momentos más frágiles de mi etapa universitaria motivándome a salir adelante. Por ser un motivo de inspiración y de lucha constante.

Un agradecimiento muy grande al Ing. Diego Ortiz por ser la guía perfecta en la elaboración de este trabajo, por su constancia, paciencia y por compartir sus conocimientos con nosotros. Infinitas gracias.

También a mis amigos universitarios, por estar en los momentos más alegres y tristes de mi vida. Por ser la compañía idónea en el día a día, por sus ocurrencias y sus consejos. Sin ustedes no habría sido lo mismo.

Montaluisa Torres, Thalía Lizbeth

Agradecimientos

En el transcurso de mi vida han surgido ocasiones en las que una inmensa bruma a nublado mi ser, circunstancias sin una alternativa viable, pero siempre he confiado en Dios en la Madre Madre Dolorosa del colegio y Santa Marianita de Jesús que con su inmenso amor y bondad me han ayudado a encontrar la mejor alternativa y tomar las mejores decisiones es por ello que siempre estaré inmensamente agradecido.

María Clemencia, mi amada mamá que me ha enseñado que es el amor verdadero, que es la entrega y la abnegación ha estado fielmente a mi lado compartido alegrías y tristezas, celebrando cada pequeño triunfo y consolándome en la más dolorosa de las derrotas, por todo ello y más siempre te agradeceré.

Agradecer de manera muy especial a nuestro tutor de tesis Ing. Diego Ortiz e Ing. Jacqueline Llanos por ser unos excelentes docentes y demostrarnos que los límites nos los ponemos nosotros mismos, por tener tanta paciencia e impulsarnos a ser mejores personas y ante todo mejores profesionales.

Un agradecimiento muy especial a la Universidad de las Fuerzas especiales ESPE Extensión-Latacunga por haberme abierto las puertas y permitirme alcanzar un peldaño más en mi formación profesional, por permitirme compartir sus aulas con docentes, compañeros y amigos extraordinarios con los cuales compartí muchos hermosos e inolvidables momentos cuyos recuerdos quedaran grabados siempre en mi memoria.

Dios le pague, a todos.

Vargas Toca, Félix Gabriel

Tabla de Contenidos

Carátula.....	1
Certificación.....	2
Reporte de verificación urkund	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Dedicatoria.....	7
Agradecimientos	8
Agradecimientos	9
Tabla de Contenidos	10
Índice de Figuras.....	15
Índice de Tablas	17
Resumen	19
Abstract.....	20
Problemática.....	21
Antecedentes.....	21
Justificación e Importancia.....	23
Alcance del proyecto	23
Objetivos	25
<i>Objetivo General</i>	25

<i>Objetivos Específicos</i>	25
Marco Teórico	26
Característica del suelo	26
<i>Propiedades físicas del suelo</i>	26
<i>Propiedades Hidrofísicas del suelo</i>	29
Requerimientos Hídricos y operación del cultivo	29
<i>Evaporación</i>	29
<i>Transpiración</i>	30
<i>Evotranspiración</i>	30
<i>Evotranspiración de referencia (ET_o)</i>	30
<i>Cálculo de la evotranspiración</i>	31
<i>Precipitación efectiva</i>	33
<i>Reposición</i>	33
Determinación del calendario de riego de los cultivos	34
<i>Agua útil para el riego</i>	34
<i>Lámina neta de riego</i>	35
<i>Frecuencia de riego</i>	35
<i>Lámina bruta de riego</i>	36
<i>Volumen de riego</i>	36
Selección del sistema de riego	36
<i>Riego por aspersión</i>	37
<i>Elementos de un sistema de riego por aspersión</i>	38
Características del sistema de riego	40
<i>Espaciamiento entre aspersores y entre laterales</i>	40

	12
<i>Pluviosidad media del sistema</i>	42
<i>Tiempo máximo permisible de riego</i>	42
Hidráulica.....	43
<i>Equipo de bombeo</i>	43
<i>El Caudal</i>	44
<i>Carga Dinámica Total</i>	44
<i>Pérdidas en el sistema de tuberías</i>	45
<i>Potencia requerida por la bomba</i>	48
<i>Potencia requerida por el motor</i>	48
Sistema fotovoltaico	49
<i>Radiación solar</i>	49
<i>Recurso solar en Ecuador</i>	50
<i>Celda fotovoltaica</i>	52
<i>Tecnologías en Paneles Fotovoltáicos</i>	53
Sistema de control	54
<i>Agricultura de precisión</i>	54
<i>Tecnologías asociadas en agricultura de precisión</i>	55
<i>Tecnologías en sistemas de riego</i>	55
<i>Lógica difusa en sistemas de riego</i>	56
Metodología	58
Estudio del suelo/cultivo	58
Diseño Tecnológico	59
<i>Diseño de sistemas para la mejora de cultivos</i>	59
<i>Selección de las técnicas de cultivo</i>	59

	13
<i>Dosificación correcta del recurso hídrico</i>	59
<i>Diseño del sistema automatizado de riego.....</i>	60
Ejecución	60
Seguimiento y evaluación.....	60
Diseño	61
Introducción.....	61
Diseño Agronómico	63
<i>Cálculo del calendario de riego.....</i>	64
Diseño Hidráulico	68
<i>Cálculo de la tubería de carga y descarga</i>	69
<i>Cálculo de pérdidas por accesorios</i>	71
Diseño del sistema de control.....	73
<i>Controlador Difuso.....</i>	73
<i>Variables de entrada</i>	74
<i>Variables de salida</i>	79
<i>Sistema de inferencia Difuso.....</i>	79
<i>Reglas de inferencia.....</i>	79
<i>Unidad de control.....</i>	80
Diseño del sistema Fotovoltaico	80
<i>Características de la carga</i>	80
<i>Estudio de radiación disponible.....</i>	83
<i>Dimensionamiento del inversor</i>	84
<i>Dimensionamiento del Sistema Fotovoltaico.....</i>	86
<i>Dimensionamiento del sistema de almacenamiento (baterías).....</i>	91

	14
Análisis y Resultados	94
Rendimiento del cultivo	94
Tasa de crecimiento	95
Análisis técnico económico.....	97
Conclusiones y Recomendaciones.....	105
Conclusiones.....	105
Recomendaciones.....	106
Bibliografía.....	108
Anexos	112

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Esquema del sistema de riego inteligente.</i>	24
Figura 2 <i>Curva típica del coeficiente de cultivo.</i>	31
Figura 3 <i>Partes de un equipo de riego por aspersión</i>	38
Figura 4 <i>Disposición de aspersores tipo cuadrada</i>	40
Figura 5 <i>Disposición de aspersores tipo Triangular</i>	41
Figura 6 <i>Disposición de aspersores tipo Rectangular</i>	41
Figura 7 <i>Rugosidad absoluta k</i>	46
Figura 8 <i>Diagrama de radiación solar</i>	50
Figura 9 <i>Mapa solar del Ecuador 2019</i>	51
Figura 10 <i>Efecto fotovoltaico sobre un semiconductor</i>	52
Figura 11 <i>Metodología propuesta, para el cultivo.</i>	58
Figura 12 <i>Localización geográfica de la parcela intervenida.</i>	61
Figura 13 <i>Evotranspiración de referencia.</i>	64
Figura 14 <i>Valores de precipitación efectiva.</i>	65
Figura 15 <i>Especificaciones de funcionamiento del aspersor</i>	67
Figura 16 <i>Coeficiente de pérdida por accesorios.</i>	71
Figura 17 <i>Prestaciones de la bomba</i>	72
Figura 18 <i>Funciones de pertenencia para la variable evotranspiración</i>	75
Figura 19 <i>Funciones de pertenencia para la variable temperatura</i>	76
Figura 20 <i>Funciones de pertenencia para la variable humedad</i>	77
Figura 21 <i>Funciones de pertenencia para la variable etapa del cultivo</i>	78

	16
Figura 22 <i>Funciones de pertenencia para la salida del controlador.....</i>	79
Figura 23 <i>Diagrama de frecuencia de riego para el peor escenario</i>	81
Figura 24 <i>Demanda diaria del sistema de riego</i>	83
Figura 25 <i>Interfaz gráfica de la plataforma PVGIS</i>	83
Figura 26 <i>Irradiancia de cada mes</i>	84
Figura 27 <i>Configuración de los paneles fotovoltaicos.....</i>	91
Figura 28 <i>Rendimiento, considerando dos líneas base vs implementación</i>	95
Figura 29 <i>Tasa de crecimiento</i>	96
Figura 30 <i>Número de cortes</i>	97

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>La textura y su variación de diámetro.....</i>	26
Tabla 2 <i>Rangos de partículas correspondientes a distintas clases textuales ...</i>	27
Tabla 3 <i>Valores medios de densidad aparente de los suelos.</i>	28
Tabla 4 <i>Comparación entre los diferentes sistemas de riego.</i>	37
Tabla 5 <i>Coeficiente de rugosidad absoluta de materiales.....</i>	47
Tabla 6 <i>Proyectos en sistemas de riego inteligente</i>	57
Tabla 7 <i>Características del suelo.....</i>	62
Tabla 8 <i>Parámetros del cultivo.....</i>	63
Tabla 9 <i>Propiedades físicas del suelo.....</i>	63
Tabla 10 <i>Rango recomendado de velocidad.....</i>	69
Tabla 11 <i>Variables de entrada del controlador.....</i>	73
Tabla 12 <i>Funciones de membresía para la variable evotranspiración.</i>	74
Tabla 13 <i>Funciones de membresía para la variable temperatura.</i>	75
Tabla 14 <i>Funciones de membresía para la variable Humedad.....</i>	76
Tabla 15 <i>Funciones de membresía para la variable etapa del cultivo.....</i>	78
Tabla 16 <i>Características de riego en el mes de junio.</i>	80
Tabla 17 <i>Resumen de la demanda energética del sistema de riego inteligente</i>	81
Tabla 18 <i>Comparación entre inversor marca POWEST y XINDUN</i>	85
Tabla 19 <i>Comparación entre panel solar 365 Wp y 270 Wp.....</i>	87
Tabla 20 <i>Datos de temperatura e irradiancia máxima y mínima</i>	88
Tabla 21 <i>Costo de producción por cosecha.....</i>	99

Tabla 22 *Detalle de costos de implementación del sistema*..... 100

Tabla 23 *Alternativa convencional vs Alternativa tecnológica*..... 103

Resumen

El presente proyecto de investigación desarrolla una metodología que busca mejorar el rendimiento de diferentes cultivos, esta metodología está conformada por cuatro ejes principales que son el estudio del suelo o cultivo, diseño tecnológico, ejecución y finalmente seguimiento y evaluación de resultados. Dicha metodología es aplicada a una parcela que posee cultivo de alfalfa, este producto se cultiva con métodos convencionales, el sector no cuenta con suministro de energía eléctrica. Una vez determinadas las características del cultivo se procede a la ejecución de la segunda etapa de la metodología la cual arrojó como resultado el diseño de un sistema de generación híbrido el cual satisface la demanda energética del sistema de riego, constituido principalmente por una bomba centrífuga eléctrica, diseñado para atender los requerimientos hídricos del cultivo y garantizar el uso eficiente del agua, además se desarrolla un sistema de control basado en lógica difusa el cual tomara las decisiones de encendido y apagado de la bomba considerando las variables evotranspiración, temperatura ambiente, humedad del suelo y los días del cultivo. Luego se procede a la etapa de ejecución en donde se implementó cada uno de los sistemas mencionados en la parcela considerando un periodo de prueba. La etapa final, seguimiento y evaluación, consiste en la determinación del rendimiento del cultivo después de la intervención tecnológica realizada validando así el nivel de impacto de la propuesta diseñada.

Palabras clave:

- **EVOTRANSPIRACIÓN**
- **LÓGICA DIFUSA**
- **GENERACIÓN HÍBRIDA**

Abstract

This research project develops a methodological framework that improve the performance of different crops, the proposal considers four main stages that are describes as follows: study of the soil or crop, design of technological solution, implementing and finally monitoring and evaluation results. The methodology is applied to crop of alfalfa, which is cultivated with conventional methods. In addition the piece of ground does not have electricity supply. Once the characteristics of the crop are determined, the second stage of the proposed methodology is carried out, the result is the design of a hybrid generating system which satisfies the energy demand of the irrigation system, which is composed mainly an electrical centrifugal pump, designed to satisfy the water requirements of the crop and ensure the optimal use of water In addition, a control system based on fuzzy logic is developed which control the centrifugal pump considering the variables evapotranspiration, ambient temperature, soil moisture and number of days of crop. Then, next stage considers the implementation of the whole system, taking into account a test period. Finally, monitoring and evaluation stage is carried out to determine the performance crop after the implementation of the technological solution, thus validating the level of impact of the designed proposal.

Key words:

- **EVAPOTRANSPIRATION**
- **FUZZY LOGIC**
- **HYBRID GENERATION**

CAPÍTULO I

1. Problemática

1.1 Antecedentes

Según proyecciones del Instituto Nacional de Estadística y Censos- INEC, en 2020 Ecuador tendrá una población de 17.510.643 habitantes, de los cuales el 65% vive en zonas urbanas. Alrededor del 31.43% de la población se concentra en las principales ciudades, Guayaquil y Quito, con un crecimiento de 1.3% anual. (INEC, 2020). En el año 2013, según datos de (ESPAC, 2019) la superficie con uso agrario fue de 7,32 millones de hectáreas, la mayor superficie de suelo cultivable está destinada a pastos cultivados, mientras en el año 2018 la superficie con uso agrario fue de 5,279 millones de hectáreas, este decrecimiento se presenta principalmente a la migración de la población rural hacia la zona urbana.

Según (FAO, 2018). El hambre en el mundo está en aumento: el número estimado de personas desnutridas pasó de 804 millones en 2016 a 821 millones en 2017. Gran parte de este crecimiento puede atribuirse al aumento de los conflictos a menudo exacerbados por los choques climáticos. Entre el 2006 y el 2016, el 26% del total de daños y pérdidas causadas por desastres climáticos en los países en desarrollo se concentró en el sector agrícola. En este mismo periodo de tiempo la sequía causó el 30% de las pérdidas agrícolas ocasionadas por desastres lo que equivale más de 26 mil millones de dólares americanos.

Para avanzar en la productividad de los cultivos, existe una necesidad urgente de cambiar métodos manuales por procesos automatizados (Nikesh Gondchawar, 2016).

(Zavala, Lopez, Reca, Martinez, & Lao, 2020) en su estudio plantea que; el uso de fuentes de energía renovable para el riego implica un nuevo paradigma para el sector

agrícola. (Hamidat, Benyoucef, & Hartani, 2003), menciona que el bombeo fotovoltaico de agua ofrece la solución adecuada para suministrar agua en regiones remotas.

Actualmente, el uso de bombas fotovoltaicas para riego a pequeña escala es una opción prometedora para usar energía solar productiva y para generar ingresos.

(Vezin, y otros, 2020) menciona que el uso de energía fotovoltaica para bombear agua de los acuíferos es una solución eficiente para eludir la baja cobertura de la red eléctrica y proporcionar un mejor acceso al agua.

(Yingdong, Jiahong, Hao, & Miao, 2018), el riego con energía solar se considera una herramienta útil para mantener el crecimiento de los cultivos y conservar el pasto. Es una nueva forma efectiva de aplicar energía solar a la producción agrícola y la protección ecológica.

(Parvaresh, Ashrafzadeh, & Ramezani, 2019) en su análisis financiero y comparativo de bombas de riego solares con respecto a bombas regulares, realizado en el este y sur de Irán, determinó que los requisitos de potencia fotovoltaica son de 4.5 y 5.5 kW con arreglos fotovoltaicos de ángulo fijo, también se utilizan baterías para almacenar la energía, el bombeo fotovoltaico es más rentable que los sistemas eléctricos, aun considerando que este país cuenta con subsidios destinados al sector eléctrico.

(Zhang , Jiang, & Han , 2015) en su estudio plantea, el diseño de un sistema de decisión en función de valor de diferencia de temperatura del follaje y la humedad del suelo que puede recibir un volumen de agua de riego óptimo. El sistema de Interferencia Difusa se entrenó con datos experimentales y se obtuvo una función de membresía óptima y reglas difusas.

1.2 Justificación e Importancia

Las nuevas tecnologías se han desarrollado con la finalidad de facilitar el análisis en las diferentes áreas de la ingeniería, por lo que en este proyecto hacemos uso de las mismas aplicando las técnicas de “Dinámica de Fluidos Computacionales”, estas técnicas son las nuevas herramientas tecnológicas que se desarrollan enfocadas a sectores agrícolas, permiten optimizar el rendimiento de los cultivos minimizando el impacto ambiental. Considerando lo descrito en las secciones anteriores, el presente proyecto busca el desarrollo de una metodología basada en los requerimientos necesarios para incrementar la eficiencia en los cultivos, utilizando equipos destinados para la automatización y control.

Además, el proyecto incluye el uso de energía eléctrica fotovoltaica para la sustitución de sistemas de bombeo basados en motores de combustión, contribuyendo de esta manera a la disminución de la producción de gases de efecto invernadero.

1.3 Alcance del proyecto

La finalidad del trabajo de titulación presentado, es el diseño e implementación de un sistema de riego inteligente para incrementar el rendimiento en los cultivos basado en energía solar fotovoltaica. El sistema es capaz de obtener información de temperatura, humedad, etapa del cultivo y evotranspiración, mediante un controlador difuso se toma la decisión de activar o desactivar el encendido de una bomba, que se encarga de suministrar agua hacia los aspersores, para el riego óptimo de agua, el sistema está energizado totalmente con energía solar fotovoltaica.

El sistema está conformado por 4 etapas como se observa en la Figura 1: Agronómica, Hidráulica, Eléctrica y Control. Dentro de la etapa agronómica, se

realizará estudios de suelo, características del cultivo, tipo de riego, variables de las cuales depende el riego, necesidades hídricas para realizar un calendario de riego.

En la parte Hidráulica, se realizará el diseño de tubería para el riego y cálculo de pérdidas hídricas para el dimensionamiento de la bomba.

En la etapa Eléctrica se dimensionará el sistema fotovoltaico, se dimensionará y selecciona el inversor, un sistema de almacenamiento para poder energizar el sistema ante la ausencia de recurso solar.

Finalmente, en la etapa de control, se diseñará e implementará un sistema de control que permita que el riego se haga de manera eficiente, para ello se desarrollará e implementara un controlador difuso.

Una vez finalizada cada etapa, se evalúa el desempeño del sistema a través de pruebas de funcionamiento en un cultivo de ciclo corto, por un ciclo de producción, en la ciudad de Latacunga, para determinar el comportamiento del sistema.

Figura 1

Esquema del sistema de riego inteligente.



1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

- Diseñar e implementar un sistema de riego inteligente para incrementar el rendimiento en un cultivo de ciclo corto, utilizando energía solar fotovoltaica.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Proponer una metodología que permita el diseño de sistemas tecnológicos para mejorar el rendimiento de diferentes cultivos.
- Construir una línea base para comparar valores de rendimiento del cultivo previo a su intervención.
- Analizar la disponibilidad de recurso solar en la zona
- Diseñar e implementar un sistema de bombeo solar fotovoltaico.
- Diseñar e implementar un sistema de control para riego óptimo del cultivo.
- Analizar el rendimiento del cultivo después de la intervención.

CAPÍTULO II

2. Marco Teórico

2.1 Característica del suelo

Los suelos agrícolas presentan diferentes propiedades las cuales pueden ser físicas, químicas y biológicas en esta sección se estudiará las características físicas del suelo ya que son las más influyentes para la determinación de los requerimientos hídricos del cultivo.

2.1.1 Propiedades físicas del suelo

Dentro de las propiedades físicas del suelo más trascendentes se puede mencionar la textura, estructura, densidad aparente, densidad real, porosidad, consistencia, infiltración, permeabilidad, conductividad hidráulica, percolación y color (Almazan, 2003). A continuación, se detalla las utilizadas en la presente investigación:

2.1.1.1 Textura.

De acuerdo a (Almazan, 2003) es una de las propiedades más trascendentes y representa los porcentajes de limo, arcilla y de arenas de 2 mm de diámetro. Su importancia radica en la determinación de las láminas de riego, cálculo previo al diseño del sistema de riego. En la Tabla 1 se muestra la textura de los suelos según la escala granulométrica propuesto por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (U.S.D.A) y Atterberg.

Tabla 1

La textura y su variación de diámetro.

Fracciones	Límites de los diámetros (mm)	
	Sistema U.S.D. A	Sistema internacional (Atterberg)
Arena muy gruesa	2.0-1.0	
Arena gruesa	1.0-0.5	2.0-0.2
Arena media	0.5-0.25	
Arena fina	0.25-0.10	0.2-0.02
Arena muy fina	0.10-0.05	
Limo	0.05-0.002	0.02-0.002
Arcilla	<0.002	<0.002

Nota: En la tabla 1 se muestra la textura y su variación de diámetro. Tomado de Apuntes de la materia de riego y drenaje (p.17). (Almazan, 2003)

Existen diferentes clases de texturas las cuales se muestran en la

Tabla 2.

Tabla 2

Rangos de partículas correspondientes a las distintas clases textuales

Clasificación Textural	% Arenas	% Limo	% Arcilla	Tipo
Arenas	85-100	0-18	0-10	Ligero
Arenas Migajón	70-90	0-30	0-15	Ligero
Migajón Arenoso	52-82	0-48	0-20	Ligero
Migajón Arcillo Arenoso	45-80	0-28	20-35	Medio
Migajón Arcillo Limoso	0-20	20-72	28-40	Medio
Franco	24-52	28-50	8-28	Medio
Migajón Limoso	0-50	50-80	0-28	Medio
Migajón Arcilloso	20-45	15-52	28-40	Medio
Limo	0-20	80-100	0-12	Medio
Arcilla Arenosa	45-65	0-20	35-55	Pesado
Arcilla	0-45	0-40	40-100	Pesado
Arcilla Limosa	0-20	40-60	40-60	Pesado

Nota: En la tabla 2 se muestra los rangos de partículas correspondientes a las distintas clases texturales. Tomado de Apuntes de la materia de riego y drenaje (p.18). (Almazan, 2003)

2.1.1.2 Densidad aparente.

Es el resultado de dividir el peso del suelo seco entre el volumen total, también tomando en consideración los poros, el resultado varía dependiendo de la textura del suelo y el contenido de materia orgánica, puede expresarse en $\frac{gr}{cm^3}$ sus valores medios son los siguientes (Almazan, 2003). En la Tabla 3 se muestran los valores medios de densidad aparente de los suelos.

Tabla 3

Valores medios de densidad aparente de los suelos.

Texturas	Densidad promedio
Arenas	1.4-1.6 $\frac{gr}{cm^3}$
Francos	1.3-1.4 $\frac{gr}{cm^3}$
Arcillas	1.1-1.3 $\frac{gr}{cm^3}$
Suelos orgánicos	0.7-1.1 $\frac{gr}{cm^3}$

Nota: En la tabla 3 se muestra los valores medios de densidad aparente de los suelos. Tomado de Apuntes de la materia de riego y drenaje (p.21). (Almazan, 2003)

2.1.1.3 Densidad real.

Representa la relación entre el peso del suelo seco y el volumen de sus partículas, sus unidades son $\frac{gr}{cm^3}$ (Almazan, 2003).

2.1.1.4 Porosidad.

Expresa el porcentaje del volumen total de suelo que está ocupado por poros en los cuales se alojan agua o aire debido a la ausencia de partículas sólidas (Almazan, 2003).

2.1.2 Propiedades Hidrofísicas del suelo

En esta sección se estudia la capacidad del suelo para actuar como depósito de agua y el punto en el cual el cultivo llega a padecer de estrés hídrico al no poder disponer libremente del recurso hídrico, estas características se detallan a continuación:

2.1.2.1 Capacidad de campo.

Representa la capacidad de agua presente en el suelo después de haber sido mojado abundantemente, hasta haber alcanzado una saturación y se ha dejado drenar libremente; la muestra se toma en un lapso de 24 a 72 horas tras el periodo de humedecimiento evitando la evotranspiración (Silva, 2015).

2.1.2.2 Punto de marchitez permanente.

Representa la cantidad de agua que se encuentra fuertemente retenida por el suelo y de la cual el cultivo no puede disponer (Silva, 2015).

2.2 Requerimientos Hídricos y operación del cultivo

En este apartado se detalla cómo, parte del agua es aprovechada por el cultivo mientras que otra se disipa en el ambiente por efecto de evaporación.

2.2.1 Evaporación

Para (Arias, 2012) tras un periodo de lluvia o posteriormente haber aplicado un tipo de riego, parte del agua suministrada se desvanece por evaporación directa a través de la superficie del suelo. El agua perdida en términos de tanto por ciento es función de la magnitud y frecuencia de las aplicaciones de agua además de la fracción expuesta a la superficie del suelo.

Dentro de los parámetros climatológicos a tomar en cuenta para evaluar el proceso de evaporación se tiene: la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica, la velocidad del viento (Richard G. Allen).

2.2.2 Transpiración

La transpiración hace referencia a la evaporación del agua del suelo mediante el sistema vascular de la planta. El volumen de agua transpirada dependerá de factores como: la demanda evotranspirativa (evotranspiración potencia), la etapa de desarrollo del cultivo y la cantidad de agua disponible del suelo en la zona de crecimiento de las raíces (Arias, 2012).

2.2.3 Evotranspiración

Representa la adición entre la transpiración y el agua que se evapora del suelo, además es un factor preponderante para determinar la cantidad de agua requerida para conservar una adecuada humedad en el suelo y un nivel de salinidad óptimo durante el cultivo (Arias, 2012).

2.2.4 Evotranspiración de referencia (ET_o)

De acuerdo a (Richard G. Allen) representa la tasa de evotranspiración de una superficie de referencia que sucede sin marginación de agua. Dicha superficie corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características particulares. También establece que la evotranspiración del cultivo se realiza mediante la ecuación [1].

$$ET_c = ET_o * K_c \quad [1]$$

Donde:

ET_c : Evotranspiración del cultivo $\left[\frac{mm}{día}\right]$.

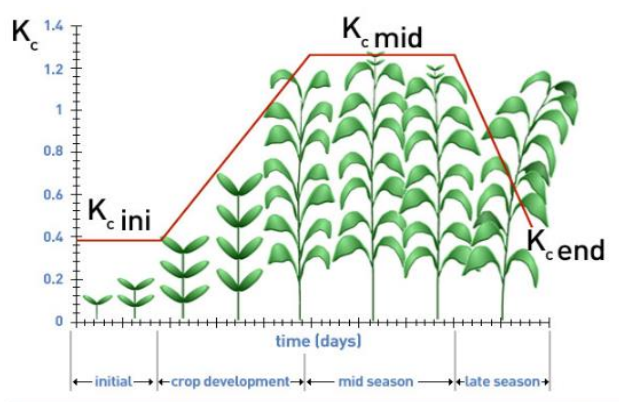
ET_o : Evotranspiración del cultivo de referencia $\left[\frac{mm}{día}\right]$.

K_c : Coeficiente del cultivo [*adimensional*].

Para (Arias, 2012) el coeficiente de cultivo (K_c) representa un factor de corrección determinado experimentalmente en diferentes lugares del mundo y toma valores distintos en función de la fase en que se encuentra cada cultivo alcanzando los valores máximos en el periodo de floración además integra las características fisiológicas y aerodinámicas del cultivo.

Figura 2

Curva típica del coeficiente de cultivo



Nota: Curva típica del coeficiente de cultivo, correspondiente al procedimiento del coeficiente único del cultivo. Tomado del Evotranspiración del cultivo guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (p.100). (Richard G. Allen)

2.2.5 Cálculo de la evotranspiración

Para el cálculo de la evotranspiración de referencia (ET_o) existen métodos abreviados menciona (Vargas, 2011) como el desarrollado por (Jensen, 1963) el cual toma en consideración parámetros como: la radiación solar, el promedio de temperatura

ambiente en un intervalo establecido y la altura (m.s.n.m) de la locación donde se aplicará (Garcia P. H., 2017) lo cual se expresa en la ecuación [2].

$$ET_o = C_T(T - T_X)R_S \left[\frac{mm}{día} \right] \quad [2]$$

Donde:

C_T : Representa un coeficiente de temperatura del aire constante para un área dada, y que se estima según las temperaturas máxima y mínima para el mes más cálido.

T : Es el promedio de temperatura ambiente en un intervalo establecido.

T_X : Es una constante de carácter regional que interpreta la intersección de la ecuación de carácter lineal con el eje de la temperatura.

R_S : Expresa la radicación solar diaria representada como lamina equivalente de evaporación.

El coeficiente C_T se calcula aplicando la ecuación [3]:

$$C_T = \frac{1}{38 - \frac{h}{152.5} + \frac{380}{e_2 - e_1}} \quad [3]$$

Donde:

e_2, e_1 : representan la presión del vapor a saturación en mm Hg o en milibares de acuerdo a la temperatura máxima y mínima del aire respectivamente, y se calcula de acuerdo a la ecuación [4].

$$e_2 = 6.108 * \exp\left(\frac{17,27+t}{t+237,3}\right) [mbar] \quad [4]$$

t : Temperatura máxima o mínima.

h : Altura de la localidad (m.s.n.m).

En tanto que el coeficiente T_X se determina mediante ecuación [5]:

$$T_x = -2.5 - 0.14(e_2 - e_1) - \frac{h}{550} \quad [5]$$

Para el cálculo de R_S se establece la ecuación [6] :

$$R_S = R_o \left(0.18 + 0.55 \frac{n}{N} \right) \left[\frac{mm}{día} \right] \quad [6]$$

Donde:

R_o : Radiación solar si no existiera atmosfera y toma los valores que se muestran en el Anexo 1.

n : Indica el número de horas de sol reales.

N : Representa el máximo teórico de horas de sol, estos valores se muestran en el Anexo 2.

2.2.6 Precipitación efectiva

Para realizar un adecuado plan de riego es necesario conocer el volumen de las lluvias y su frecuencia tomando en consideración que estas varían año tras año y que no toda la lluvia es aprovechable o efectiva parte de esta se pierde en forma de percolación profunda, evaporación o escorrentía (Arias, 2012).

2.2.7 Reposición

Según (Arias, 2012) la reposición puede expresarse como la diferencia entre la evotranspiración del cultivo y la precipitación efectiva, el resultado muestra la absorción de agua por las raíces como respuesta a las pérdidas en las hojas debido al proceso de transpiración, como se muestra en la ecuación [7].

$$Reposicion = ET_c \left(\frac{mm}{día} \right) - \text{presipitación efectiva} \left(\frac{mm}{día} \right) \quad [7]$$

2.3 Determinación del calendario de riego de los cultivos

Con la finalidad de obtener el valor más aproximado con respecto a los requerimientos hídricos de un cultivo para garantizar la producción óptima del mismo, se hace uso de los datos proporcionados por las estaciones meteorológicas, además se considera que no es necesaria la aplicación diaria de riego sino en intervalos de tiempo, dichos intervalos se denominan frecuencia de riego para lo cual se considera la capacidad de retención de agua del suelo en la zona radicular del cultivo (Arias, 2012).

2.3.1 Agua útil para el riego

En periodos de escasez de recurso hídrico un cultivo es capaz de extraer agua del punto de marchitez permanente lo que genera una condición denominada estrés hídrico donde el cultivo utiliza una excesiva cantidad de energía para cumplir la demanda evotranspiratoria lo que deriva también en una disminución de la productividad del cultivo (Arias, 2012).

La ecuación [8] representa el agua útil para riego.

$$AU = (Cc - Pmp) * Da * z \quad [8]$$

Donde:

AU : Agua útil o lámina total de agua, disponible para las plantas en la zona radicular [mm].

Cc : Contenido de humedad a capacidad de campo $\left[\frac{m^3}{m^3}\right]$.

Pmp : Contenido de humedad a punto de marchites permanente $\left[\frac{m^3}{m^3}\right]$.

Da : Densidad aparente del suelo $\left[\frac{gr}{m^3}\right]$.

z : Profundidad de la zona radicular [mm].

2.3.2 Lámina neta de riego

Representa la cantidad de agua que puede ser extraída fácilmente por las plantas y se calcula de acuerdo con la ecuación [9]:

$$L_n = umbral * AU \quad [9]$$

Donde:

L_n : Lámina neta [mm].

AU : Agua útil o lámina total de agua, disponible para las plantas en la zona radicular [mm].

$umbral$: Umbral de riego.

El umbral es un factor que indica la sensibilidad del cultivo a la escases de agua, factores climáticos y factores económicos, de acuerdo al tipo de cultivo sea este muy delicado o de un elevado valor económico como hortalizas o flores este factor adopta un valor entre 0.3 y 0.4 (30%-40%) (Arias, 2012).

2.3.3 Frecuencia de riego

Una vez que se determinan los valores citados anteriormente se procede a la obtención de la frecuencia de riego máxima con la ecuación [10] (Arias, 2012):

$$FR_{max} = \frac{L_n}{ET_C} \quad [10]$$

Donde:

FR_{max} : Frecuencia de riego máxima [días].

L_n : Lámina neta [mm].

ET_C : Evotranspiración del cultivo $\left[\frac{mm}{dia}\right]$.

La frecuencia de aplicación del riego se puede dividir en intervalos menores al calculado.

2.3.4 Lámina bruta de riego

Se calcula a través de la ecuación [11] (Arias, 2012):

$$L_b = \frac{ET_c * FR_{max}}{Ef} \quad [11]$$

Donde:

L_b : Lámina bruta de riego [mm].

FR_{max} : Frecuencia de riego máxima [días].

ET_c : Evotranspiración del cultivo $\left[\frac{mm}{día}\right]$.

Ef : Eficiencia del sistema de riego [%].

2.3.5 Volumen de riego

Representa el volumen de agua que será aplicada al cultivo y se calcula con la ecuación [12] (Arias, 2012):

$$V_{riego} = L_b * \text{área} \quad [12]$$

Donde:

V_{riego} : Volumen de riego a aplicar [litros].

L_b : Lámina bruta de riego [mm].

Área : Superficie cultivada [m^2].

2.4 Selección del sistema de riego

La Tabla 4 muestra una comparación entre los diferentes sistemas de riego y muestra las características que poseen cada uno de ellos.

Tabla 4

Comparación entre los diferentes sistemas de riego.

Ventajas e inconvenientes de los principales sistemas de riego				
	Riego por superficie	Riego por aspersión a alta presión	Riego por aspersión a baja presión	Riego por goteo
Costo de inversión	Bajo en terreno plano	Elevado	Elevado	Elevado
Necesidades energéticas (para bombeo)	Bajo o nulo	Elevado	Mediano	Bajo
Nivel técnico necesario para la operación y mantenimiento	Bajo	Mediano	Mediano	Elevado
Carga de trabajo para la operación	Elevado	Bajo	Mediano	Bajo
Eficiencia del riego	Baja (50 – 70%)	Elevada	De mediana a elevada	Elevada
Costo del riego (por hora de trabajo)	De bajo a mediano	Elevado	De mediano a elevado	Elevado
Comentarios	No conviene en terrenos arenosos o accidentados	Utilización muy flexible Posibles problemas fitosanitarios	Posibles problemas fitosanitarios	Conveniente para cultivos de alto valor agregado o con aguas salinas

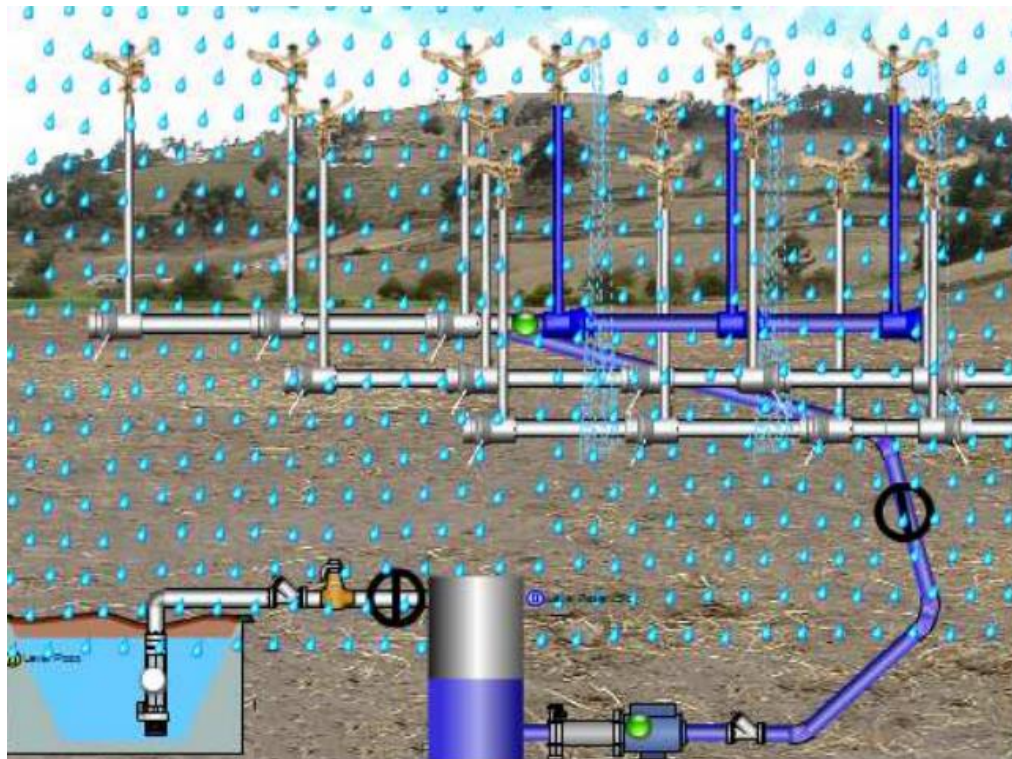
Nota: La tabla muestra las principales ventajas y desventajas de cada sistema de riego. Tomado de Manual práctico para el diseño de sistemas de minirriego (p.93). (Alocén, 2007)

2.4.1 Riego por aspersión

Este tipo de riego consiste en la aplicación de agua a los cultivos emulando la lluvia para ello se dispone de elementos denominados aspersores cuya característica principal es su presión de funcionamiento como se observa en la Figura 3 (Almazan, 2003).

Figura 3

Partes de un equipo de riego por aspersión



Nota: El gráfico muestra los componentes principales de un sistema de riego por aspersión. Tomado de Diseño de un sistema de turbo bombeo y riego por aspersión en la comunidad de San Francisco de Cunuguachay (p.36). (Hidrobo, 2011)

2.4.2 Elementos de un sistema de riego por aspersión

En esta sección se enumeran los componentes principales de un sistema de riego por aspersión y describe su función principal.

2.4.2.1 La bomba.

Su función principal es impulsar el agua desde el origen sea este un río, una acequia, un pozo o un embalse, garantizando los requerimientos de presión y caudal de los aspersores esta puede ser accionada por un motor eléctrico o de combustión (Gómez, 2010).

2.4.2.2 Las tuberías.

Permiten transportar el agua desde la bomba hasta los aspersores, de manera general se pueden clasificar en (Pereira, 2010):

Tubería principal. Puede ser de tipo fija enterrada o montada de manera superficial, existen también tuberías principales desplazables. Se fabrican generalmente en acero galvanizado, fibrocemento o plástico de alta densidad, en tanto que las tuberías móviles pueden ser de aluminio o PVC.

Ramales. Permiten el montaje de los aspersores, pueden ser fijos y desplazables.

2.4.2.3 Aspersores.

Son elementos diseñados para distribuir el agua en los cultivos mediante un hilo de agua que se pulveriza en pequeñas gotas. La disposición de los aspersores debe ser tal que cubra toda la parcela procurando que existan aspersores lo suficientemente próximos para que el agua se distribuya lo más homogéneamente posible en el suelo (Pereira, 2010). Se consideran dos factores fundamentales para la selección del aspersor la presión y el caudal de funcionamiento ya que estos son indicadores de la superficie que puede irrigar en una posición. De acuerdo a sus características los aspersores se pueden clasificar en (Alocén, 2007):

- De cabeza giratoria
- De giro rápido
- Gran cañón
- De giro lento
- De cabeza fija o estacionaria
- De boquilla

2.4.2.4 Accesorios y conexiones.

Estos pueden ser válvulas de pie, válvulas de paso, uniones, reducciones, codos giratorios, codos en línea, abrazaderas y ganchos, acoples simples y dobles, codos reversibles, elevadores, soportes, tapón final entre otros (Almazan, 2003).

2.5 Características del sistema de riego

En este apartado se muestra la disposición que pueden asumir los aspersores para garantizar un riego uniforme también se muestra las distancias recomendadas entre tuberías y entre aspersores.

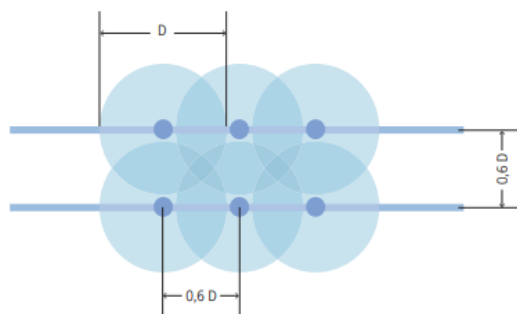
2.5.1 Espaciamiento entre aspersores y entre laterales

La distribución de agua por parte de los aspersores al cultivo puede ser afectada por el viento ya que distorsiona el perfil de distribución del aspersor para mitigar este efecto se recomienda utilizar la disposición de aspersores mostrada a continuación (Gómez, 2010):

2.5.1.1 Disposición en cuadrado.

Figura 4

Disposición de aspersores tipo cuadrada

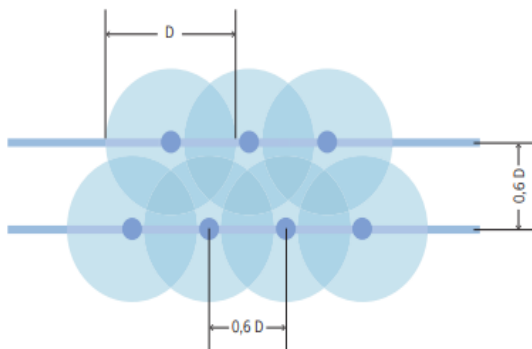


Nota: El gráfico muestra la separación recomendada entre aspersores y ramales de aspersión en marco cuadrado. Tomado de Manual de Riego para agricultores Módulo 3: Riego por Aspersión (p.29).(Gómez, 2010)

2.5.1.2 Disposición triangular o tresbolillo.

Figura 5

Disposición de aspersores tipo Triangular

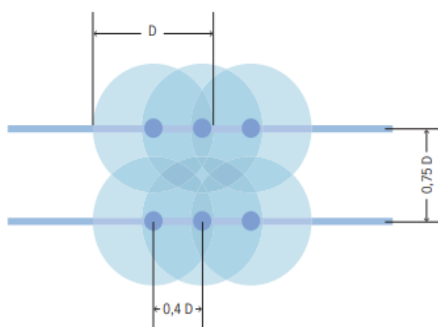


Nota: El gráfico muestra la separación recomendada entre aspersores y ramales de aspersión en marco triangular. Tomado de Manual de Riego para agricultores Módulo 3: Riego por Aspersión (p.29).(Gómez, 2010)

2.5.1.3 Disposición rectangular.

Figura 6

Disposición de aspersores tipo Rectangular



Nota: El gráfico muestra la separación recomendada entre aspersores y ramales de aspersión en marco rectangular. Tomado de Manual de Riego para agricultores Módulo 3: Riego por Aspersión (p.29).(Gómez, 2010)

2.5.2 Pluviosidad media del sistema

Este factor representa la cantidad de agua que distribuirá el aspersor en un periodo de tiempo si se dispersara el caudal emitido por el mismo en el área teóricamente irrigada. Dicho factor se calcula de acuerdo a la ecuación [13] (Arias, 2012):

$$Pms = \frac{227.12 * Q}{E_{Lat} * E_{Asp}} \quad [13]$$

Donde:

Pms : Pluviosidad media del sistema $\left[\frac{mm}{h}\right]$.

Q : Caudal del aspersor $[gpm]$.

E_{Lat} : Espaciamiento lateral entre aspersores $[m]$.

E_{Asp} : Espaciamiento entre aspersores $[m]$.

Dentro de los valores recomendados para la pluviosidad media del sistema se tiene que no debe ser superior a 3 o 4 $\left[\frac{mm}{h}\right]$ (Arias, 2012).

2.5.3 Tiempo máximo permisible de riego

Representa el tiempo estimado para completar un periodo de riego y se representa con la ecuación [14] (Arias, 2012).

$$t_r = \frac{L_b}{Pms} \quad [14]$$

Donde:

t_r : Tiempo de riego $[h]$.

L_b : Lámina bruta por riego $\left[\frac{mm}{riego}\right]$.

2.6 Hidráulica

En esta sección se estudia los factores que intervienen en la selección y dimensionamiento de la bomba la cual atenderá los requerimientos hídricos del cultivo considerando las pérdidas por conducción del fluido a través de las tuberías.

2.6.1 Equipo de bombeo

Es la parte principal de un sistema de riego, debido a que es el encargado de aportar energía al fluido a fin de conseguir darle movimiento (Almazan, 2003).

2.6.1.1 Aspectos para la selección de la bomba.

Dentro de los parámetros que se debe considerar para la selección de la bomba se establecen los siguientes (Almazan, 2003):

- El volumen de agua a impulsar
- La altura de succión
- La presión total de la bomba
- La altura de descarga de la bomba
- La presión requerida por los aspersores
- Las pérdidas por conducción
- Energía disponible

2.6.1.2 Tipos de bombas.

En función de la disposición del eje se clasifican en:

- **Bombas de eje horizontal**

Son utilizadas para impulsar aguas superficiales es decir de embalses, canales, pozos de poca profundidad, etc. Debido a que se sitúa sobre el nivel de agua es indispensable mantener llena la tubería de succión dicha operación se denomina cebado.

- **Bombas de eje vertical**

Son principalmente utilizadas para bombear agua de pozos profundos

- **Bombas centrífugas**

En este tipo de bombas el fluido ingresa por el rodete en el centro y es impulsada en dirección radial por efecto de la fuerza centrífuga (Gómez, 2010).

2.6.2 El Caudal

La ecuación [15] representa el volumen de agua que circula a través de una sección transversal en un determinado tiempo (Alocén, 2007):

$$Q = V * S \quad [15]$$

Donde:

Q : es el caudal $\left[\frac{m^3}{h}\right]$.

V : es la velocidad media del fluido en $\left[\frac{m}{s}\right]$.

S : es la sección transversal

2.6.3 Carga Dinámica Total

La ecuación [16] representa la carga hidráulica que tendrá que abastecer la bomba y su análisis parte de la Ecuación de Bernoulli (Avedaño, 2004):

$$CDT = H_s + H_f + h_f + H_o + H_e \quad [16]$$

Donde:

CDT : Carga dinámica total de bombeo $[m]$.

H_s : Distancia vertical que existe entre el nivel de agua en la fuente y el eje de la bomba $[m]$.

H_f : Pérdidas por conducción $[m]$.

h_f : Pérdidas por accesorios $[m]$.

H_o : Presión de trabajo del aspersor [m].

H_e : Altura del soporte del aspersor [m].

2.6.4 Pérdidas en el sistema de tuberías

En esta sección se estudia las pérdidas generadas tanto por el transporte del fluido en tuberías principales o de conducción, así como las pérdidas ocasionadas por la utilización de codos, válvulas, etc.

2.6.4.1 Pérdidas primarias.

La ecuación [17] representa la pérdida de energía de un flujo hidráulico por el contacto de la tubería con el fluido, se presentan principalmente en tramos de tubería en donde su sección no varía (Mataix, 1986):

$$H_f = \lambda \frac{L \cdot v^2}{2g \cdot D} \quad [17]$$

Donde:

H_f : Pérdidas primarias [m].

λ : Coeficiente de pérdida de carga primaria [*adimensional*].

L : Longitud de la tubería [m].

v : Velocidad del fluido $\left[\frac{m}{s}\right]$.

g : Aceleración de la gravedad $\left[\frac{m}{s^2}\right]$.

D : Diámetro de la tubería [m].

El coeficiente de pérdida de carga primaria es función del número de Reynolds Re y la rugosidad relativa $\frac{K}{D}$, para la determinación del coeficiente de pérdida de carga primaria se puede utilizar el diagrama de Moody, estos conceptos se amplían a continuación.

2.6.4.1.1 Número de Reynolds.

Permite establecer la condición en la que fluye un fluido, se considera flujo laminar si $Re \leq 2000$ y flujo turbulento si $Re \geq 4000$; y se calcula de acuerdo a la ecuación [18] (Mataix, 1986):

$$Re = \frac{v * D * \rho}{\eta} \quad [18]$$

Donde:

Re : Número de Reynolds [*adimensional*].

v : Velocidad del fluido $\left[\frac{m}{s}\right]$.

D : Diámetro de la tubería [*m*].

ρ : Densidad del fluido $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$.

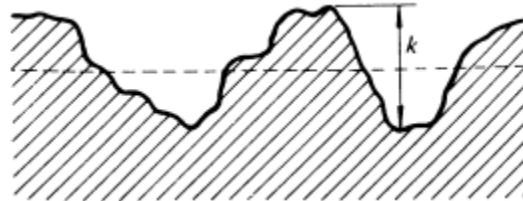
η : Viscosidad del fluido $\left[\frac{kg}{ms}\right]$.

2.6.4.1.2 Rugosidad absoluta de los materiales.

Representa las irregularidades presentes en el interior de las tuberías que transportan fluidos (Mataix, 1986).

Figura 7

Rugosidad absoluta k



Nota: La figura muestra el aspecto de una tubería rugosa macroscópicamente y la rugosidad absoluta k tiene una dimensión lineal. Tomado de Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas (p.209) (Mataix, 1986).

Los valores del coeficiente de rugosidad absoluta de diferentes materiales se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5

Coeficiente de rugosidad absoluta de materiales.

Rugosidad Absoluta de Materiales	
Material	<i>k</i> (mm)
Plástico (PE, PVC)	0.0015
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	0.01
Tubos estirados de acero	0.0024
Tubos de latón o cobre	0.0015
Fundición revestida de cemento	0.0024
Fundición centrifugada	0.003

Nota: La tabla muestra el coeficiente de rugosidad absoluta de materiales para tuberías más comunes tomado de (Garcia H. , 2011).

2.6.4.1.3 Diagrama de Moody.

Son un conjunto de curvas logarítmicas que permiten estimar el coeficiente de pérdida de carga primaria y así calcular las pérdidas primarias en tuberías teniendo en consideración el material de la tubería su diámetro y el número de Reynolds (Mataix, 1986).

2.6.4.2 Pérdidas por accesorios

Este tipo de pérdidas se presenta debido a variaciones de sección y dirección en la tubería dichos cambios pueden ser producidos por elementos como válvulas, diafragmas, codos, etc. Estas pérdidas se calculan con la ecuación [19] (Mataix, 1986):

$$h_f = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad [19]$$

Donde:

h_f : Pérdidas por accesorios o pérdidas secundarias [m].

ζ : Coeficiente de pérdida de carga secundaria [adimensional].

v : Velocidad media en la tubería $\left[\frac{m}{s}\right]$.

g : Aceleración de la gravedad $\left[\frac{m}{s^2}\right]$.

2.6.5 Potencia requerida por la bomba

Representa la energía mecánica que transfiere la bomba al fluido con la cual se eleva un determinado caudal hasta una altura manométrica determinada, para calcular la potencia de la bomba se utiliza la ecuación [20] (Mataix, 1986):

$$P_a = \frac{Q \cdot \rho \cdot g \cdot H}{\eta_{Tot}} \quad [20]$$

Donde:

P_a : Potencia requerida por la bomba [W]

Q : Caudal total $\left[\frac{m^3}{s}\right]$.

ρ : Densidad del fluido $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$.

g : Aceleración de la gravedad $\left[\frac{m}{s^2}\right]$.

H : Altura útil, carga dinámica total [m].

η_{Tot} : Rendimiento total de la bomba [%].

2.6.6 Potencia requerida por el motor

La potencia del motor que accionará la bomba depende de la eficiencia de la transmisión mecánica y potencia de la bomba, se calcula de acuerdo a la ecuación [21]:

$$P_m = \frac{P_a}{E_f} \quad [21]$$

P_m : Potencia del motor

E_f : Eficiencia de la transmisión mecánica

2.7 Sistema fotovoltaico

En la actualidad algunos países de América latina están cerca de lograr una red eléctrica de energía renovable completa, utilizando una fusión entre energía hidroeléctrica y energías renovables no convencionales. Como ejemplo son Paraguay, Costa Rica y Uruguay, países que en la actualidad satisfacen más del 90% de sus demandas de energía eléctrica utilizando sistemas híbridos de energía renovable (Mark, 2017).

2.7.1 Radiación solar

La radiación solar, es un término general para la radiación electromagnética emitida por el sol, se puede capturar y convertir en formas útiles de energía, como calor y electricidad, aplicando diferentes tecnologías (Wald, 2007).

La radiación solar que incide sobre la superficie de la tierra varía respecto al sistema geográfico, época del año, día y hora. (Vaca & López, 2019). Los rayos provenientes del sol llegan a la superficie de la tierra con diferentes intensidades que se clasifican de acuerdo a la longitud de onda. Los gases atmosféricos, el vapor de agua, moléculas de aire, nubes de polvo, contaminación, incendios forestales entre otros, obstruyen una gran parte de la radiación solar (Venegas, Villicaña, & Arrieta, 2015).

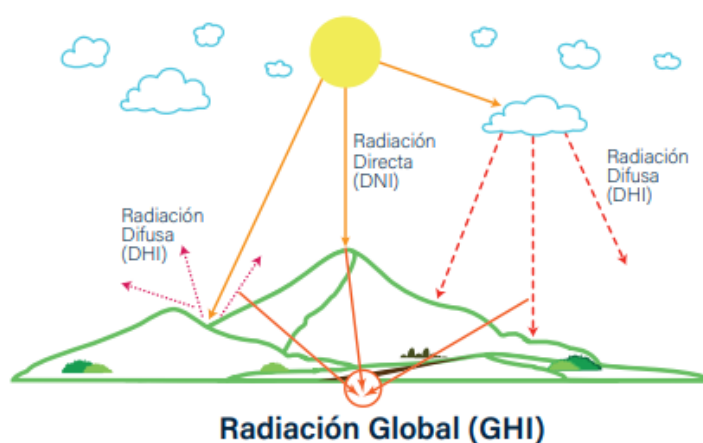
Como se muestra en la Figura 8, la radiación solar que atraviesa sin la obstrucción de la atmosfera se conoce como irradiación normal directa (DNI), representada en la ecuación [22], mientras que aquella que ha sido obstruida por

efectos de atmosfera o reflejada por la superficie de la tierra se conoce como irradiación horizontal difusa (DHI), y la suma de estas irradiaciones se conoce como irradiación global horizontal (GHI) (Vaca & López, 2019).

$$GHI = DHI + DNI \quad [22]$$

Figura 8

Diagrama de radiación solar



Nota: La figura muestra el resultado de la radiación global. Tomado de Mapa solar del ecuador (p.2), (Vaca & López, 2019)

2.7.2 Recurso solar en Ecuador

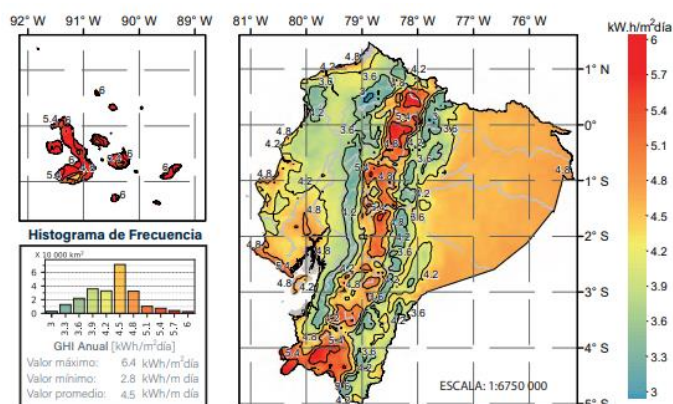
Ecuador al encontrarse sobre la línea ecuatorial, debería tener un recurso solar casi constante, pero la presencia de la cordillera de los Andes causa variedad de microclimas en el país por lo cual provoca la variabilidad el recurso solar en diferentes regiones del país (Vaca & López, 2019).

La irradiación global horizontal anual sobre el Ecuador varía desde 2.9 kWh/m² día a 6.3 kWh/m² día, las zonas ubicadas en elevada altitud tienen niveles de radiación mayores, mientras las regiones costeras y orientales cuentan con menor radiación (Vaca & López, 2019).

La radiación en Ecuador es considerablemente suficiente según, (Cevallos & Ramos, 2018) sugieren que una radiación de $3.8 \frac{kWh}{m^2}$ día es viable para desarrollar un proyecto fotovoltaico. En la Figura 9 se muestra, el mapa solar del Ecuador 2019 donde se observa que aproximadamente el 75% de la irradiación global horizontal anual muestra niveles de irradiación por encima $3.8 \frac{kWh}{m^2}$ día.

Figura 9

Mapa solar del Ecuador 2019



Nota: La figura muestra el mapa de radiación solar en Ecuador. Tomado de Mapa solar del Ecuador (p.6), (Vaca & López, 2019)

2.7.3 Photovoltaic Geographical Information System PVGIS

Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), fue desarrollado hace aproximadamente 10 años por el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea. PVGIS enfoca su investigación en la evaluación de recursos solares, estudios de rendimiento fotovoltaico y la difusión de conocimientos y datos sobre el rendimiento de la radiación solar. Gran parte de los datos que proporciona PVGIS han sido calculados mediante imágenes satelitales, por lo tanto, se tiene información para cualquier localización en el mundo con una resolución horaria (Tataglia, 2019).

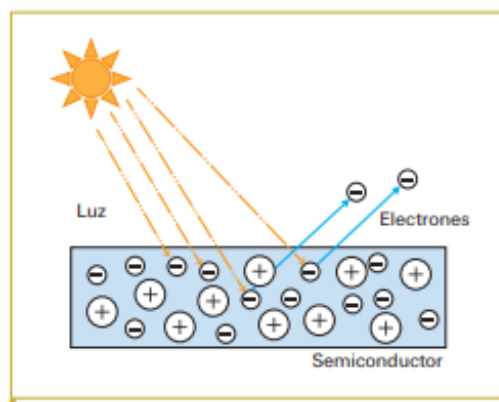
2.7.4 Celda fotovoltaica

Las celdas fotovoltaicas son dispositivos formados por materiales semiconductores, los cuales, en función de condiciones externas como la luz o la temperatura, desprenden electrones a medida que los rayos de luz inciden sobre ellos, de esta manera producen energía para aplicaciones electrónicas, como la termoeléctrica, la fotocatalisis y la fotovoltaica (Rodríguez, De Moure, & Quiñones , 2020).

El efecto fotovoltaico no es suficiente para liberar electrones, también es necesaria la presencia de voltaje para que los electrones liberados puedan ser direccionados, la forma más simple de conseguirlo es uniendo dos semiconductores con características electrónicas diferentes, como se observa en la Figura 10. Uno de los semiconductores debe tener exceso de electrones y el otro debe presentar una deficiencia de electrones (Rodríguez, De Moure, & Quiñones , 2020).

Figura 10

Efecto fotovoltaico sobre un semiconductor



Nota: La figura muestra cómo actúan los semiconductores en presencia de radiación solar.

Tomado de energía solar fotovoltaica (p.3) (Rodríguez, De Moure, & Quiñones , 2020).

2.7.5 Tecnologías en Paneles Fotovoltaicos

2.7.5.1 Paneles Monocristalinos

Se fabrican a partir de silicio puro fundido y se dopan con boro, el proceso para llegar a la mono cristalización requiere de mucho tiempo y energía, es por esta razón que su precio es mayor respecto a los paneles policristalinos, presentan un color azul oscuro, debido a la pureza de sus materiales, su rendimiento teórico es del 25% y el real llega hasta el 18% (Romero, 2015).

2.7.5.2 Paneles Policristalinos

La diferencia con respecto a los paneles monocristalinos es el proceso de fabricación principalmente en la etapa de enfriamiento, ya que en su solidificación se producen múltiples cristales, su rendimiento real es máximo 14%, pero su costo de producción es más bajo (Romero, 2015).

2.7.5.3 Paneles Bifaciales

La principal característica de los paneles fotovoltaicos bifaciales, es que pueden producir más energía que los policristalinos, ya que ambos lados del panel tienen la capacidad de absorber la radiación solar. Esto se presenta cuando la superficie del suelo cerca u otro material artificial tiene características muy reflectantes (Appelbaum, 2016).

2.7.5.3 Paneles orgánicos

Poseen tiempos de fabricación rápidos, son más ecológicos, cumpliendo con el objetivo principal de la energía fotovoltaica reducir la huella de carbono, acorta los tiempos de recuperación del carbono en comparación con los paneles a base de silicio durante la producción de una célula solar, su principal desventaja es sus impactos en el ciclo de vida que está entre el 39 y 89% por debajo del silicio junto con los tiempos de

recuperación de energía y carbono tan cortos entre 118 días y 220 respectivamente (Tsang, Sonnemann, & Bassani, 2016).

2.8 Sistema de control

En este apartado se procede a describir diferentes sistemas tecnológicos enfocados en sistemas de precisión agrícolas, y técnicas de control propios de sistemas de riego.

2.8.1 Agricultura de precisión

La agricultura de precisión es un sistema que maneja la variabilidad espacio-temporal, su principal objetivo es maximizar el rendimiento de producción y reducir el costo de inversión, con gran impacto ambiental (FCCyT, 2018).

La agricultura de precisión es una estrategia que permite gestionar la utilización de tecnologías para influir en la toma de decisiones relacionadas con la producción de cultivos (Li & Chung, 2015).

Cuando la tecnología, se encuentra integrada en un proceso del cultivo, se logra incrementar de manera importante su producción, como la agricultura es una actividad económica básica para la subsistencia humana y la tecnología permite al aumento de rendimiento en la producción, se convierte en la principal motivación para su uso (Alcaraz & Jiménez, 2018).

La diferencia de la agricultura tradicional con la de precisión, es que la primera considera las buenas prácticas de producción como condiciones homogéneas, mientras que la agricultura de precisión está en constante avance para brindarle al cultivo lo necesario para su mayor rendimiento disminuyendo los riesgos en producción (Alcaraz & Jiménez, 2018).

2.8.2 Tecnologías asociadas en agricultura de precisión

Existen diferentes tecnologías asociadas a este tipo de agricultura. Sistemas de posicionamiento global. En la agricultura de precisión con el sistema de posicionamiento global (GPS) se ha podido registrar la variabilidad espacio-temporal para poder controlar con exactitud y precisión la diversa maquinaria agrícola.

Sistemas de información geográfica. En la agricultura de precisión permiten analizar la información obtenida mediante distintos sensores remotos para tomar decisiones sobre el manejo espacio-temporal. Son usados para almacenar, visualizar y analizar datos referidos geográficamente (Cox, 2002).

Los sensores remotos son sistemas remotos que entregan información del cultivo, sin tener contacto físico con éste. Se emplean en la recolección de datos sobre la administración de agua de riego, aplicación de fertilizantes, contenido de materia orgánica, entre otros (FCCyT, 2018).

Monitores de rendimiento y aplicación. Obtienen información sobre la cantidad de producción que hay en una unidad de tiempo y la calidad del cultivo, también son usados para la dosificación de agua en sistemas de riego, aplicación de fertilizantes y agroquímicos (FCCyT, 2018).

Maquinaria inteligente. Este campo se encarga del desarrollo de maquinaria agrícola inteligente, como la capaz de recolectar frutos, y que pueda distinguir entre maduros e inmaduros, así como la automatización de la siembra, este campo está en desarrollo actualmente y se enfoca en la inteligencia artificial (FCCyT, 2018).

2.8.3 Tecnologías en sistemas de riego

Existen diferentes tecnologías asociadas a sistemas de riego, basadas en calendarios de riego, en mediciones en tiempo real, estaciones meteorológicas, las

cuales se enfocan en la reducción de mano de obra, incremento en la eficiencia de riego, control de costo y producción y como objetivo principal buscan mejorar la productividad de los cultivos.

(Collado, 2017) en su estudio propone un sistema de riego inteligente que permite minimizar el consumo total de agua en los sistemas de riego, mientras se satisface las necesidades hídricas de la planta, se propone un algoritmo que toma en consideración las necesidades reales de agua de las plantas y características ambientales que las rodea.

Es necesario conocer las características del cultivo a estudiar para encontrar las necesidades hídricas de cada cultivo, así como identificar las variables ambientales que permiten una mejor dosificación del recurso, de la misma manera es importante realizar un estudio para definir el riego más óptimo para cada cultivo y diseñar un sistema de control.

Generalmente los componentes de un sistema de riego inteligente son:

Transductores o sensores: Tensiómetros, hidrómetros, termocuplas, fotoceldas, manómetro, entre otros.

Actuadores: Bombas, interruptores, electroválvulas.

Unidades de control: Microcontroladores, programadores, ordenadores.

Sistema de comunicación: Protocolos de comunicación.

2.8.4 Lógica difusa en sistemas de riego

La lógica difusa forma parte de los controladores inteligentes, permite trabajar con información imprecisa, el uso de lógica difusa en sistemas de riego permite evaluar diferentes parámetros climáticos con el fin de decidir la cantidad de agua que se puede suministrar a un cultivo (Fierro, 2018).

En la Tabla 6 se muestran diferentes proyectos de sistemas de riego con controladores difusos, se puede observar que la mayoría tiene como datos de entrada variables climáticas, con diferentes controladores, así como también se muestran trabajos simulados con la misma lógica de control. Permitiendo asegurarnos que esté tipo de sistemas de control son los más utilizados en sistemas de riego, ya que se ajusta a las necesidades del productor.

Tabla 6

Proyectos en sistemas de riego inteligente

Tema	Ciudad	Control	Controlador	Características	Año
Sistema de riego inteligente borroso	MADRID	Control difuso	Simulador JAVA	Entradas: Temperatura, humedad, Percepción Solar. Salida: Tiempo de Riego	2007
Diseño de un sistema de riego inteligente para cultivos de hortalizas basado en fuzzy logic en la granja la pradera de la universidad técnica del norte.	IBARRA	Control difuso	Matlab	Entradas: Temperatura Ambiente, Humedad Ambiente, Precipitación, Humedad del suelo. Salida: Tiempo de riego.	2019
Sistemas Inteligentes de Irrigación en la Agricultura.	CUBA	Lazo cerrado	PLC	Entrada: sensor de humedad. Salida: Variador de frecuencia	2016
Generación y simulación de un modelo para mejorar los criterios de riego en los cultivos de mini clavel de la sabana de Bogotá mediante técnicas de inteligencia artificial	BOGOTA	Sistema difuso-red neuronal	Matlab	Entradas: Radiación solar, temperatura del aire, velocidad del viento. Salida tiempo de riego	2016

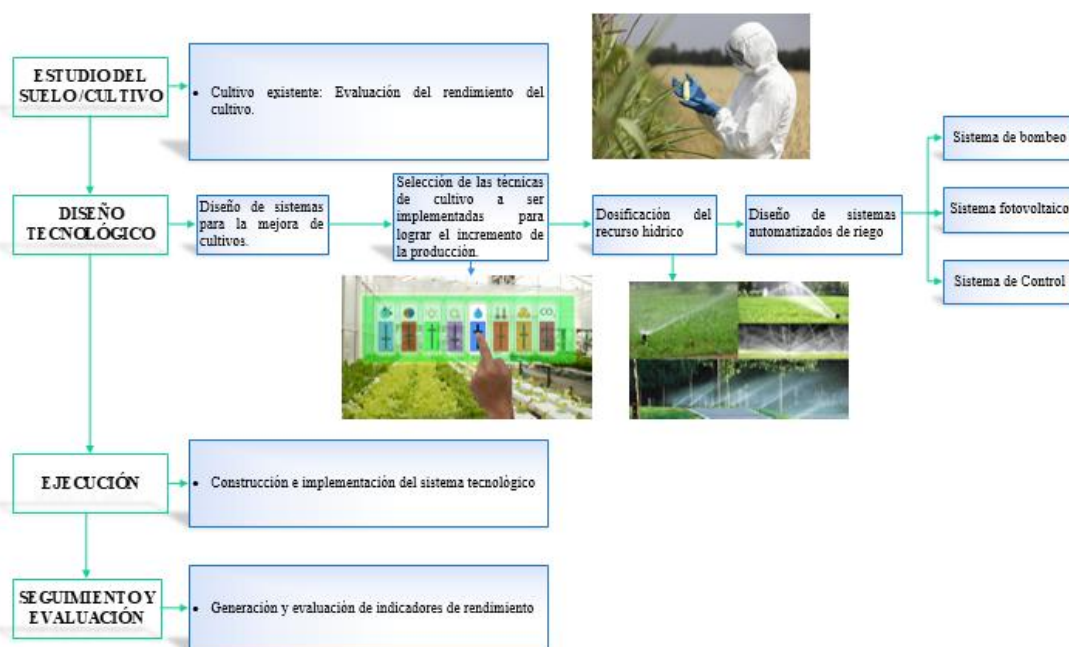
CAPÍTULO III

3. Metodología

En la Figura 11, se detalla la metodología propuesta, en donde se considera como etapa inicial el estudio del suelo y cultivo, para obtener como resultados un sistema tecnológico adecuado para incrementar el rendimiento del cultivo.

Figura 11

Metodología propuesta, para incrementar el rendimiento de un cultivo.



3.1 Estudio del suelo/cultivo

En un cultivo existente se procede a evaluar el desempeño del mismo y la tecnología usada bajo la perspectiva de gradientes ambientales. Como componentes de este estudio se toman alternativas económicamente viables, biológica y tecnológicamente disponibles y posteriormente se realizan pruebas de sistemas de cultivo.

3.2 Diseño Tecnológico

3.2.1 Diseño de sistemas para la mejora de cultivos

En esta etapa se considera el desarrollo e implementación de tecnologías que permitan alcanzar el incremento del rendimiento de los cultivos cumpliendo las políticas medio ambientales establecidas por los gobiernos locales.

3.2.2 Selección de las técnicas de cultivo a ser implementadas para lograr el incremento de la producción

En esta etapa se evalúan las técnicas de cultivo, que de manera general comprenden la selección de la variedad, frecuencia, estacionalidad de siembra, fertilización, manejo del nivel de agua en función del cultivo, protección y cosecha. Estas actividades son llevadas a cabo con el soporte de un profesional agrónomo, haciendo énfasis en el manejo adecuado del recurso hídrico debido a que es la manera más óptima de incrementar el rendimiento de los cultivos.

3.2.3 Dosificación correcta del recurso hídrico

Para la correcta dosificación del recurso hídrico se debe conocer, los parámetros de riego y el tipo de regadío. Para escoger el tipo de sistema de riego, se lo hace por medio de indicadores de sostenibilidad, los cuales influyen la adaptación a los cultivos, topografía del terreno, el tipo de cultivo, requerimiento de energía para suministrar el agua, consumo de agua, calidad de agua, control de agua aplicada, riesgo ambiental entre otros.

3.2.4 Diseño del sistema automatizado de riego

Para la aplicación de la ingeniería de diseño del sistema automatizado de riego se establecen los siguientes aspectos: diseño del sistema de bombeo, sistema fotovoltaico y sistema de control.

3.3 Ejecución

Con los parámetros definidos en la etapa del diseño, se procede a la selección de los componentes del sistema de control del sistema de riego. Luego se construye, implementa y opera el sistema, considerando que para mejorar el funcionamiento del riego se incluye la participación de los usuarios a lo largo de todas las etapas que involucra el desarrollo del proyecto.

3.4 Seguimiento y evaluación

Para evaluar el nivel de logro del proyecto. Se realiza una comparación entre un cultivo antes de ser intervenido con los resultados alcanzados luego de la intervención. Se consideran varias variables para medir el rendimiento como: altura de la planta, frecuencia de corte, número de frutos por planta, diámetro del tallo, entre otras.

CAPÍTULO IV

4. Diseño

4.1 Introducción

La metodología desarrollada en el presente trabajo de investigación fue implementada en una parcela de 1173 m² localizada en la parroquia urbana Ignacio Flores (La Laguna), del cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi, ubicada en la sierra al centro de la provincia y a 2,1 Km de la vía Panamericana sur Latacunga – Salcedo, como se observa en la Figura 12. Dicha parcela no cuenta con suministro de energía eléctrica, pero si cuenta con abundante agua de vertientes naturales además presenta una ligera pendiente.

Latitud -0.935061

Longitud -78.603145

Figura 12

Localización geográfica de la parcela intervenida.



Nota: Mapa geográfico de la superficie intervenida Tomada de (Earth, 2020)

Seleccionada la superficie de trabajo se procede con la aplicación de la primera fase de la metodología desarrollada, el estudio del cultivo, la cual arrojó como resultado que en la parcela se cultiva alfalfa con métodos intuitivos por ejemplo la aplicación del recurso hídrico en verano se realiza con una bomba de caudal de 5HP y un sistema de riego por aspersión que no considera parámetros técnicos lo que da como resultado un bajo rendimiento del cultivo. Además, se debe considerar que el combustible para alimentar la motobomba es almacenado en una bodega que no cuenta con prestaciones de seguridad

Como parte del estudio del suelo se pudo determinar que presenta las características que se resumen en la Tabla 7:

Tabla 7

Características del suelo

Textura	Valor	Unidad
Cc	0.09	$\frac{cm^3 \text{ agua}}{cm^3 \text{ suelo}}$
Pmp	0.04	$\frac{cm^3 \text{ agua}}{cm^3 \text{ suelo}}$
Humedad	40	%
Densidad aparente	1.3	$\frac{gr}{cm^3}$
Densidad real		
Porosidad		%

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la primera etapa se procedió con la fase de diseño tecnológico que consiste en la búsqueda de herramientas tecnológicas que permitan incrementar el rendimiento del cultivo, es así que la investigación derivó en la aplicación eficiente del recurso hídrico en conjunto con herramientas de control moderno y energía renovable con las cuales se busca incrementar el rendimiento del cultivo

Esta etapa se dividió en 3 subetapas las cuales se detallan a continuación

4.2 Diseño Agronómico

En esta etapa se determinarán los requerimientos hídricos del cultivo mediante el cálculo de un calendario de riego el cual muestra el volumen de agua que requiere el cultivo, los tiempos de riego, caudal total y la presión total que serán la base para el diseño hidráulico.

La Tabla 8 muestra la duración de cada etapa de cultivo y la profundidad radicular alcanzada.

Tabla 8

Parámetros del cultivo

Cultivo: ALFALFA			
Kc:		Días	Z(mm)
Inicial	0,4	5	100
Desarrollo	1,05	10	275
Intermedio	1,2	10	800
Final	1,15	5	800

Nota: La tabla muestra los parámetros de cultivo, Tomado del Evotranspiración del cultivo guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (p.107). (Richard G. Allen)

La Tabla 9 muestra los valores de capacidad de campo, densidad aparente y punto de marchitez del suelo.

Tabla 9

Propiedades físicas del suelo

Propiedad	Valor
Cc	0,09(m ³ /m ³)
Da	1,3(gr/cm ³)

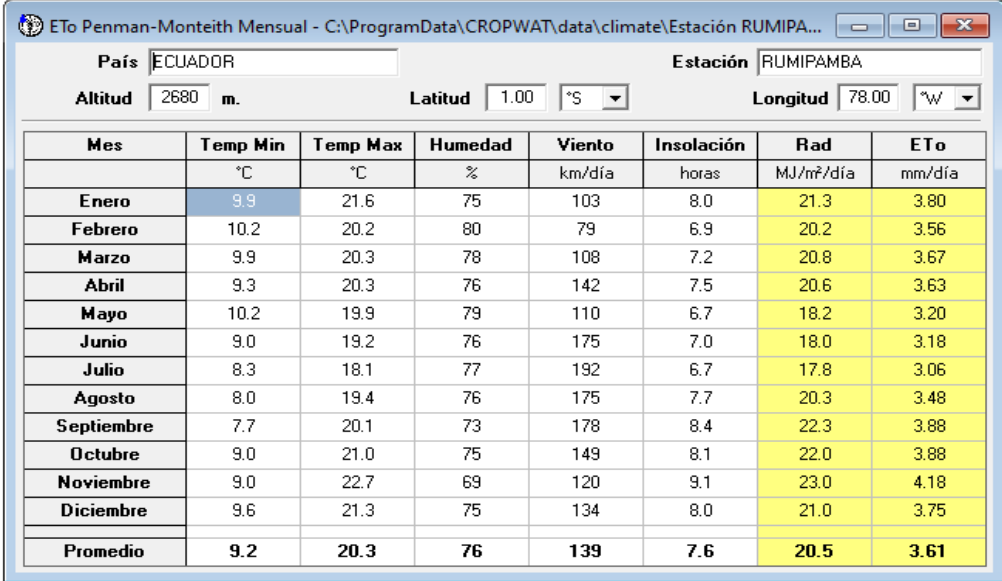
Propiedad	Valor
Pmp	0,04(m3/m3)

4.2.1 Cálculo del calendario de riego

Para determinar la evotranspiración de referencia se utiliza el software CROPWAT en el cual se ingresan los datos de la estación Agrometeorológica Rumipamba localizada en Salcedo, los resultados se muestran en la Figura 13.

Figura 13

Evotranspiración de referencia.



The screenshot shows the 'ETo Penman-Monteith Mensual' software interface. The window title is 'ETo Penman-Monteith Mensual - C:\ProgramData\CROPWAT\data\climate\Estación RUMIPA...'. The interface includes input fields for 'País' (Ecuador), 'Estación' (RUMIPAMBA), 'Altitud' (2680 m), 'Latitud' (1.00 °S), and 'Longitud' (78.00 °W). Below these fields is a table with the following data:

Mes	Temp Min °C	Temp Max °C	Humedad %	Viento km/día	Insolación horas	Rad MJ/m²/día	ETo mm/día
Enero	9.9	21.6	75	103	8.0	21.3	3.80
Febrero	10.2	20.2	80	79	6.9	20.2	3.56
Marzo	9.9	20.3	78	108	7.2	20.8	3.67
Abril	9.3	20.3	76	142	7.5	20.6	3.63
Mayo	10.2	19.9	79	110	6.7	18.2	3.20
Junio	9.0	19.2	76	175	7.0	18.0	3.18
Julio	8.3	18.1	77	192	6.7	17.8	3.06
Agosto	8.0	19.4	76	175	7.7	20.3	3.48
Septiembre	7.7	20.1	73	178	8.4	22.3	3.88
Octubre	9.0	21.0	75	149	8.1	22.0	3.88
Noviembre	9.0	22.7	69	120	9.1	23.0	4.18
Diciembre	9.6	21.3	75	134	8.0	21.0	3.75
Promedio	9.2	20.3	76	139	7.6	20.5	3.61

Para el desarrollo del calendario de riego se utilizó la herramienta de office, Excel con la cual se realiza un cálculo de todos los meses semana por semana, como resultado se determinó que el mes con mayor demanda de recurso hídrico es junio, los cálculos de este mes se detallan a continuación:

Con los valores de evotranspiración de referencia se procede al cálculo de la evotranspiración del cultivo tomando el valor máximo de K_c

$$ET_c = ET_o * K_c$$

$$ET_c = 3.18 * 1.2$$

$$ET_c = 3.82 \frac{mm}{día}$$

Cálculo del agua útil, al ser un cultivo existente z toma el máximo valor de profundidad de raíz, por lo tanto:

$$AU = (Cc - Pmp) * Da * z$$

$$AU = (0.09 - 0.04) * 1.3 * 800$$

$$AU = 52mm$$

A continuación, se procede con el cálculo de la Reposición para lo cual se requiere el valor de precipitación efectiva este valor se calcula también con el software CROPWAT y los datos de precipitación de la estación Agrometeorológica Rumipamba, la Figura 14 se muestran los valores de precipitación ingresados al software para obtener el valor de precipitación efectiva mensual.

Figura 14

Valores de precipitación efectiva.

	Precipit. mm	Prec. efec mm
Enero	9.6	9.5
Febrero	98.8	83.2
Marzo	36.3	34.2
Abril	44.0	40.9
Mayo	69.1	61.5
Junio	4.8	4.8
Julio	14.0	13.7
Agosto	14.9	14.5
Septiembre	6.6	6.5
Octubre	34.4	32.5
Noviembre	33.0	31.3
Diciembre	27.1	25.9
Total	392.6	358.4

A continuación, se presenta el procedimiento para el cálculo del valor de la reposición.

$$\text{Reposicion} = ET_c \left(\frac{\text{mm}}{\text{día}} \right) - \text{presipitación efectiva} \left(\frac{\text{mm}}{\text{día}} \right)$$

$$\text{Reposicion} = 3.82 - 0.2$$

$$\text{Reposicion} = 3.7 \frac{\text{mm}}{\text{día}}$$

Con la finalidad de determinar el volumen de agua requerida por el cultivo, se calcula en primer lugar la lámina neta posteriormente la frecuencia de riego y finalmente la lámina bruta de la siguiente manera:

A continuación, se presenta el procedimiento para el cálculo de la lámina neta

$$L_n = \text{umbral} * AU$$

$$L_n = 0.3 * 52$$

$$L_n = 15,6 \text{ mm}$$

El valor calculado de lámina neta se utiliza para la determinación de la frecuencia máxima de riego como se muestra a continuación.

$$FR_{max} = \frac{L_n}{ET_c}$$

$$FR_{max} = \frac{15,6}{3,82}$$

$$FR_{max} = 4.083$$

Es decir, se debe aplicar un periodo de riego cada cuatro días, una vez seleccionado el periodo de riego se procede con el cálculo de la lámina bruta

$$L_b = \frac{ET_c * FR_{max}}{Ef}$$

$$L_b = \frac{3.82 * 4.083}{0.75}$$

$$L_b = 20.8 \text{ mm}$$

Determinado el valor de la lámina bruta se procede finalmente al cálculo del volumen de riego es decir el volumen de agua que requiere el cultivo semana a semana.

$$V_{riego} = L_b * \text{área}$$


$$V_{riego} = 20,8 * 1173$$

$$V_{riego} = 24.4 \frac{m^3}{semana}$$

Para calcular la pluviometría del sistema se parte de un proceso iterativo que relaciona la presión de operación del aspersor, el caudal de operación del aspersor, espaciamiento entre laterales y entre aspersores buscando cumplir los parámetros analizados en la sección 0 es así que se selecciona el aspersor tipo X cel Wobbler boquilla número 6 ya que es el más utilizado en proyectos de riego parcelario (Arias, 2012) sus especificaciones se muestran en la Figura 15.

Figura 15

Especificaciones de funcionamiento del aspersor



X cel WOBBLER	PRESIONES DE TRABAJO (PSI)			
	10	15	20	25
Boquilla 6 (Gold) R/M 1/2"				
Caudal (GPM)	0.78	0.95	1.10	1.23
Diámetro a 0.50 m	11.13	12.50	13.72	14.02
Boquilla 7 (Lima) R/M 1/2"				
Caudal (GPM)	1.06	1.3	1.5	1.68
Diámetro a 0.50 m	12.19	14.17	14.32	15.40
Boquilla 10 (Turquesa) R/M 1/2" y 3/4"				
Caudal (GPM)	2.22	2.72	3.14	3.51
Diámetro a 0.50 m	13.56	14.94	15.40	16.30

Nota: La figura muestra las características de operación del aspersor seleccionado. Tomado de Diseño de un sistema de riego por aspersión con automatización para el sector de Ugñag, cantón Penipe (p. 39).(Arias, 2012)

Para la implementación se selecciona un marco cuadrado como se mostró en la **Figura 4** con un espaciamiento entre aspersores y entre laterales de 10 metros, una presión de funcionamiento de 20 PSI y un caudal de 1,1 GPM con lo cual se puede determinar que se requieren 12 aspersores.

$$Pms = \frac{227.12 * Q}{E_{Lat} * E_{Asp}}$$

$$Pms = \frac{227.12 * 1.1}{10 * 10}$$

$$Pms = 2.5$$

Una vez calculado el valor de pluviometría se procede al cálculo del tiempo de riego

$$t_r = \frac{L_b}{Pms}$$

$$t_r = \frac{\frac{L_b}{\text{número de riegos}}}{Pms}$$

$$t_r = 4.16 \text{ horas}$$

Se obtiene así el tiempo máximo de riego dato que se utiliza para el dimensionamiento del sistema de almacenamiento (baterías), además como resultado de esta etapa se tiene que el caudal total de funcionamiento del sistema es de 13,2 GPM y una presión total de 240 PSI datos que se utilizarán en el diseño hidráulico.

4.3 Diseño Hidráulico

Considerando los requerimientos de presión y caudal del diseño agronómico se procesa los datos en Excel, para el dimensionamiento de la tubería de carga y descarga, cálculo de las pérdidas en la tubería. El proceso se detalla a continuación:

4.3.1 Cálculo de la tubería de carga y descarga

Este proceso es iterativo y consiste en asumir una velocidad de fluido de acuerdo a la tubería que se esté dimensionando para poder hallar el diámetro de la tubería, este diámetro calculado se compara con los catálogos de tuberías comerciales en la Tabla 10 se muestra los rangos de velocidad que puede tomar el fluido.

Tabla 10

Rango recomendado de velocidad

Tipo de Servicio	Rango recomendado de velocidad	
	pie/s	m/s
Líneas de succión	2 – 4	0.6 – 1.2
Líneas de retorno	4 – 13	1.5 – 4
Líneas de descarga	7 – 18	2 – 5.5

Nota: La tabla muestra los rangos de velocidad recomendados para las tuberías. Tomado de Mecánica de fluidos (p.164), por (Mott., 2006)

A continuación, se detalla el cálculo de las tuberías de carga y descarga del sistema de riego.

$$Q = V * S$$

$$S = \frac{Q}{V}$$

$$S = \frac{3 \frac{m^3}{h}}{3600 \frac{m}{h}}$$

$$S = 0,000833 m^2$$

$$S = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$D = 0.03257m$$

Se selecciona una tubería de 32 mm del catálogo de tubería comercial que se muestra en el Anexo 3 cuyo diámetro interior es 29.8 mm con este dato se procede a recalcular la velocidad

$$V_d = 1,2 \frac{m}{s}; D_d = 0.0298m$$

El procedimiento se repite para el cálculo de la tubería de succión

$$D_s = 0.0228m$$

Obtenidos estos valores se procede al cálculo de las pérdidas en la tubería de descarga, es así que se inicia con el cálculo de las pérdidas primarias

$$H_f = \lambda \frac{L * v^2}{2g * D}$$

$$\lambda = f\left(Re; \frac{k}{D_d}\right)$$

$$Re = \frac{V * D_d * \rho}{\eta}$$

$$Re = \frac{1,2 \frac{m}{s} * 0.0298 m * 997 \frac{Kg}{m^3}}{0.001008 \frac{kg}{m * s}}$$

$$Re = 35369,763$$

Rugosidad relativa $\frac{K}{D_d}$, k toma los valores mostrados en la Tabla 5 de acuerdo a la materia seleccionada para la tubería de descarga.

$$\text{Rugosidad relativa} = \frac{K}{D_d}$$

$$\text{Rugosidad relativa} = \frac{0.0015}{29,8}$$

$$\text{Rugosidad relativa} = 0.00005033$$

Con los valores del número de Reynolds y la rugosidad relativa se puede estimar el valor del coeficiente de pérdida de carga primaria haciendo uso del diagrama de Moody como se muestra en el Anexo 4 dando como resultado un valor de $\lambda = 0.022$.

Una vez realizada la distribución de los aspersores en la parcela se puede determinar que la longitud total de la tubería es de 116m con lo cual se aplica la ecuación para determinar las pérdidas primarias.

$$H_f = \lambda \frac{L * v^2}{2g * D}$$

$$H_f = 0.022 * \frac{116 \text{ m} * (1.2 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2 * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0.0298 \text{ m}}$$








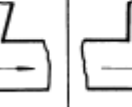


$$H_f = 6,3 \text{ m}$$

4.3.2 Cálculo de pérdidas por accesorios

A continuación, se determinan las pérdidas por accesorios, para la distribución de la tubería se utilizó dos collarines y una "T" cuyos coeficientes de pérdidas se muestran en la Figura 16, el cálculo de las pérdidas se detalla a continuación:

Figura 16

Coeficiente de pérdida por accesorios.

Figura					
ζ	0.5	1.0	1.5	3.0	0.05
Figura					
ζ	0.1	0.15	2.0	3.0	

Nota: La figura muestra el sentido de flujo del fluido en el accesorio Tomado de Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas (p.240), por C. Mataix, 1986, ediciones del Castillo, S. A.

Se aplica la ecuación para determinar las pérdidas secundarias o de accesorios

$$h_f = \zeta \frac{v^2}{2g}$$

$$h_f = 1.5 * 3 \frac{(1.2 \frac{m}{s})^2}{2 * 9.8 \frac{m}{s^2}}$$

$$h_f = 0.331 m$$

Luego se determina la Carga dinámica total para la cual se considera una altura de tubo porta aspersor de 1.2 m y presión de funcionamiento del aspersor 13.61 m

$$CDT = H_s + H_f + h_f + H_o + H_e$$

$$CDT = 2m + 6.3m + 0.331m + 13.61m + 1.2m$$

$$CDT = 23.44 m$$

Teniendo en consideración el valor de CDT y el caudal total de operación del sistema se procede a la selección de la bomba utilizando los diagramas de curvas de funcionamiento que se muestra en el Anexo 5 donde se puede determinar que los requerimientos de nuestro sistema serán suplidos por la bomba Pedrollo CPm620 cuyas características se muestran en la

Figura 17.

Figura 17

Prestaciones de la bomba

MODELO		POTENCIA		Q	H metros																		
Monofásica	Trifásica	kW	HP		m ³ /h	0	0.6	1.2	1.8	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8	5.4	6.0	6.6	7.2	7.8	8.4	9.0	9.6	
CPm 600	CP 600	0.37	0.50	l/min	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160		
CPm 610	CP 610	0.60	0.85		22	21	20	18.5	17	15.5	14	12	9										
CPm 620	CP 620	0.75	1		30	28.5	27	25.5	23.5	21.5	19	16	12										
CPm 650	CP 650	1.1	1.5		35	34	33	31.5	30.5	29.5	28	26.5	24.5	22	19								
CPm 660	CP 660	1.5	2	H metros	42	41.5	41	40.5	39.5	39	38	36.5	35	33	30	27	24						
CPm 670	CP 670	2.2	3		48	47.5	47	46.5	46	45	43.5	42	40.5	38.5	36	33.5	31	28					
CPm 650M	CP 650M	1.1	1.5		57	56.5	55.5	55	54	53.5	53	52	50.5	49.5	47	45	42.5	38	33				
CPm 650M	CP 650M	1.1	1.5		39	38.5	38	37	36.5	36	35	34	33	32	30	28.5	26.5	24.5	22.5	20	18		
CPm 660M	CP 660M	1.5	2		43	42.5	42	41	40.5	40	39	37.5	36.5	35	34	32.5	31	29	27	25	23		
CPm 670M	CP 670M	2.2	3		51	50.5	50.5	50	49.5	48.5	47.5	46.5	45	44	42.5	41	39.5	37.5	36	34	32		

Nota: La figura muestra las especificaciones de altura útil, caudal y potencia de bombas centrífugas Pedrollo. Tomado de Electrobombas centrífugas CP (p.40). (Pedrollo, 2020)

Para comprobar la potencia requerida por la bomba se aplica la ecuación

$$P_a = \frac{Q * \rho * g * H}{\eta_{Tot}}$$

$$P_a = 745.74 W$$

Como conclusión de esta sección se tiene que los requerimientos hídricos del cultivo serán suplidos por una bomba centrífuga monofásica de 1 HP, no se considera la aplicación de bombas solares sumergibles por su elevado costo.

4.4 Diseño del sistema de control.

Se sugiere que para sistemas de riego inteligentes es conveniente utilizar lógica difusa, ya que se ajusta de mejor manera en la toma de decisiones y permite la dosificación necesaria del recurso hídrico para el cultivo.

4.4.1 Controlador Difuso

Para el desarrollo del controlador difuso, es necesario definir las variables de control y transformarlas en variables lingüísticas. Cada una de las variables que se muestran en la Tabla 11 se seleccionó de acuerdo a la investigación realizada.

Tabla 11

Variables de entrada del controlador

EVOTRANSPIRACIÓN (mm/día)	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)	ETAPA DEL CULTIVO (DÍAS)
Eto Bajo	Baja	Seco	Inicio
Eto Medio	Media	Semiseco	Desarrollo
Eto Alto	Alta	Húmedo	Intermedia
		Semihúmedo	Final
		Superhúmedo	

4.4.2 Variables de entrada

4.4.2.1 Evotranspiración.

La evotranspiración es la pérdida de agua a través de la superficie del suelo por evaporación y por transpiración del cultivo. La evotranspiración es el producto de una expresión matemática que está relacionada, con la temperatura máxima, mínima y horas de sol al día. Para determinar la temperatura máxima y mínima se utiliza un sensor de temperatura tipo Pt100, y para determinar el número de horas de sol diarias se utilizó una fotocelda. Con respecto a los cálculos realizados sus valores oscilan desde 1.5 a 5 mm/día , cómo se trata de un rango corto de valores se decide formar tres funciones de membresía como se observa en la Tabla 12.

Tabla 12

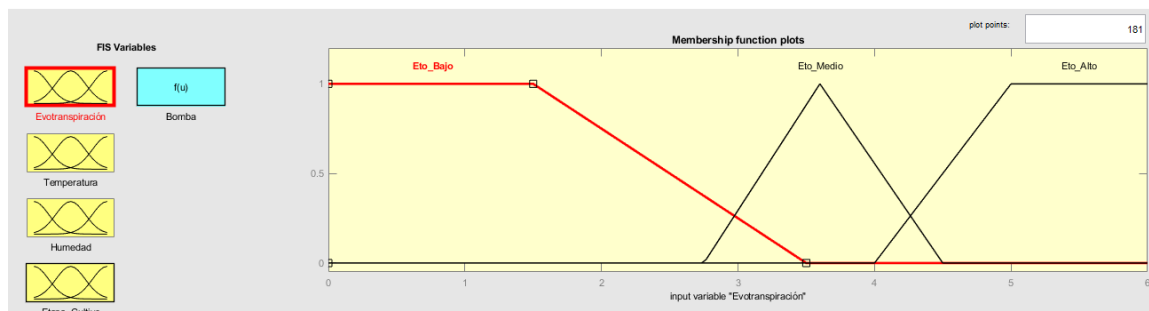
Funciones de membresía para la variable evotranspiración.

Evotranspiración (mm/día)	Tipo de curva	Parámetros
Eto Bajo	Trapezoidal	[0 0 1.5 3.5]
Eto Medio	Triangular	[2.75 3.6 4.5]
Eto Alto	Trapezoidal	[4 5 6 6]

En la Figura 18 se puede observar las tres funciones de pertenencia para la valoración de la variable evotranspiración.

Figura 18

Funciones de pertenencia para la variable evotranspiración



4.4.2.2 Temperatura ambiente.

Latacunga no cuenta con estaciones climáticas definidas. La temperatura en la ciudad de acuerdo a sus datos históricos tiene un valor mínimo de -5 grados centígrados, siendo casos particulares y una temperatura máxima histórica de 32 grados, la temperatura presenta tres funciones de membresía como se observa en la Tabla 13.

Tabla 13

Funciones de membresía para la variable temperatura.

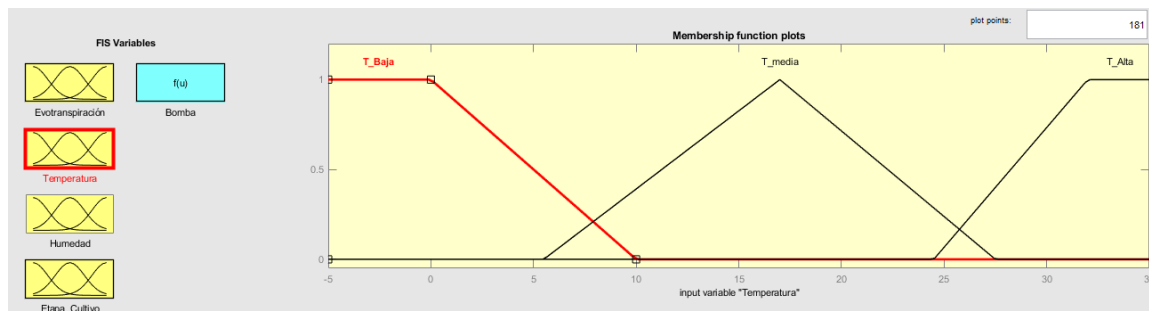
TEMPERATURA (°C)	TIPO DE CURVA	PARÁMETROS
Baja	Trapezoidal	[-5 -5 0 10]
Media	Triangular	[5.5 17 27.5]
Alta	Trapezoidal	[22 32 35 35]

En la .

Figura 19 se puede observar las tres funciones de pertenencia para la valoración de la variable temperatura, en sus extremos se encuentran funciones trapezoidales y en el centro una función triangular.

Figura 19

Funciones de pertenencia para la variable temperatura



4.4.2.3 Humedad del suelo.

La humedad del suelo es fundamental para estimar la cantidad de agua necesaria para reponer lo que el suelo ha perdido por procesos naturales como la evotranspiración.

Las funciones de pertenencia se formaron a partir de las pruebas realizadas con el sensor de humedad tipo capacitivo en diferentes muestras del suelo. De acuerdo a la extensión del terreno se configuro la distribución de 4 sensores capacitivos de humedad con salidas en corriente, para no tener inconvenientes con caídas de voltaje. Al ser un sensor de salida analógica en el ladder del PLC, se realizó la transformación para obtener los valores de porcentajes de humedad. De acuerdo a los valores obtenidos por humedad se forma cinco funciones de membresía descritos en la Tabla 14.

Tabla 14

Funciones de membresía para la variable Humedad.

HUMEDAD (%)	TIPO DE CURVA	PARÁMETROS
Seco	Trapezoidal	[0 0 10 20]
Semiseco	Triangular	[15 30 45]

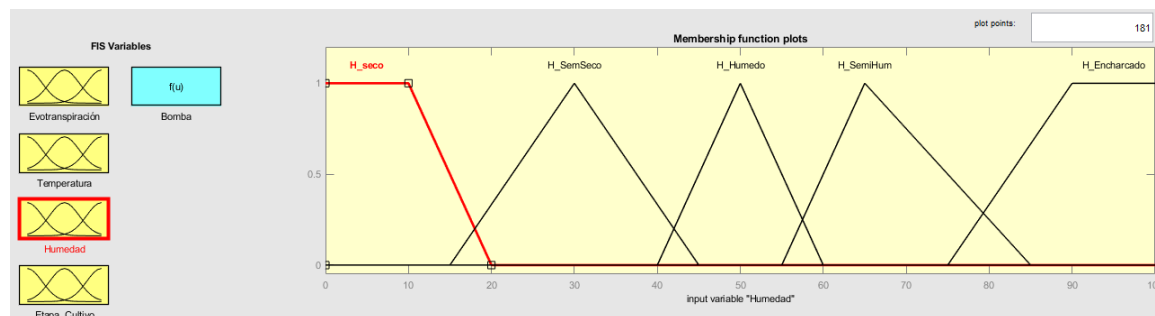
HUMEDAD (%)	TIPO DE CURVA	PARÁMETROS
Húmedo	Triangular	[40 50 60]
Semihúmedo	Triangular	[55 65 85]
Superhúmedo	Trapezoidal	[75 90 100 100]

En la

Figura 20 se puede observar las cinco funciones de pertenencia para la valoración de la variable humedad, en sus extremos se encuentran funciones trapezoidales y en el centro funciones triangulares.

Figura 20

Funciones de pertenencia para la variable humedad



4.4.2.4 Etapa del cultivo.

En el estudio agrónomo se determina que es importante definir la etapa del cultivo, ya que está ligado a la cantidad de agua que debe ser regada. Las etapas del cultivo son definidas para el caso de estudio, alfalfa, donde su ciclo de producción es de 30 días. La distribución de días con respecto a la etapa del cultivo de alfalfa se puede observar en la Tabla 15.

Tabla 15

Funciones de membresía para la variable etapa del cultivo.

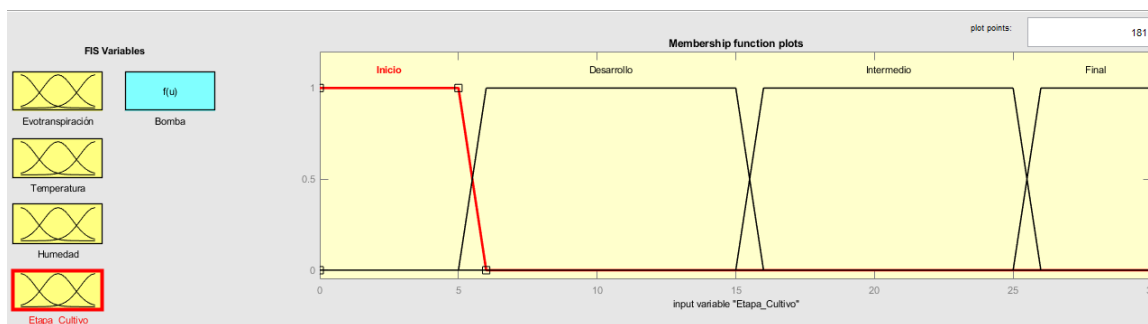
ETAPA DEL CULTIVO (DÍAS)	TIPO DE CURVA	PARÁMETROS
Inicio	Trapezoidal	[0 0 5 6]
Desarrollo	Trapezoidal	[5 6 15 16]
Intermedio	Trapezoidal	[15 16 25 26]
Final	Trapezoidal	[25 26 30 30]

En la .

Figura 21 se puede observar las cuatro funciones de pertenencia para la valoración de la variable etapa del cultivo, que está constituida por funciones trapezoidales.

Figura 21

Funciones de pertenencia para la variable etapa del cultivo



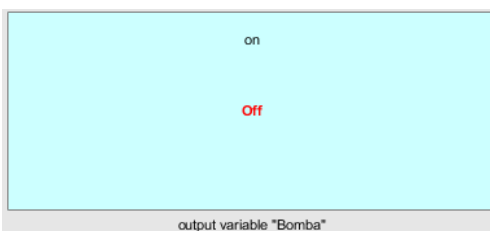
4.4.3 Variables de salida

4.4.3.1 Encendido o apagado de la bomba.

Se opta por un sistema ON/OFF como se observa en la Figura 22 ya que todas las variables de entrada se obtienen en tiempo real, variables como la humedad serán las encargadas de darle el estado de encendido o apagado a la bomba.

Figura 22

Funciones de pertenencia para la salida del controlador



4.4.4 Sistema de inferencia Difuso

El método utilizado para el motor de inferencia es el de Sugeno, ya que este método está basado en reglas difusas pero el consecuente no presenta un conjunto difuso sino una serie de funciones lineales (Diciembre Sanahuja, 2017), pudiendo darle una función de salida a la bomba ON-OFF como se observa en la Figura 22.

4.4.5 Reglas de inferencia

Para definir las reglas aplicadas en el controlador, se requiere del conocimiento de la planta, la forma en la que se comportaría el sistema al momento de variar alguna de sus entradas. No existe alguna regla formal para el diseño de las reglas de inferencia, queda a decisión del diseñador del controlador. Las reglas de un controlador difuso se basan en la experiencia del operario del control de la planta.

Al tener cuatro funciones de entrada del controlador, se obtuvo un total de 180 reglas de inferencia.

4.4.6 Unidad de control

De acuerdo a las variables de entrada, y a la lógica de control se opta por un controlador Lógico Programable, ya que tiene aplicaciones industriales. Se selecciona el PLC SIEMENS S7-1200 como unidad de control, y un módulo de entradas análogas para la aplicación ya que el sistema cuenta con 5 sensores analógicos.

4.5 Diseño del sistema Fotovoltaico

4.5.1 Características de la carga

El sistema de bombeo, está conformado por una bomba de presión de 1HP, que tiene la capacidad de impulsar 12 aspersores X cel WOBLER, el controlador del sistema de riego consta de 4 sensores inductivos de humedad, un sensor de temperatura y una fotocelda, para la alimentación de los sensores se utiliza una fuente de 24 V, y como se mencionó el controlador es un PLC SIEMENS-1200, para poder adquirir todas las señales se utiliza un módulo de expansión de entradas analógicas y cada sensor analógico utiliza un transmisor de corriente. En la Tabla 16 se presenta las características de demanda hídrica en cada etapa del cultivo, para el mes de junio, donde se tiene un tiempo máximo de riego de 4.16 horas.

Tabla 16

Características de riego en el mes de junio.

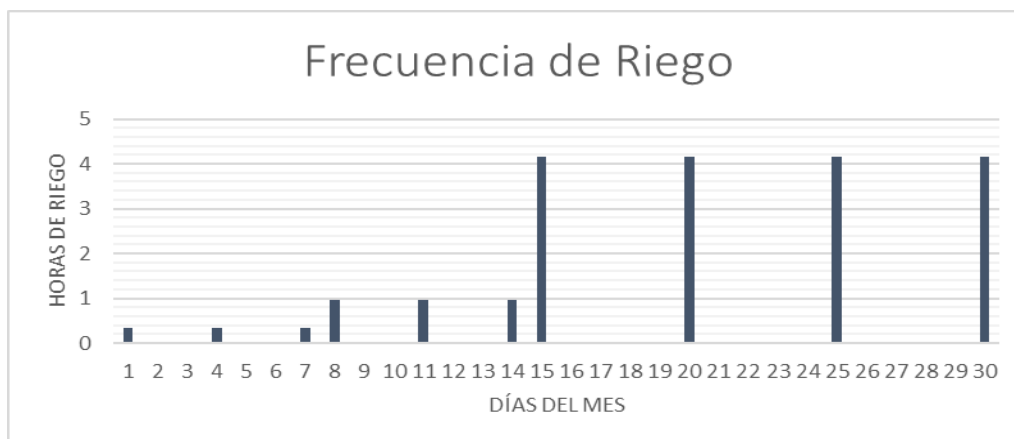
Mes	Frecuencia Riego	Números de riego	Tiempo Horas	Riego
Junio	2	3	0,35	

Mes	Frecuencia Riego	Números de riego	Tiempo Horas	Riego
	2	3	0,95	
	4	2	4,16	
	4	2	4,16	

En la Figura 23 se observa la frecuencia de riego en el mes de junio, se puede visualizar que el sistema de riego se encenderá por mayor tiempo a medida que vaya creciendo la planta. Inicialmente el cultivo tiene una frecuencia de dos días con un número de horas de riego mínimo mientras en su etapa final el sistema regara por más tiempo, pero a una frecuencia de cuatro días.

Figura 23

Diagrama de frecuencia de riego para el peor escenario



En la Tabla 17, se especifica el consumo energético con la implementación de la solución tecnológica, para el peor escenario en el mes de junio, considerando un riego de 4 horas.

Tabla 17

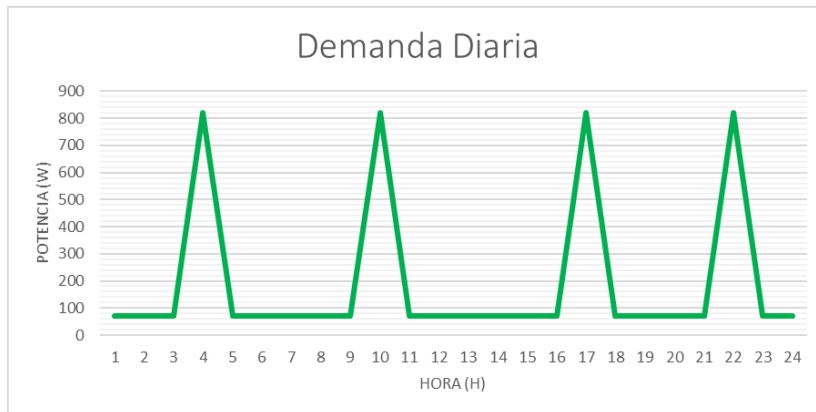
Resumen de la demanda energética del sistema de riego inteligente

Equipo	Potencia(w)	Tiempo consumo (h)	Consumo diario(wh)
Bomba	750	4	3000
PLC	11	24	264
Modulo i/o	11	24	264
Fuente 24 v	48	24	1152
P. Total	820	Energía T (Wh/día)	4680

En la Figura 24 se observa el comportamiento de la curva de demanda del sistema de riego para el escenario donde la bomba está encendida 4 horas con una frecuencia de riego de cuatro días, el sistema fotovoltaico tendrá que cubrir 20 horas diarias una demanda de 70 W y 4 horas diarias una demanda de 820 W, en sistemas de riego de acuerdo a la experiencia del profesional agrícola, es recomendable no regar cuando existe demasiado sol, por lo cual es innecesario encender la bomba en el horario de 10:00 hasta las 18:00 horas, para no ocasionar problemas agrícolas a la planta, además es necesario fraccionar el tiempo de riego entre 4 o 6 riegos al día, para descartar la posibilidad de sobre hidratación a la planta y así cubrir la demanda hídrica total del cultivo.

Figura 24

Demanda diaria del sistema de riego

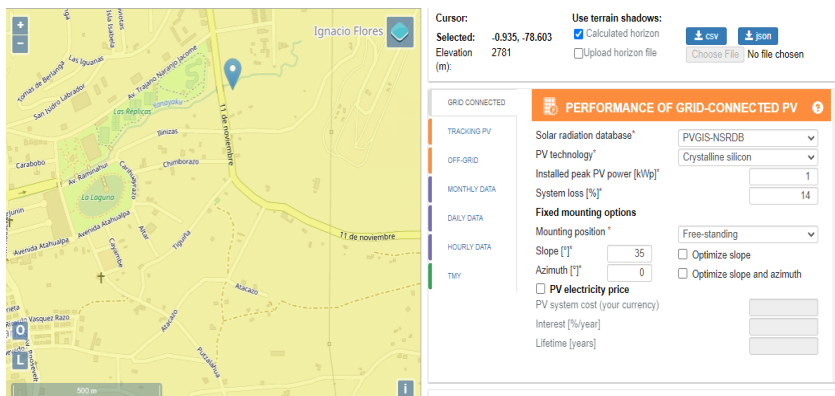


4.5.2 Estudio de radiación disponible

Mediante el uso de la plataforma web PVGIS, se obtuvo datos de irradiación solar en la ciudad de Latacunga, en el punto geográfico determinado para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico. En la Figura 25 se muestra la interfaz gráfica del software, donde se ubica el punto bajo estudio.

Figura 25

Interfaz gráfica de la plataforma PVGIS

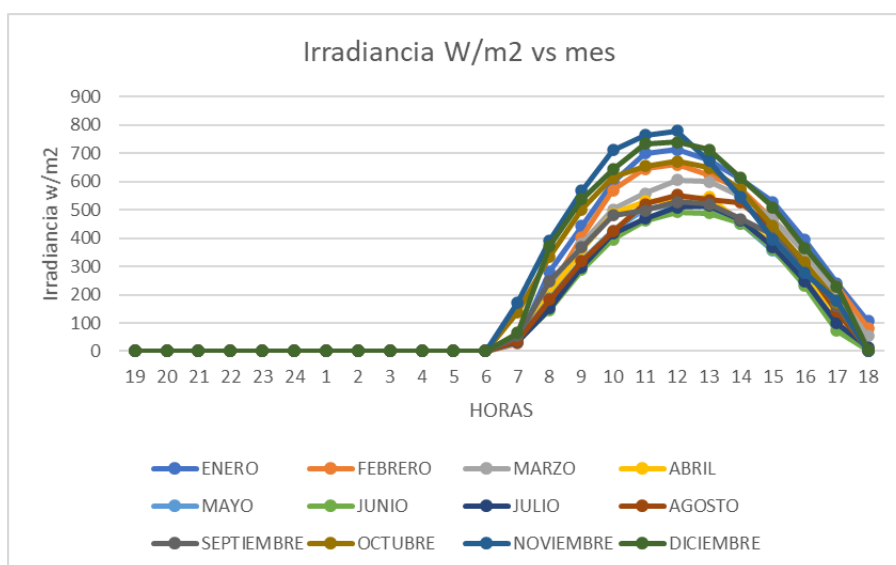


A partir de los datos obtenidos por la plataforma web en un periodo de tiempo de 5 años, se procede a promediar los datos diarios de cada mes en intervalos horarios, como se muestran en la

Figura 26, se pudo concluir que el mes con menor irradiancia es junio.

Figura 26

Irradiancia de cada mes



Todos los equipos del sistema fotovoltaico, se seleccionan de acuerdo a los valores teóricos calculados, considerando, sus características mecánicas y eléctricas.

4.5.3 Dimensionamiento del inversor

En la ecuación [24] se muestra la capacidad instalada la misma que es la razón entre la demanda diaria y el factor de planta por 24 horas, para determinar la demanda diaria es necesario conocer las cargas y el tiempo de utilización.

$$Capacidad\ Instalada = \frac{E\ dia(Kwh)}{Factor_{planta} * 24h} \quad [24]$$

En la ecuación [25] se muestra el factor de planta el cual está dado por el número de horas sol pico, del lugar de estudio entre 24 horas, el número de horas sol pico para la ciudad de Latacunga es 4.7 horas (Ola & Salas, 2020)

$$Factor_{planta} = \frac{HSP}{24h} \quad [25]$$

$$Factor_{planta} = \frac{4,7 h}{24h}$$

$$Factor_{planta} = 0.2$$

$$Capacidad\ Instalada = \frac{4.680\ kWh/día}{0.2 * 24h}$$

$$Capacidad\ Instalada = 0.97\ kW$$

Se muestra en la ecuación [26] la forma de calcular la potencia del inversor, es recomendable multiplicar por el 50% para poder sobredimensionar el equipo.

$$P_{inv} = 1.5 * Capacidad\ Instalada \quad [26]$$

$$P_{inv} = 1.5 * 0.97\ kW$$

$$P_{inv} = 1.46\ kW$$

Los inversores existentes en el mercado, tienen potencias de 1, 3 y 5 kW, de acuerdo a los datos calculados, se escoge un inversor con una potencia de 3KW.

En la Tabla 18 se muestra un cuadro comparativo entre dos inversores de 3 kW, lo que permite una selección adecuada del inversor para el sistema.

Tabla 18

Comparación entre inversor marca POWEST y XINDUN

Marcas	XINDUN	POWEST
PV input		
Potencia máxima de arreglo PV	4500 W	2000 W
Voltaje de puesta en marcha	116 VDC	80 VDC

Marcas	XINDUN	POWEST
Voltaje máximo de arreglo PV	500 VDC	145 VDC
Número de MPPT	1	1
Grid output		
Topología de salida	Monofásica	Monofásica
Voltaje nominal de salida	184-265 V	101/110/120 AC
Corriente nominal de salida	30 A	27,2 A - 110 V AC
Factor de potencia	0,99	0,99
Eficiencia	85	90
Battery charger		
Voltaje nominal DC	48 V	24 V
Máxima corriente de carga	25 A	80 A

Se selecciona el inversor de marca POWEST considerando la tensión de marcha, ya que requiere de 80 VDC, asegurando que puede funcionar en días nublados, mientras el inversor de marca XINDUN requiere de 116 VDC para funcionar es decir en días más soleados.

4.5.4 Dimensionamiento del Sistema Fotovoltaico

Para la selección de los paneles solares se toma en cuenta los datos de entrada del inversor, principalmente el voltaje de puesta en marcha y el voltaje máximo de arreglo que tiene un valor de 80 y 145 VDC respectivamente, y que pueda abastecer la potencia instalada.

En el mercado se encontraron paneles fotovoltaicos de 365 Wp y 270 Wp, en la Tabla 19 se muestran las características de los dos paneles.

Tabla 19

Comparación entre panel solar 365 Wp y 270 Wp.

Tipo	Panel solar 365	Panel solar 270
	Wp	Wp
Tecnología	Monocristalina	Policristalina
Modificación	72 células	60 células
Voltaje Circuito Abierto (Voc)	47,30 V	31,44 V
Máxima capacidad de voltaje (Vmp)	39,46 V	39,46 V
Corriente Circuito Cerrado	9,62 A	9,03 A
Eficiencia	18,81%	16,60%
TONC	45°C	
Precio	220 USD	180 USD

Se escoge el panel de 365 Wp, ya que su eficiencia es mayor. Usar un panel de 365 Wp es más económico que uno de 270 Wp,

La ecuación [27] determina el número de paneles fotovoltaicos, la cual está representada por la potencia total instalada sobre la potencia nominal de los paneles fotovoltaicos.

$$N = \frac{\text{Potencia Total Instalada}}{\text{Potencia nominal del panel}} \quad [27]$$

$$N = \frac{820 \text{ W}}{365 \text{ W}}$$

$$N = 2.25$$

Se debe ubicar 3 paneles de 365 W. Para determinar la disposición en serie o paralelo de los paneles fotovoltaicos, es primordial conocer la temperatura del panel, la cual está representada en la ecuación [28]

$$T_p = T_a + \frac{T_{ONC} - 20}{800} I \quad [28]$$

Dónde:

T_p : Temperatura del panel

T_a : Temperatura ambiente

$T_a \text{ máx.}$: Temperatura ambiente máximo

$T_a \text{ mín.}$: Temperatura ambiente mínimo

T_{ONC} : Temperatura de operación nominal de célula

$I \text{ máx.}$: Irradiancia máxima

$I \text{ mín.}$: Irradiancia mínima

En la Tabla 20, se muestra la temperatura e irradiancia máxima y mínima en la ciudad de Latacunga los datos descritos de irradiancia son tomados de la plataforma PVGIS, mientras que los de temperatura son datos tomados de (Ola & Salas, 2020)

Tabla 20

Datos de temperatura e irradiancia máxima y mínima

$T_a \text{ máx (}^\circ\text{C)}$	$T_a \text{ mín (}^\circ\text{C)}$	$I \text{ máx W/m}^2$	$I \text{ mín W/m}^2$
25	5	1200	246

$$T_{p \min} = T_{a \min} + \frac{TONC - 20}{800} I_{\min}$$

$$T_{p \min} = 5 + \frac{45 - 20}{800} * 246$$

$$T_{p \min} = 12.69 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{p \max} = T_{a \max} + \frac{TONC - 20}{800} I_{\max}$$

$$T_{p \max} = 25 + \frac{45 - 20}{800} * 1300$$

$$T_{p \max} = 65.6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La ecuación [29] determina la relación entre el voltaje en circuito abierto del panel fotovoltaico y la temperatura.

$$\frac{\delta V_{oc}}{\delta T} = \frac{\delta V_{mp}}{\delta T} \quad [29]$$

$$\frac{\delta V_{oc}}{\delta T} = 47.3V * \frac{0.35\%}{^\circ\text{C}} * \frac{1}{100\%} = 0.1655 \frac{V}{^\circ\text{C}}$$

La ecuación [30] se muestra el diferencial de voltaje, el cual está relacionado entre la diferencia de temperatura y la razón del voltaje en circuito abierto y la temperatura.

$$\Delta V = \Delta T * \frac{\delta V_{oc}}{\delta T} \quad [30]$$

Dónde.

ΔV : Diferencial de voltaje

ΔT : Diferencial de temperatura

$$\Delta T = T_{a \max} - T_{p \min}$$

$$\Delta T = 25 - 12.69$$

$$\Delta T = 12.31 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta V = 12.31 * 0.1655 \frac{V}{^\circ\text{C}} = 1.63V$$

La ecuación [31] permite determinar el voltaje máximo que puede producir el panel fotovoltaico.

$$V \text{ máx panel} = Voc + \Delta V \quad [31]$$

$$V \text{ máx panel} = 47.3 + 1.63$$

$$V \text{ máx panel} = 48.93 V$$

$$\Delta T = T_{p \text{ máx}} - T_{a \text{ máx}}$$

$$\Delta T = 65.6^\circ C - 25^\circ C$$

$$\Delta T = 40.6^\circ C$$

$$\Delta V = 40.6 * 0.1655 \frac{V}{^\circ C} = 6.72 V$$

La ecuación [32] permite determinar el voltaje mínimo que puede producir el panel fotovoltaico.

$$V \text{ mín panel} = Voc - \Delta V \quad [32]$$

$$V \text{ mín panel} = 47.3 V - 6.72 V$$

$$V \text{ mín panel} = 40.58 V$$

La ecuación [33] permite determinar el número de paneles máximos en serie.

$$\# \text{ paneles serie máx} \leq \frac{V \text{ inversor máximo}}{V \text{ máx panel}} \quad [33]$$

$$\# \text{ paneles serie máx} \leq \frac{145V}{48.93V}$$

$$\# \text{ paneles serie máx} \leq 3$$

La ecuación [34] permite determinar el número mínimo de paneles fotovoltaicos en serie.

$$\# \text{ paneles serie mín} \leq \frac{V \text{ inversor mínimo}}{V \text{ máx panel}} \quad [34]$$

$$\# \text{ paneles serie mín} \leq \frac{80 v}{47 V}$$

$$\#paneles\ serie\ min \leq 1.7$$

Como resultado de los cálculos anteriores se procede a instalar 3 paneles fotovoltaicos de $365\ Wp$ en serie, para poder cumplir con la demanda del sistema.

$$Potencia\ Instalada \leq P\ paneles$$

$$820\ W \leq 365\ W * 3$$

$$820\ W \leq 1095\ W$$

En la Figura 27 se muestra la disposición de paneles fotovoltaicos, tres paneles monocristalinos de $365\ Wp$, en serie, los cuales producirán un voltaje máximo de $146.79\ V$ y un voltaje mínimo de $121.74\ V$.

Figura 27

Configuración de los paneles fotovoltaicos



4.5.5 Dimensionamiento del sistema de almacenamiento (baterías)

Para determinar la capacidad de una batería, es necesario tomar en cuenta los días de autonomía que tiene el sistema, así como la profundidad de descarga de las baterías.

El tiempo máximo de encendido de la bomba es 4 horas, con una autonomía de 0.16 días y el resto del sistema tendrá una autonomía de un día.

La ecuación [35] describe el consumo de potencia de la batería

$$C Pbat = \frac{E * A}{Pd \text{ máx}} \quad [35]$$

Dónde:

$C Pbat$: Consumo de potencia de la batería

E : Demanda media total

A : Autonomía

$Pd \text{ máx}$: Profundidad de descarga de a batería

$$C Pbat_1 = \frac{3000 \text{ Wh} * 0.16}{0.7}$$

$$C Pbat_1 = 685.71 \text{ W/h}$$

$$C bat_1 = \frac{685.71 \text{ w/h}}{24 \text{ v}}$$

$$C bat_1 = 28.57 \text{ A/h}$$

Para la carga del PLC, la fuente, y los módulos de expansión que suman un total de 1680 Wh . Al día lo multiplicamos por el 60% para dimensionar el sistema de almacenamiento, ya que el inversor tiene la característica de dar prioridad a la generación fotovoltaica y la potencia de los sistemas de control es de tan solo 70 W.

$$E2 = 1680 \text{ Wh} * 60\%$$

$$E2 = 1008 \text{ Wh}$$

$$C Pbat_2 = \frac{1008 \text{ Wh} * 1}{0.7}$$

$$C Pbat_2 = 1440 \text{ W/h}$$

$$C bat_2 = \frac{1440 \text{ w/h}}{24 \text{ v}}$$

$$C bat_2 = 60 \text{ A/h}$$

Capacidad de la batería total

$$C_{bat_T} = C_{bat_1} + C_{bat_2}$$

$$C_{bat_T} = 28.57 \text{ A/h} + 60 \text{ A/h}$$

$$C_{bat_T} = 88.57 \text{ A/h}$$

De acuerdo al estudio para determinar el dimensionamiento necesario para el sistema de almacenamiento se requiere de una batería de 80 A/h a 24 V.

CAPÍTULO V

5 Análisis y Resultados

Dentro de este capítulo se presenta los resultados de rendimiento obtenidos a partir de la implementación del sistema de riego inteligente en un ciclo de producción en el cultivo de alfalfa, el análisis comparativo se lo realiza con respecto a dos líneas bases.

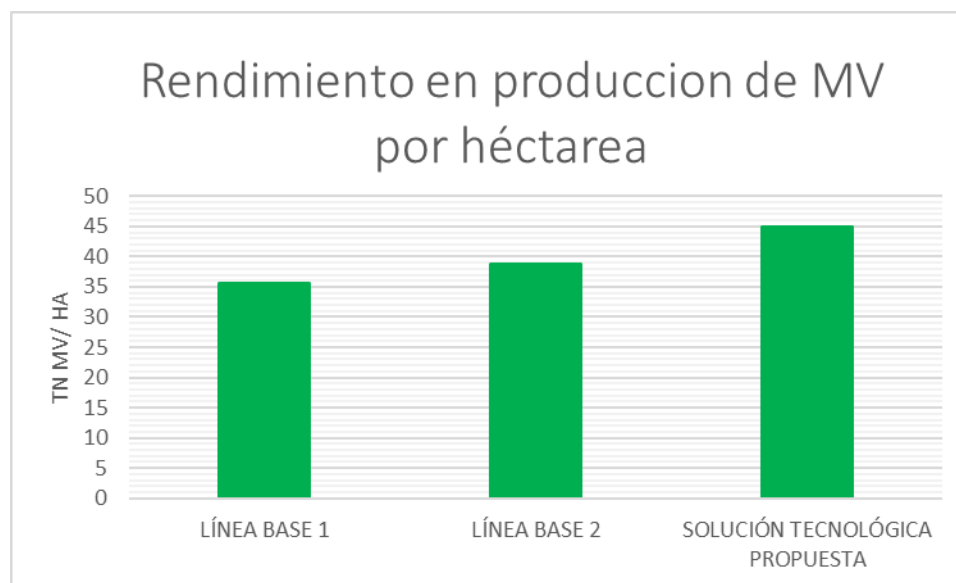
5.1 Rendimiento del cultivo

En el sistema agrícola para representar el rendimiento de un forraje se lo realiza en unidades de toneladas de materia verde por hectárea (*Tn Mv/ha*). Las cantidades de producción de alfalfa en materia verde determinada como testigos o líneas base, registraron variaciones entre *35.7* y *38.7 Tn Mv/ha*. Evaluando los datos considerando la aplicación correcta del recurso hídrico, se presenta una producción de *44.8 Tn Mv/ha*, obteniendo un incremento de *13.6%* respecto a la línea base dos y *20.31%* respecto a la línea base uno. Como se observa en la Figura 28.

La investigación en tecnologías que permitan alcanzar el incremento de rendimiento en un cultivo muestra resultados favorables en la producción de materia verde en el caso de estudio, alfalfa, la aplicación correcta del recurso hídrico donde intervienen variables ambientales para su dosificación y el haber aplicado una técnica de control avanzado (controlador basado en lógica difusa), son los responsables de la diferencia significativa alcanzada entre las líneas base y la aplicación de la solución tecnológica propuesta.

Figura 28

Rendimiento, considerando dos líneas base vs implementación



5.2 Tasa de crecimiento

La tasa de crecimiento se calculó con los datos del rendimiento de materia verde por cada corte y el tiempo del ciclo de corte como se expresa en la ecuación [36].

$$T_c = \frac{FC}{t} \quad [36]$$

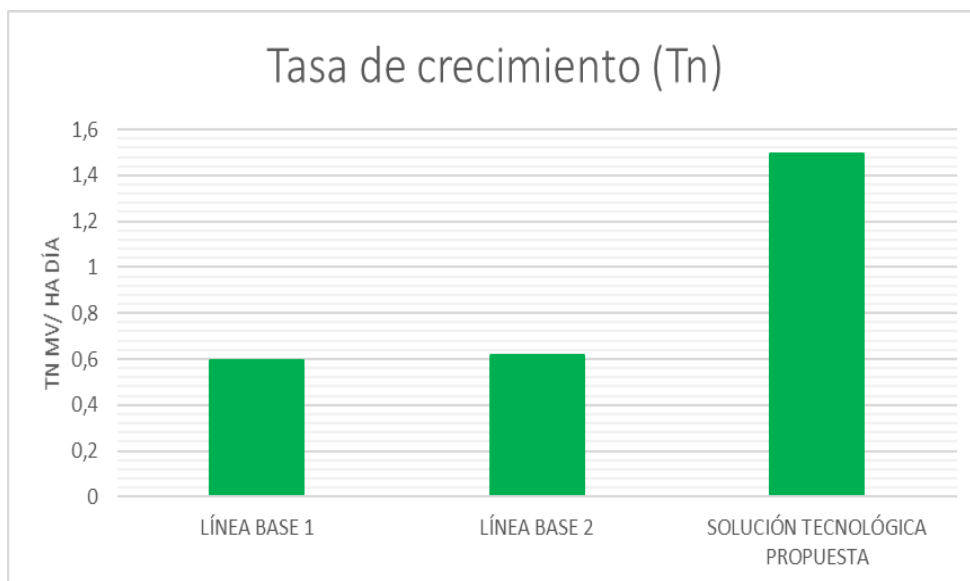
FC: Forraje cosechado (*Tn Mv/ha*)

T: Días transcurridos entre un corte y el siguiente

Los resultados obtenidos con la tasa de crecimiento muestran que el cultivo antes de la intervención presentaba una tasa de crecimiento entre 0.596 y 0.615 *Tn Mv/ha día* mientras que con la propuesta del sistema de riego inteligente la tasa aumenta significativamente a 1.496 *Tn Mv/ha día* como se observa en la Figura 29.

Figura 29

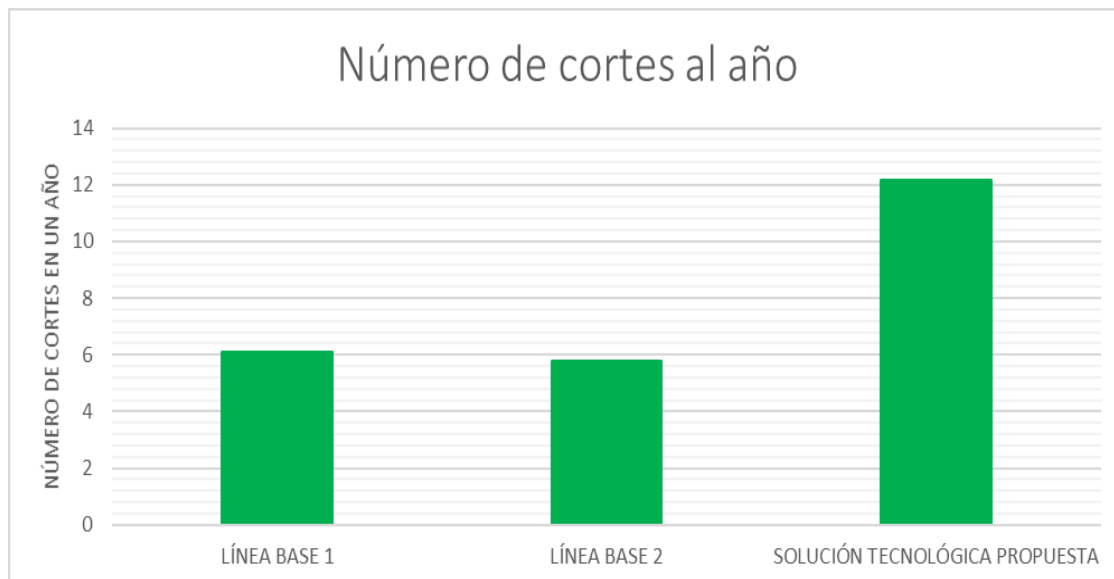
Tasa de crecimiento, considerando dos líneas base vs implementación



Con respecto al número de cortes esperados en un año de acuerdo a la tasa de crecimiento, las líneas bases presentan un ciclo de producción entre 60 y 63 días, es decir se podía cortar la alfalfa cada dos meses, teniendo un total de 6 cortes al año. Es importante mencionar que FAO, en sus estudios menciona que el tiempo de un ciclo de producción de alfalfa es de 30 días. Con la intervención tecnológica la tasa de crecimiento aumentó, el tiempo del ciclo de producción el cual fue de 30 días, el número de cortes esperados para un año aumentó a 12 aproximadamente como se observa en Figura 30.

Figura 30

Número de cortes, considerando dos líneas base vs implementación



5.3 Análisis técnico económico

A continuación, se presenta el costo de producción de alfalfa en la parcela previa a la intervención tecnológica, cuya característica es que se considera un ciclo de cultivo de 45 días es decir al año se obtendría 8 cosechas, 3 en la estación invernal y 5 en la estación de verano; por lo que se considerara un costo de producción para cada estación.

Como se mencionó en la parte en la sección 0 los requerimientos hídricos del cultivo eran suplidos por una motobomba de caudal cuyo motor era alimentado por diésel, para determinar el gasto en combustible se considera el manejo por bandas de precios para gasolinas y diésel que rige en Ecuador desde el 1 de Julio del 2020

Es así que se considera un costo mínimo de diésel $D_{min} = \$1,00$ y un costo máximo de diésel al 8 de marzo del 2021 $D_{max} = \$1,35$

El sistema de riego es impulsado por una motobomba cuya capacidad de tanque es de aproximadamente un galón el cual brinda una autonomía estimada de dos horas y el agricultor inicia el periodo de riego desde las 6 am hasta las 6 pm dos veces por semana, por lo tanto:

$$\#galones = \frac{\textit{T tiempo total de riego}}{\textit{Autonomía}}$$

$$\#galones = \frac{12 \textit{ horas}}{2 \frac{\textit{horas}}{\textit{galón}}}$$

$$\#galones = 6 \textit{ galones}$$

$$\#galones = 6 \textit{ galones} * 2$$

$$\#galones = 12 \frac{\textit{galones}}{\textit{semana}}$$

Además, se considera un periodo de seis semanas hasta la cosecha del cultivo por lo que el consumo de combustible será:

$$\#galones = 12 \frac{\textit{galones}}{\textit{semana}} * 6 \textit{ semanas}$$

$$\#galones = 72$$

Por lo que el gasto en combustible hasta el periodo de cosecha del cultivo será:

$$D = \$D_{min} * \# \textit{ galones}$$

$$D_{min} = 1,00 \frac{\textit{USD}}{\textit{galón}} * 72 \frac{\textit{galones}}{\textit{cosecha}}$$

$$D_{min} = 72,00 \frac{\textit{USD}}{\textit{cosecha}}$$

$$D_{max} = 1.35 * 72$$

$$D_{max} = 97.20 \frac{\textit{USD}}{\textit{cosecha}}$$

También se considera el costo de mano de obra para cumplir los periodos de riego y cosecha, cuyo valor es de \$12,00 por día, y su valor total hasta la cosecha se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Costo mano de obra Total} = \text{periodos de riego} + \text{cosecha}$$

$$\text{Costo mano de obra Total} = \left(12 \frac{\text{días}}{\text{cosecha}} * 12 \frac{\text{USD}}{\text{día}}\right) + \left(1 \frac{\text{día}}{\text{cosecha}} * 12 \frac{\text{USD}}{\text{día}}\right)$$

$$\text{Costo mano de obra Total} = 156 \frac{\text{USD}}{\text{cosecha}}$$

El combustible para el sistema de bombeo se transporta desde una gasolinera localizada a 2.1 km, el costo de la carrera es aproximadamente \$2,00 y su costo total se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Costo transporte} = 2,00 \frac{\text{USD}}{\text{carrera}} * 6 \frac{\text{carreras}}{\text{cosecha}}$$

$$\text{Costo transporte} = 12,00 \frac{\text{USD}}{\text{cosecha}}$$

En la Tabla 21 se muestran el costo de producción hasta la cosecha

Tabla 21

Costo de producción por cosecha

	Combustible		Mano de obra	Transporte	Total	
Costo de invierno	0		$12,00 \frac{\text{USD}}{\text{cosecha}}$	0	$12,00 \frac{\text{USD}}{\text{cosecha}}$	
Costo de verano	D_{min}	D_{max}	$156 \frac{\text{USD}}{\text{cosecha}}$	$12,00 \frac{\text{USD}}{\text{cosecha}}$	$Costo_{min}$	$Costo_{max}$
	$72,00 \frac{\text{USD}}{\text{cosecha}}$	$97,20 \frac{\text{USD}}{\text{cosecha}}$			$240 \frac{\text{USD}}{\text{cosecha}}$	$265,20 \frac{\text{USD}}{\text{cosecha}}$

Considerando el rendimiento promedio del cultivo, sin la intervención tecnológica, se establece que para producir $4,36 \frac{TnMV}{\text{cosecha}}$ (en 1173 m2) fue necesaria una

inversión de

$12,00 \frac{USD}{cosecha}$ en época invernal, mientras que en verano $240 \frac{USD}{cosecha}$ con costo bajo de combustible diésel y $265,20 \frac{USD}{cosecha}$ con costo elevado de combustible diésel.

El costo total anual de producción se calculará de la siguiente manera:

$$\text{Costo anual de producción} = (C. Invierno * \#cosechas) + (C. Verano * \#cosechas)$$

Con costo de diésel mínimo

$$\text{Costo anual de producción} = \left(12,00 \frac{USD}{cosecha} * 3\right) + \left(240 \frac{USD}{cosecha} * 5\right)$$

$$\text{Costo anual de producción} = 1236,00 \text{ dólares}$$

Con el costo de diésel máximo

$$\text{Costo anual de producción} = \left(12,00 \frac{USD}{cosecha} * 3\right) + \left(265,20 \frac{USD}{cosecha} * 5\right)$$

$$\text{Costo anual de producción} = \$1362,00 \text{ dólares}$$

A continuación, se detalla el gasto y los beneficios de la intervención tecnológica.

Con la alternativa tecnológica planteada se estima un periodo de cosecha de 30 días incrementando el número de cosechas anuales a 12.

La planilla de gastos de la intervención tecnológica se detalla en la Tabla 22

Tabla 22

Detalle de costos de implementación del sistema

Rubro	Costo Total
Sistema Fotovoltaico (Paneles FV, inversor, BESS protecciones)	\$1635,00
Sistema Hidráulico (Bomba, tuberías, aspersores, acoples rápidos, válvulas)	\$365,16

Rubro	Costo Total
Sistema de control (PLC, Modulo AI, Fuente, Sensores, transmisores, cajas porta sensores)	\$1390,00
Armario de control (armario, luces piloto)	\$210,00
Obra civil (pozo, jaula de protección, candado, soporte de baterías)	\$1070,00
Materiales menores (rollos de cable sucre, terminales, cinta aislante, amarras,	\$467,02
Valor total	\$5137,18

Tomando en consideración estos valores se calcula la anualidad para lo cual se toma como referencia la tasa de interés que brinda BanEcuador al ser un proyecto que fomenta el desarrollo del productor agrícola ganadero cuyo valor es 8,53% anual, un valor total de inversión de \$5500,00 y un tiempo de préstamo de 5 años

$$A = CI * \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Donde:

A : Anualidad

CI : Costo de inversión

i : Tasa interés anual

n : Años préstamo

$$A = 5500,00 * \frac{0,0853(1 + 0,0853)^3}{(1 + 0,0853)^3 - 1}$$

$$A_{5500 \text{ a } 3 \text{ años}} = 2154,62$$

$$A_{5500 \text{ a } 5 \text{ años}} = \$1396,80$$

A este valor se le añade el costo de mano de obra por cosecha multiplicado por el número de cosechas anuales, para obtener un costo anual

$$\text{Costo anual de cosecha} = \text{mano de obra por cosecha} * \# \text{ de cosechas}$$

$$\text{Costo anual de cosecha} = 12 \frac{\text{USD}}{\text{cosecha}} * 12 \text{ cosechas}$$

$$\text{Costo anual de cosecha} = \$144,00$$

Con lo cual el costo anual de producción con la propuesta de innovación sería:

$$\text{Costo anual de producción} = \text{Anualidad} + \text{costo anual de cosecha}$$

$$\text{Costo anual de producción} = A_{5500 \text{ a } 5 \text{ años}} \$1396,80 + \$144,00$$

$$\text{Costo anual de producción} = \$1540,80$$

Con respecto a los ingresos generados por la comercialización de la alfalfa. La alfalfa es comercializada por mulas, una medida no estandarizada de uso comercial, cuyo peso aproximado es 150 libras, la cual puede alcanzar un valor máximo promedio de \$8,00 en verano mientras que en el invierno su valor cae a \$2,00.

Considerando el número de cosechas mencionadas anteriormente se tiene:

$$\text{Ingreso}_{\text{invierno}} = \text{producción del terreno} * \text{costo} * \# \text{ cosechas}$$

$$\text{Ingreso}_{\text{invierno}} = 4,36 \frac{\text{TnMV}}{\text{cosecha}} * 29,41 \frac{\text{USD cosecha}}{\text{TnMV}} * 3$$

$$\text{Ingreso}_{\text{invierno}} = 384,68 \text{ dólares}$$

$$\text{Ingreso}_{\text{verano}} = 4,36 \frac{\text{TnMV}}{\text{cosecha}} * 117,64 \frac{\text{USD cosecha}}{\text{TnMV}} * 5$$

$$\text{Ingreso}_{\text{verano}} = \$2564,55$$

El método convencional genera el siguiente ingreso anual

$$\text{Ingreso anual} = \text{Ingreso}_{\text{invierno}} + \text{Ingreso}_{\text{verano}}$$

$$\text{Ingreso anual} = \$384,68 + \$2564,55$$

$$\text{Ingreso anual} = \$2949,23$$

Mientras que la alternativa tecnológica al incrementar el rendimiento del cultivo y el número de cosechas al año, generara los siguientes ingresos

$$\text{Ingreso}_{\text{invierno}} = 5,27 \frac{\text{TnMV}}{\text{Cosecha}} * 29,41 \frac{\text{USD cosecha}}{\text{TnMV}} * 5$$

$$\text{Ingreso}_{\text{invierno}} = \$774,95$$

$$\text{Ingreso}_{\text{verano}} = 5,27 \frac{\text{TnMV}}{\text{Cosecha}} * 117,64 \frac{\text{USD cosecha}}{\text{TnMV}} * 7$$

$$\text{Ingreso}_{\text{verano}} = \$ 4339,73$$

$$\text{Ingreso anual} = \text{Ingreso}_{\text{invierno}} + \text{Ingreso}_{\text{verano}}$$

$$\text{Ingreso anual} = \$774,95 + \$4339,73$$

$$\text{Ingreso anual} = \$5114,68$$

A continuación, se detalla el cálculo de las utilidades. Para la alternativa convencional

$$\text{Utilidad} = \text{Total de Ingreso} - \text{Total de Gastos}$$

$$\text{Utilidad} = \$1587,23$$

Con la alternativa tecnológica

$$\text{Utilidad} = \$5114,68 - \$1540,80$$

$$\text{Utilidad} = \$ 3573,88$$

Con lo cual se puede concluir que la alternativa tecnológica es sumamente viable al incrementar el rendimiento del cultivo y por ende generar un margen de utilidad mucho mayor con respecto a la alternativa convencional, la Tabla 23 muestra una comparación entre la alternativa convencional y alternativa de innovación.

Tabla 23

Alternativa convencional vs Alternativa tecnológica

	Alternativa convencional	Alternativa Tecnológica
Costo Anual de Producción	\$1362.00	\$1540,80
Ingreso anual	\$2949,23	\$5114,68
Utilidad anual	\$1587,23	\$3573,88

CAPÍTULO VI

6 Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

En este trabajo de investigación se propone una metodología interesante que permite el diseño de sistemas tecnológicos con la capacidad de mejorar el rendimiento de cualquier cultivo bajo estudio.

Se desarrolló un conjunto de líneas base con dos ciclos de producción que nos permite comparar valores de rendimiento del cultivo previo a su intervención con respecto a los valores obtenidos después de la intervención tecnológica.

Se analizó la disponibilidad del recurso solar en la zona de estudio con la finalidad de dimensionar el sistema fotovoltaico y el sistema de almacenamiento de energía, el cual tiene la capacidad de suministrar energía al sistema de riego, siempre priorizando la energía solar fotovoltaica.

Se desarrolló un sistema de control basado en lógica difusa con variables de entrada ambientales y características propias del cultivo de estudio como: temperatura, humedad, evotranspiración y etapa del cultivo, con una serie de reglas de inferencia difusa que dan como resultado el encendido o apagado de la bomba, que suministra la cantidad óptima del recurso hídrico requerida por el cultivo.

Los resultados de este trabajo muestran que el rendimiento del cultivo incrementó entre el 13.6 y 20.31% respecto a sus líneas base y se obtuvo un incremento en el ciclo de producción pasado de entre 60 y 63 días a 30 días, lo que se traduce en aproximadamente 12 cortes al año, presentando un incremento de un 50% del número de ciclos de producción esperados al año.

Se realizó la evaluación técnica económica del proyecto considerando el costo total del sistema, se pudo demostrar que la alternativa tecnológica genera un margen de utilidad más elevado lo que permite recuperar la inversión en un periodo de tiempo muy acotado.

Con el desarrollo de este proyecto se ha mejorado la calidad de vida del agricultor además de disminuir las pérdidas hídricas aportando a la preservación y el cuidado de fuentes naturales de agua. La energía solar fotovoltaica es una de las formas de producción de energía limpia, segura y amigable con el ambiente, permite disminuir la producción de gases efecto invernadero y reemplazar combustibles fósiles.

6.2 Recomendaciones

Es importante analizar el comportamiento del rendimiento del cultivo en el resto del año, ya que la dinámica de crecimiento puede verse afectada por factores externos como plagas o insectos, por esto es recomendable hacer un estudio de un sistema de fertirriego, para poder controlar de mejor manera el sistema.

Se recomienda sensibilizar el proyecto a sectores y entidades gubernamentales con el fin de encontrar inversionistas para el desarrollo de proyectos tecnológicos en el campo agrícola del país, ya que los agricultores experimentan pérdidas principalmente debido al bajo rendimiento de sus cultivos.

Se propone el estudio de sistemas de control predictivo para que el sistema sea capaz de tomar decisiones adecuadas antes de que ocurran fenómenos ambientales que perjudiquen al rendimiento del cultivo, de esta manera se asegura el crecimiento óptimo del cultivo.

Se propone elaborar una aplicación móvil donde se muestre la tasa de crecimiento diaria del sistema, la supervisión del sistema de generación y el valor económico de la venta de cultivo.

Se recomienda trabajar con un programa de mantenimiento preventivo y predictivo de todos los elementos que conforman el sistema, así como la limpieza de los paneles fotovoltaicos debido a la cantidad de polvo que pueden experimentar lo que podría ocasionar una disminución en el factor de planta. (Diciembre Sanahuja, 2017)

Bibliografía

- Alcaraz, J., & Jiménez, J. (2018). La aplicación de la agricultura de precisión en el proceso de fertilización: un caso de estudio para el sector bananero de Urabá-Anioqueño. Medellín: Universidad EAFIT.
- Almazan, R. C. (2003). Apuntes de la Materia de Riego y Drenaje . San Luis Potosí.
- Alocén, J. C. (2007). Manual práctico para el diseño de sistemas de minirriego . Honduras.
- Appelbaum, J. (2016). Bifacial photovoltaic panels field. *Renewable Energy*, 338-343.
- Arias, M. P. (2012). Diseño de un sistema de riego por aspersión con automatización para el sector de Ugnag, cantón Penipe. En G. A. Patricia, Diseño de un sistema de riego por aspersión con automatización para el sector de Ugnag, cantón Penipe (pág. 40). Riobamba.
- Avedaño, V. M. (2004). Estudio de la factibilidad de la introducción de un sistema de riego por gravedad-aspersión en el caserío Corral de Piedra concepción Tutuapa San Marcos. Guatemala.
- Cevallos, J., & Ramos, J. (2018). Spatial assessment of the potential of renewable energy: The case of Ecuador. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81:1154-1165.
- Cifuentes., R. L. (2017). Guía de desarrollo de proyectos pequeños y medianos proyectos de Energía Eólica. En R. L. Cifuentes., Guía de desarrollo de proyectos pequeños y medianos proyectos de Energía Eólica. (págs. 11-14). Santiago de Chile: Rodrigo Vieytes.
- Collado, E. (2017). Sistema de Riego Inteligente para optimizar el consumo de agua en cultivos en Panamá. *Global Partnerships for Development and Engineering Education*, 19-21.
- Cox, S. (2002). The global key to precision agriculture and sustainability. *Comput Electron Agric*, 93-111.
- Diciembre Sanahuja, S. (2 de 10 de 2017). Sistemas de Control con Lógica Difusa: Métodos de Mandami y de Takagu-Sugeno-Kang(TSK). Recuperado el 5 de 2 de 2021, de

- http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/173788/TFG_2017_DiciembreSanahuja_Samuel.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Earth, G. (2020). Google Earth. Recuperado el 12 de 3 de 2021, de Google Earth: <https://earth.google.com/web/@-0.93490023,-78.60220615,2780.42332586a,214.54272997d,35y,359.22202748h,0t,0r>
- ESPAC. (2019). Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua 2018. Quito: ESPAC.
- FAO. (2018). El trabajo de la FAO sobre el cambio climático (Vol. I). París: FAO.
- FCCyT. (2018). Agricultura de precisión. México: INCyTU.
- Fierro, A. (2018). Diseño e implementación de un sistema de irrigación inteligente en la hacienda cochicaranqui ubicada en el cantón ibarra. Recuperado el 15 de 2 de 2021, de <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/9117>
- García, E. B. (2013). Fuentes de energías renovables. Recuperado el 1 de 03 de 2019, de Monografías.com: <https://www.monografias.com/docs110/fuentes-energias-renovables-ppt/fuentes-energias-renovables-ppt3.shtml>
- García, H. (27 de 9 de 2011). Slideshare. Recuperado el 3 de 2 de 2021, de Slideshare: https://es.slideshare.net/hjgg_jacob/cálculo-de-prdidas-de-carga-en-tuberas
- García, P. H. (2017). Determinación del método más eficiente para calcular la evotranspiración potencial para un modelo lluvia-escorrentia en la cuenca Huancané. Puno.
- Gómez, R. F. (2010). Manual de Riego para agricultores Módulo 3: Riego por Aspersión. Sevilla.
- Hamidat, A., Benyoucef, B., & Hartani, T. (2003). Small-scale irrigation with photovoltaic water pumping system in Sahara regions. *Renewable Energy*, 1081-1096.
- Hidrobo, B. &. (2011). Diseño de un sistema de turbobombeo y riego por aspersión en la comunidad de San Francisco de Cunuguachay. Riobamba.
- INEC. (2020). Proyección de la Población Ecuatoriana, por años calendario, según cantones 2010-2020. Quito: INEC.
- Jensen, M. E. (1963). Estimating evapotranspiration from solar radiation. *J. Irrig. Drain. Div. ASCE* 89(LR4). Proceedings of the America Society of Civil Engineers.
- Li, M., & Chung, S. (2015). Special issue on precision agriculture. *Computers and electronics in agriculture*, 112-117.

- López, K. (Julio de 2015). Diseño de la estructura física de un AS/RS para fines didácticos. Recuperado el 6 de Marzo de 2020, de http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/12914.pdf?fbclid=IwAR0d4SHC8OGgWIOjJeIWv_GfuZqROfEsU4uQcfq4Rj3oHmzpER31VSFoTW0
- López, V. (2019). Desarrollo y desafíos de proyectos de Generación de Energía Solar Fotovoltaica en Chile. Chile: Universidad Técnica Federico Santa María.
- Mark, J. (2017). Global list of countries powered 100% by renewable energy, or close to it. Obtenido de Green Road Journal: <https://www.agreenroadjournal.com/2016/05/global-list-of-countries-powered-100-by.html>
- Mataix, C. (1986). Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. Madrid: Ediciones del Castillo S.A.
- Mott., R. L. (2006). Mecanica de fluidos. Pearson.
- Nikesh Gondchawar, D. R. (2016). IoT Based Smart Agriculture. JARCCE, Vol 5, Num 6.
- Ola , L., & Salas, J. (21 de 06 de 2020). Diseño e implementación de un sistema de generación fotovoltaico conexión a red con almacenamiento para el laboratorio de fuente alternativas de energía de la universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga. Recuperado el 2 de 1 de 2020, de <https://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/2715>
- Parvaresh, A., Ashrafzadeh, A., & Ramezani, A. (2019). A financial comparative study of solar and regular irrigation pumps:. Renewable Energy, 1096-1103.
- Pedrollo. (2020). Pedrollo. Obtenido de Pedrollo: https://www.pedrollo.com/public/allegati/CP%200.25-2.2%20kW_ES_60Hz.pdf
- Pereira, L. S. (2010). El Riego y sus Tecnologías. Lisboa : Europa-América.
- Plastigama. (22 de 02 de 2021). Plastigama Wavin. Obtenido de Plastigama Wavin: <http://plastigama.com/wp-content/uploads/2018/09/Tuberi%CC%81as-y-accesorios-de-PVC-y-PE-BD-uso-agri%CC%81cola.pdf>
- Richard G. Allen, L. S. (s.f.). Evapotranspiración del cultivo, guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos . Roma.
- Rodriguez, K., De Moure, F., & Quiñones , J. (2020). Energía solar fotovoltaica. CIENCIA, vol 71, número 3, 1-6.

- Romero, J. (2015). Análisis del funcionamiento de paneles fotovoltaicos y su utilización en las regiones de la costa y sierra del Ecuador. Caso de estudio: Biblioteca Pompeu Fabra de Mataró. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Sánchez, F. J. (2017). Hidrología Superficial y Subterránea. España.
- Silva, P. (2015). Manual de estudio y ejercicios relacionados con el contenido de agua en el suelo y su uso por los cultivos. Santiago de Chile.
- Tataglia, A. (2019). Tecnología fotovoltaica con paneles bifaciales: ¿Vuelve para quedarse? Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Tsang, M., Sonnemann, G., & Bassani, D. (2016). Life-cycle assessment of cradle-to-grave opportunities and environmental impacts of organic photovoltaic solar panels compared to conventional technologies. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 37-48.
- Vaca, D., & López, J. (2019). Mapa solar del Ecuador 2019. Quito: Scinergy.
- Vargas, Y. R. (2011). Análisis de la evotranspiración real en el cultivo de rosa. Bogotá.
- Venegas, M., Villicaña, E., & Arrieta, L. (2015). Quantification and characterization of solar radiation at the departament of La Guajira-Colombia by calculating atmospheric transmissivity. *Prospect*, Vol 13, N° 2, 54-63.
- Veziñ, T., Meunier, S., Quéval, L., Cherni, J., Vido, L., Darga, A., . . . Marchand, C. (2020). Borehole water level model for photovoltaic water pumping systems. *Applied Energy*.
- Wald, L. (2007). Solar radiation energy (fundamentals). *Encyclopedia of life Support Systems (EOLSS)*. Solar Energy conversion and photoenergy Systems.
- Yingdong, Y., Jiahong, L., Hao, W., & Miao, L. (2018). Assess the potential of solar irrigation systems for sustaining pasture lands in arid regions – A case study in Northwestern China. *Applied Energy*, 3176-3782.
- Zavala, V., Lopez, R., Reza, J., Martinez, J., & Lao, M. (2020). Optimal management of a multisector standalone direct pumping photovoltaic irrigation system. *Applied Energy*.
- Zhang , B., Jiang, H., & Han , X. (2015). Study on Corn Water Saving Irrigation Decision-making Model. *Advance Journal of Food Science and Technology* , 9-12.

ANEXOS