



Diseño de un sistema híbrido óptimo con gestión de la demanda.

Cela Abata, Cristian Paul y Pantoja Guangasi, Kevin Alexander

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electromecánica

Trabajo de unidad de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero en
Electromecánica

Ing. Llanos Proaño, Jacqueline del Rosario PhD.

01 de Marzo del 2024

Latacunga.

Reporte de verificación de contenido

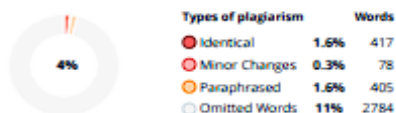


Tesis_Cela - Pantoja_Final.pdf

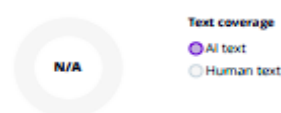
Scan details

Scan time: March 1th, 2024 at 17:11 UTC Total Pages: 102 Total Words: 25286

Plagiarism Detection



AI Content Detection



Plagiarism Results: (38)

<p>Gómez - DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO RENOVABLE C... 1.1%</p> <p>https://m.rionet.upv.es/bitstream/handle/10251/158563/g%3b3mez%20-%20dise%c3%91o%20y%20optim...</p> <p>Francisco Javier</p> <p>TESIS DOCTORAL "DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO RENOVABLE CON GESTIÓN DE LA DEMANDA Y APLICACIONES EN PENÍNSULA Y MODO ISLA"...</p>
<p>ESTUDIO DE CONTROL DE FRECUENCIA Y DETERMINACIÓN DE RESERVAS 1%</p> <p>https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2023/05/estudio-cydr-2023-parte-1-informe-preliminar.pdf</p> <p>GERENCIA DE OPERACIÓN</p> <p>ESTUDIO DE CONTROL DE FRECUENCIA Y DETERMINACIÓN DE RESERVAS Parte 1 Informe Preliminar GERENCIA DE OPERACIÓN Mayo 2023 Estudio de Cont...</p>
<p>Plan-Energetico-Nacional-WEB-2022.pdf 1%</p> <p>https://www.cne.gob.do/wp-content/uploads/2022/08/plan-energetico-nacional-web-2022.pdf</p> <p>El Plan Nacional es Energético elaborado por la Comisión Nacional de Energía (CNE) por mandato de La Ley General de Electricidad No. 125-...</p>
<p>Estimación de la vida útil de baterías en Sistemas Eléctricos de Pequeña ... 1%</p> <p>http://idus.us.es/bitstream/handle/11441/82048/rfm-1155-jimenez.pdf?sequence=1&isAllowed=y</p> <p>Manuel Jiménez Cañizares</p> <p>1.2 Objetivos Figura 1.3 Constitución de un vehículo eléctrico [20]. 1.2 Objetivos El objeto del presente proyecto es realizar una esti...</p>

Certified by
Copleaks

About this report
help.copleaks.com

copleaks.com
in f o t



Ing. Llanos Proaño, Jacqueline del Rosario PhD

Director



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electromecánica

Certificación

Certifico que el trabajo de unidad de integración curricular: **“Diseño de un sistema híbrido óptimo con gestión de la demanda”** fue realizado por los señores **Cela Abata, Cristian Paul y Pantoja Guangasi, Kevin Alexander**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 01 de marzo de 2024



.....
Ing. Llanos Proaño, Jacqueline del Rosario, PhD

C. C.: 0502527039



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electromecánica

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Cela Abata, Cristian Paul**, con cédula de ciudadanía n° 0504298753 y **Pantoja Guangasi, Kevin Alexander**, con cédula de ciudadanía n° 1805483508, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de unidad de integración curricular: **“Diseño de un sistema híbrido óptimo con gestión de la demanda”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 01 de marzo de 2024

Cela Abata, Cristian Paul

C.C.: 0504298753

Pantoja Guangasi, Kevin Alexander

C.C.: 1805483508



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electromecánica

Autorización de Publicación

Nosotros **Cela Abata, Cristian Paul**, con cédula de ciudadanía n° 0504298753 y **Pantoja Guangasi, Kevin Alexander**, con cédula de ciudadanía n° 1805483508, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de unidad de integración curricular: **“Diseño de un sistema híbrido óptimo con gestión de la demanda”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 01 de marzo de 2024

Cela Abata, Cristian Paul

C.C.: 0504298753

Pantoja Guangasi, Kevin Alexander

C.C.: 1805483508

Dedicatoria

El presente trabajo de integración curricular está dedicado a mi amada familia. En especial a mi madre por su incansable esfuerzo, dedicación, apoyo incondicional y amor han sido la fuente inagotable de inspiración a lo largo de cada etapa de mi vida.

A mis tíos Juan, Sergio, Jorge y a mi tía Ana quienes han desempeñado roles fundamentales como figuras paternas y maternas. Su constante atención, apoyo y sabios consejos han sido guías cruciales, convirtiéndose en ejemplos a seguir y pilares esenciales en mi vida.

A Luis y Kevin a quienes considero como hermanos. Que me han acompañado en cada aventura, compartiendo muy gratos momentos que han enriquecido mi vida de manera inigualable.

A mi querida abuela María y mi abuelo Segundo, quienes desde mi infancia me cuidaron, educaron, me guiaron por el buen camino y me enseñaron a valorar y agradecer cada esfuerzo realizado. Quiero dedicar un reconocimiento especial a mi abuela quien con su amor incondicional me ha dejado una huella imborrable en mi corazón, aunque ahora no este conmigo sé que desde cielo me está cuidando y dando sus bendiciones.

Cristian Cela

Dedicatoria

El presente trabajo de integración curricular va dedicado a mi familia, este logro es tanto o más suyo que mío, a mi madre quien siempre supo guiarme, educarme, cuidarme y apoyarme incondicionalmente desde mis inicios.

A mi padre quien siempre me ha impulsado a ser mejor en cada aspecto de mi vida y quien siempre ha buscado el bienestar de toda mi familia.

A mi hermano que es un pilar en mi vida, por quien trato de mejorar cada día y poder ser un ejemplo de superación mostrándole que nunca hay que rendirse.

A mi abuelita quien me ha apoyado durante toda mi vida.

A todos les dedico con todo el corazón mi esfuerzo plasmado en este proyecto, una dedicatoria no expresa todo el amor y agradecimiento que siento hacia ustedes porque son mi razón de ser, todo el esfuerzo realizado a lo largo de la carrera fue y siempre será por y para todos ustedes.

Kevin Pantoja

Agradecimiento

Agradezco a Dios por guiarme por el buen camino, por no dejarme vencer y darme fuerza, voluntad, dedicación y disciplina en cada día de mi vida.

Un agradecimiento especial a mi amada familia por su incondicional apoyo, sabiduría, valiosos consejos y la confianza depositada en mí, han sido fundamentales en cada etapa de mi vida

Agradezco a mi directora del trabajo de integración curricular Ph.D. Jacqueline Llanos, quien con su experiencia y sabiduría nos brindó su apoyo, paciencia y confianza que hizo posible la realización de este proyecto. Al Dr. Diego Ortiz quien en su momento nos compartió su conocimiento, sabiduría, tiempo y paciencia para la culminación del proyecto. Ambos son no solo mentores excepcionales, sino también personas extraordinarias.

A mis amigos Joel, Kevin y Richi por compartir sus experiencias y conocimiento durante la etapa académica. Los momentos compartidos han sido enriquecedores y su constante esfuerzo, dedicación y disciplina han demostrado ser personas excepcionales y amigos leales.

Cristian Cela

Agradecimiento

Agradezco en primer lugar a Dios por la posibilidad que me dio de poder cursar esta maravillosa carrera, por darme las fuerzas para salir adelante ante cualquier circunstancia que se presente en el camino y por darme la sabiduría para actuar en cada aspecto de mi vida.

En segundo lugar, un agradecimiento muy especial a mis amados padres, mi padre Wilson Pantoja y mi madre Rosa Guangasi por todo su esfuerzo y por cada día de trabajo duro que me permitieron salir adelante y poder llegar a ser un profesional, gracias por apoyarme en todo momento y por confiar en mí.

A mi querido hermano Daniel Pantoja, gracias por estar siempre junto a mí para darme alegrías en los momentos que más lo necesitaba y por impulsarme a mejorar cada día.

A mi querida abuelita Aida Guangasi, gracias por estar siempre a mi lado y apoyarme en los buenos y malos momentos, por tus consejos y porque nunca perdiste la fe en mí.

A mis amigos de la universidad Joel, Cristian y Richier, con quienes llegamos a ser una familia, gracias por todos los momentos compartidos y por su ayuda en cada etapa de la carrera.

A mi tutora de trabajo de integración curricular Ing. Jacqueline Llanos Ph.D. y al Ing. Diego Ortiz Ph.D., por toda su ayuda, por la paciencia que nos han tenido y por compartirnos su conocimiento para poder sacar adelante este trabajo. Son unos maestros increíbles.

Kevin Pantoja

ÍNDICE DE CONTENIDO

Caratula	1
Reporte de verificación de contenido	2
Certificación	3
Responsabilidad de Autoría	4
Autorización de Publicación	5
Dedicatoria	6
Dedicatoria	7
Agradecimiento	8
Agradecimiento	9
Índice de contenido	10
Índice de figuras	13
Índice de tablas	15
Índice de ecuaciones	16
Resumen	23
Abstract	24
Capítulo I: Marco metodológico de la investigación	25
Antecedentes	25
Planteamiento del problema	26
Importancia y justificación	28
Alcance del Proyecto	30
Objetivos	31

<i>Objetivo general</i>	31
<i>Objetivos específicos</i>	31
Capitulo II: Estado del arte	32
Requerimiento hídrico del cultivo	34
<i>Caracterización del suelo</i>	34
<i>Evotranspiración</i>	36
<i>Agua Útil</i>	37
<i>Lamina neta de riego</i>	38
<i>Necesidad neta diaria de riego</i>	38
<i>Frecuencia máxima de riego</i>	39
<i>Lámina bruta de riego</i>	39
<i>Volumen de riego</i>	40
Selección del Sistema de Riego	40
<i>Sistema de riego por aspersion</i>	41
Dimensionamiento de la electrobomba	45
<i>Perdidas primarias</i>	46
<i>Perdidas secundarias</i>	51
<i>Carga dinámica total</i>	52
<i>Potencia requerida por la bomba</i>	52
Generación distribuida	53
Sistema Híbrido de Energía basado en Paneles Solares y Baterías	54
Gestión de la demanda	57
Capitulo III: Metodología	59
Metodología para diseño óptimo del sistema híbrido con gestión de la demanda	59
Datos de entrada	60

Problema de optimización y modelo matemático	64
Modelamiento de las unidades de generación	65
Modelamiento gestión de la demanda	66
Restricciones del problema de Optimización.....	67
Capítulo IV: Caso de estudio.....	73
Localización y caracterización del área destinada al riego.....	73
Dimensionamiento del sistema de riego.....	80
Dimensionamiento y selección de la electrobomba	82
Definición de recurso solar y escenarios de estudio	91
Capítulo V: Análisis de resultados de la metodología planteada	98
Validación del Sistema Híbrido Óptimo con Gestión de la Demanda.....	98
Análisis comparativo con otros métodos de dimensionamiento	105
Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones	113
Conclusiones.....	113
Recomendaciones.....	114
Bibliografía	115
Anexos.....	122

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Componentes de un sistema de riego por aspersión	41
Figura 2 Disposición de los aspersores.....	42
Figura 3 Diagrama de un sistema fotovoltaico autónomo.....	55
Figura 4 Insolación global promedio en Ecuador.....	56
Figura 5 Base de datos de radiación solar anual.....	57
Figura 6 Esquema de manejo de la demanda.....	58
Figura 7 Metodología del diseño óptimo del sistema híbrido con gestión de la demanda	60
Figura 8 Requerimiento hídrico del cultivo.....	61
Figura 9 Dimensionamiento del sistema de riego.....	62
Figura 10 Dimensionamiento de la electrobomba.....	62
Figura 11 Análisis del recurso solar	63
Figura 12 Área considerada para el sistema de riego por aspersión	73
Figura 13 Evotranspiración del cultivo de referencia.....	76
Figura 14 Precipitación efectiva para cada mes del año	77
Figura 15 Necesidad neta diaria de riego para cada mes.....	78
Figura 16 Dimensiones del estanque presente en el campus	80
Figura 17 Curva característica de la bomba seleccionada.....	89
Figura 18 Comportamiento de la irradiación solar a lo largo del año	92
Figura 19 Energía mensual generada.....	93
Figura 20 Radiación semanal promedio del mes de marzo	94
Figura 21 Radiación semanal promedio del mes de septiembre.....	95
Figura 22 Operación del sistema híbrido de energía con gestión de la demanda en marzo.....	99
Figura 23 Comportamiento de las BESS en un día de la semana de marzo	100
Figura 24 Volumen acumulado suministrado en un día de la semana de marzo.....	100

Figura 25 <i>Operación del sistema híbrido de energía con gestión de la demanda</i>	101
Figura 26 <i>Comportamiento de las BESS en un día de la semana de septiembre</i>	102
Figura 27 <i>Volumen acumulado suministrado en un día de la semana de septiembre</i>	103
Figura 28 <i>Curva de demanda diaria fija a emplear en el sistema híbrido óptimo</i>	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Propiedades físicas del suelo</i>	35
Tabla 2 <i>Valores del coeficiente único del cultivo Kc</i>	36
Tabla 3 <i>Comparativa entre sistemas de riego</i>	40
Tabla 4 <i>Espaciamiento entre aspersores y laterales</i>	43
Tabla 5 <i>Factor de salidas múltiples</i>	49
Tabla 6 <i>Coeficiente de Hazen-Williams para diferentes materiales</i>	49
Tabla 7 <i>Horas de riego permitidas y restringidas</i>	71
Tabla 8 <i>Características del suelo franco arenoso</i>	74
Tabla 9 <i>Parámetro Kc del césped</i>	75
Tabla 10 <i>Características técnicas del aspersor seleccionado para el sistema de riego</i>	81
Tabla 11 <i>Caudal requerido en tramos de tubería</i>	83
Tabla 12 <i>Perdidas Primarias en el sistema de riego por aspersión</i>	87
Tabla 13 <i>Perdidas por accesorios en el sistema de riego por aspersión</i>	88
Tabla 14 <i>Características técnicas de la electrobomba CP210B</i>	90
Tabla 15 <i>Estaciones del año en Ecuador</i>	92
Tabla 16 <i>Costos de inversión establecidos por tecnología de generación</i>	96
Tabla 17 <i>Resultados de la planificación</i>	98
Tabla 18 <i>Volumen diario suministrado y tiempo total de operación de la electrobomba</i>	104

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 <i>Evotranspiración del cultivo</i>	36
Ecuación 2 <i>Agua Útil</i>	37
Ecuación 3 <i>Lamina neta de riego</i>	38
Ecuación 4 <i>Necesidad neta diaria de riego</i>	38
Ecuación 5 <i>Frecuencia máxima de riego</i>	39
Ecuación 6 <i>Lámina bruta de riego</i>	39
Ecuación 7 <i>Volumen de riego</i>	40
Ecuación 8 <i>Intensidad de precipitación</i>	44
Ecuación 9 <i>Tiempo de aplicación</i>	45
Ecuación 10 <i>Diámetro teórico</i>	45
Ecuación 11 <i>Caudal</i>	46
Ecuación 12 <i>Perdidas primarias</i>	46
Ecuación 13 <i>Número de Reynolds</i>	47
Ecuación 14 <i>Factor de fricción</i>	47
Ecuación 15 <i>Perdidas primarias por salidas múltiples</i>	48
Ecuación 16 <i>Condición de cumplimiento de presión</i>	50
Ecuación 17 <i>Presión en el origen del ramal</i>	51
Ecuación 18 <i>Presión al final del ramal</i>	51
Ecuación 19 <i>Perdidas secundarias</i>	51
Ecuación 20 <i>Carga dinámica total</i>	52
Ecuación 21 <i>Potencia de la bomba hidráulica</i>	52
Ecuación 22 <i>Volumen del estanque</i>	61
Ecuación 23 <i>Función objetivo del problema de optimización</i>	64
Ecuación 24 <i>Costos de inversión</i>	65
Ecuación 25 <i>Costos de operación</i>	65

Ecuación 26 <i>Modelo fotovoltaico</i>	65
Ecuación 27 <i>Modelo de la temperatura de las células solares</i>	65
Ecuación 28 <i>Condiciones iniciales del sistema de almacenamiento</i>	66
Ecuación 29 <i>Energía suministrada por el sistema de almacenamiento en un tiempo t</i>	66
Ecuación 30 <i>Cumplimiento del requerimiento hídrico del cultivo</i>	67
Ecuación 31 <i>Balance de potencias</i>	67
Ecuación 32 <i>Restricción asociada a la potencia fotovoltaica generada</i>	68
Ecuación 33 <i>Restricción asociada a la potencia de vertimiento</i>	68
Ecuación 34 <i>Restricción de límite de energía máxima y mínima de las BESS</i>	68
Ecuación 35 <i>Restricciones para la potencia de carga</i>	69
Ecuación 36 <i>Restricción para la tasa máxima de potencia de carga</i>	69
Ecuación 37 <i>Restricciones para la potencia de descarga</i>	69
Ecuación 38 <i>Restricción para la tasa máxima de potencia de descarga</i>	69
Ecuación 39 <i>Restricción para la tasa máxima de potencia de descarga</i>	70
Ecuación 40 <i>Restricción de la potencia instalada del sistema de almacenamiento</i>	70
Ecuación 41 <i>Restricción de activación de tiempo mínimo de encendido de la electrobomba</i> ...71	71
Ecuación 42 <i>Restricción del tiempo de no activación de la electrobomba</i>	71
Ecuación 43 <i>Restricción de la energía no suministrada</i>	72

Nomenclatura: Problema de optimización

$BESS$	Sistema de almacenamiento de energía en baterías.
$BESS^{inst}$	Potencia instalada del sistema de almacenamiento de energía en baterías.
$Bombeo^{agua}$	Caudal nominal de la electrobomba.
C^{BESS}	Costo del sistema de almacenamiento de energía.
$C^{BESS,op}$	Costo de operación de las baterías.
C^{ENS}	Penalización por energía no suministrada.
C^{PV}	Costo de la generación fotovoltaica.
C^{vert}	Penalización de vertimiento de energía del sistema PV.
CI	Costos de inversión.
CO	Costos de operación.
$Demand^{agua}$	Demanda de agua en un día no consecutivo de riego.
$Dem^{bomba}(t)$	Potencia nominal de la electrobomba.
$ENS(t)$	Energía no suministrada.
$E(t)$	Energía del BESS.
$E(t - 1)$	Energía del BESS en el instante anterior.
E_o	Energía inicial del BESS.
FRC	Factor de recuperación de capital.
$Irr(t)$	Irradiancia solar.
n	Número de horas.
n_c	Eficiencia de carga de las baterías.
n_d	Eficiencia de descarga de las baterías.
η_{inv}	Eficiencia del inversor.
η_T	Eficiencia térmica del panel.

$NOCT$	Temperatura del sistema fotovoltaico en condiciones normales.
$p^{BESS,C}(t)$	Potencia de carga de las baterías.
$p^{BESS,D}(t)$	Potencia de descarga de las baterías.
$p^{BESS,inst}$	Potencia a instalar para el sistema de almacenamiento.
$PV(t)$	Potencia fotovoltaica generada.
pV^{inst}	Potencia instalada del sistema fotovoltaico.
$PV^{vert}(t)$	Producción de energía del sistema fotovoltaico de vertimiento.
t	Tiempo.
t_f	Tiempo final de no riego.
t_o	Tiempo inicial de no riego.
$T_{amb}(t)$	Temperatura ambiente.
$T^{on,bomba}(t)$	Tiempo de encendido de la bomba.
$Tp(t)$	Temperatura de las células solares.
$X^{on}(t)$	Estado de activación de la bomba.

Nomenclatura: Sistema de riego

ΔP	Variación de presión [Adimensional].
ε	Rugosidad absoluta [mm].
η_{Tot}	Rendimiento total de la bomba [%].
μ	Viscosidad dinámica del fluido [kg/m*s].
ν	Viscosidad cinemática del fluido [m ² /s].
ρ	Densidad [kg/m ³].
\emptyset	Diámetro de la tubería [mm].
Área	Superficie cultivada [m ²].
AU	Agua útil o lámina total de agua [mm].
C	Coefficiente de Hazen-Williams [Adimensional].
Cc	Contenido de humedad a capacidad de campo [%].
Da	Densidad aparente del suelo [g/cm ³].
D_i	Longitud característica de la geometría [diámetro en m].
Ef	Eficiencia del sistema de riego [%].
ET_C	Evotranspiración del cultivo [mm/día]
ET_o	Evotranspiración del cultivo de referencia [mm/día]
F	Factor de salidas múltiples de Christiansen [Adimensional].
f	Factor de fricción [Adimensional].
FR_{max}	Máximo intervalo entre riegos [días].
g :	Gravedad [m/s ²].
H	Altura útil o carga dinámica total (CDT) [m].
Ha	Altura del elevador [m].
H_e	Altura del soporte del aspersor [m].
H_f	Perdidas primarias [mca].

H_{fSM}	Perdidas primarias por salidas múltiples [mca].
h_f	Perdidas secundarias [mca].
H_g	Pendiente o desnivel [m].
H_o	Presión de trabajo del aspersor [m].
H_s	Distancia vertical [m].
I	Intensidad de precipitación [cm/h]
K	Coeficiente de Resistencia [Adimensional].
K_c	Coeficiente del cultivo [Adimensional].
L	Longitud de la tubería principal [m].
L_b	Lámina bruta de riego [mm].
L_f	Longitud de la tubería secundaria [m].
L_n	Lamina neta de riego [mm].
N_n	Necesidad neta diaria de riego [mm].
P	Potencia de la bomba hidráulica [W].
P_a	Presión de operación del aspersor [mca].
P_e	Precipitación efectiva [mm].
P_{mp}	Contenido de humedad a punto de marchites permanente [%].
P_n	Presión al final del ramal [mca].
P_o	Presión en el origen del ramal [mca].
Q	Caudal del aspersor [l/s].
Q_t	Caudal por la tubería [l/s].
Q_T	Caudal total bombeado [m ³ /s].
Re	Número de Reynolds [Adimensional].
S_m	Espaciamiento entre laterales [m].
S_1	Espaciamiento entre aspersores [m].

T	Tiempo de aplicación [h].
$umbral$	Umbral de riego [%].
v	Velocidad de flujo promedio [m/s].
V_{riego}	Volumen de riego a aplicar [m ³].
z	Profundidad de la zona radicular [mm].

Resumen

El presente trabajo de integración curricular presenta el diseño óptimo de un sistema híbrido de energía con gestión de la demanda, operando en modo aislado. La metodología propuesta es aplicada para un riego óptimo, por lo tanto, se gestiona el tiempo de encendido de una electrobomba. Se propone tres niveles para el diseño, el primero que consiste en definir los datos de entrada entre ellos el requerimiento hídrico del cultivo, dimensionamiento del sistema de riego y de la electrobomba, así como también el dimensionamiento y escenarios relevantes del recurso solar. El segundo consiste en el problema de optimización propuesto en el que se considera el cumplimiento del volumen de riego y gestión de demanda, obteniendo la capacidad óptima de las unidades, tiempo óptimo de encendido de la electrobomba, el sistema híbrido diseñado incluye un sistema de generación fotovoltaico con almacenamiento de energía en baterías, para la solución de los problemas de optimización se usa FICO Express. Finalmente se verifica la operación del sistema híbrido de energía validando la propuesta. La metodología es aplicada para satisfacer el requerimiento hídrico del cultivo en un área definida en el Campus Gral. Guillermo Rodríguez Lara de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga. Este dimensionamiento óptimo con gestión de demanda es comparado con una técnica tradicional, así como también con una planificación óptima. La propuesta de este trabajo presenta menor costo de implementación al tener un mejor aprovechamiento de los recursos y gestionar la operación óptima de la electrobomba estableciendo el tiempo adecuado de uso con el fin obtener un consumo energético más balanceado y que minimiza los picos de energía, logrando cumplir las exigencias técnicas del riego.

Palabras clave: Sistema híbrido, Gestión de la demanda, FICO Xpress.

Abstract

The present work of curricular integration presents the optimal design of a hybrid energy system with demand management, operating in isolated mode. The proposed methodology is applied for an optimal irrigation, therefore, the turn-on time of an electric pump is managed. Three levels are proposed for the design, the first one consists of defining the input data including the crop water requirement, sizing of the irrigation system and the electric pump, as well as the sizing and relevant scenarios of the solar resource. The second one consists of the proposed optimization problem in which the compliance of the irrigation volume and demand management is considered, obtaining the optimum capacity of the units, optimum turn-on time of the electric pump, the hybrid system designed includes a photovoltaic generation system with energy storage in batteries, for the solution of the optimization problems FICO Express is used. Finally, the operation of the hybrid energy system is verified to validate the proposal. The methodology is applied to satisfy the water requirement of the crop in a defined area in the Campus Gral. Guillermo Rodriguez Lara of the University of the Armed Forces ESPE Latacunga extension. This optimal sizing with demand management is compared with a traditional technique, as well as with an optimal planning. The proposal of this work presents a lower implementation cost by having a better use of resources and managing the optimal operation of the electric pump by establishing the appropriate time of use in order to obtain a more balanced energy consumption and minimizing energy peaks, achieving the technical requirements of irrigation.

Key words: Hybrid system, Demand management, FICO Xpress.

Capítulo I

Marco metodológico de la investigación

Antecedentes

A nivel mundial la generación eléctrica es obtenida a través de la participación de un 63% por combustibles fósiles, las fuentes renovables con un aporte del 27% y finalmente la energía nuclear con el 10%, provocando que esta sea predominada por combustibles fósiles (Organización Latinoamericana de Energía [OLADE], 2021). Sin embargo, en Latinoamérica y el Caribe es considerada una región con alto potencial de energía renovable, pero que cuenta con ciertas limitaciones en varias localidades provocada por brechas en el acceso a la red o la muy baja calidad en la entrega de este, haciendo que opten por suplir su consumo energético a través de sistemas de generación por combustibles fósiles (Alarcón, 2015).

Es así que en Ecuador el servicio eléctrico se ha fundamentado en la distribución del recurso energético a distintos sectores de la región, para abastecer a la mayor cantidad de usuarios a través de las redes de transmisión y solventar los requerimientos energéticos, aprovechando los recursos naturales comandada por la generación hidráulica presente en el país.

Sin duda esta dependencia a la generación hidráulica como eje principal en la generación de electricidad en Ecuador ha provocado que se lleve a cabo distintos estudios y proyectos que aborden otro tipo de soluciones y permitan al país diversificar su producción eléctrica, en este contexto, gracias a políticas y planes de electrificación el gobierno ha invertido en nuevas fuentes de producción energética logrando así la construcción de algunos proyectos como lo es la planta eólica Villonaco con 16.5MW de potencia instalada, o la de San Cristóbal con 2.40 MW en Galápagos y 35 plantas fotovoltaicas que suman 26.74MW de potencia instalada, y proyectos futuros como el Aromo de aproximadamente 200 MW de potencia instalada (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2019).

En consecuencia, con la creación de nuevas políticas las personas están en la capacidad de aprovechar los recursos naturales presentes en su entorno para su beneficio propio con la inserción de fuentes de energías alternativas, es así, que se emite una regulación enfocada al área de la generación distribuida, el cual define las pautas y reglamentos direccionada a la producción de energía autónoma, cuya producción sea auto consumida, sincronizada y entregada a la red en caso de excesos, para usuarios que desean instalar sistemas de micro generación fotovoltaica con capacidad nominal instalada de hasta 30kW en bajo voltaje, bajo parámetros previos cumplidos (Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables [ARCERNNR], 2021).

En base a esta regulación lo que se pretende es involucrar más fuentes de generación autónoma que reduzca la dependencia a la red eléctrica tradicional por lo que en base a este escenario la empresa de análisis de datos trazó un escenario favorable para el crecimiento de generación solar de 15 % a lo largo de la década, lo que llevaría la generación fotovoltaica del país de sólo 26,7 MW en 2019 a 450 MW en 2030, o más de 4 gigavatios GW, si la tasa global de crecimiento de generación solar sigue aumentando (Global Data UK, 2020).

De este modo, los sistemas híbridos de energía aparecen como una solución prometedora, económica y efectiva que ayuda a la minimización del uso de combustible y brinda energía a localidades aisladas o en busca de autonomía (Alarcón, 2015). Dentro de este marco, el bombeo de agua mediante sistemas fotovoltaicos han demostrado ser una solución interesante para mejorar el acceso al agua, de hecho, son económicamente competitivos en áreas fuera de la red teniendo un bajo costo de mantenimiento y no emitiendo gases de efecto invernadero durante la operación (Vezin et al., 2020).

Planteamiento del problema

En la actualidad, la confianza en el suministro convencional de energía y su dependencia a la red eléctrica tradicional exponen a estos sistemas a distintas vulnerabilidades. Para superar estos obstáculos surge la necesidad de explorar soluciones en

la obtención de energía a partir de la diversificación y la dinamización de nuestras fuentes naturales. Para lograr esto, se propone la implementación de sistemas híbridos de generación energética que proporcionen una respuesta a la demanda energética de manera sostenible y sustentable, con la finalidad de aumentar la seguridad en situaciones de crisis, contribuir a la conservación de recursos, a la mitigación del impacto ambiental y emplear lo menos posible la energía de la red eléctrica incluyendo en su diseño gestión de la demanda.

En consecuencia, la innegable preocupación del agotamiento de las fuentes tradicionales además de su afección directa al ambiente ha provocado que se busquen nuevas soluciones para satisfacer la demanda energética de forma innovadora, eficiente y sostenible, por tal razón, el campo de las energías renovables se presenta como una opción prometedora que ha estado en pleno crecimiento y auge debido a las distintas tecnologías y sistemas que son cada vez más accesibles y eficientes que han demostrado su capacidad para proporcionar una fuente confiable y sustentable de energía.

Es por ello que en el campus Guillermo Rodríguez Lara en Belisario Quevedo, se identifica una oportunidad en el área situada al noroeste de la institución. En este espacio se encuentra un estanque diseñado originalmente para almacenamiento de agua de riego por la que se paga mensualmente. Sin embargo, en la actualidad, este recurso valioso permanece en un estado de desuso en respuesta a este escenario, se presenta un proyecto con visión al futuro, una propuesta que busca reactivar este estanque y darle un propósito significativo. La esencia de esta iniciativa consiste en diseñar un sistema híbrido que energizará de forma óptima una bomba hidráulica, esto establecerá la pauta para una implementación a futuro del sistema de bombeo y de riego para jardines del campus.

A esto se debe considerar la variabilidad de la radiación presente en el sector donde las fluctuaciones provocan un consumo ineficiente de energía. Por tal motivo, la búsqueda de la gestión de la demanda será enfocada a establecer un método de caracterización de la demanda, siendo en este caso la carga a usar una bomba de agua, por lo que en relación a

eso se pretende plantear un problema de optimización que arroje la configuración óptima del sistema híbrido de energía que permitirá optimizar el uso de la energía generada y almacenada, minimizando pérdidas y maximizando el uso de la potencia generada.

En este contexto, el diseño óptimo de un sistema híbrido con gestión de la demanda representa una gran oportunidad de mejora en el área de Energías Renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas Sede Latacunga. Primero se dimensionará la bomba de agua acorde a las características técnicas del estanque, luego se caracterizará la irradiación solar presente en el sector. Posteriormente se planteará el modelo de los equipos involucrados y problema de optimización. Finalmente se obtendrá la configuración óptima del sistema fotovoltaico y de almacenamiento de baterías junto con la gestión de la demanda, esto con el propósito de desarrollar una solución energética que se adapte a los requerimientos establecidos por la universidad y con la finalidad de aprovechar los recursos renovables presentes en el campus.

Importancia y justificación

El desarrollo del presente proyecto tiene como objetivo principal realizar el diseño óptimo de un sistema híbrido con gestión de la demanda, esto permitirá obtener un aprovechamiento total de los recursos naturales presentes en el campus, encaminado a contar con sistemas energéticos autónomos y sustentables que satisfagan el requerimiento eléctrico de diversos procesos de la institución con la finalidad de limitar el uso de la energía eléctrica tradicional y contribuir a la filosofía universitaria fundamentada en el paradigma Smart University.

En este contexto, tras haber recopilado los recursos naturales existentes en la universidad se determina que está cuenta con un reservorio de agua para suministro de riego comunitario que actualmente se encuentra en desuso, por lo que mediante este proyecto el agua de riego acumulada en el estanque se transformaría en un recurso esencial para mantener áreas verdes, jardines y vegetación en el campus, contribuyendo a un entorno más

agradable y funcional. Por lo que, sin duda el aprovechamiento eficiente de este recurso natural mediante la configuración óptima del sistema híbrido de generación eléctrica garantizará un suministro adecuado, eficiente y sustentable de agua en todo momento, mejorando la calidad de vida en el campus.

En consecuencia, para lograr un uso óptimo del recurso hídrico presente en la institución será necesario incluir un método de gestión de la demanda, el cual, permitirá ajustar la precisión de la alimentación de la carga según las necesidades reales de uso, evitando así picos de consumo innecesarios y optimización del recurso energético proporcionado por el sistema, lo que se traducirá en ahorros significativos en costos operativos y de mantenimiento.

Sin duda, el presente trabajo está profundamente ligado a los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera ya que se involucran varios conocimientos necesarios para diseñar e integrar dichos componentes y garantizar un funcionamiento adecuado y eficiente, en vista que emplea diversos aspectos relacionados con las energías renovables, optimización, eficiencia energética y mecánica de fluidos, puntos que serán fundamentales para llevar a cabo los objetivos planteados en la propuesta y resolver los problemas presentes en la misma.

La importancia que tiene es enfocada al aprovechamiento del recurso renovable disponible en el campus mediante el diseño óptimo de un sistema híbrido con gestión de la demanda que está basado en un sistema fotovoltaico y el almacenamiento de energía en las baterías por lo que sin duda el diseño de este tipo de proyectos permite incursionar en la diversificación de la producción de energía eléctrica e incentiva a los estudiantes a participar en proyectos prácticos y relacionados a tecnologías limpias que impulsa el desarrollo de investigaciones sobre la eficiencia y el uso óptimo de la energía.

Dentro de este marco es importante que los proyectos de tesis estén direccionados a la sustentabilidad y que promuevan la implementación de fuentes de energía renovable con el propósito de minimizar la contaminación producida por otras fuentes de generación y se creen

nuevas soluciones para reducir la dependencia a la generación hidráulica mejorando así el rendimiento del sistema eléctrico del país.

De hecho, los resultados y hallazgos de este estudio servirán para enriquecer el conocimiento científico y tecnológico en el área de las energías renovables, sirviendo como una guía a futuras implementaciones a gran escala y una base en la formación profesional en la adquisición de habilidades científicas y tecnológicas, en busca de soluciones sostenibles e innovadoras, creando una relación directa con la filosofía de la universidad y lograr un mejor posicionamiento en los diferentes rankings internacionales de educación superior.

Alcance del Proyecto

El alcance de este proyecto está centrado en Diseñar un óptimo sistema híbrido con gestión de la demanda sin conexión a la red que integre el siguiente tipo de fuente renovable específica, en este caso, con la inclusión de paneles solares, junto al almacenamiento de baterías, considerando la gestión de la bomba. Esto se centrará en determinar la configuración óptima de los distintos componentes del sistema, además, se abordará el dimensionamiento de una bomba de agua, lo cual requerirá de la identificación de características técnicas para generar el perfil de demanda. Esto se llevará a cabo considerando un área que cuenta con un estanque situado al noroeste del campus y aprovechando la radiación solar presente en ese sector y el agua de riego disponible.

Para lograr esto, se planteará un problema de optimización que permitirá realizar la gestión de la demanda optimizando el uso de la energía generada y almacenada mediante el modelamiento de los distintos componentes del sistema híbrido que se ajusten a la operación de la carga, la cual, estará encaminada a un sistema de riego para el campus.

Es importante destacar que el alcance del presente diseño óptimo de un sistema híbrido con gestión de la demanda se limitará a una propuesta, no se ejecutará la implementación del sistema híbrido, sin embargo, se enfocará en realizar un proyecto completo técnico y económico que será presentada para una etapa de implementación con asignación de fondos.

Objetivos

Objetivo general

- Diseñar un sistema híbrido óptimo de energía con gestión de la demanda.

Objetivos específicos

- Dimensionar la bomba hidráulica para el sistema de bombeo a abastecer por el sistema híbrido óptimo.
- Caracterizar el recurso solar presente en el Campus Gral. Guillermo Rodríguez Lara de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga.
- Caracterizar el consumo de demanda energética correspondiente a la bomba hidráulica.
- Diseñar el sistema híbrido óptimo con gestión de demanda.

Capítulo II

Estado del Arte

En la actualidad aún existe lugares donde el acceso a la red es complicado y la creciente necesidad de abastecer el consumo energético hace que se esté muy ligado a la dependencia de la red eléctrica tradicional, es decir, en base a esta premisa se ha optado por abastecer distintos procesos productivos con fuentes de energía alternativas que minimizan la dependencia de la red eléctrica, por ende, se han realizado diversos proyectos de implementación de sistemas híbridos de energía, el cual, sin duda lo que se busca es aprovechar los recursos naturales existentes en el entorno.

Es así, que como una solución energética se han diseñado sistemas híbridos que consta de la generación fotovoltaica y eólica mediante el uso de algoritmos de optimización dando como resultado un alto índice de confiabilidad tecnológica del sistema con el propósito de verificar su viabilidad y seguridad en el suministro de energía, donde se han obtenido resultados positivos en relación al costo de la energía tomando un valor menor y competitivo resultando que sean muy factibles su instalación (Cueva, 2019).

Dentro de este marco, la generación híbrida y la gestión de la demanda son dos conceptos claves que desempeñan un papel fundamental en el aprovechamiento de los recursos de una zona, de esta manera en una investigación previa mediante un algoritmo basado en Artificial Bee Colony (ABC) se realizó el dimensionamiento óptimo de los componentes, presentando una buena propiedad de convergencia y capacidad para proporcionar resultados de buena calidad siendo capaz de gestionar flujo de potencia (Singh et al., 2016).

En este contexto desarrollar una metodología para el dimensionamiento de los equipos de generación resulta una tarea esencial que involucra diversas maneras de abordar este tipo de problemática, de hecho, en una publicación realizada se propone una formulación de un problema lineal entero mixto que en base a un perfil de demanda determina el número óptimo

de componentes de generación fotovoltaica – baterías que son implementados en lugares comerciales, residenciales y desconectados a la red (Yu et al., 2014).

Por lo que, la ejecución de este tipo de proyectos es necesario abordar su viabilidad e impacto, es por ello, que se realizó un estudio que consideró indicadores económicos que involucra la combinación del costo de la electricidad, el porcentaje de exceso de energía y los indicadores del ciclo de vida operativo, además, de indicadores de evaluación ambiental que permitió determinar la disponibilidad de fuentes renovables y el impacto ambiental, los resultados mostraron que la configuración óptima conduce a la maximización de los indicadores económicos y ambientales (Al-Sharafi et al., 2017).

En otra investigación realizada se estableció un análisis financiero y comparativo realizado entre bombas hidráulicas llevado a cabo en el este y sur de Irán, se consideró una potencia fotovoltaica de 5.5 kW incluido un banco de baterías para el almacenamiento de dicha energía, llegando a la conclusión de que el bombeo fotovoltaico es más rentable que los sistemas eléctricos, aun considerando que este país cuenta con subsidios destinados al sector eléctrico (Parvaresh Rizi et al., 2019).

Estos estudios han promovido avances positivos en el uso de fuentes de energías renovables en distintos proyectos como lo fue en la mejora del rendimiento de cultivos, es así, que en una parcela de alfalfa se diseñó un sistema de generación híbrido direccionado a la satisfacción de la demanda energética de un sistema de riego haciendo uso de un sistema de control mediante lógica difusa que influye en el encendido o apagado de la bomba, suministrando la cantidad óptima de agua requerida por el cultivo que provocó un incremento en su rendimiento entre el 13% al 20% (Montaluisa & Vargas, 2021).

En este trabajo de investigación se propone un sistema híbrido de energía con gestión de la demanda, en donde se busca abastecer energéticamente todo un sistema de riego que incluye el bombeo hidráulico para un riego por aspersión. Una característica relevante de este trabajo es que se considera la gestión de la electrobomba con el objetivo de lograr un riego

óptimo, para lo cual se requiere el estudio previo de todos los factores que influyen para conseguirlo. Por lo tanto, en las siguientes secciones se explica los fundamentos relacionados al riego, así como conceptos del dimensionamiento de sistemas de riego por bombeo eléctrico y finalmente sistemas de energía distribuida.

Requerimiento hídrico del cultivo

En el diseño de un sistema de riego una de las primeras fases que se lleva a cabo es definir la operación del cultivo, el cual sirve para establecer las necesidades brutas que deberá transportar la instalación en relación a la época de mayor necesidad (GESTIRIEGO, 2016).

En este contexto, para la obtención del requerimiento hídrico del cultivo, es necesario definir la caracterización del suelo, evotranspiración del cultivo, agua útil, lamina neta, frecuencia máxima, necesidad neta diaria, lamina bruta y finalmente se obtiene el volumen de riego a suministrar. Esto permitirá conocer la operatividad que deberá tener el sistema de riego junto con la selección adecuada de la bomba eléctrica de agua.

Caracterización del suelo

La composición del suelo depende de varios factores externos como, humedad, temperatura, su ubicación, entre otras. Por lo que, definir el tipo de suelo presente resulta una tarea importante ya que existen varias condiciones o características que definen al suelo, por tal razón, se hará énfasis específicamente en la textura que este posee.

En función de su textura, se dividen en los siguientes tipos básicos siendo estos los suelos arenosos, arcillosos, limosos y francos, en relación a estos tipos de textura se definen otros aspectos físicos importantes del suelo como lo es la densidad aparente, capacidad de campo y punto de marchitez permanente (Carrazón, 2007).

La **densidad aparente** según Carrazón (2007) menciona que: "Es una medida de la porosidad de un suelo, se determina dividiendo el peso de suelo seco entre el volumen total, de

modo que un mayor valor de densidad aparente significará menor porosidad” (p. 54). Se expresa en (g/cm³).

En la **capacidad de campo** el contenido de humedad presente en el suelo es el ideal para el desarrollo de los cultivos por lo que según Carrazón (2007) indica que “es el máximo nivel de humedad que el suelo puede retener, es decir, el contenido de humedad del suelo una vez que el drenaje ha terminado” (p. 56). Se expresa en porcentaje de volumen de agua (%).

El **punto de marchitez permanente** representa la relación que existe entre el agua consumida y los nuevos aportes de agua que se da a las plantas, por el cual, estas absorben hasta tal punto que su recurso hídrico disminuye y su absorción de agua no se completa provocando que estas terminen marchitándose (Carrazón, 2007). Se expresa en porcentaje (%).

Los aspectos físicos del suelo anteriormente mencionados se encuentran establecidos dentro de la Tabla 1 en la cual se presentan los valores recomendados para cada uno de los diferentes tipos de suelo.

Tabla 1

Propiedades físicas del suelo

Tipos de suelo	Densidad aparente (g/cm³)	Capacidad de campo (%)	Punto de marchitez permanente (%)
Arenoso	1.65	9	4
Franco arenoso	1.5	14	6
Franco	1.4	22	10
Franco arcilloso	1.35	27	13
Arcilloso	1.25	35	17

Nota. En la tabla se presentan las diferentes propiedades físicas que presentan los suelos y el valor recomendado para cada tipo de suelo. Tomado de (Carrazón, 2007).

Evotranspiración

Es considerado como parte fundamental dentro del establecimiento de la cantidad de agua requerida por el suelo a fin de conservar un nivel de humedad adecuado, así como, un nivel de salinidad idóneo a lo largo del cultivo, en vista a que representa la adición entre la transpiración junto con el agua evaporada del suelo (Arias, 2012). Para la determinación de la evotranspiración del cultivo como indica Carrazón (2007) se emplea la Ecuación 1.

Ecuación 1

Evotranspiración del cultivo.

$$ET_C = ET_o * Kc$$

Donde:

ET_C : Evotranspiración del cultivo [mm/día]

ET_o : Evotranspiración del cultivo de referencia [mm/día]

Kc : Coeficiente del cultivo [Adimensional]

Para obtener la evotranspiración de referencia tras una consulta realizada a varios expertos en 1990 establecieron y recomiendan la aplicación del método de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) Penman-Monteith, para ello se emplea datos meteorológicos específicos de la localidad a analizar (Allen et al., 2006).

Dentro de este marco, el coeficiente del cultivo (Kc) se diferencia 3 fases del cultivo siendo estos el Kc inicial que comprende desde la siembra hasta que existe un 10% de cobertura del suelo, Kc medio desde el 10% de cobertura hasta la cobertura máxima y Kc final desde la madurez hasta el corte (Carrazón, 2007). Para obtener el valor de Kc , se utiliza según el tipo de cultivo seleccionado, definido para cada etapa de desarrollo del mismo, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2

Valores del coeficiente único del cultivo Kc

Cultivo	Tipos	Kc	Kc	Kc final
		inicial	medio	
Pastos (césped, turfgrass)	Época fría	0.90	0.95	0.95
	Época caliente	0.80	0.85	0.85

Nota. En la tabla se puede observar los valores estándar referentes al coeficiente único de cultivo Kc acorde al cultivo. Tomado de (Allen et al., 2006).

Agua Útil

Según Carrazón (2007) el agua útil se refiere a aquella que: “Es utilizable por los cultivos o también como el intervalo de humedad disponible obtenido mediante la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente multiplicada por la profundidad radicular y densidad aparente” (p. 57). La Ecuación 2 representa el agua utilizable para riego.

Ecuación 2

Agua Útil.

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

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 [%].

Pmp: Contenido de humedad a punto de marchites permanente [%].

Da: Densidad aparente del suelo [g/cm³].

z: Profundidad de la zona radicular [mm].

Lamina neta de riego

Es el valor real de la lámina de agua que puede ser absorbida por los cultivos y se representa por la Ecuación 3.

Ecuación 3

Lamina neta de riego.

$$L_n = umbral * AU$$

Donde:

L_n : Lamina neta de riego [mm].

AU : Agua útil o lamina total de agua [mm].

umbral: Umbral de riego [%].

El umbral de riego dependerá del tipo de cultivo el cual se esté tratando, por lo que si se presenta plantas delicadas se optan por valores entre (30% - 40%), para el caso del pasto al no ser de extremo delicado se puede optar por valores entre (50% - 60%) (Carrazón, 2007).

Necesidad neta diaria de riego

La necesidad neta diaria de riego es fundamental para conocer el nivel de lámina real a cumplir en cada uno de los meses, en vista, a que ya se está considerando la precipitación que penetra en el cultivo y por lo tanto es aprovechada por el mismo, se emplea la Ecuación 4.

Ecuación 4

Necesidad neta diaria de riego.

$$Nn = ET_C - Pe$$

Donde:

Nn : Necesidad neta diaria de riego [mm].

ET_C : Evotranspiración del cultivo [mm].

Pe : Precipitación efectiva [mm].

Frecuencia máxima de riego

Para Carrazón (2007) en relación a la frecuencia de riego establece que: “Es el máximo tiempo que se puede dejar entre dos riegos consecutivos de tal manera que el déficit de humedad no sea inferior al umbral de riego” (p. 105). Se emplea la Ecuación 5.

Ecuación 5

Frecuencia máxima de riego.

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

Donde:

FR_{max} : Máximo intervalo entre riegos [días].

L_n : Lamina neta [mm].

ET_C : Evotranspiración del cultivo [mm].

Lámina bruta de riego

Considerada como la cantidad de agua necesaria para el cultivo teniendo en consideración la compensación necesaria por perdidas relacionadas a la evaporación y eficiencia del sistema de riego al estar expuesto a perturbaciones externas como el viento (Arias, 2012). Para el cálculo se emplea la Ecuación 6

Ecuación 6

Lámina bruta de riego.

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

Donde:

L_b : Lámina bruta de riego [mm].

FR_{max} : Máximo intervalo entre riegos [días].

ET_C : Evotranspiración del cultivo [mm].

E_f : Eficiencia del sistema de riego [%].

Volumen de riego

Representa el volumen total de agua que será aplicado en el cultivo a fin de conservarlo en condiciones óptimas (Arias, 2012). Se calcula mediante la Ecuación 7.

Ecuación 7

Volumen de riego.

$$V_{riego} = L_b * \text{Área}$$

Donde:

V_{riego} : Volumen de riego a aplicar [m³].

L_b : Lámina bruta de riego [mm].

Área: Superficie cultivada [m²].

Selección del Sistema de Riego

Existen diversos métodos por el cual ejecutar el riego para abastecer la demanda hídrica de un cultivo en específico, por lo que, se considera diversos aspectos tanto económicos como técnicos para la selección de un sistema de riego el cual se ajuste a los requerimientos. En la Tabla 3 se detallan ciertos aspectos que son necesarios conocer previo a la selección de un sistema de riego.

Tabla 3

Comparativa entre sistemas de riego

Características	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

Características	Riego por superficie	Riego por aspersión a alta presión	Riego por aspersión a baja presión	Riego por goteo
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
Recomendaciones	No conveniente para terrenos arenosos o accidentados.	Utilización muy flexible. Posibles problemas fitosanitarios.	Posibles problemas fitosanitarios.	Conveniente para cultivos de alto valor agregado o con aguas salinas.

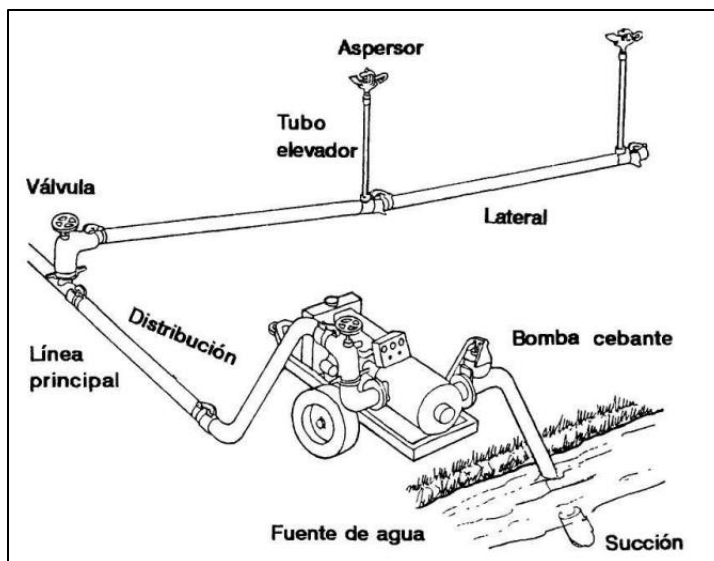
Nota. Se muestra en la tabla las características de cada uno de los principales sistemas de riego empleados. Tomado de (Carrazón, 2007).

Sistema de riego por aspersión

El riego por aspersión está conformado por un conjunto de tuberías conectadas entre sí, por el cual, circula el agua hacia cada uno de los aspersores, donde a través de sus boquillas expulsan está simulando un día de lluvia con la finalidad de completar una lámina de agua aplicada a un área (Ortega, 1994). En la Figura 1 se observa un sistema de riego por aspersión tradicional.

Figura 1

Componentes de un sistema de riego por aspersión



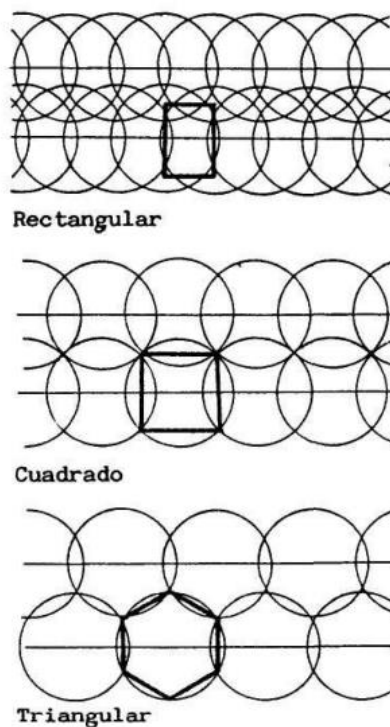
Nota. Se muestra los componentes básicos de un sistema de riego por aspersión el cual cuenta con la máquina de bombeo, tuberías, válvulas, accesorios y los aspersores. Tomado de (Ortega, 1994).

En este tipo de sistemas de riego se debe considerar las distintas distribuciones que se pueden optar para realiza un riego uniforme, así como la separación que existe entre cada aspersor y las tuberías. Para definir el número de aspersores a instalar se debe determinar el arreglo de aspersores.

El aspersor según su radio de alcance no presenta un riego uniforme en la superficie debido a que en su parte más alejada no alcanza un riego deseado, por lo que, al implementar aspersores aledaños según su disposición genera un riego más equilibrado en toda la superficie considerada, para esto existe 3 tipos de arreglos básicos el cual se aplica según la forma del área o la red de distribución a implementar (Briceño et al., 2013). En la Figura 2 se observa las configuraciones.

Figura 2

Disposición de los aspersores



Nota. En la figura se muestra las separaciones de los aspersores según sea la distribución cuadrada, rectangular o triangular. Tomado de (Ortega, 1994).

Una de las maneras para definir la distancia entre aspersores y líneas según Briceño et al. (2013) establece que para la disposición en cuadrado el espaciamiento (e), $e < 1.4$ del radio de alcance del aspersor (R), para la disposición rectangular entre aspersores en la misma línea $e < 1.4$ de R y entre líneas $e < 1.3$ de R y para la disposición triangular entre aspersores de una misma línea $e < 1,7$ de R y la distancia entre líneas $e < 1,5$ de R . Otra forma de determinar el espaciamiento entre los aspersores es mediante los índices presentados en la Tabla 4.

Tabla 4

Espaciamiento entre aspersores y laterales

Velocidad del viento	En cuadrado	En rectángulo	
	$Ea = EI$	Ea	EI
Sin viento	65%	65%	65%

Velocidad del viento	En cuadrado	En rectángulo	
	Ea = EI	Ea	EI
Hasta 6 km/h (1.67m/s)	60%	50%	65%
Hasta 12 km/h (3.33m/s)	50%	40%	60%
Hasta 15 km/h (4.17m/s)	40%	40%	50%
Mayor a 15 km/h (4.17 m/s)	30%	30%	40%

Nota. En la tabla se puede observar los valores recomendados para el cálculo del espaciamiento entre los aspersores y entre los laterales. Tomado de (Luza, 2006).

Finalmente se debe considerar la selección del aspersor por su presión de funcionamiento, es así que Ortega (1994) establece que los aspersores a baja presión funcionan con presiones inferiores a 20mca, los aspersores de media presión trabajan entre 20 y 45 mca y por último los aspersores de alta presión con valores superiores a los 45 mca.

La **intensidad de precipitación** representa la cantidad de caudal en forma de lluvia que será distribuida a través de los aspersores sobre su área de irrigación (Valencia Ramirez et al., 1987). Para el cálculo se emplea la Ecuación 8.

Ecuación 8

Intensidad de precipitación.

$$I = \frac{Q * 360}{S_1 * S_m}$$

Donde:

I: Intensidad de precipitación [cm/h]

Q: Caudal del aspersor [l/s].

S₁: Espaciamiento entre aspersores [m].

S_m: Espaciamiento entre laterales [m].

Finalmente, según Carrazón (2007) considera que el **tiempo de aplicación** es el tiempo necesario que se debe aplicar para cumplir con el valor de la lámina bruta proporcionada por cada aspersor. Para el cálculo se emplea la Ecuación 9.

Ecuación 9

Tiempo de aplicación.

$$T = \frac{L_b}{I}$$

Donde:

T : Tiempo de aplicación [h].

L_b : Lámina bruta [mm].

I : Intensidad de precipitación [mm/h].

Dimensionamiento de la electrobomba

Para obtener el valor de la electrobomba a implementar hay que considerar dos aspectos importantes para un correcto dimensionamiento, por lo que primero se debe determinar el caudal necesario y presión requerida, dado por el requerimiento de agua según la aplicación.

El diámetro teórico sirve para obtener el valor de velocidad y con eso se ajusta el diámetro de la tubería hasta obtener una velocidad dentro del rango establecido. Para esto se emplea la Ecuación 10.

Ecuación 10

Diámetro teórico.

$$\emptyset = 1.35 * \sqrt{Q_t} * 25.4$$

Donde:

\emptyset : Diámetro de la tubería [mm].

Q_t : Caudal por la tubería [l/s].

Carrazón (2007) establece que el **caudal** se define como: “El volumen que atraviesa una sección transversal de una tubería, río o canal en un determinado tiempo” (p. 29). Para su cálculo se emplea la Ecuación 11.

Ecuación 11

Caudal.

$$v = \frac{Q_t}{A}$$

Donde:

v : Velocidad de flujo promedio [m/s].

Q_t : Caudal por la tubería [m³/s].

A : Área de la tubería [m²].

Perdidas primarias

La obtención de las pérdidas primarias ayuda al equipo de bombeo a solventar esta dificultad en el traslado del fluido, por lo que, según el trayecto que debe recorrer se generan pérdidas de cargas por rozamiento y pérdidas por accesorios que disminuyen la presión del fluido (Mott, 2015).

Para obtener el valor referente a las pérdidas de energía provocadas por el rozamiento del fluido se utiliza la ecuación de Darcy utilizada tanto para fluido laminar como turbulento, enfocado en pérdidas de energía debido a la fricción en las secciones rectas y largas de tubería redonda (Mott, 2015). Para su cálculo se utiliza la Ecuación 12.

Ecuación 12

Perdidas primarias.

$$H_f = f \frac{L * v^2}{2g * \phi_i}$$

Donde:

H_f : Perdidas primarias [m].

f : Factor de fricción [Adimensional].

L : Longitud de la tubería principal [m].

v : Velocidad de flujo promedio [m/s].

ϕ_i : Diámetro interno de la tubería [m].

g : Gravedad [m/s²].

Según Cengel (2007) el **número de Reynolds** (Re) indica que “en la mayoría de las condiciones prácticas, el flujo en una tubería circular es laminar para $Re \lesssim 2\,300$, turbulento para $Re \gtrsim 4\,000$, y de transición entre ellos” (p. 352). Se expresa en la Ecuación 13.

Ecuación 13

Número de Reynolds.

$$Re = \frac{v * \phi_i * \rho}{\mu}$$

Donde:

Re : Número de Reynolds [Adimensional].

ϕ_i : Longitud característica de la geometría [diámetro en bm].

$\nu = \mu/\rho$ = Viscosidad cinemática del fluido [m²/s].

μ : Viscosidad dinámica del fluido [kg/m*s].

ρ : Densidad [kg/m³].

El **factor de fricción** en régimen turbulento viene dado en la Ecuación 14.

Ecuación 14

Factor de fricción.

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\epsilon}{3.71 * \phi_i} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$$

Donde:

f : Factor de fricción [Adimensional].

Re : Número de Reynolds [Adimensional].

ϕ_i : Diámetro interno de la tubería [mm].

ε : Rugosidad absoluta [mm].

La rugosidad absoluta dependerá del tipo de material que se esté trabajando por lo general para material plástico (PVC) se toma el valor de $\varepsilon = 0.0015\text{mm}$.

Las **perdidas primarias por salidas múltiples** se utilizan para el diseño y análisis de sistemas de agua, en donde el caudal que ingresa a la tubería se reduce a medida que avanza, por lo que la magnitud de las pérdidas de carga en la tubería será menor (Jiménez & Ramirez, 2018). Se utiliza la Ecuación 15.

Ecuación 15

Perdidas primarias por salidas múltiples.

$$Hf_{SM} = \frac{10.643 * Lf * Q_t^{1.85} * F}{C^{1.85} * \phi_i^{4.87}}$$

Donde:

Hf_{SM} : Perdidas primarias por salidas múltiples [mca].

Lf : Longitud de la tubería secundaria [m].

Q_t : Caudal por la tubería [m^3/s].

F : Factor de salidas múltiples de Christiansen [Adimensional].

C : Coeficiente de Hazen-Williams [Adimensional].

ϕ_i : Diámetro interno de la tubería [m].

Las tuberías usadas en los sistemas de riego por aspersión presentan múltiples salidas, lo que provoca pérdidas de carga por fricción porque el caudal circulante disminuye en cada salida. En la Tabla 5 se presenta el factor de salidas múltiples (F) según el número de salidas presentes en la tubería.

Tabla 5*Factor de salidas múltiples*

Número de salidas	Factor (F)	Número de salidas	Factor (F)
1	1	13	0.384
2	0.634	14	0.381
3	0.528	15	0.379
4	0.48	16	0.377
5	0.451	17	0.375
6	0.433	18	0.373
7	0.419	19	0.372
8	0.410	20	0.370
9	0.402	22	0.366
10	0.396	24	0.366
11	0.392	26	0.364
12	0.382	28	0.363

Nota. En la tabla se observan los valores recomendados para el factor de salidas múltiples en tuberías según el número de salidas. Tomado de (Plastigama, 2020).

El **coeficiente de Hazen-Williams** es un índice que se asigna según la superficie del conducto y de la edad del mismo. En la Tabla 6 se presentan valores referenciales para diferentes tipos de materiales cuando son nuevos y limpios, así como cuando llevan varios años de uso.

Tabla 6*Coeficiente de Hazen-Williams para diferentes materiales*

Material	C	Material	C
Asbesto cemento	140	Hierro galvanizado	120
Latón	130-140	Vidrio	140
Ladrillo de saneamiento	100	Plomo	130-140
Hierro fundido nuevo	130	Plástico (PE, PVC)	140-150
Hierro fundido, 10 años de edad	107-113	Tubería lisa nueva	140
Hierro fundido, 20 años de edad	89-100	Acero nuevo	140-150
Hierro fundido, 30 años de edad	75-90	Acero	130
Hierro fundido, 40 años de edad	64-83	Acero rolado	110
Concreto	120-140	Lata	130
Cobre	130-140	Madera	120
Hierro dúctil	120	Hormigón	120-140

Nota. En la tabla se puede observar los valores estándar referentes al coeficiente de Hazen-Williams para diferentes materiales. Tomado de (Alegret & Martinez, 2019).

El diseño de la línea lateral se debe considerar que no exista una gran diferencia de presión entre el primer y último aspersor, por lo que, se debe cumplir que la diferencia de presión entre los extremos no supere el 20% de la presión con la que trabaja el aspersor (Peralta & Simpfendorfer, 2001). Esta variación máxima aceptable queda definida a través de la Ecuación 16, 17 y 18.

Ecuación 16

Condición de cumplimiento de presión.

$$\Delta P \leq 0.2H_0$$

Donde:

ΔP : Variación de presión [Adimensional].

H_0 : Presión de operación del aspersor [mca].

Ecuación 17

Presión en el origen del ramal.

$$P_o = H_o + \frac{3}{4}Hf_{SM} + \frac{Hg}{2} + H_e$$

Donde:

P_o : Presión en el origen del ramal [mca].

H_e : Altura del soporte del aspersor [m].

Hg : Pendiente o desnivel [m].

Ecuación 18

Presión al final del ramal.

$$P_n = H_o - \frac{1}{4}Hf_{SM}$$

Donde:

P_n : Presión al final del ramal [mca].

Perdidas secundarias

Según Mott (2015) establece que los accesorios “interrumpen el suave flujo del fluido y provocan pérdidas adicionales debido al fenómeno de separación y mezcla del flujo que producen” (p. 377). Generalmente, los valores experimentales de pérdida de energía se dan en términos del coeficiente de resistencia (K), expresado así en la Ecuación 19.

Ecuación 19

Perdidas secundarias.

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

Donde:

h_f : Perdidas secundarias [mca].

K: Coeficiente de Resistencia [Adimensional].

v : Velocidad de flujo promedio [m/s].

g : Gravedad [m/s^2].

Carga dinámica total

La carga dinámica total (CDT) está confirmada por la suma de diferentes parámetros que representan la carga hidráulica que se pretende abastecer mediante la bomba hidráulica (Avendaño, 2004). Se emplea la Ecuación 20.

Ecuación 20

Carga dinámica total.

$$CDT = H_S + H_O + H_e + H_f + h_f$$

Donde:

CDT : Carga dinámica total [m]

H_S : Distancia vertical [m].

H_O : Presión de trabajo del aspersor [m].

H_e : Altura del soporte del aspersor [m].

H_f : Pérdidas primarias [mca].

h_f : Pérdidas por accesorios [mca].

Potencia requerida por la bomba

Es la encargada de establecer la cantidad de trabajo a invertir para impulsar un caudal a una altura determinada considerando el rendimiento total de una bomba, misma que implica el rendimiento hidráulico, volumétrico y mecánico (Mataix, 1986). Para determinar la potencia de la bomba se emplea la Ecuación 21.

Ecuación 21

Potencia de la bomba hidráulica.

$$P = \frac{Q_T * \rho * g * CDT}{\eta_{Tot}}$$

Donde:

P : Potencia de la bomba hidráulica [W].

Q_T : Caudal total bombeado [m^3/s].

ρ : Densidad del Fluido [kg/m^3].

g : Gravedad [m^2/s].

CDT : Carga dinámica total (CDT) [m].

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

Generación distribuida

Según Navarro (2020) el modelo de generación distribuida está enfocado en la generación eléctrica en puntos cercanos a los consumidores teniendo de tal forma una disminución considerable en lo que respecta a las pérdidas por distribución, se detallan algunas de las ventajas de su aplicación a continuación,

- Permite ajustar la oferta y la demanda en tiempo real.
- Posibilidad de integración dentro del marco urbanístico y el sector del transporte.
- Mayor rendimiento y reducción de costos con el uso de microrredes.
- Autogestión del consumidor, permitiéndole generar, almacenar y vender su energía producida.

El proceso de planificación permite establecer objetivos para obtener como resultado una operación óptima de un sistema de energía en base a una evaluación de ciertos aspectos técnicos, económicos y medioambientales, que en función de mejorar la operatividad se pueden combinar y resultar factible (Hatziaargyriou, 2013).

El objetivo está en establecer la demanda eléctrica el cual el sistema de generación a utilizar abastecerá con este requerimiento, por lo que es importante conocer el comportamiento del consumo eléctrico del sistema a energizar. Entonces, al obtener el comportamiento de la curva de la demanda que representa los hábitos de uso de la energía en el entorno, mediante

escenarios planteados en un horizonte de tiempo diario, semanal, mensual o anual, permitirá lograr una correcta planificación direccionada a características particulares de una localidad (Organización Latinoamericana de Energía [OLADE], 2017).

Para este tipo de aplicación se debe considerar los siguientes aspectos según Arango et al. (2001) es importante analizar fuentes alternativas de energía para operación conjunta, la funcionalidad o aplicación que se le pretende dar, características técnicas enfocados a aspectos hidráulicos, eléctricos y mecánicos y finalmente la estimación del recurso solar presente en la ubicación geográfica.

Es así que, en busca de sistemas independientes de la red, un sistema de riego mediante bombeo fotovoltaico resulta muy apto y que garantiza evitar los problemas comunes relacionados a cortes de energía, entre otros, además de tener un mínimo costo operativo (Martínez, 2017). Para este tipo de aplicación hay que definir el consumo de la electrobomba ligada a la demanda hídrica del cultivo, por lo que es esencial determinar el tiempo de riego y la frecuencia en que la carga entrará en funcionamiento.

Sistema Híbrido de Energía basado en Paneles Solares y Baterías

Países europeos han optado por la reducción del uso de combustibles fósiles provocando un mayor crecimiento de las energías renovables con una capacidad instalada de 227GW para finales del 2015, por lo que, sin duda en Ecuador la generación fotovoltaica debe ser incentivada con una nueva reforma de leyes que beneficien su instalación esto debido a que el potencial solar para generación eléctrica se estima en un valor de 312GW, aun con este potencial el desarrollo de proyectos de generación eléctrica solar es mínima (Muñoz et al., 2018).

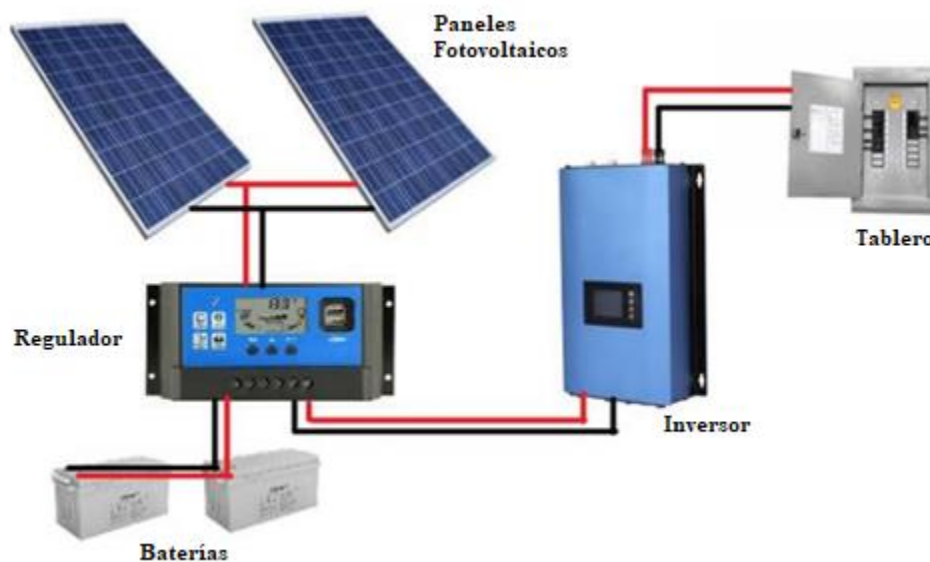
En consecuencia, la creación de proyectos relacionados a sistemas híbridos de generación contribuye a incentivar la implementación de sistemas para autoconsumo y viables para abastecer la demanda de aplicaciones para evitar la dependencia de la red tradicional y gestionar mejor su consumo personal.

El diseño de un sistema fotovoltaico conlleva una serie de cálculos que permiten determinar la cantidad de potencia a instalar, el número de paneles y selección de equipos, su funcionamiento se basa en generar la energía necesaria y almacenarla en baterías para su posterior uso volviéndolo un sistema autónomo (Panjón, 2010).

Generalmente el sistema fotovoltaico está conformado por 3 tipos principales según la configuración que sea requerida siendo estos, conectados a red, aislados de la red e híbridos, donde los elementos que conforman estos sistemas son los módulos o paneles, regulador de carga, inversor y la carga a suministrar, ver Figura 3 (Smets et al., 2016, como se citó en Barroso, 2023).

Figura 3

Diagrama de un sistema fotovoltaico autónomo



Nota. En la figura mostrada se observa la conexión de los elementos que conforma un sistema fotovoltaico autónomo. Tomado de: (Barroso, 2023).

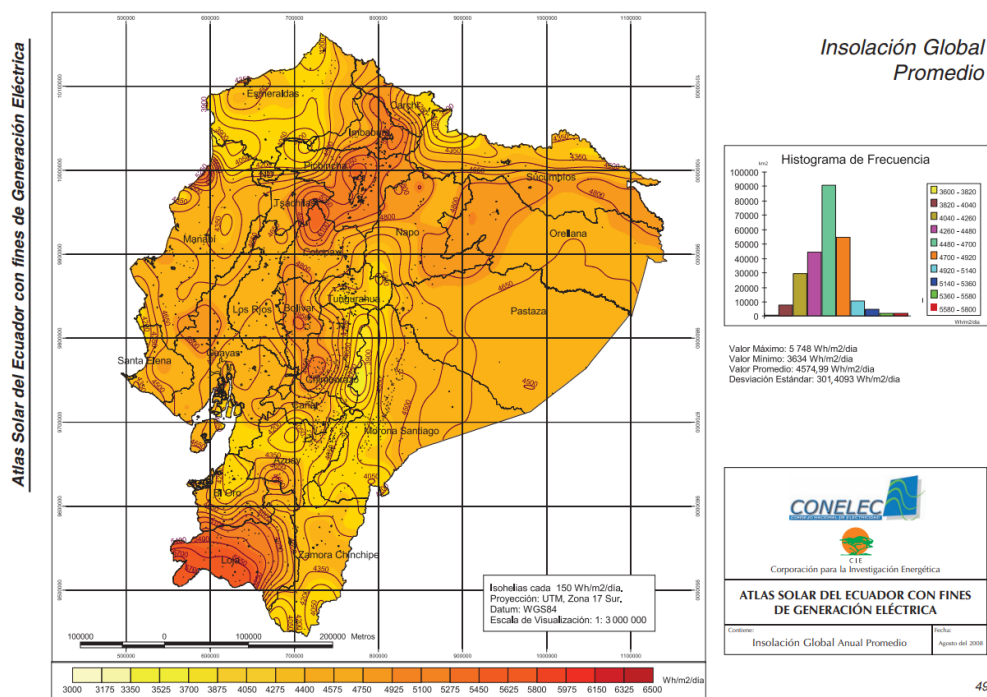
Un factor importante para crear sistemas híbridos de generación eléctrica basado en la generación fotovoltaica es determinar el comportamiento de la radiación presente en la zona

que permite conocer el aprovechamiento del recurso natural para abastecer el consumo de energía.

La radiación solar presente en un área va a estar influenciada por la topografía que en el país es variada, la situación climática, entre otras que delimitan su utilidad, para conocer cómo se comporta la radiación solar en el país el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC) ha elaborado un atlas solar que brinde una pauta inicial para impulsar el uso masivo de la energía solar como fuente energética, el cual menciona que existe un valor promedio de 4574.99 Wh/m²/día (OLADE, 2008). Ver Figura 4.

Figura 4

Insolación global promedio en Ecuador

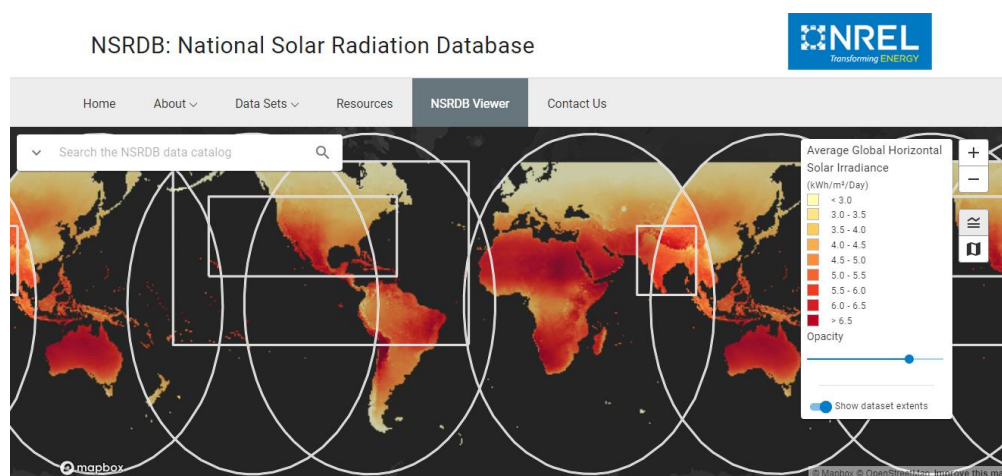


Nota. Se muestra la incidencia solar en cada zona del país confines de generación eléctrica, donde las zonas pálidas (amarillo) representa una baja incidencia solar y las zonas más intensas representa una alta incidencia solar (rojo). Tomado de: (OLADE, 2008).

Para el diseño de un sistema híbrido de energía basado en producción fotovoltaica se torna un punto fundamental dentro del mismo el conocer la radiación presente en el sector de estudio, para ello, existe la base de datos anuales presentes en National Solar Radiation Database (NSRDB) la cual permite conocer una serie de parámetros meteorológicos de cualquier zona del mundo, ver Figura 5.

Figura 5

Base de datos de radiación solar anual



Nota. Se muestra en la figura la página web que proporciona la base de datos de la radiación solar presente en el sector de estudio a lo largo de 5 años. Tomado de: (NREL Transforming ENERGY, 2023).

Gestión de la demanda

Gestionar la demanda tiene una relación directa con la eficiencia energética el cual es necesario establecer una estructura de uso o consumo eléctrico definido por la reducción o redistribución de los picos de energía diarios para esto se pueden ejecutar acciones destinadas a minimizar o controlar el consumo energético de diversos equipos (OLADE, 2017).

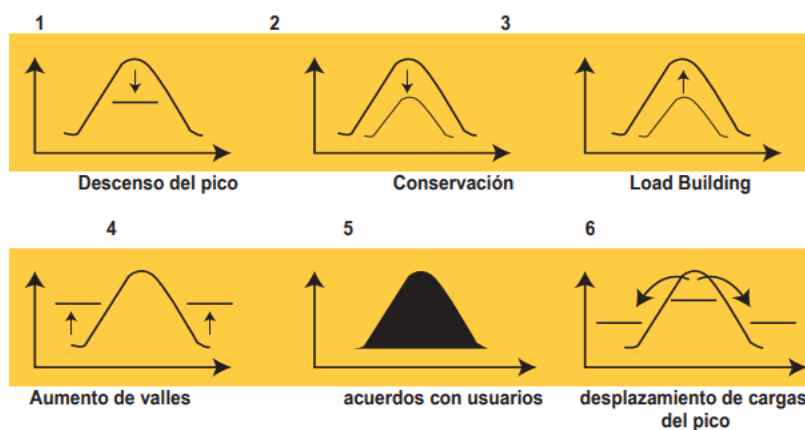
Es así como esta práctica conlleva tomar en cuenta ciertos aspectos o comportamiento de los usuarios en relación con el uso habitual que le dan al servicio eléctrico:

Para poder desarrollar acciones de control o gestión de la demanda, es necesario conocer a fondo las modalidades de consumo horario en lo que hace al nivel y estructura del consumo por usos. La realización de encuestas piloto que incluyan la recopilación de hábitos de consumo y posesión de electrodomésticos complementada con mediciones de consumos horarios, permiten obtener las curvas de carga desagregadas por usos o artefacto. (OLADE, 2017, p. 124)

Con este análisis previo se identifican grupos donde se preparan alternativas para aplicar la gestión de la demanda. En la Figura 6 se observan los distintos grupos para manejar la demanda.

Figura 6

Esquema de manejo de la demanda



Nota. Existen tres grupos principales los basados en tiempo, (1, 4, 6); los basados en incentivos y cortes, (2 y 3), y en programas de confiabilidad, por ejemplo: cargas interrumpibles, (5). Tomado de: (OLADE, 2017).

Capítulo III

Metodología para diseño óptimo del sistema híbrido con gestión de la demanda

En esta sección se presenta la metodología aplicada para planificar de forma óptima un sistema híbrido con gestión de la demanda. Se considera como componentes del sistema híbrido la generación fotovoltaica y el sistema de almacenamiento de energía basado en baterías, aislada de la red. La gestión de la demanda propuesta e incluida en el sistema consiste en la planificación óptima del riego de espacios verdes.

La metodología propuesta se muestra en la Figura 7 en donde se definen 3 etapas, la primera datos de entrada, la segunda es el problema de optimización y la última el resultado obtenido.

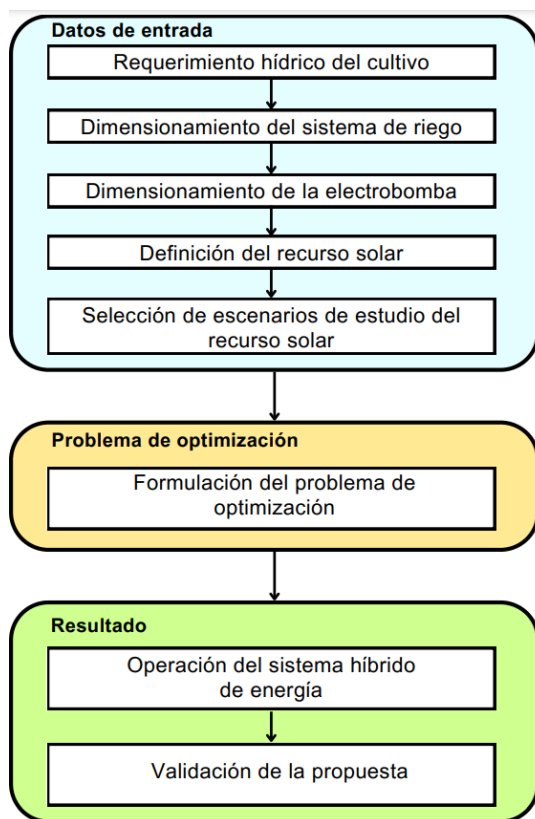
En la primera etapa se define los datos de entrada, estos están asociados a i) requerimiento hídrico del cultivo, ii) dimensionamiento del sistema de riego, iii) dimensionamiento de la electrobomba, iv) definición del recurso solar y v) definición de escenarios de estudio de recurso solar.

La segunda etapa consiste en la formulación de un modelo matemático destinado a la planificación de las tecnologías empleadas para establecer su configuración óptima, donde, se evalúan los costos de inversión y operación asociadas a restricciones propias de los modelos de generación, además, incorpora restricciones adicionales según la gestión de la demanda que flexibilice la carga, para que genere su curva de demanda en relación al horario de riego permitido. El problema se formula utilizando programación lineal a través del software “FICO Xpress”, herramienta idónea para la resolución de problemas de optimización matemática.

Finalmente, en la tercera etapa se analiza la potencia a instalar para cada tecnología de generación y su operación en los escenarios propuestos en el apartado anterior, para que se pueda validar el funcionamiento de estos y su respectivo cumplimiento con los requerimientos del sistema de riego.

Figura 7

Metodología del diseño óptimo del sistema híbrido con gestión de la demanda



Nota. Se muestra el diagrama metodológico de la propuesta de obtención de un sistema híbrido óptimo con gestión de la demanda. Elaborado por autores.

Datos de entrada

El primer paso está en establecer el requerimiento hídrico del cultivo que está asociado a varias etapas, ver Figura 8, para esto se debe caracterizar el suelo con la finalidad de obtener sus propiedades físicas, con esos parámetros se procede al cálculo del agua útil, la lámina neta y la frecuencia máxima de riego, resultados que permiten definir el máximo intervalo entre riegos. Luego, se procede con la evotranspiración del cultivo mediante el software libre CROPWAT ingresando los datos meteorológicos de la localidad se consigue la evotranspiración de referencia y la precipitación efectiva, valores que sirven para calcular la necesidad neta diaria de riego. Finalmente, mediante la lámina neta y la eficiencia del sistema

de riego se obtiene la lamina bruta, valor que se usa para fijar el volumen de agua requerido por el cultivo en toda el área.

También es completamente necesario conocer la disponibilidad de recurso hídrico para abastecer la demanda de agua diaria para el riego del cultivo, es por ello que obtener el volumen total del estanque disponible en el campus es fundamental (Canales et al., 2020). Se aplica la siguiente ecuación.

Ecuación 22

Volumen del estanque.

$$V_{\text{estanque}} = \frac{h}{3} (A_{\text{ext}} + A_{\text{int}} + \sqrt{A_{\text{ext}} * A_{\text{int}}})$$

Donde:

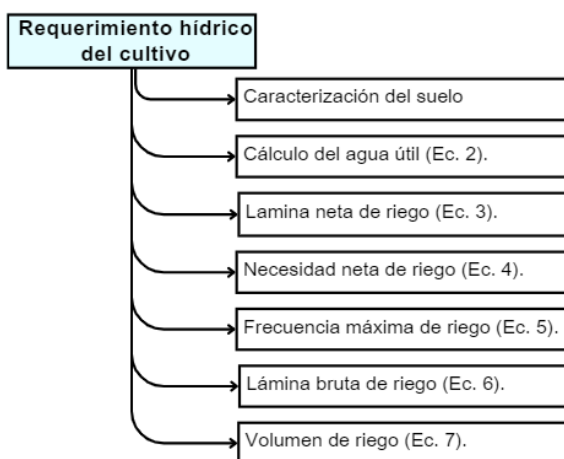
A_{ext} : Área exterior [m²].

A_{int} : Área interior [m²].

h: altura del estanque [m].

Figura 8

Requerimiento hídrico del cultivo

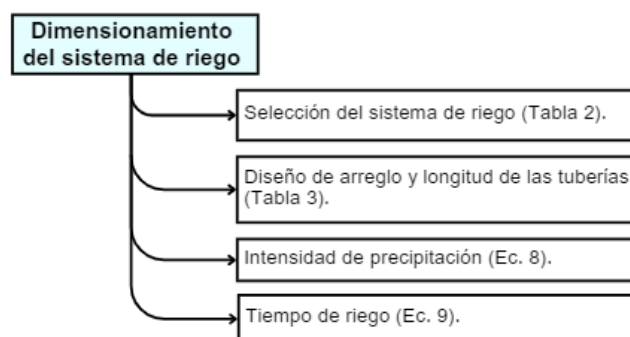


Nota. Se muestra la primera sección de los datos de entrada correspondiente al requerimiento hídrico del cultivo. Elaborado por autores.

El segundo paso consiste en el dimensionamiento del sistema de riego, ver Figura 9, que inicia con la selección del sistema de riego acorde a su aplicabilidad, características técnicas y económicas, para continuar con el diseño del arreglo de los aspersores que sirve como punto de partida para obtener la longitud y ubicación de las tuberías del sistema de riego. En consecuencia, a través de la selección del aspersor se obtiene la intensidad de precipitación que define el tiempo de operación que deberá tener el sistema de riego para cubrir toda el área.

Figura 9

Dimensionamiento del sistema de riego

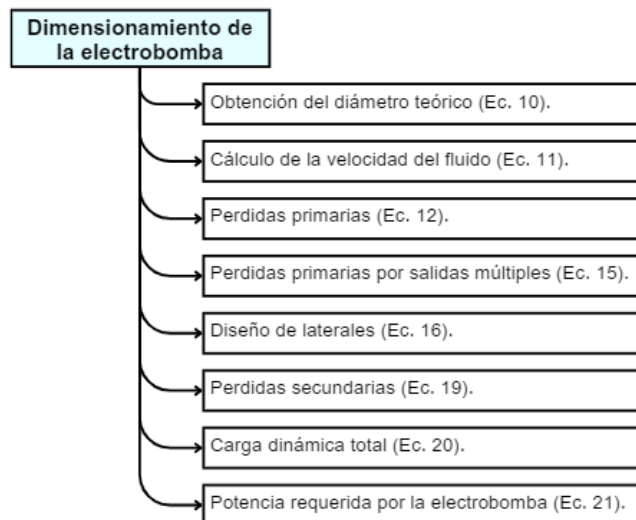


Nota. Se muestra la segunda sección de los datos de entrada de la metodología. Elaborado por autores.

El tercer paso consiste en realizar el dimensionamiento de la electrobomba, ver Figura 10, donde primeramente se obtiene un diámetro teórico para las tuberías junto con el cálculo de la velocidad del fluido, datos que son necesario para establecer las pérdidas primarias en las tuberías, en este aspecto es necesario conocer las perdidas primarias por salidas múltiples ya que el caudal de ingreso se reduce a medida que avanza por la tubería, así mismo se realiza el diseño de los laterales del sistema. Luego, se calcula las perdidas secundarias presentes en el sistema de riego para con ellas en conjunto con las perdidas primarias poder establecer finalmente la carga dinámica total y con eso obtener la potencia requerida de la electrobomba.

Figura 10

Dimensionamiento de la electrobomba

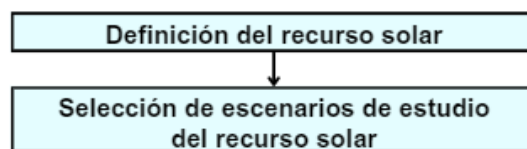


Nota. Se muestra el diagrama relacionado al proceso para el dimensionamiento de la electrobomba correspondiente a los datos de entrada. Elaborado por autores.

Finalmente, como último paso, ver Figura 11, se requiere conocer información detallada sobre el recurso solar presente en el sector de análisis, para lo cual se hace uso de la plataforma National Solar Radiation Data Base (NSRDB) que permite ingresar la ubicación exacta del sistema a instalar y como resultado se obtiene la radiación anual por horas. Con ello se selecciona los escenarios de estudio del recurso solar en función de las estaciones presentes en el año.

Figura 11

Análisis del recurso solar



Nota. Se muestra los dos últimos datos de entrada correspondientes a la primera etapa de la metodología. Elaborado por autores.

Problema de optimización y modelo matemático

En esta sección se muestra el problema de optimización para el dimensionamiento de un sistema híbrido solar y baterías con gestión de la demanda de una electrobomba el cual garantice un riego óptimo. Por lo que, al emplear una planificación óptima con gestión de la demanda de sistemas híbridos de generación fotovoltaica y baterías, se busca minimizar los costos de inversión y operación de los equipos y maximizar los beneficios técnicos, para obtener una decisión de inversión que satisfaga las restricciones técnicas en los escenarios seleccionados.

La función objetivo se muestra en la Ecuación 23 que minimiza los costos de inversión (CI) junto con los costos de operación (CO).

Ecuación 23

Función objetivo del problema de optimización.

$$Min = CI + CO$$

En la Ecuación 24 se presenta los costos de inversión asociados a la capacidad instalada para la generación fotovoltaica (PV^{inst}) y el sistema de almacenamiento de energía (BESS) ($P^{BESS,inst}$), donde FRC es el factor de recuperación de capital, n representa el número de horas de estudio, C^{PV} y C^{BESS} representan los costos por kW instalado de paneles fotovoltaicos y baterías respectivamente. Además, en la Ecuación 25 se muestra los costos de operación conformado por la sumatoria en un horizonte de tiempo de operación T , t representa el tiempo. Se incluye el costo de operación de las baterías ($C^{BESS,op}$) para mejorar la vida útil, además de la penalización por energía no suministrada (C^{ENS}) y la penalización de vertimiento de energía del sistema fotovoltaico (C^{vert}).

Las variables a optimizar son PV^{inst} y $P^{BESS,inst}$, se definen como parámetros a: C^{PV} , C^{BESS} , $C^{BESS,op}$, C^{ENS} y C^{vert} .

Ecuación 24

Costos de inversión.

$$CI := \left(\frac{FRC * n}{8760} \right) [PV^{inst} * C^{PV} + P^{BESS,inst} * C^{BESS}]$$

Ecuación 25

Costos de operación.

$$CO := \sum_{t=1}^T [P^{BESS,des}(t) * C^{BESS,op} + ENS(t) * C^{ENS} + P^{PV,vert}(t) * C^{vert}]$$

Modelamiento de las unidades de generación**Modelamiento del panel fotovoltaico**

Para el modelo fotovoltaico expresada en la Ecuación 26 se establece la potencia activa generada ($PV(t)$), la cual depende de la potencia instalada del sistema (PV^{inst}), la irradiancia solar ($Irr(t)$), la temperatura de las células solares ($Tp(t)$), la eficiencia térmica del panel (η_T) y la eficiencia del inversor (η_{inv}). Para obtener ($Tp(t)$), se hace uso de la Ecuación 27, donde involucra la ($Irr(t)$), la temperatura ambiente ($T_{amb}(t)$) y la temperatura de operación nominal de la célula (NOCT). (Velásquez et al., 2022)

Ecuación 26

Modelo fotovoltaico

$$PV(t) = PV^{inst} * \frac{Irr(t) * [1 - n_T * (Tp(t) - 25 \text{ } ^\circ\text{C}) * n_{inv}]}{1000}$$

Ecuación 27

Modelo de la temperatura de las células solares.

$$Tp(t) = T_{amb}(t) * \frac{Irr(t)}{800 \left[\frac{W}{m^2} \right]} * [NOCT - 20[^\circ\text{C}]]$$

Modelo del sistema de almacenamiento BESS

La tecnología complementaria para el sistema híbrido de generación es un sistema de almacenamiento de baterías razón por la cual se empleará el modelo propuesto en la investigación de Pozo (2022) mediante el cual representa el comportamiento del BESS a través del tiempo.

En las ecuaciones 28 y 29 se representa la cantidad de energía disponible en el BESS ($E(t)$), para ello se emplea la energía inicial del BESS (E_o), la potencia de descarga de las baterías ($P^{BESS,D}(t)$), la potencia de carga de las baterías ($P^{BESS,C}(t)$), la eficiencia de descarga de las baterías (n_d), la eficiencia de carga de las baterías (n_c) y la energía del BESS en un instante anterior ($E(t - 1)$) (Pozo, 2022).

Ecuación 28

Condiciones iniciales del sistema de almacenamiento.

$$E(t) = E_o - \frac{P^{BESS,D}(t)}{n_d} + P^{BESS,C}(t) * n_c \quad t = 1$$

Ecuación 29

Energía suministrada por el sistema de almacenamiento en un tiempo t.

$$E_t = E(t - 1) - \frac{P^{BESS,D}(t)}{n_d} + P^{BESS,C}(t) * n_c \quad t > 1$$

Modelamiento gestión de la demanda

El modelo de la gestión de la demanda tiene como objetivo establecer una operación del sistema híbrido más eficiente en función del requerimiento hídrico del cultivo, por ende, este tiene una relación directa en el consumo energético del sistema el cual busca minimizar los costos técnicos, económicos y cumplir con la cantidad de agua necesaria para el área de riego.

En la Ecuación 30 se muestra la siguiente igualdad que indica la demanda de agua en un día no consecutivo de riego ($Demand^{agua}$), debe ser igual a la sumatoria que establece el tiempo de encendido de la bomba ($T^{on,bomba}(t)$) por la cantidad de agua bombeada

($Bombeo^{agua}$), con esto se garantiza el cumplimiento del volumen diario, considerando un horizonte de tiempo de operación T y donde t representa el tiempo.

Ecuación 30

Cumplimiento del requerimiento hídrico del cultivo.

$$Demand^{agua} = \sum_{t=1}^T [T^{on,bomba}(t) * Bombeo^{agua}]$$

Restricciones del problema de Optimización

Restricción de balance de potencia

La Ecuación 31 presenta la restricción de igualdad de balance del sistema donde se debe cumplir que la potencia generada sea igual a la demanda. Es decir, la potencia fotovoltaica más la potencia de descarga de la batería menos la potencia de vertimiento ($PV(t)$, $P^{BESS,D}(t)$, $PV^{vert}(t)$) son igual a la demanda de la bomba cuando esta encendida ($Dem^{bomba}(t) * T^{on,bomba}(t)$), más la potencia en las baterías cuando está en modo carga ($P^{BESS,C}(t)$) y menos la energía no suministrada ($ENS(t)$) siendo esta una variable de holgura que permite cumplir el balance de potencia en ciertos escenarios.

Ecuación 31

Balance de potencias.

$$PV(t) - PV^{vert}(t) + P^{BESS,D}(t) = Dem^{bomba}(t) * T^{on,bomba}(t) - ENS(t) + P^{BESS,C}(t)$$

Restricciones del panel fotovoltaico

Las restricciones asociadas al modelo fotovoltaico se encuentran en la ecuación 32 y 33 donde se presenta que la potencia fotovoltaica generada ($PV(t)$) debe ser menor o igual a la potencia instalada del sistema fotovoltaico (PV^{inst}), de la misma manera se restringe la potencia de vertimiento ($PV^{vert}(t)$) de tal manera que se evite que la misma supere a la potencia generada por el sistema fotovoltaico.

Ecuación 32

Restricción asociada a la potencia fotovoltaica generada.

$$PV(t) \leq PV^{inst}$$

Ecuación 33

Restricción asociada a la potencia de vertimiento.

$$PV^{vert}(t) \leq PV(t)$$

Restricciones del sistema de almacenamiento BESS

En la Ecuación 34 se establece los límites de carga y descarga de las baterías dentro de un rango establecido que evita el deterioro acelerado de las baterías, para esto se ha definido que el sistema de almacenamiento tenga una carga total y que no se produzca descargas profundas al considerar un 20% como límite. Esto se lo realiza considerando la vida útil de las baterías y poder extenderla lo mayor posible.

Ecuación 34

Restricción de límite de energía máxima y mínima de las BESS.

$$0.2 * P^{BESS,inst} \leq E(t) \leq P^{BESS,inst}$$

Dentro de la investigación realizada en Pozo (2022) se presenta restricciones complementarias con la finalidad de evitar que la activación de la carga y descarga de las baterías se produzca al mismo tiempo. Para esto en relación con la potencia de carga ($P^{BESS,C}(t)$) se define los límites de energía que absorberá del sistema, es así, que para este caso se usa una tasa de potencia de carga del 50%, como se puede ver en la ecuación 35. Así mismo, en la Ecuación 36 el ($P^{BESS,C}(t)$) debe ser menor o igual a la diferencia entre la energía máxima, para este caso la potencia instalada de las BESS ($P^{BESS,inst}$), y la energía inicial (E_o), dividido para la eficiencia de carga de las baterías (n_c).

Ecuación 35

Restricciones para la potencia de carga.

$$0 \leq P^{BESS,C}(t) \leq 0.5 * P^{BESS,inst}$$

Ecuación 36

Restricción para la tasa máxima de potencia de carga.

$$P^{BESS,C}(t) \leq \frac{(P^{BESS,inst} - E_o)}{n_c}$$

De la misma manera Pozo (2022) establece restricciones asociadas a la potencia de descarga, donde estas entregarán al sistema una potencia de descarga $P^{BESS,D}(t)$ del 90%, limitando así la descarga de la energía total almacenada en las BESS como se representa en la Ecuación 37.

Ecuación 37

Restricciones para la potencia de descarga.

$$0 \leq P^{BESS,D}(t) \leq 0.9 * P^{BESS,inst}$$

En la Ecuación 38 se presenta la restricción asociada a la tasa máxima de potencia de descarga donde se considera la descarga de las baterías considerando el valor del 20% anteriormente mencionado en lo que respecta a la profundidad de descarga del sistema de almacenamiento, para ello la potencia de descarga $P^{BESS,D}(t)$ debe ser menor o igual a la diferencia entre la energía inicial de las baterías (E_o) y la potencia a instalar para el sistema de almacenamiento ($P^{BESS,inst}$) por el límite establecido, todo ello por la eficiencia de descarga de las baterías representado por (n_d).

Ecuación 38

Restricción para la tasa máxima de potencia de descarga.

$$P^{BESS,D}(t) \leq (E_o - 0.2 * P^{BESS,inst}) * n_d$$

Un punto diferenciador en lo que respecta al modelamiento de las BESS es lo presentado en la Ecuación 39 ya que se emplea dos limitantes que son el 90% y el 50 % en lo que respecta a la carga y descarga de energía por hora de almacenamiento, con ello se restringe el funcionamiento del sistema de almacenamiento puesto que no toda la energía almacenada será liberada en caso de que la demanda así lo requiera y por ende prolongar mucho más la vida útil de las baterías.

Ecuación 39

Restricción para la tasa máxima de potencia de descarga.

$$P^{BESS,D}(t) \leq 0.9 * P^{BESS,inst} - \left(\frac{0.9}{0.5}\right) * P^{BESS,C}(t)$$

Finalmente, en lo que respecta a las restricciones del sistema de almacenamiento una muy importante es la presentada en la Ecuación 40, donde se establece que la potencia instalada del sistema de almacenamiento de energía ($P^{BESS,inst}$) debe ser mayor o igual a la potencia instalada del sistema fotovoltaico, de tal manera que se pueda almacenar la mayor parte de la energía producida por los paneles fotovoltaicos.

Ecuación 40

Restricción de la potencia instalada del sistema de almacenamiento.

$$P^{BESS,inst} \geq P^{Vinst}$$

Restricciones para la gestión de la demanda

La restricción asociada al modelo de la gestión de la demanda se muestra en la Ecuación 41, donde la operación del sistema no está regido a una demanda de agua por horas, por lo que se estableció una restricción que provoca que el mínimo tiempo de activación de la electrobomba ($T^{on,bomba}(t)$) sea 15 minutos, evitando tiempos cortos de activación que no beneficia al riego.

Ecuación 41

Restricción de activación de tiempo mínimo de encendido de la electrobomba.

$$0.25 * X^{on}(t) \leq T^{on,bomba}(t) \leq 1 * X^{on}(t)$$

En la Ecuación 42 se presenta la restricción asociada al estado de activación de la electrobomba ($X^{on}(t)$) que indica que el mismo no puede estar operando durante un tiempo inicial (t_o) hasta un tiempo final (t_f), especialmente en donde se tiene la presencia de radiación solar.

Ecuación 42

Restricción del tiempo de no activación de la electrobomba.

$$X^{on}(t) = 0 \quad t_o \leq t \leq t_f$$

Así, se consideró que las horas de riego no se ejecuten en la madrugada por las bajas temperaturas que puedan existir y que provocarían cristalización en el césped y en horas con mayor presencia solar ya que al efectuar el riego quemaría a la planta y el agua se evaporaría, por ende, en la Tabla 7 se especifican los horarios escogidos en base a la experiencia del profesional agrícola.

Tabla 7

Horas de riego permitidas y restringidas

Riego permitido	Riego restringido
Desde 6:00 AM – 9:00 AM	Desde 00:00 AM – 5:00 AM
Desde 18:00 PM – 23:00 AM	Desde 10:00 AM – 17:00 PM

Nota. Se muestra los horarios de riego permitidos durante el día al igual que las horas restringidas para el funcionamiento considerando el cuidado del cultivo. Elaborado por Autores.

Finalmente se añade la restricción de la energía no suministrada, debiendo ser menor a la potencia de vertimiento, como se puede ver en la Ecuación 43.

Ecuación 43

Restricción de la energía no suministrada.

$$ENS(t) \leq PV^{vert}(t)$$

Capítulo IV

Caso de estudio

Localización y caracterización del área destinada al riego

La metodología presentada en la sección anterior se aplica en la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” en el campus Guillermo Rodríguez Lara del sector de Belisario Quevedo de Latacunga, donde se ha identificado ausencia de las áreas verdes tratadas en la institución, por su gran tamaño. Es así como en respuesta a esta problemática se propone en diseñar un sistema de riego por aspersión para un área de $5750 m^2$ conformada por césped, ver Figura 12, mediante un sistema de bombeo que use el agua disponible en un estanque cerca del área seleccionada. Esto permitirá obtener la demanda eléctrica que será abastecida por el sistema híbrido óptimo con gestión de la demanda, logrando dar una utilidad a los recursos naturales que presenta la institución enfocada a mejorar el estado actual de los jardines.

Apoyando a jardines cuidados y un campus sustentable usando herramientas y tecnología actual con esta innovadora propuesta.

Figura 12

Área considerada para el sistema de riego por aspersión



Nota. En la figura presentada se muestra el área hacer regada al igual que el estanque que servirá para cumplir la demanda hídrica. Tomado de (Google, s.f.)

Se aplica la metodología descrita en la Figura 7, en donde el primer paso es obtener los datos de entrada. Como punto de partida se debe definir el requerimiento hídrico del cultivo, tomando como referencia la base teórica del capítulo 2, como se planteó en la metodología, Figura 8.

Caracterización del suelo

Primero se define las características del suelo en la institución, para determinar su textura y propiedades físicas, donde a través de un documento elaborado por el Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) de la parroquia de Belisario de Quevedo (2019) establece que tiene una taxonomía de suelo molisol y mediante el uso de la Tabla 1 se define las propiedades físicas para el tipo de suelo franco arenoso. En la Tabla 8 se muestra los parámetros seleccionados.

Tabla 8

Características del suelo franco arenoso

Propiedades	Valores
Capacidad de campo (<i>Cc</i>)	14%
Punto de marchitez permanente (<i>Pmp</i>)	6%
Densidad Aparente (<i>Da</i>)	1.5 g/cm ³
Profundidad radicular efectiva (<i>z</i>)	60 cm

Nota. En la tabla se observan las características del suelo presente en el Campus Belisario Quevedo de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga. Elaborado por Autores.

Como en el área considerada se observa la presencia en mayor parte de césped el estudio se enfocará en este tipo de cultivo, en relación a este cultivo se asocian ciertos valores para definir el coeficiente del cultivo (K_c) en base a la Tabla 2. El K_c que se aplicará al cultivo del área seleccionada se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9

Parámetro K_c del césped

Etapas	Valores
Kc inicial	0.90
Kc medio	0.95
Kc final	0.95

Nota. En la tabla se observan los valores de K_c referentes al cultivo de césped donde se tiene el K_c inicial, medio y final. Elaborado por Autores.

Cálculo del agua útil

Siguiendo la metodología de la Figura 8 se procede a definir el cálculo del agua útil para lo cual se procede a establecer la capacidad de retención de agua del suelo, que para el caso en cuestión es Franco Arenoso, empleando la Ecuación 2 se obtiene:

$$AU = (C_c - P_{mp}) * D_a * z$$

$$AU = (0.14 - 0.06) * 1.5 * 600$$

$$AU = 72 \text{ mm}$$

Lamina neta de riego

El valor obtenido será empleado en la Ecuación 3 para calcular la lámina neta de riego a fin de conocer la cantidad de agua que realmente puede ser absorbida por el cultivo debido a que se genera pérdidas por evaporación. El valor del umbral fue explicado en el capítulo 2.

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

$$L_n = 0.6 * 72$$

$$L_n = 43.2 \text{ mm}$$

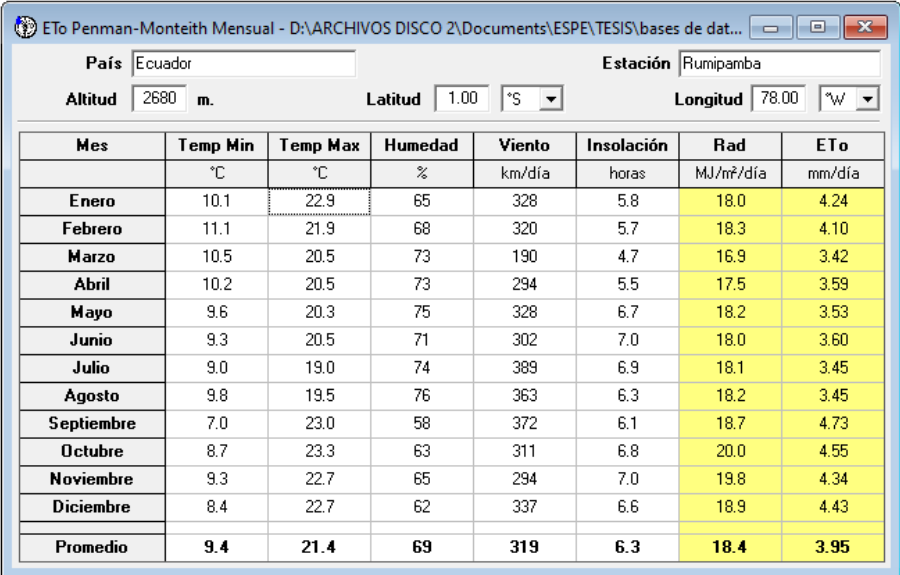
Necesidad neta de riego

Posteriormente, se debe analizar el calor de la evotranspiración de referencia (ET_o), parámetro que se usara para obtener el valor de la lámina bruta, para cada mes del año con la finalidad de escoger el mes de mayor demanda hídrica requiere el cultivo.

Para obtener la necesidad neta de riego es necesario la selección de escenarios, para lo cual se ha identificado los distintos coeficientes K_c del césped, es correcto tomar el valor en el que el cultivo necesita más requerimiento hídrico, siendo este valor de 0.95, como se observa en la Tabla 9, esto permitirá proceder con el establecimiento de la evotranspiración del cultivo (ET_c) mediante el uso del software CROPWAT herramienta agronómica que involucra las variables de temperatura, velocidad del viento, humedad, entre otras de la zona que permite obtener el (ET_o), es así que para este caso de estudio se utilizó los datos meteorológicos de la estación de Rumipamba obteniendo lo presentado en la Figura 13.

Figura 13

Evotranspiración del cultivo de referencia



The screenshot shows the 'ETo Penman-Monteith Mensual' software interface. At the top, it displays the location: País: Ecuador, Estación: Rumipamba, Altitud: 2680 m., Latitud: 1.00 °S, and Longitud: 78.00 °W. Below this is a table with 8 columns: Mes, Temp Min (°C), Temp Max (°C), Humedad (%), Viento (km/día), Insolación (horas), Rad (MJ/m²/día), and ETo (mm/día). The table lists data for each month from Enero to Diciembre, with a final row for the Promedio (Average). The ETo values range from 3.42 mm/día in March to 4.55 mm/día in October. The average ETo is 3.95 mm/día.

Mes	Temp Min °C	Temp Max °C	Humedad %	Viento km/día	Insolación horas	Rad MJ/m²/día	ETo mm/día
Enero	10.1	22.9	65	328	5.8	18.0	4.24
Febrero	11.1	21.9	68	320	5.7	18.3	4.10
Marzo	10.5	20.5	73	190	4.7	16.9	3.42
Abril	10.2	20.5	73	294	5.5	17.5	3.59
Mayo	9.6	20.3	75	328	6.7	18.2	3.53
Junio	9.3	20.5	71	302	7.0	18.0	3.60
Julio	9.0	19.0	74	389	6.9	18.1	3.45
Agosto	9.8	19.5	76	363	6.3	18.2	3.45
Septiembre	7.0	23.0	58	372	6.1	18.7	4.73
Octubre	8.7	23.3	63	311	6.8	20.0	4.55
Noviembre	9.3	22.7	65	294	7.0	19.8	4.34
Diciembre	8.4	22.7	62	337	6.6	18.9	4.43
Promedio	9.4	21.4	69	319	6.3	18.4	3.95

Nota. En la figura se puede observar la ET_o para cada uno de los meses del año tomando como punto de partida los valores presentes en la base de datos de (NSRDB) y empleando el software CROPWAT. Elaborado por Autores.

Con la obtención del ET_o se selecciona el mes con el valor mayor y se procede a determinar la evotranspiración del cultivo empleando la Ecuación 1.

$$ET_c = ET_o * Kc$$

$$ET_c = 4.73 \frac{mm}{día} * 0.95$$

$$ET_c = 4.49 \frac{mm}{día}$$

Sin embargo, para conocer el valor exacto de suministro de agua al cultivo se debe incluir el análisis de las precipitaciones que se dan en la zona, para eso el mismo software utilizado da el valor de la precipitación efectiva (Pe) para cada uno de los meses del año, como se presenta en la Figura 14.

Figura 14

Precipitación efectiva para cada mes del año

	Precipit.	Prec. efec
	mm	mm
Enero	11.7	0.0
Febrero	25.1	5.1
Marzo	102.1	57.7
Abril	50.0	20.0
Mayo	8.6	0.0
Junio	29.5	7.7
Julio	23.9	4.3
Agosto	12.2	0.0
Septiembre	5.8	0.0
Octubre	26.2	5.7
Noviembre	19.8	1.9
Diciembre	4.6	0.0
Total	319.5	102.4

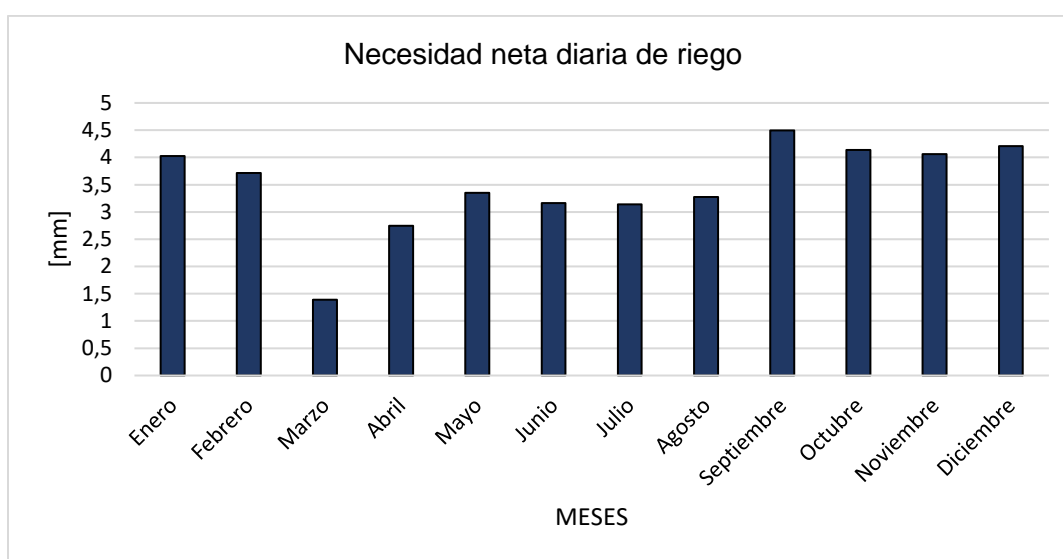
Nota. En la figura se puede observar la (Pe) mensual tomando como punto de referencia los valores presentes en la base de datos de (NSRDB) y empleando el software CROPWAT.

Elaborado por Autores.

Considerando la (Pe) de la Figura 10, se emplea la Ecuación 4 para estimar la necesidad neta diaria de riego para cada mes del año presentada en la Figura 15.

Figura 15

Necesidad neta diaria de riego para cada mes



Nota. En la figura se observa la necesidad neta diaria para cada mes del año para establecer el riego ideal considerando la lluvia presente en cada mes. Elaborado por Autores.

Como se observa en la Figura 15, el mes de mayor necesidad neta diaria de riego corresponde a septiembre, siendo así el escenario seleccionado para el dimensionamiento del sistema, ya que este mes necesita mayor cantidad de agua, provocando que la electrobomba necesite estar más tiempo encendida.

Frecuencia máxima de riego

En base a lo anterior se define que el valor del (ET_C) considerando la (Pe) para el mes de septiembre es de 4.49 mm/día, con esto se puede determinar la cantidad de días que el

cultivo puede permanecer sin riego, para eso se emplea la Ecuación 5 obteniendo de tal manera la frecuencia máxima de riego del cultivo.

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

$$FR_{max} = \frac{43.2mm}{4.49 \frac{mm}{dia}} = 9.62 \sim 9 dias$$

Lamina bruta de riego

Luego, se realiza el cálculo de la lámina bruta de riego con la Ecuación 6 donde se considera la eficiencia que tendrá el sistema de riego por aspersión y la frecuencia de riego, es así que para el presente caso se considera realizar un riego diario por lo que la frecuencia máxima tomara el valor de 1, con la finalidad de disminuir el tiempo que puede llegar a estar operativo el sistema, Ef esta asociada a la eficiencia del sistema de riego por aspersión como se explicó en el Capítulo II.

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

$$Lb = \frac{4.49 \frac{mm}{dia}}{0.75} * 1 = 5.98 \frac{mm}{dia}$$

Volumen de riego

Finalmente, esta sección concluye con el establecimiento del volumen de riego diario para el mes de septiembre mediante la Ecuación 7, en vista que si el dimensionamiento del sistema híbrido óptimo de energía con gestión de la demanda cumple a cabalidad con este parámetro se garantizará el riego de todos los meses sin inconvenientes. Este parámetro será utilizado en el problema de optimización como la demanda de agua diaria ($Demand^{agua}$), presentado en el capítulo 3.

$$V_{riego} = L_b * \text{Área}$$

$$V_{riego} = 5.98 \frac{mm}{dia} * 5750m^2 = 34.39 \approx 35 \frac{m^3}{dia}$$

$$V_{mensual} = 35 \frac{m^3}{dia} * 30 \frac{dias}{mes} = 1050 \frac{m^3}{mes}$$

Con el volumen mensual establecido es necesario conocer el recurso hídrico disponible en el sector para lo cual se emplea la Ecuación 22. Las dimensiones aproximadas del estanque se muestran en la Figura 16.

Figura 16

Dimensiones del estanque presente en el campus



Nota. En la figura se puede observar las dimensiones correspondientes al estanque presente en el campus de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, mismas que serán utilizadas para determinar su volumen de almacenamiento. Elaborado por Autores.

$$V_{estanque} = \frac{h}{3} (A_{ext} + A_{int} + \sqrt{A_{ext} * A_{int}})$$

$$V_{estanque} = \frac{2}{3} (100 * 20 + 9.6 * 80 + \sqrt{100 * 20 * 9.6 * 80})$$

$$V_{estanque} = 2671.57 m^3$$

Dimensionamiento del sistema de riego

Se aplica la metodología descrita en la Figura 9 para el dimensionamiento del sistema de riego a emplear en el presente proyecto.

Selección del sistema de aspersión

En base a la Tabla 3, se selecciona el sistema de aspersión a baja presión, el cual se considera el más apto en función de las características descritas en la tabla y a su vez por la presión de trabajo del mismo al considerar una presión menor a 20 mca y un radio de alcance

menor a 9 m como se indica en el capítulo 2, es así que el tipo de aspersor requerido para este proyecto es el de impacto de círculo completo de una boquilla y vaina para largo alcance que presenta las siguientes características mostradas en la Tabla 10.

Tabla 10

Características técnicas del aspersor seleccionado para el sistema de riego

Características	Especificaciones
Ángulo trayectoria boquilla	14°
Material	Termoplásticos de alta resistencia protegidos contra rayos ultra violeta
Caudal (Q)	307 lt/h
Vaina	30V
Alcance según vaina R(m)	8.7m
Presión	10.5mca

Nota. En la tabla se puede observar las especificaciones técnicas del aspersor de impacto círculo completo a utilizar en el sistema de riego. Tomado de (Unirain, 2019).

Diseño de arreglo y longitud de las tuberías

Después, en base a la Tabla 4, se determina el espaciamiento entre los aspersores y laterales que definirán las longitudes y ubicaciones de las tuberías del sistema de aspersión. Se propone en el diseño del arreglo de aspersores un doble espaciamiento entre los laterales en vista que es el necesario para cubrir el área de riego.

$$S_1 = 0.4 * 2 * \text{Alcance del aspersor [diámetro]}$$

$$S_1 = 0.4 * 8.7m * 2 * 2 = 13.92m$$

$$S_m = 0.5 * \text{Alcance del aspersor [diámetro]}$$

$$S_m = 0.5 * 8.7m * 2 = 8.7m$$

Intensidad de precipitación

Al conocer la separación entre aspersores se emplea la Ecuación 8 para establecer la intensidad de precipitación que se logrará con el sistema de aspersión en base a su capacidad de suministro de agua.

$$I = \frac{Q * 360}{S_1 * S_m}$$

$$I = \frac{0.0853 \frac{lt}{s} * 360}{13.92 m * 8.7m} = 0.254 \frac{cm}{h} \rightarrow 2.54 \frac{mm}{h}$$

Tiempo de riego

Con este valor obtenido se puede proceder a determinar el tiempo por el cual el sistema de aspersión estará en funcionamiento para cumplir el requerimiento diario de agua que abastecerá con el volumen en toda el área que está considerada, utilizando la Ecuación 9.

$$T = \frac{L_b}{I}$$

$$T = \frac{5.98 \frac{mm}{dia}}{2.54 \frac{mm}{h}} = 2.35 \frac{horas}{dia}$$

Finalmente, el diseño propuesto cubre toda el área definida para riego en el cual se realiza la distribución uniforme de los aspersores obteniendo un total de 50 aspersores que distribuirán adecuadamente el recurso hídrico para los 5750 m². Cabe mencionar que el diseño del sistema de riego por aspersión considera el entorno en el que se encuentra delimitada el área de riego ya que en esta existe presencia de infraestructura, caminos y canchas deportivas por el cual influye en la ubicación de la tubería principal, secundaria y ramales, en el Anexo 1 se observa el plano del sistema de riego diseñado donde se muestra la ubicación de las tuberías, aspersores y la bomba de agua.

Dimensionamiento y selección de la electrobomba

Se aplica la metodología presentada en la Figura 10 para el dimensionamiento de la electrobomba a emplearse para el sistema de riego por aspersión, para lo cual se aplica lo presentado en las secciones siguientes.

Obtención del diámetro teórico

Para esta sección se requiere encontrar el caudal a suministrar y la carga dinámica total que tendrá que superar la electrobomba, para esto mediante el diseño del sistema de aspersión realizado se proporciona la información necesaria sobre la longitud de la tubería principal, secundaria, ramales, el número de accesorios y el caudal necesario a bombear.

Para la forma del área de riego delimitada, se procede a realizar un análisis en dos sectores que toman la misma distribución de aspersores esto con la finalidad de realizar un correcto dimensionamiento de las tuberías y que se produzcan el mínimo de pérdidas, es así que en la Tabla 11 se muestra los caudales requeridos por cada tramo de tubería que conforma el sistema.

Tabla 11

Caudal requerido en tramos de tubería

Tramo	Longitud (m)	Caudal (l/s)
Línea Principal	115	4.265
Línea Secundaria Sector 1	183	3.753
Línea Secundaria Sector 2	17.5	0.511
Laterales	15	0.1706

Nota. En la tabla se observa los caudales que pasaran por los tramos de la tubería principal, secundario y laterales. Elaborado por Autores

Diámetro teórico

Para obtener diámetro teórico de la tubería principal se aplica con la Ecuación 10 que permite determinar un diámetro teórico que servirá para seleccionar en base a los diámetros comerciales y con eso aplicar la Ecuación 11 para obtener la velocidad del fluido y conocer si el

flujo de agua se encuentra dentro del rango, (Mott, 2015) menciona que para la tubería principal y secundaria sea de un valor menor a 2.5 m/s, para los laterales que este dentro de 0.5 m/s a 2 m/s.

A continuación, se muestra el cálculo realizado para la tubería principal o de descarga.

$$\phi = 1.35 * \sqrt{Q_t} * 25.4$$

$$\phi = 1.35 * \sqrt{4.265} * 25.4$$

$$\phi = 70.81mm$$

Cálculo de la velocidad del fluido

En base a este resultado se selecciona una tubería comercial de 75mm proporcionada por el catálogo que se encuentra en el Anexo 2, en donde especifica que el diámetro interno de esta tubería es de 71.2mm, por lo tanto, con el diámetro interno proporcionado por el fabricante se calcula la velocidad el fluido verificando que no sobrepase el rango de velocidad.

$$v = \frac{Q_t \left(\frac{m^3}{s} \right)}{A \left(m^2 \right)}$$

$$v = \frac{0.004265 \text{ m}^3/s}{\frac{\pi \left(\frac{71.2}{1000} \right)^2}{4} \text{ m}^2}$$

$$v = 1.071 \text{ m/s}$$

Perdidas primarias

Una vez determinado la tubería a utilizar se procede a ejecutar el cálculo de pérdidas por fricción, considerando que esta no presenta múltiples salidas por lo que se utiliza la Ecuación 12 por consiguiente se parte definiendo el tipo de flujo que se presentará en la tubería a través del número de Reynolds definida en la Ecuación 13. La selección de μ se describió en la sección anterior. Se puede entonces concluir que le flujo es de tipo turbulento.

$$Re = \frac{v * D_i * \rho}{\mu}$$

$$Re = \frac{\frac{1.071m}{s} * \left(\frac{71.2}{1000}\right)m * 997 \frac{kg}{m^3}}{0,001008 \frac{kg}{m * s}} = 75423.05$$

Entonces es – Flujo Turbulento

Ahora se procede a desarrollar el cálculo del factor de fricción definido en la Ecuación 14 establecida para flujo turbulento.

$$f = \frac{0.25}{\left[\log\left(\frac{\varepsilon}{3.71 * \varnothing} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right)\right]^2}$$

$$f = \frac{0.25}{\left[\log\left(\frac{0.0015mm}{3.71 * (71.2mm)} + \frac{5.74}{(75423.05)^{0.9}}\right)\right]^2}$$

$$f = 0.01907$$

Finalmente, se procede a calcular la pérdida por fricción en la tubería principal considerando la longitud de esta junto con la velocidad del fluido que pasa a través de la sección, para esto se utiliza la Ecuación 12.

$$H_f = f \frac{L * v^2}{2g * \varnothing}$$

$$H_f = 0.01907 * \frac{(115) * (1.071m/s)^2}{2 \left(\frac{9.81m}{s^2}\right) * \left(\frac{71.2}{1000}m\right)}$$

$$H_f = 1.79 mca$$

Perdidas primarias por salidas múltiples

El diseño de la tubería secundaria y lateral de conducción se lo realizan mediante las pérdidas primarias por salidas múltiples debido a que en toda su longitud estas tienen varias salidas lo que hace que no se puede considerar que el flujo de agua sea el mismo en el punto inicial como al final, ya que este a medida que avanza va disminuyendo dependiendo de las salidas que esta posea, es así que a continuación se muestra cómo se procede a ejecutar este cálculo para la tubería secundaria.

La selección del diámetro se aplica el mismo método y se escoge la tubería comercial de 71.2mm de diámetro interno con esto se procede a realizar las pérdidas de carga por fricción mediante la Ecuación 15.

$$Hf_{SM} = \frac{10.643 * Lf * Q^{1.85} * F}{C^{1.85} * \phi^{4.87}}$$

$$Hf_{SM} = \frac{10.643 * (183m) * \left(0.00375 \frac{m^3}{s}\right)^{1.85} * 0.366}{(150)^{1.85} * \left(\frac{71.2}{1000}m\right)^{4.87}}$$

$$Hf_{SM} = 0.8385 mca$$

Con este valor se verifica que la pérdida de presión no supere el 20% de la operación nominal del aspersor para esto se utiliza la Ecuación 16, 17 y 18, obteniendo los siguientes resultados.

$$\Delta P \leq 0.2H_o$$

$$\Delta P \leq 0.2 * 10.51 = 2.102 mca$$

$$P_o = H_o + \frac{3}{4}Hf_{SM} + H_a$$

$$P_o = 10.51mca + \frac{3}{4}(0.8385 mca) + 0.3m = 11.439 mca$$

$$P_n = H_o - \frac{1}{4}Hf_{SM}$$

$$P_n = 10.51mca - \frac{1}{4}0.8385mca = 10.30 mca$$

$$\Delta H = P_o - P_n = 11.439 - 10.30 = 1.138mca$$

$$1.138 < 2.102 mca$$

Este procedimiento se repite para el diseño de los laterales obteniendo el cálculo del diámetro, pérdida de carga y cumplimiento del rango de presión. A continuación, se presenta en la Tabla 12 un resumen de la selección y diseño del sistema de riego por aspersión.

Tabla 12

Perdidas Primarias en el sistema de riego por aspersión

Tramo	Longitud [m]	Numero de laterales	Caudal [l/s]	Diámetro Comercial [mm]	Diámetro interno [mm]	Factor de S.M. (F)	Perdidas de carga [mca]	Velocidad [m/s]
Principal	115	NA	4,265	75	71,2	NA	1,79	1,071
Secundaria S1	183	NA	3,75	75	71,2	0,366	0,8385	0,942
Laterales	15	22	0,1706	20	17,8	0,634	7.458	0,686
Secundaria S2	17,5	NA	0,511	25	22,8	0,528	0,7403	1,252
Laterales	15	3	0,1706	20	17,8	0,634	1,017	0,686
Total	690,5	25					11,721	

Nota. En la tabla se muestra los diámetros comerciales seleccionados para cada tramo del sistema, así como la velocidad del fluido y sus respectivas pérdidas de carga. No Aplica (NA).

Elaborado por Autores.

Cálculo de pérdidas secundarias o por accesorios

Para el cálculo de las pérdidas secundarias según los tramos definidos se establecen los accesorios requeridos por lo que continuación se muestra los cálculos realizados utilizando la Ecuación 19 para la tubería principal.

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

$$hf = (5 * 0.9 + 1 * 1) * \frac{\left(1.071 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9.81 \frac{m}{s^2}}$$

$$hf = 0.321 \text{ mca}$$

Anteriormente se muestra el cálculo de h_f del tramo principal, K está en función al número de accesorios es así que $K = 0.9$ se multiplica por el total de codos es decir 5, y se le añade como accesorio un conector T de acuerdo a la Tabla 13. Este cálculo se lo realiza a los

tramos faltantes para así obtener las pérdidas por accesorios de todo el sistema de riego. A continuación, en la Tabla 13 se muestra los resultados obtenidos. El total de pérdidas secundarias de todo el sistema es de 2,964 mca.

Tabla 13

Pérdidas por accesorios en el sistema de riego por aspersión

Tramo	Accesorios	Cantidad	K	hf	Total
Principal	Codos	5	0,9	0,053	0,263
	Conector T	1	1	0,058	0,058
Secundaria S1	Codos	1	0,9	0,041	0,041
	Conector T	21	1	0,045	0,949
	Contracción súbita	22	0,47	0,011	0,248
Laterales	Codos	22	0,9	0,022	0,474
	Conector T	22	1	0,024	0,527
Secundaria S2	Codos	1	0,9	0,072	0,072
	Conector T	2	1	0,080	0,160
	Contracción súbita	1	0,44	0,035	0,035
	Contracción súbita	3	0	0,000	0,000
Laterales	Codos	3	0,9	0,022	0,065
	Conector T	3	1	0,024	0,072
Total					2,964 mca

Nota. En la tabla se muestra los accesorios que formarán parte del sistema de riego por aspersión, así como su pérdida de carga que producen en el sistema. Elaborado por Autores.

Carga dinámica total

Para esto se considera una distancia vertical de $H_s = 2.5m$ y una altura de soporte del aspersor de $H_e = 0.3m$ esto junto a la presión de operación del aspersor y las pérdidas de carga primarias y secundarias, todos estos parámetros se emplean para obtener el valor de CDT mediante la Ecuación 20.

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

$$CDT = 2.5m + 10.5m + 0.3m + 11.721m + 2.964m$$

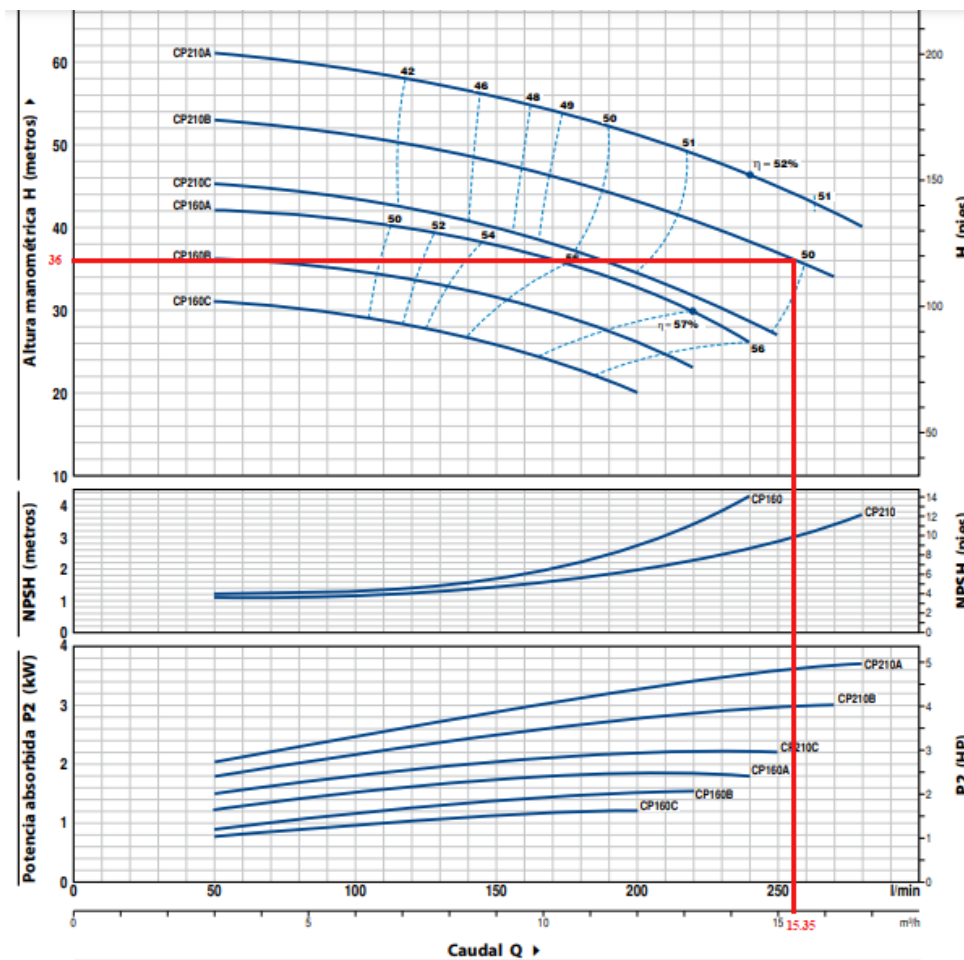
$$CDT = 27.98 \text{ mca}$$

Para finalmente realizar la selección de la electrobomba se debe considerar dos aspectos importantes, donde la electrobomba seleccionada debe cumplir con el caudal mínimo de funcionamiento necesario para el total de aspersores que conforman el sistema de riego, y la carga dinámica total, en base a estos datos se selecciona el equipo más adecuado en el catálogo que proporciona el fabricante, ver Anexo 3.

Mediante la curva de funcionamiento de las electrobombas proporcionadas por el fabricante se ubica los dos parámetros requeridos por el sistema de riego, el primero que corresponde al caudal mínimo requerido que se obtiene de multiplicar los 50 aspersores por el consumo de cada aspersor (307 lt/h), por lo tanto, el caudal mínimo requerido es $Q_T = 15.35 \text{ m}^3/\text{h}$, que es lo requerido para el funcionamiento adecuado de los 50 aspersores que conforman el sistema de riego por aspersión. El segundo dato requerido es la carga dinámica total de $CDT = 28 \text{ mca}$, ver Figura 17.

Figura 17

Curva característica de la bomba seleccionada



Nota. En la figura se puede observar las curvas características asociadas a cada tipo de electrobombas teniendo así la bomba adecuada que cumpla con el caudal necesario para el sistema de riego, en rojo se muestra los datos para la selección de la electrobomba. Tomado de (Casa del riego, 2020)

Se determina que según la curva del fabricante la bomba que más se adapta a las condiciones requeridas de funcionamiento es una electrobomba centrífuga trifásica modelo: CP210B que presenta las siguientes características presentadas en la Tabla 14.

Tabla 14

Características técnicas de la electrobomba CP210B

Características	Especificaciones
Tipo	Centrifuga
Potencia	4 hp – 3kW
Caudal	16.2 m ³ /h
Presión	34 mca

Nota. En la figura se puede observar las características técnicas asociadas a la electrobomba seleccionada para el sistema de riego. Tomado de (Casa del riego, 2020)

Dentro de los requerimientos solicitados para abastecer la demanda hídrica del sistema de riego por aspersión, no se cuenta con equipos del consumo exacto por lo que se escoge una bomba superior a la demandada pero que garantiza un suministro adecuado para las características de funcionamiento del sistema de riego. Una vez seleccionado con la Ecuación 21 se realiza la comprobación de la siguiente manera.

$$P = \frac{Q_T * \rho * g * H}{\eta_{Tot}}$$

$$P = \frac{\frac{0.0853 \frac{l}{s} * 50}{1000} * 997 \frac{kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2} * 27.96m}{0.4}$$

$$P = 2915.82W = 3.91hp \approx 4hp$$

De esta manera la potencia de la electrobomba seleccionada se utilizará como un dato de entrada en el problema de optimización. Esta potencia indica la demanda eléctrica de la bomba ($Dem^{bomba}(t)$), la cual al estar relacionada con su tiempo de operación genera la curva de demanda energética que deberá de abastecer el sistema híbrido de energía.

Definición de recurso solar y escenarios de estudio

La caracterización del recurso solar implica el previo conocimiento de la radiación solar presente en la zona donde se encuentra ubicada la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga, para lo cual se usa una base de datos presente en National Solar Radiation Database (NSRDB), ver Figura 5. El diseño partirá en base a las estaciones presente

en el año, por lo que, en Ecuador se tienen dos estaciones definidas (Invierno y Verano) las cuales varían en su duración y en sus meses de inicio y fin entre cada una de las regiones como se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15

Estaciones del año en Ecuador

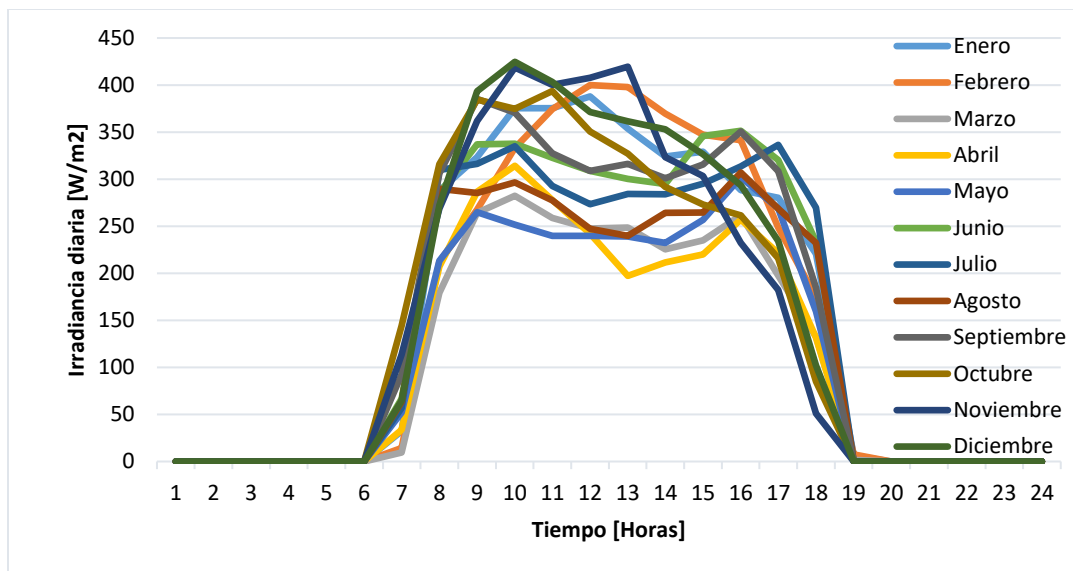
Región	Invierno	Verano
Costa	Desde Diciembre hasta Mayo	Desde Junio hasta Noviembre
Sierra	Desde Octubre hasta Mayo	Desde Junio hasta Septiembre
Amazonía	Desde Marzo hasta Noviembre	Desde Diciembre hasta Febrero

Nota. En la tabla se observan las estaciones presentes durante el año y los meses de duración en cada región del país. Tomado de (Varela & Ron, 2018).

Para la selección de los escenarios de estudio se considerará la región Sierra con sus respectivos meses de acuerdo con las estaciones de invierno y verano. Para definir el recurso solar se opta por una base de datos de radiación solar por 5 años presente en el sector donde se efectúa un promedio entre el 2018 hasta el 2022, por lo que, se procesó dichos datos para establecer su comportamiento en cada mes como se presenta en la Figura 18.

Figura 18

Comportamiento de la irradiación solar a lo largo del año

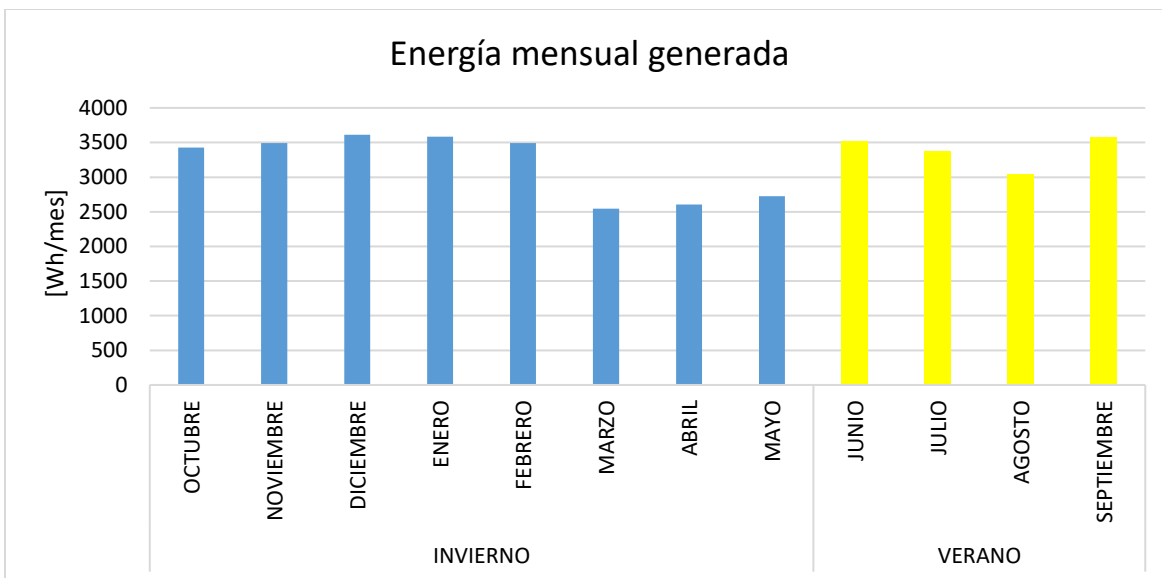


Nota. En la figura se observa el comportamiento de la irradiación mensual analizada de cinco años presente en el sector de Belisario Quevedo, donde está la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Elaborado por Autores.

Después de lo presentado se dividió en estaciones de invierno y verano los meses respectivos, a la par de ello se realizó un promedio de la radiación mensual por cada hora del día de los 5 años y a través de una sumatoria mensual se obtuvo la energía producida por cada mes del año, obteniendo así lo presentado en la Figura 19.

Figura 19

Energía mensual generada

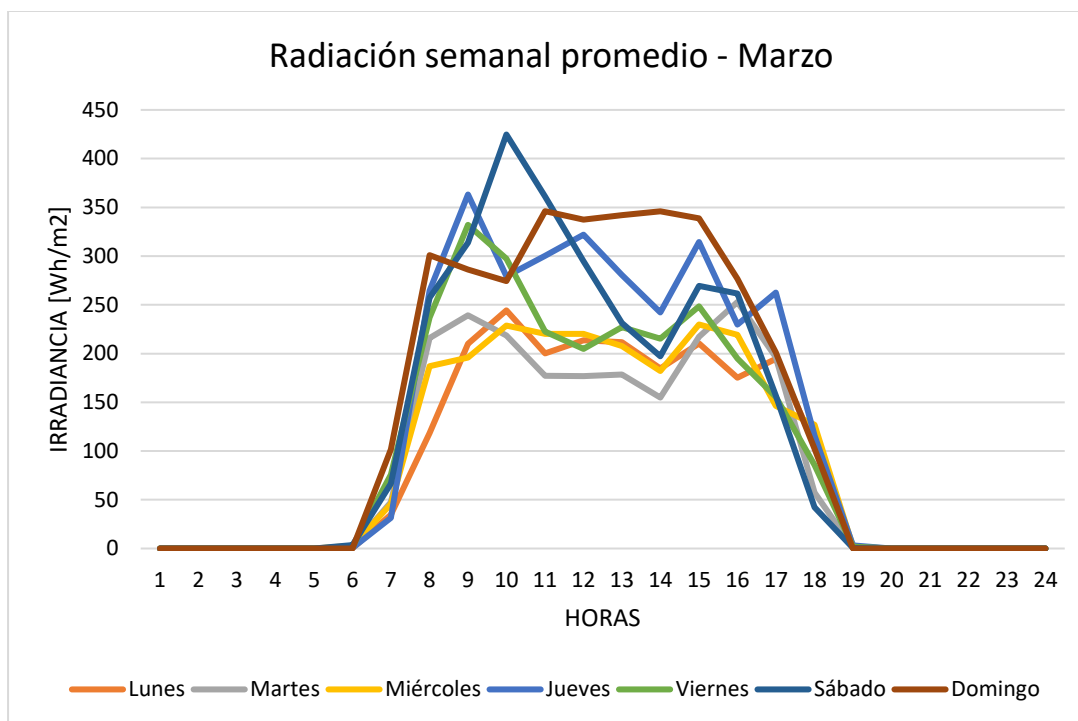


Nota. En la figura se observa la total de energía producida en los meses posteriores al promedio de radiación solar mensual por hora del día. Elaborado por Autores.

Es así que en la estación de invierno se selecciona el peor mes de radiación solar producida correspondiente a marzo con 2223.967 Wh/mes, que es objeto de estudio para la realización del problema de optimización, pero con una peculiaridad la cual es que se analizará el mes completo dividiéndolo en 7 días y obteniendo un promedio de la radiación presente en cada uno de esos días por cada hora del mismo, como se ve en la Figura 20.

Figura 20

Radiación semanal promedio del mes de marzo

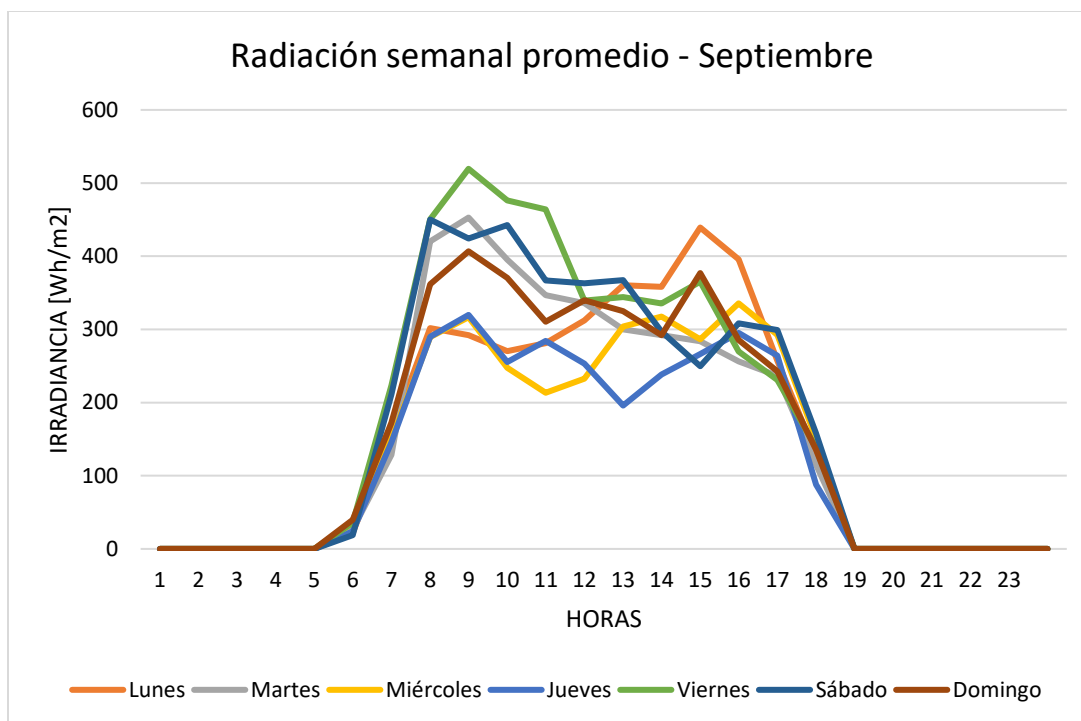


Nota. En la figura se puede observar el promedio de irradiación solar semanal por cada hora del día del mes de marzo correspondiente a la estación de invierno. Elaborado por Autores.

Del mismo modo se procedió a trabajar con la estación de verano en el cual se selecciona el mes de mayor generación de energía solar, siendo así el de septiembre con 3391.903 Wh/mes, el mes en cuestión de igual manera será objeto de estudio para el problema de optimización por lo cual se lo dividió en 7 días con un promedio de radiación por cada hora del día como se presenta en la Figura 21.

Figura 21

Radiación semanal promedio del mes de septiembre



Nota. En la figura se puede observar el promedio de irradiación solar semanal por cada hora del día del mes de septiembre correspondiente a la estación de verano. Elaborado por Autores.

Portafolio de inversión y operación

Los costos de inversión considerados en lo que respecta a las diferentes tecnologías empleadas en el sistema híbrido como lo son la fotovoltaica y almacenamiento en baterías, se lo detalla en la Tabla 16 donde se presenta los costos en (\$/kW).

Tabla 16

Costos de inversión establecidos por tecnología de generación

Tecnología	Costo de inversión referencial (\$/kW)
Térmica diésel	470
Eólica	1358
Solar \leq 9MW	961
Solar con almacenamiento a 2-4h / 60%Pnom	1494

Nota. En la tabla se muestra los valores establecidos para los costos de inversión para las respectivas tecnologías, valores a emplear en el optimizador. Tomado de (Comisión Nacional de Energía, 2023).

Los costos de operación para el problema de optimización se han considerado en tres valores las cuales son el costo por la energía no suministrada (ENS) a 1.5 \$/kW, el costo de la potencia de vertimiento a 0.05 \$/kW y finalmente el costo de uso de las baterías siendo este a 0.13 \$/kW.

Además, se incluye el Factor de Recuperación de Capital (FRC) que calcula los pagos iguales requeridos para que se pueda amortizar un monto económico proveniente de un préstamo que consta de un interés, razón por la que se suele diferir a 10 años con una tasa de interés del 10% anual.

Capítulo V

Análisis de resultados de la metodología planteada

En este capítulo se valida la metodología propuesta, se analiza y compara tres técnicas de diseño para el sistema híbrido con gestión de demanda a implementarse en el Campus Belisario Quevedo de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. El primero que corresponde a un método tradicional, el segundo que corresponde a un diseño óptimo sin incluir gestión de la demanda y finalmente la propuesta de este trabajo de investigación que es el diseño del sistema híbrido considerando gestión de demanda para el riego.

Validación del Sistema Híbrido Óptimo con Gestión de la Demanda

Para llevar a cabo la validación de la propuesta que es incluir la gestión de demanda al sistema híbrido diseñado se requiere estrictamente garantizar el cumplimiento del volumen diario de agua de riego para el cultivo seleccionado del área definida, en base al mes de mayor demanda de agua requerida, junto con el mes de mayor y menor producción de energía que aporta el recurso solar. Como resultado se obtendrá la capacidad de generación a instalar técnica y económicamente óptima de las tecnologías seleccionadas del sistema híbrido (paneles fotovoltaicos y baterías).

En la Tabla 17 se presenta la capacidad a instalar del sistema fotovoltaico y de las baterías al aplicar la metodología propuesta en el Capítulo III. Además, se incluye el costo de inversión para la implementación del sistema híbrido en operación aislada con estas tecnologías considerando gestión de demanda.

Tabla 17

Resultados de la planificación

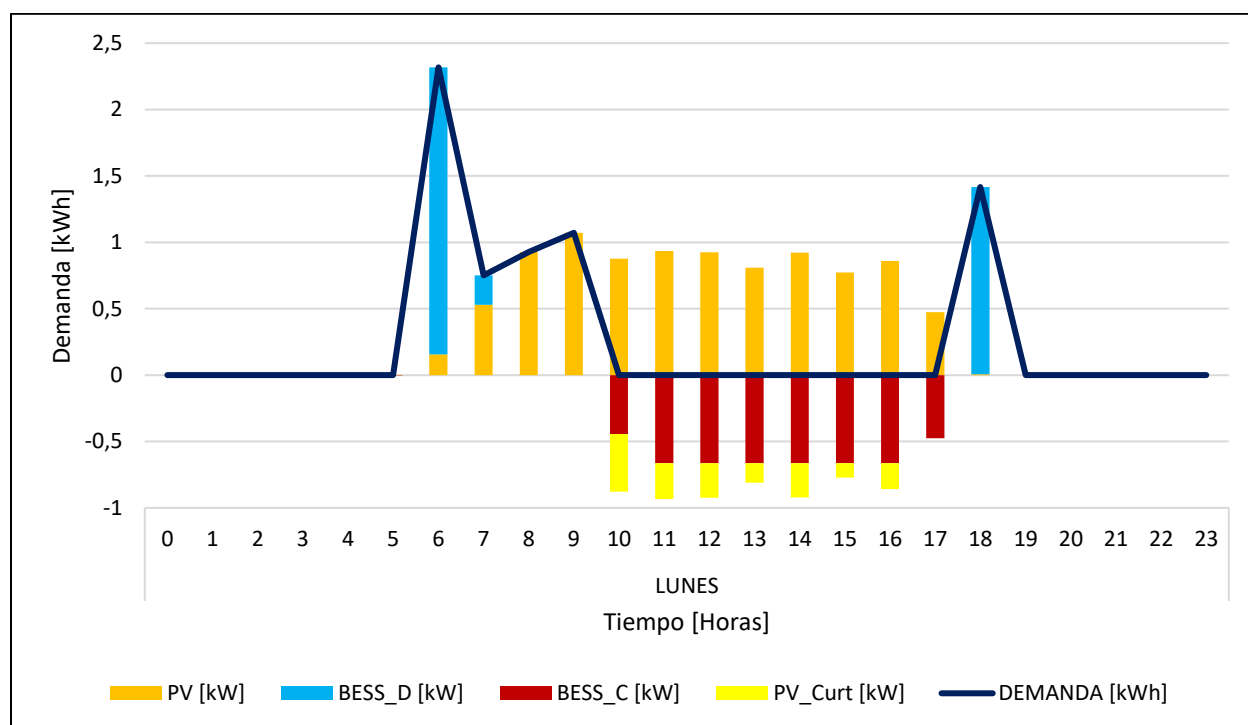
Tecnología	Potencia instalada [kW]
Fotovoltaico (PV)	4,59
BESS	4,59
Costo de Inversión [USD]	\$11.267

Nota. Se muestra en la tabla los resultados de planificación del sistema híbrido de energía con gestión de la demanda, los valores técnicos y económicos de la capacidad a instalar de las diferentes tecnologías junto con el costo de inversión del sistema híbrido. Elaborado por Autores.

En la Figura 22 se puede observar la operación del sistema híbrido de energía, que a través de darle flexibilidad a la carga se genera la curva de demanda eléctrica en función del cumplimiento de volumen de riego diario en un día típico de una semana del mes de marzo.

Figura 22

Operación del sistema híbrido de energía con gestión de la demanda en marzo



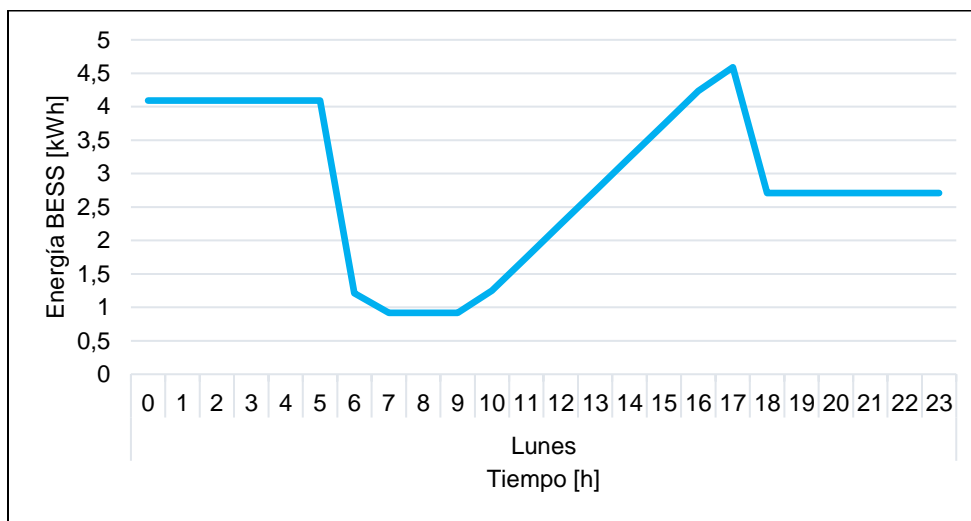
Nota. Se muestra en la figura la operación del sistema híbrido óptimo con gestión de la demanda diseñado para un día típico correspondiente al mes de marzo. Elaborado por Autores.

En consecuencia, se observa que el sistema de riego opera en las horas permitidas, es decir, en las horas de riego el abastecimiento de la demanda eléctrica es compartido por la energía de las baterías y la fotovoltaica, de igual manera, en las horas de no riego la energía

solar disponible es utilizada para cargar las baterías y contar con energía para el riego en la noche, como se muestra en la Figura 23.

Figura 23

Comportamiento de las BESS en un día de la semana de marzo

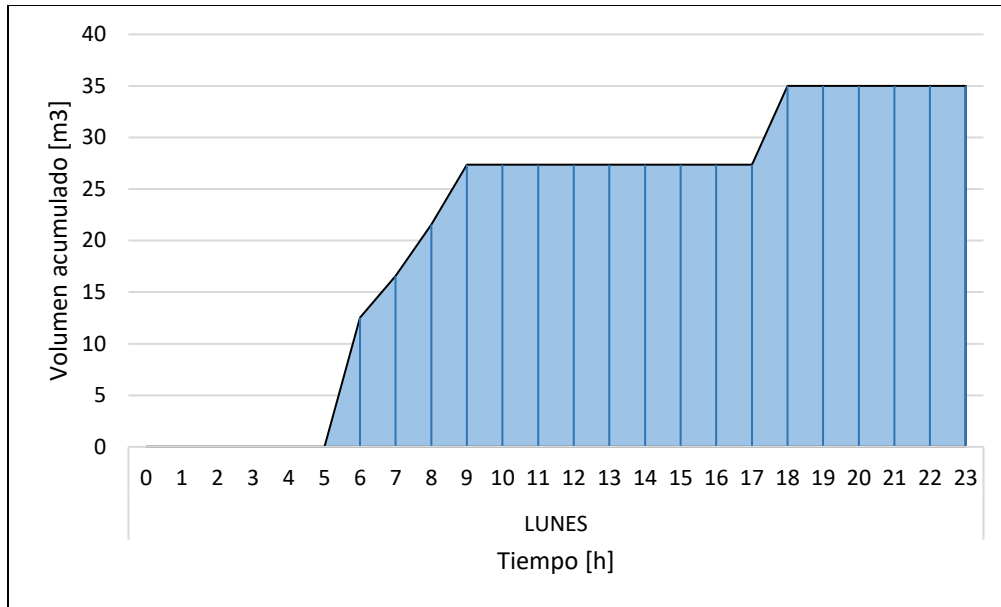


Nota. Se muestra en la figura el comportamiento que presenta el sistema de almacenamiento en un día de la semana correspondiente al mes de marzo a fin de cumplir con el riego establecido. Elaborado por Autores.

Al finalizar el día se observa en la Figura 24 que el sistema híbrido de energía a través del sistema de riego ha proporcionado con la cantidad de agua requerida siendo esta 35 m³/día. De esta manera se asegura que a lo largo de la semana en el mes que peor energía solar se produce se abastezca con el agua requerida por el cultivo, por ende, en las semanas siguientes al igual que en los meses siguientes no habrá problemas de solventar con la demanda hídrica y energética.

Figura 24

Volumen acumulado suministrado en un día de la semana de marzo

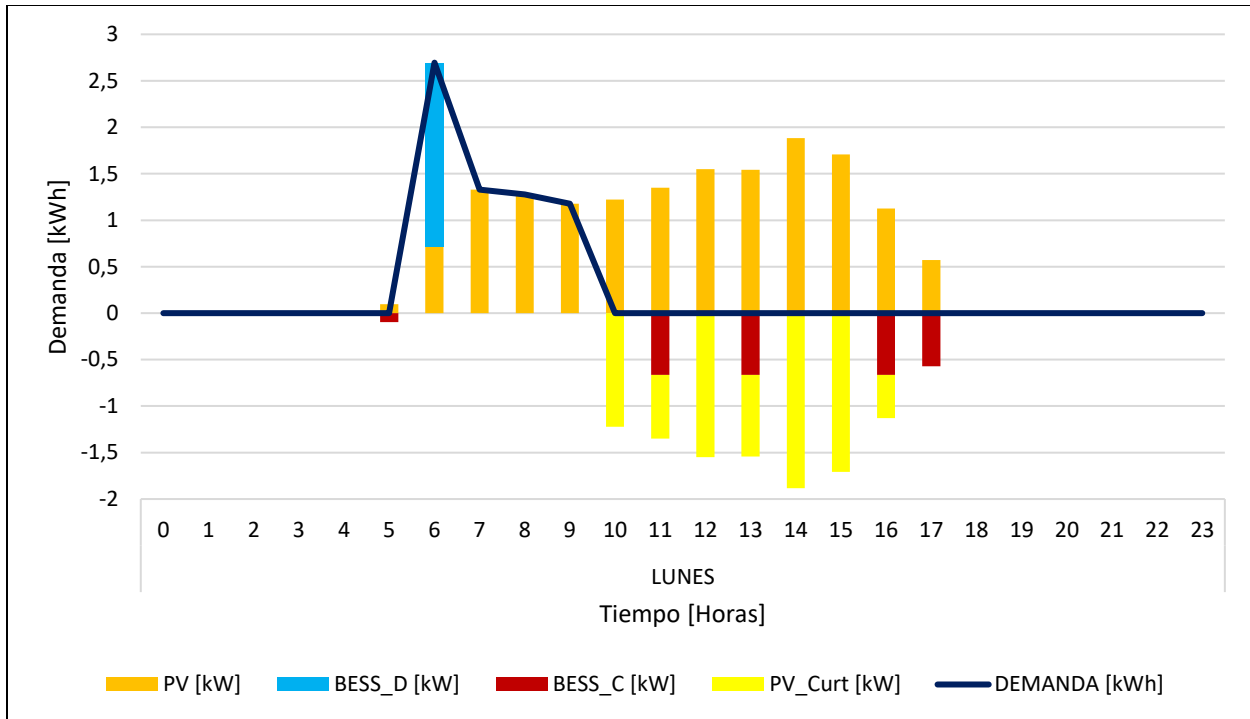


Nota. Se muestra en la figura el volumen suministrado para un día de riego correspondiente al mes de marzo. Elaborado por Autores.

Algo semejante ocurre con el mes de septiembre de acuerdo con los mismos parámetros establecidos que el mes de marzo, en la Figura 25 se observa el comportamiento de la demanda eléctrica que tendrá en un día típico de la semana.

Figura 25

Operación del sistema híbrido de energía con gestión de la demanda

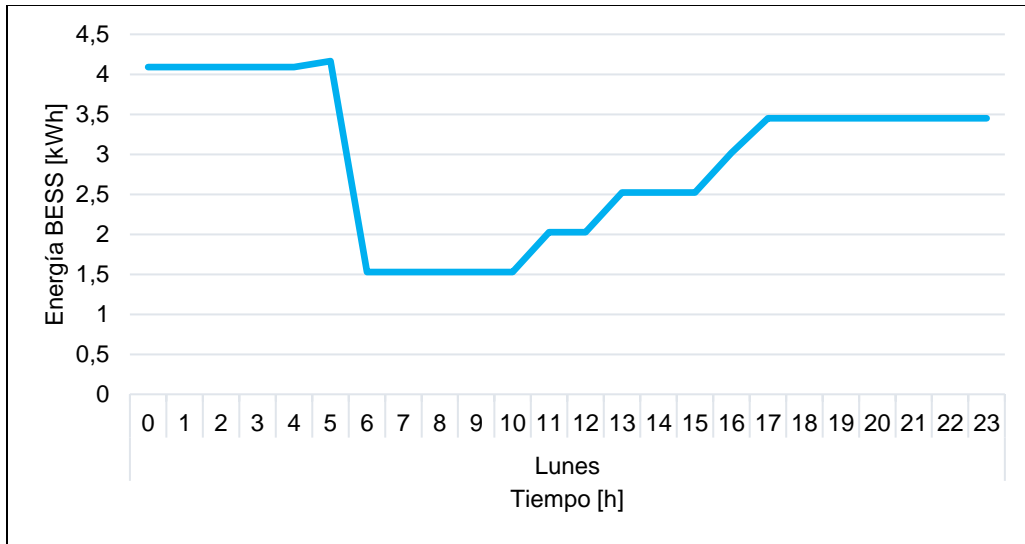


Nota. Se muestra en la figura la operación del sistema híbrido óptimo con gestión de la demanda diseñado para un día típico correspondiente al mes de septiembre. Elaborado por Autores.

De la misma forma se observa que las fuentes en forma conjunta satisfacen con la demanda requerida para ese día, siendo el sistema fotovoltaico que en la mayoría proporciona la energía requerida a lo largo del día complementada con la energía de las baterías, que además recibe la energía fotovoltaica para su respectiva carga, ver Figura 26.

Figura 26

Comportamiento de las BESS en un día de la semana de septiembre

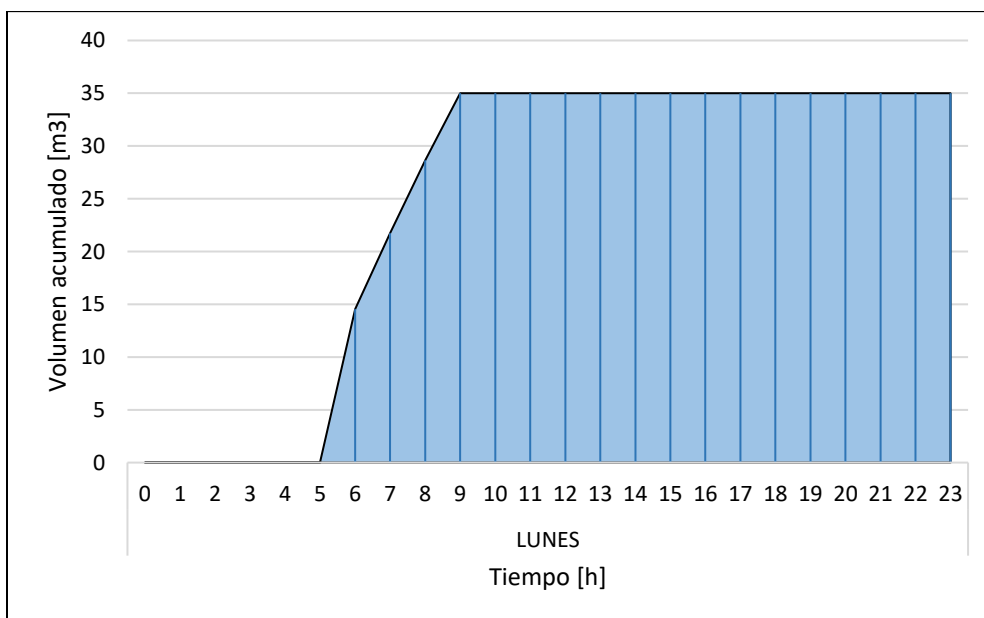


Nota. Se muestra en la figura el comportamiento del sistema de almacenamiento BESS para un día típico correspondiente al mes de septiembre. Elaborado por Autores.

Por consiguiente, en la Figura 27 se puede comprobar que el requerimiento hídrico del cultivo se está cumpliendo al llegar a su demanda diaria que es 35 m³/día.

Figura 27

Volumen acumulado suministrado en un día de la semana de septiembre



Nota. Se muestra en la figura el volumen suministrado para un día de riego del mes de septiembre. Elaborado por Autores.

En la Tabla 18 se presenta un resumen del cumplimiento del volumen diario requerido, en base a los escenarios seleccionados, donde se observa que el tiempo necesario para cumplir con el riego es de 2.16h. En el Anexo 4 se muestra más detalladamente las horas de riego y el tiempo recomendado de activación de la electrobomba.

Tabla 18

Volumen diario suministrado y tiempo total de operación de la electrobomba

Mes	Días	Volumen bombeado diariamente	Tiempo de encendido
		[m ³]	[h]
Marzo	Lunes	35	2,16
	Martes	35	2,16
	Miércoles	35	2,16
	Jueves	35	2,16
	Viernes	35	2,16
	Sábado	35	2,16
	Domingo	35	2,16
Septiembre	Lunes	35	2,16
	Martes	35	2,16
	Miércoles	35	2,16
	Jueves	35	2,16
	Viernes	35	2,16
	Sábado	35	2,16
	Domingo	35	2,16

Nota. Se presenta el volumen bombeado por cada día de la semana del mes de marzo y septiembre. Elaborado por autores.

Análisis comparativo con otros métodos de dimensionamiento

En esta sección se ejecuta una comparativa técnica – económica entre la propuesta del diseño óptimo con gestión de la demanda con un diseño tradicional y diseño óptimo sin gestión de la demanda.

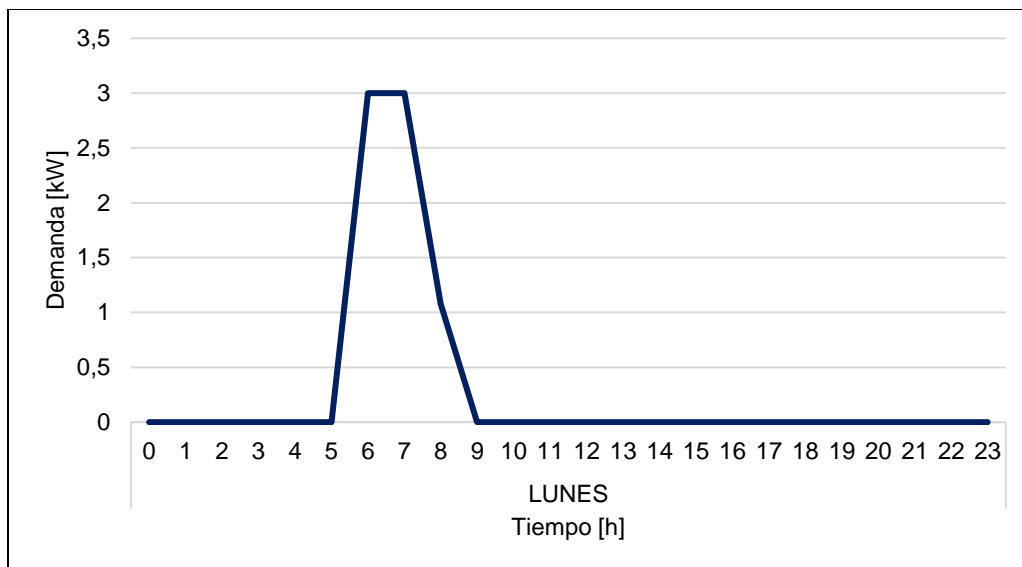
En el caso del dimensionamiento tradicional del sistema híbrido, se consideró el tiempo de 2.36h que se obtuvo en el tiempo de aplicación de la Ecuación 9 junto con la potencia eléctrica de electrobomba, con estos parámetros se podrá determinar la capacidad a instalar tanto en potencia fotovoltaica como del sistema de almacenamiento, los cálculos realizados para este caso se encuentran detallados en el Anexo 5.

Para el caso del diseño óptimo sin gestión de la demanda, se usa la misma función objetivo, los mismos modelos de paneles fotovoltaicos y de baterías, las mismas restricciones del sistema fotovoltaico, energía no suministrada, vertimiento de recurso; pero si presenta cambios en la restricción del balance de energía porque no se incluye el tiempo de encendido óptimo de la electrobomba sino una curva de demanda fija, además no se incluye las restricciones de gestión de demanda propuestas, el problema de optimización se puede observar en el Anexo 6.

Se introduce una curva de demanda diaria fija, ver Figura 28, que a diferencia de la propuesta de investigación en donde cambia óptimamente porque es una variable de optimización esta se mantiene fija todos los días, en donde se considera de la misma manera que el sistema de riego operará 2.36h, realizando el riego solo en la mañana, de igual forma se usa el software de FICO Xpress para obtener las capacidades a instalar de ambas tecnologías.

Figura 28

Curva de demanda diaria fija a emplear en el sistema híbrido óptimo



Nota. Se muestra la demanda diaria fija a cumplir en cada día de riego por el sistema híbrido óptimo. Elaborado por Autores.

En la Tabla 19, se manifiesta los resultados obtenidos de las capacidades a instalar de las dos tecnologías usadas en los 3 métodos, así como su costo de inversión total por cada una.

Tabla 19

Análisis técnico comparativo entre los diferentes métodos de dimensionamiento efectuados

Tecnología	Análisis Óptimo sin		
	Análisis Tradicional	Gestión de la demanda	Análisis Óptimo con Gestión de la demanda
Fotovoltaico [kW]	4,2	5,35	4,59
BESS [kW]	14,4	9,66	4,59
C.I. [\$]	25.550	19.580	11.267

Nota. Se muestra la capacidad a instalar de las diferentes tecnologías junto a sus costos de inversión. Elaborado por Autores.

Como resultado de la comparativa del costo de inversión asociado a cada método aplicado se determina que al realizar un diseño óptimo con gestión de la demanda se obtiene un costo más viable en comparación con las otras dos, es decir comparado con un diseño tradicional se logra un ahorro del 55.9%. En la Tabla 20 se muestra el ahorro que se genera al inicio de invertir según la potencia a instalar.

Tabla 20

Análisis económico del costo de inversión inicial por kW instalado de cada tecnología

ANÁLISIS	INVERSIÓN	AHORRO	
Tradicional	\$25.550	\$14.283	55.9%
Óptimo + Gestión de la demanda	\$11.267		

Nota. Se muestra en la tabla el ahorro generado al emplear un diseño óptimo con gestión de la demanda en comparativa con un diseño convencional de sistemas híbridos. Elaborado por Autores.

Como se puede evidenciar en la Tabla 19 y 20 posterior al dimensionamiento y diseño efectuados en cada uno de los análisis se puede establecer que al realizar un análisis óptimo + gestión de la demanda se obtiene el sistema híbrido como mejor opción técnica – económica a instalar, además de estar cumpliendo con la demanda requerida para el riego diario de toda el área de cultivo y presentar un ahorro significativo en la inversión de los equipos. Validando esta afirmación en la Tabla 21 se presenta un análisis económico del ahorro de la inversión respecto al interés que se pagaría por la inversión para conocer el ahorro producido y la anualidad entre el diseño óptimo y el óptimo con gestión de la demanda.

Tabla 21

Análisis económico comparativo en relación al pago de interés anual de la inversión.

ANÁLISIS	INVERSIÓN	1 AÑO	10 AÑOS	AHORRO EN 10 AÑOS	AHORRO TOTAL
Óptimo	\$19.580	\$3.186	\$31.856		
Óptimo + Gestión de la demanda	\$11.267	\$1.747	\$17.471	\$14.385	\$22.698

Nota. Se muestra en la tabla la anualidad perteneciente a los dimensionamientos óptimo y óptimo con gestión de la demanda empleando la inversión correspondiente para determinar el ahorro producido. Elaborado por Autores.

En la tabla 21 se puede observar el ahorro producido al optar por un diseño híbrido con gestión de demanda en vista que se considera la inversión realizada para ambos casos (óptimo y óptimo + gestión de demanda) además del factor de recuperación de capital (FRC) el cual como se explicó en Capítulo IV tiene una proyección a 10 años con un interés anual del 10%, razón por la cual se presenta el pago anual incluido el interés que se deberá realizar en el caso hipotético de emplear un crédito para la realización del proyecto, mismo que se proyecta a los 10 años establecidos, obteniendo así el ahorro generado al final de este tiempo (\$14.385). El ahorro total presentado en la misma tabla hace referencia a la suma del ahorro anterior más el ahorro presentado al realizar la inversión inicial (\$8.313).

Selección de equipos para diseño óptimo con gestión de la demanda

El voltaje del sistema el cual se encuentra representado en diferentes niveles de acuerdo a las diferentes recomendaciones para instalaciones fotovoltaicas y de acuerdo con la potencia de la carga, como se muestra en la Tabla 22.

Tabla 22

Voltaje del sistema recomendado para cada potencia instalada

Potencia instalada	Voltaje de trabajo del sistema fotovoltaico
Menor de 1500 W	12 V
Entre 1500 W y 5000 W	24 V o 48 V
Mayor de 5000 W	48 V o 120 V

Nota. En la tabla se presenta los voltajes recomendados para el sistema fotovoltaico de acuerdo con la potencia instalada. Tomado de: (Cuenca, 2017).

Mediante la capacidad de generación a instalar más óptima técnica – económica proporcionado a través del problema de optimización, se procede a determinar el número de paneles y baterías necesarias para el sistema híbrido óptimo de energía con gestión de la demanda dependiendo de las características técnicas de las baterías y de los paneles como se muestra en la Tabla 23 y 24, para mayor información de las características técnicas de los equipos mirar los Anexos 7 y 8.

Tabla 23

Características técnicas del panel solar seleccionado

Potencia [W]	Precio [USD]	Área [m ²]
420	293,62	1,953

Nota. En la tabla se muestra las características del panel fotovoltaico JINKO SOLAR Tiger Neo N-type JKM420N-54HL4-V. Tomado de (Jinko Solar, 2020).

Tabla 24

Características técnicas de la batería seleccionada

Voltaje [V]	Capacidad [Ah]	Precio [USD]
12	100	322,12

Nota. En la tabla se muestra las características de la batería Aokly 12V 100AH, 100Ah@10h 6GFM100G GEL empleada en el sistema de almacenamiento. Tomado de (RENOVA Energía, s.f.).

Posteriormente, se establece el regulador de carga necesario para el sistema, así como el inversor teniendo en consideración que el voltaje del sistema es de 48V, como se presenta en las Tablas 25 y 26 a continuación.

Tabla 25

Características técnicas del regulador de carga seleccionado

Requerimiento del sistema	Características del equipo
$I_{ccR} = 106.73A$	$I_{ccR} = 100A$
$V_R = 76.98V$	$V_R = 150V$

Nota. En la tabla se muestra las características del Controlador de carga SmartSolar MPPT 150/100-Tr VE seleccionado para el sistema. Tomado de (RENOVA Energía, s.f.).

Tabla 26

Características técnicas del inversor seleccionado

Requerimiento del sistema	Características del equipo
$P_{inv} = 5507.52 W$	$P_{inv} = 8000 W$
$V_{in} = 48V$	$V_{in} = 48V$

Nota. En la tabla se muestra las características del Inversor/Cargador Victron Quattro 8000VA 48V 110 - 100A seleccionado para el sistema. Tomado de (AutoSolar, s.f.).

Como se puede observar tanto el regulador de carga como el inversor han sido seleccionados en base a los requerimientos del sistema, para mayor detalle de sus características técnicas se recomienda ver los Anexos 9 y 10.

Análisis comparativo con otros métodos del costo total del proyecto implementado

En esta sección se analiza los costos de inversión por equipos a instalar que conforman todo el proyecto entre la propuesta del diseño óptimo con gestión de la demanda con un diseño tradicional y diseño óptimo sin gestión de la demanda. En la Tabla 27 se presenta el número de paneles fotovoltaicos y baterías requeridos para cada método de diseño del sistema híbrido de energía.

Tabla 27

Análisis económico por unidad de equipo entre los diferentes métodos de dimensionamiento efectuados

Tecnología	Tradicional		Óptimo sin gestión de la demanda		Óptimo con gestión de la demanda	
	N.º	Costo	N.º	Costo	N.º	Costo
Paneles Fotovoltaicos [420 W]	paneles 10	\$ 293,62	paneles 13	\$ 293,62	paneles 12	\$ 293,62
Baterías [100 Ah]	N.º BESS 12	Costo \$ 322,12	N.º BESS 8	Costo \$ 322,12	N.º BESS 4	Costo \$ 322,12
Inversión [\$]	\$ 6.801,64		\$ 6.394,02		\$ 4.811,92	

Nota. Se muestra el número de equipos a instalar de las diferentes tecnologías junto a su costo por unidad para la instalación del sistema híbrido de energía. Elaborado por autores.

Como resultado de la comparativa del costo por unidad a instalar se determina que al realizar un diseño óptimo con gestión de la demanda se obtiene un costo menor en la adquisición de los equipos. Comparado con un diseño tradicional que tiene un costo de \$ 6.801,64 y un diseño óptimo con gestión de la demanda con un costo de \$ 4.811,92 se logra tener un ahorro de \$ 1.989,72 que significa una reducción del 29% en su costo de inversión. De la misma manera comparando un diseño óptimo sin gestión de la demanda que se necesita invertir \$ 6.394,02, con un diseño óptimo con gestión de la demanda se logra un ahorro de \$ 1.582,1, es decir una reducción del 24% en su precio.

Finalmente, en la Tabla 28 se muestra el costo total de inversión por la adquisición de los equipos y materiales del sistema de riego, la electrobomba y el sistema híbrido de energía.

Tabla 28

Costo total de inversión para la implementación del proyecto

Equipos/Materiales	Tradicional	Óptimo sin gestión de la demanda	Óptimo con gestión de la demanda
Paneles + baterías	\$ 6.802	\$ 6.395	\$ 4.812
Inversor	\$ 3.291	\$ 3.291	\$ 3.291
Regulador	\$ 616	\$ 616	\$ 616
Electrobomba	\$ 1.105	\$ 1.105	\$ 1.105
Tuberías	\$ 1.147	\$ 1.147	\$ 1.147
Aspersores	\$ 176	\$ 176	\$ 176
Total	\$ 13.137	\$ 12.730	\$ 11.147

Nota. Se muestra en la tabla los costos finales para la implementación del sistema híbrido de energía en función del método de dimensionamiento empleado. Elaborado por autores.

Capítulo VI

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

En este trabajo de investigación se propuso y validó una metodología para planificar un sistema híbrido basado en energía fotovoltaica y baterías para la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Campus Guillermo Rodríguez Lara incluyendo la gestión de la demanda, logrando darle flexibilidad a la carga eléctrica en este caso una electrobomba para un sistema de riego. Se verifica que al aplicar la propuesta en todos los escenarios probados el riego planificado de acuerdo con las características técnicas requeridas del cultivo se cumple, asegurando el volumen diario requerido de $35m^3/día$, en un tiempo óptimo de encendido de la electrobomba.

A través de la propuesta metodología para obtener el requerimiento hídrico del cultivo y el sistema de riego por aspersión se ha logrado determinar la capacidad necesaria de la electrobomba, que es usada para el bombeo de agua hacia las tuberías del sistema de riego por aspersión.

Para obtener el requerimiento hídrico del cultivo fue necesario conocer fundamentos agronómicos para poder determinar el volumen óptimo diario de riego y así garantizar que el sistema cumpla con este. A su vez este dato se convierte en un dato para el dimensionamiento del sistema de riego.

Es necesario disponer y analizar la disponibilidad del recurso solar en la zona de estudio logrando obtener los escenarios de energía solar generada que sirvieron para establecer la operación del sistema híbrido de energía ante una mayor y menor producción de energía solar y que tuvo relación directa con la capacidad a instalar del sistema fotovoltaico.

Con la flexibilidad de operación de la carga del sistema híbrido óptimo con gestión de la demanda se logró establecer un horario de riego eficiente y flexible, donde se recomienda distribuir el tiempo de encendido total del sistema de riego en varios periodos evitando así picos

de energía máximos en una misma hora, dicha acción optimiza la operación de las unidades de generación y almacenamiento. Además, permite reducir costos en la planificación de 29% comparadas con técnicas tradicionales y de 24% comparado con planificación óptima sin incluir gestión de demanda.

El diseño óptimo con gestión de la demanda resulta una opción muy viable en comparación con el diseño tradicional ya que en este tipo de diseño se sobredimensiona los equipos por lo tanto presenta un costo más elevado de implementación al no tener en cuenta la operación del sistema al encender y apagar la electrobomba óptimamente, por tal razón con la inclusión de la gestión de la demanda se logra obtener la operación óptima de la carga y una reducción del costo de inversión en un 29%.

La propuesta es comparada con una técnica de planificación óptima que no considera la gestión de demanda y se pudo establecer que con el sistema híbrido óptimo con gestión de la demanda se logró un ahorro de \$24% en los costos de inversión por unidad instalada del sistema de generación y almacenamiento. Por lo tanto, el agregar la gestión de la demanda permite reducir costos de instalación y operación a la vez que cumple en todo momento la demanda requerida por el sistema de riego a fin de tener un cultivo en perfectas condiciones.

Al incluir la gestión de la demanda eléctrica se logra el desplazamiento del consumo energético a zonas con disponibilidad de recurso solar y una gestión eficiente de la batería en su operación carga y descarga siempre respetando el volumen hídrico diario requerido y condiciones técnicas de riego.

Recomendaciones

Se recomienda establecer escenarios de estudio que representen las necesidades tanto hídricas como energéticas del sistema durante el año y en función de ello proceder con el dimensionamiento de los equipos.

Se recomienda utilizar la metodología elaborada en este trabajo ya que se ha establecido un proceso generalizado para el dimensionamiento de las tecnologías afines a un sistema híbrido de energía.

Para la aplicación de la gestión de la demanda se debe identificar cargas controlables que permitan dar una flexibilidad en las horas de activación.

En la gestión de la demanda al no necesitar de una curva de demanda eléctrica sino de un volumen diario a cumplir se recomienda que el tiempo de activación no tome valores en un rango de cero a 1, sino de un tiempo mínimo de activación ya que puede presentarse tiempos de activación bajos que no son beneficiosos para el funcionamiento del sistema de riego.

Para conocer la viabilidad del sistema híbrido con gestión de la demanda se recomienda emplear un análisis técnico – económico del mismo en comparativa con otros métodos de dimensionamiento de sistemas híbridos.

Bibliografía

Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables

[ARCERNNR]. (2021). *Resolución Nro. ARCERNNR-013/2021 - REGULACIÓN Nro. ARCERNNR-001/2021*. https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/06/res_nro__arcernnr-013-2021.pdf

Alarcón, A. D. (2015). *¿Cuál es la importancia de los sistemas híbridos para América Latina y el Caribe?* Energía para el Futuro: <https://blogs.iadb.org/energia/es/cual-es-la-importancia-de-los-sistemas-hibridos-para-america-latina-y-el-caribe/>

Alegret, E., & Martínez, Y. (2019). Coeficiente de Hazen-Williams en función del número de Reynolds y la rugosidad relativa. *INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL*, 41-55. <http://scielo.sld.cu/pdf/riha/v40n3/1680-0338-riha-40-03-41.pdf>

Allen, D., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: Roma Estudio FAO Riego y Drenaje. <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>

Al-Sharafi, A., Yilbas , B., Sahin , A., & Ayar, T. (2017). Performance assessment of hybrid power generation systems: Economic and environmental impacts. *Energy Conversion and Management*, 132, 418-431. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.047>

Arango, J., Ascencio, M., Barrientos, R., & Briones, C. (2001). *Guía para el Desarrollo de Proyectos de Bombeo de Agua con Energía Fotovoltaica. I. Mexico*. <https://ecotec.unam.mx/wp-content/uploads/Guia-Bombeo-Agua-Energia-Fotovoltaica-Vol1-Libro-de-consulta.pdf>

Arias, M. (2012). *Diseño de un Sistema de Riego por Aspersión con Automatización para el Sector de Ugnag, Cantón Penipe. [Tesis de Ingeniería, Escuela Superior Politécnica del Chimborazo]*. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/2477/1/15T00520.pdf>

- AutoSolar. (s.f.). *AutoSolar*. <https://autosolar.es/inversores-cargadores-48v/inversor-victron-quattro-8000va-48v-110100a>
- Avendaño, V. (2004). *Estudio de la factibilidad de la introducción de un sistema de riego gravedad - aspersión en el caserío Corral de Piedra, Concepción Tutuapa, San Marcos*. Repositorio Institucional. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/01/01_2134.pdf
- Barroso, A. (2023). Sizing of a Photovoltaic Solar Energy System for a Family Home in Maracay, Aragua State. *Tekhné*, 26(2), 1-12.
<https://revistasenlinea.saber.ucab.edu.ve/index.php/tekhne/article/view/6189/6202>
- Briceño, M., Álvarez, F., & Barahona, U. (2013). *Manual de Riego y Drenaje*.
<https://bdigital.zamorano.edu/items/7f23f41f-6d3f-4dce-a57c-1d5b56c8cf86>
- Canales, J., Martínez, G., & Olivás, N. (2020). *Sistema de bombeo solar fotovoltaico para extracción de agua de estanque y su utilización para riego en la finca Santa Cruz, de la comunidad Santa Cruz, Estelí. [Tesis de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua]*.
- Carrazón, J. (2007). *Manual práctico para el diseño de sistemas de minirriego*.
<https://www.fao.org/3/at787s/at787s.pdf>
- Casa del riego. (2020). *Casa del riego Ecuador*. <https://www.casadelriegoecuador.com/wp-content/uploads/2020/09/CATALOGO-GENERAL-PEDROLLO-60Hz.pdf>
- Cengel, Y. (2007). *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicación* (Cuarta ed.). Mexico: McGraw-Hill Interamericana.
- Comisión Nacional de Energía. (2023). *Informe de costos de tecnologías de generación*.
<https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2023/05/ICTG-Mayo-2023.pdf>
- Cuenca, M. (2017). *Dimensionado de un sistema híbrido de abastecimiento de agua y energía en una comunidad aislada (Toledo)*. Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, España.
<https://e->

archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/27949/TFG_Marcos_Cuenca_Ruiz.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Cueva, A. (2019). *Diseño de sistemas híbridos de energías renovables. [Master en Sistemas Electricos de Potencia, Escuela Superior Politécnica del Litoral]*.

<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/54744/1/T-109692%20Cueva%20Urgilez.pdf>

GAD de la Parroquia Rural de Belisario Quevedo. (2019). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia Rural de Belisario Quevedo 2019-2023*.

GESTIRIEGO. (2016). *Diseño Agronómico*. GESTIRIEGO: <https://www.gestiriego.com/disenogr-109692%20Cueva%20Urgilez.pdf> agronomico/#:~:text=El%20diseño%20agronómico%20representa%20la,las%20épocas%20de%20máxima%20necesidad.

Global Data UK. (2020). Ecuador could achieve optimistic >400MW solar PV capacity by 2030, says GlobalData. <https://www.globaldata.com/media/power/ecuador-achieve-optimistic-400mw-solar-pv-capacity-2030-says-globaldata/>

Google. (s.f.). [Universidad de las Fuerzas Armadas - Belisario Quevedo]. <https://www.google.es/intl/es/earth/index.html>

Hatzargyriou, N. (2013). *Microgrids: Architectures and control* (Primera ed.). Wiley-IEEE Press.

Jiménez, S., & Ramirez, C. (2018). IV CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII. Mexico.

<https://www.riego.mx/congresos/comeii2018/assets/ponencias/extenso/18057.pdf>

Jinko Solar. (2020). *Jinko Solar*. <https://www.jinkosolar.com/es/site/dwparametern>

Luza, D. (2006). Diseño de riego por aspersión. En D. Luza, *Introducción al riego presurizado y Diseño de un sistema de riego por aspersión*. (págs. 1 - 31). Cochabamba: Programa de Postgrado en Gestión Integral de Recursos Hídricos - UMSS.

Martinez, P. (2017). *Dimensionado de un Sistema de Bombeo Fotovoltaico en las cercanías de Jaén. [Tesis de Ingeniería, Universidad de Jaén]*. Repositorio Institucional.

<https://crea.ujaen.es/bitstream/10953.1/17611/1/TFG%20Pablo%20Miguel%20Martinez%20Cardenas%20DEFINITIVO.pdf>

Mataix, C. (1986). *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. Madrid: Ediciones del .

Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables. (2019). Plan Maestro de Electricidad. <https://www.recursosyenergia.gob.ec/plan-maestro-de-electricidad/#>

Montaluisa, T., & Vargas, F. (2021). *Diseño e implementación de un sistema de riego inteligente para incrementar el rendimiento en los cultivos basado en energía solar fotovoltaica [Tesis de Ingeniería, Universidad de las Fuerzas Armadas]*. Repositorio Institucional ESPE. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/24271>

Mott, R. (2015). *Mecánica de Fluidos* (Séptima ed.). Mexico: Pearson Education.

<https://www.pearsoneducacion.net/españa/TiendaOnline/mecánica-de-fluidos-7ed>

Muñoz, J., Rojas, M., & Barreto, C. (2018). Incentivo a la generación distribuida en el Ecuador.

Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología, 60-68.

http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-860X2018000100060&lng=es&tlng=es.

Navarro, D. (2020). *Gestión de Energía para la Microrred en Cuenca (Ecuador) usando Control Predictivo. [Título de grado, Universidad de Sevilla]*. Repositorio Institucional idUS.

<https://idus.us.es/handle/11441/106370>

NREL Transforming ENERGY. (2023). *NSRDB: National Solar Radiation Database*.

<https://nsrdb.nrel.gov/data-viewer>

OLADE. (2008). Atlas solar del Ecuador con fines de generación eléctrica.

<https://goo.gl/xyQQTt>

Organización Latinoamericana de Energía [OLADE]. (2017). *Manual de Planificación Energética* (Segunda ed.). [https://www.olade.org/wp-](https://www.olade.org/wp-content/uploads/2021/03/Manual_Planificacion_Energetica_Espanol_Final22-05-2017.pdf)

[content/uploads/2021/03/Manual_Planificacion_Energetica_Espanol_Final22-05-2017.pdf](https://www.olade.org/wp-content/uploads/2021/03/Manual_Planificacion_Energetica_Espanol_Final22-05-2017.pdf)

- Organización Latinoamericana de Energía [OLADE]. (2021). *Generación eléctrica mundial y para América Latina y el Caribe (ALC) y su impacto en el sector en el sector energético por la pandemia producida por el COVID–19*. https://www.olade.org/wp-content/uploads/2021/01/Generacion-electrica-mundial-y-para-America-Latina-y-el-Caribe-ALC_01-12-2020.pdf
- Ortega, L. (1994). *SELECCIÓN Y MANEJO DE EQUIPOS DE RIEGO POR ASPERSIÓN*. <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/31815/NR17720.pdf?sequence=1>
- Panjón, L. (2010). Implementación de Sistemas Fotovoltaicos en Zonas Rurales del Cantón Morona Santiago. *Revista Técnica "energía&Quot*, 6(1), 90-94. <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v6.n1.2010.233>
- Parvaresh Rizi, A., Ashrafzadeh, A., & Ramezani, A. (2019). A financial comparative study of solar and regular irrigation pumps: Case studies in eastern and southern Iran. *Renewable Energy*, 1096-1103. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.026>
- Peralta, J. M., & Simpfendorfer, C. (2001). Riego por Aspersión. (INIA, Ed.) Temuco. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/40180>
- Plastigama. (2020). Tuberías y Accesorios PVC y PE BD. <https://www.ditecna.com.ec/wp-content/uploads/2020/08/PGA-6-Catalogo-de-Tuberias-y-Accesorios-de-PVC-y-PE-BD-Plastigama-Agricultura.pdf>
- Pozo, D. (2022). Linear Battery Models for Power Systems Analysis. *Electric Power Systems Research*, 212. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108565>
- RENOVA Energía. (s.f.). *RENOVA Energía*. <https://www.renova-energia.com/productos/regulador-voltaje-victron-energy-smartsolar-mppt-150-100-ve-can/>

- RENOVA Energía. (s.f.). *RENOVA Energía*. <https://www.renova-energia.com/productos/bateria-aokly-12v-100ah-100ah10h-6gfm100g-gel/>
- Singh, S., Singh, M., & Chandra Kaushik, S. (2016). Feasibility study of an islanded microgrid in rural area consisting of PV, wind, biomass and battery energy storage system. *Energy Conversion and Management*, 128, 178-190.
- Unirain. (2019). *Aspersor F2614 circular de plástico 1/2", ángulo bajo 14°*.
<https://unirain.com/familias/aspersores-riego-cobertura/caudal-bajo-medio-plastico/aspersor-f2614.html>
- Valencia Ramirez, R., Melo Martinez, A., Legarda Burbano, L., & Puentes Leal, G. (1987). DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO POR ASPERSION PARA LA GRANJA EXPERIMENTAL VALENCIA DE LA UNIVERSIDAD DE NARIÑO. *Revista De Ciencias Agrícolas*, 10, 3-4. <https://revistas.udenar.edu.co/index.php/rfacia/article/view/1319>
- Varela, L., & Ron, S. (2018). *Geografía y clima del Ecuador*.
<https://bioweb.bio/fungiweb/GeografiaClima/#:~:text=Solo%20hay%20dos%20estaciones%20definidas,lugar%20entre%20junio%20y%20noviembre.>
- Velásquez, A., Aguirre, M., Saltos, M., Ortiz, D., Macias, M., Llanos, J., . . . Martinez, W. (2022). Practical Framework for Optimal Planning of Isolated Rural Microgrids. *Recent Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 227 - 241.
- 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*, 114080. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114080>
- Yu, X., Malysz, P., Sirouspour, S., & Emadi, A. (2014). Optimal microgrid component sizing using mixed integer linear programming. *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ITEC.2014.6861770>

Anexos