



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DIFUSO DE SEGUIMIENTO SOLAR DE DOS EJES

PABLO ERNESTO MONTALVO JARAMILLO

**Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, presentado ante
el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial
para la obtención del grado de:**

**MAGISTER EN SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN
INDUSTRIAL**

RIOBAMBA – ECUADOR

JULIO 2017

CERTIFICACIÓN:

EL TRIBUNAL DE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, titulado “DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DIFUSO DE SEGUIMIENTO SOLAR DE DOS EJES”, de responsabilidad del Sr Pablo Ernesto Montalvo Jaramillo ha sido prolijamente revisado y se autoriza su presentación.

Tribunal:

Dr. JUAN VARGAS GUAMBO
PRESIDENTE

FIRMA

Ing. MARCO SANTILLAN GALLEGO
DIRECTOR

FIRMA

Ing. CESAR ASTUDILLO MACHUCA
MIEMBRO

FIRMA

Ing. JORGE FREIRE MIRANDA
MIEMBRO

FIRMA

Riobamba, Julio 2017

DERECHOS INTELECTUALES

Yo, Pablo Ernesto Montalvo Jaramillo declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, y que el patrimonio intelectual generado por la misma pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

PABLO E MONTALVO JARAMILLO

N.º Cédula: 1801624402

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Pablo Ernesto Montalvo Jaramillo declaro que el presente **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este proyecto de investigación de maestría.

Riobamba, julio de 2017

PABLO ERNESTO MONTALVO JARAMILLO
N° CÉDULA 1801624402

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mi esposa e hijos que han sido para mí la principal fuente de fortaleza y animo de superación, gracias a ellos encuentro la manera de salir adelante y alcanzar los objetivos sin dejar atrás mi proyecto de vida.

Una dedicatoria especial a Gonzalo Montalvo, mi padre, que durante toda su vida fue un ejemplo de persona a seguir.

PABLO

AGRADECIMIENTO

Expreso mi sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y a los docentes profesionales que me guiaron a lo largo de mis estudios y en el transcurso de este trabajo de titulación.

Pablo

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Tema de investigación.....	1
1.2. Problema	1
1.3. Justificación	1
1.4. Formulación del problema	3
1.5. Sustentación del problema	3
1.6. Objetivos	5
1.6.1. Objetivo general:.....	5
1.6.2. Objetivos específicos.	5
1.7. Hipótesis.....	5
1.8. Variables	5
1.8.1. Independiente	5
1.8.2. Dependiente.....	5
CAPITULO II	6
2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Energías renovables	6
2.2. Energía solar	8
2.2.1. Energía solar térmica.....	10
2.2.2. Energía solar fotovoltaica	11
2.3. Mapa solar del Ecuador.....	11
2.4. Seguidores solares.....	13
2.5. Lógica difusa.....	14
2.5.1. Operaciones con conjuntos difusos	16
2.5.2. El control difuso.....	19

CAPÍTULO III.....	31
3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	31
CAPÍTULO IV.....	34
4. PROPUESTA.....	34
4.1. Tema.....	34
4.2. Datos informativos.....	34
4.3. Antecedentes.....	34
4.4. Objetivos.....	35
4.4.1. Objetivo general.....	35
4.4.2. Objetivos específicos.....	35
4.5. Descripción de la propuesta.....	35
4.5.1. Principio de funcionamiento.....	36
4.5.2. Acondicionamiento de la señal de entrada.....	39
4.5.3. Lazo de control.....	41
4.5.4. Obtención del error.....	41
4.5.5. Prototipo.....	41
4.5.6. Lógica difusa de control.....	42
CAPÍTULO V.....	53
5. DEMOSTRACIÓN DE LA HIPÓTESIS.....	53
CAPÍTULO VI.....	59
Resultados y discusión.....	59
Recomendaciones.....	60
BIBLIOGRAFIA	
ANEXOS	

LISTA DE TABLAS

Tabla 1-2	Ejemplo de reglas de fuzzificación	20
Tabla 2-2	Reglas difusas	23
Tabla 2-3	Ejemplo de aplicación de la salida difusa	25
Tabla 2-4	Conjunto de salidas activadas	27
Tabla 1-3	Indicadores de la variable independiente	32
Tabla 1-5	Energía incidente en el panel fotovoltaico	50
Tabla 2-5	Promedio de energía incidente	54
Tabla 3-5	Prueba de normalidad de la energía incidente	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-2.	Mapa solar de la provincia de Chimborazo.....	12
Figura 2-2.	Mapa solar del Ecuador CIE	13
Figura 3-2.	Señal lógica booleana.....	14
Figura 4-2.	Señal lógica difusa	15
Figura 5-2.	Conjunto booleano	15
Figura 6-2.	Conjunto difuso	16
Figura 7-2.	Conjunto difuso A	17
Figura 8-2.	Número difuso B	17
Figura 9-2.	Conjunto difuso operación AND o intersección	17
Figura 10-2.	Conjunto difuso operación OR o unión.....	18
Figura 11-2.	Negación del conjunto difuso A.....	18
Figura 12-2.	Conjunto negación del número difuso B.....	18
Figura 13-2.	Formas de los conjuntos difusos	20
Figura 14-2.	Área del conjunto difuso de salida	21
Figura 15-2.	Conjunto difuso de salida dividido en figuras conocidas.....	22
Figura 16-2.	Conjunto difuso variable A	24
Figura 17-2.	Conjunto difuso variable B	24
Figura 18-2.	Conjunto difuso variable de salida	25
Figura 19-2.	Valores de entrada variables A y B.....	25
Figura 20-2.	Conjunto difuso de salida para A bajo=1 y B bajo =1	26
Figura 21-2.	Membresía para un valor de entrada A = -4.....	27
Figura 22-2.	Membresía para un valor de entrada B = 2	27
Figura 23-2.	Conjunto difuso de salida Bajo = 0.6.....	28
Figura 24-2.	Conjunto difuso de salida Normal = 0.2.....	28
Figura 25-2.	Conjunto difuso de salida Normal = 0.4.....	29
Figura 26-2.	Conjunto difuso de salida Alta = 0.2.....	29
Figura 27-2.	Conjunto difuso de salida y valor de salida = - 2.11	30
Figura 1-4.	Fotorresistencia (LDR).....	37
Figura 2-4.	Ubicación de las fotorresistencias	37
Figura 3-4.	Acción que tomar para la corrección del error	38
Figura 5-4.	Caída de tensión en la fotorresistencia (Divisor de tensión o medio puente).....	38
Figura 6-4.	Servomotor de pasos	39
Figura 7-4.	Acondicionamiento de la señal de entrada	40
Figura 8-4.	Señal corregida emitida por las fotorresistencias	40

Figura 9-4.	Lazo de control.....	41
Figura 10-4.	Prototipo.....	42
Figura 11-4.	Membresía del error del plato giratorio.....	42
Figura 12-4.	Membresía del error del parante.....	43
Figura 13-4.	Membresía de la salida del plato giratorio	43
Figura 14-4.	Membresía de la salida del parante	44
Figura 15-4.	Diagrama de bloques del control difuso (LabVIEW).....	46
Figura 16-4.	Adquisición y acondicionamiento de la señal de los sensores	47
Figura 17-4.	Configuración de la DAQ para la adquisición de datos	47
Figura 18-4.	Envío de señal de control booleano al motor de pasos.....	48
Figura 19-4.	Configuración de la DAQ para salida de datos al motor de pasos	48
Figura 20-4.	Reglas y membresías en el Fuzzy System Designer	49
Figura 21-4.	Lectura del archivo de las reglas y membresías	49
Figura 22-4.	Procesamiento difuso del error de posición	50
Figura 23-4.	Sentido y secuencia de giro del motor de pasos del plato giratorio	50
Figura 24-4.	Señal para apagar las bobinas de los motores de pasos.....	51
Figura 25-4.	CI ULN 2003.....	51
Figura 26-4.	Conexión entre motor de pasos y la tarjeta DAQ.....	52

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1-5.	Energía incidente 1º día	55
Gráfico 2-5.	Energía incidente segundo día	55
Gráfico 3-5.	Energía incidente tercer día	56
Gráfico 4-5.	Promedio de energía incidente.....	56
Gráfico 5-5.	Resultados de la prueba U de Mann - Whitney	58

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1-2.	Radiación solar sobre una superficie.....	9
Ecuación 2-2.	Eficiencia de un panel solar	10
Ecuación 3-2.	Calculo de la salida de control difuso	22
Ecuación 1-4.	Acondicionamiento de la señal	40
Ecuación 2-4.	Error de posición del parante	41
Ecuación 3-4.	Error de posición del plato	41
Ecuación 1-5.	Rendimiento	56

RESUMEN

Se diseñó un sistema de seguimiento solar de dos ejes con control difuso que aproveche de mejor manera la radiación solar, la propuesta tecnológica y de innovación implementa un sistema de seguimiento solar de dos ejes controlado por un algoritmo difuso, el mismo permite seguir al sol en toda su trayectoria durante el día, dando una mayor optimización de la captación de la energía solar con respecto a los paneles solares de orientación fija que son los más comúnmente utilizados en nuestro país. El control difuso se lo realiza desde una plataforma desarrollada en LabVIEW, en este se ha implementado el ingreso de dos señales correspondientes al error de posición tanto en latitud como en azimut y dos señales de salida generadas en el control difuso para controlar a dos motores de pasos que permiten corregir estos errores, dando como consecuencia, un seguimiento continuo de la trayectoria solar, el sistema difuso corresponde a un sistema MIMO (múltiple entrada, múltiple salida). Para verificar la hipótesis de que un panel solar ubicado en un seguidor solar de dos ejes aprovecha de mejor manera la energía solar con respecto a un panel ubicado con una orientación fija se construyó un prototipo, en él se montó un panel solar y se tomó las lecturas de la incidencia solar durante tres días a intervalos fijos se comparó las medidas captadas por el panel ubicado en el seguidor y en el panel fijo luego, luego se realizó la prueba no paramétrica de U de Mann-Whitney que compara medianas y no medias ya que la distribución luminosa dada por el sol no tiene una distribución normal. El sistema propuesto permitió obtener un rendimiento mayor en un 10.66 % de captación de energía solar con respecto a de un panel fijo. En siguientes trabajos se podrá tomar como referencia la presente investigación para investigar sobre la aplicación de otros posibles algoritmos de control como por ejemplo un control PID continuo, PID digital o sobre un control discreto, etc.

PALABRAS CLAVE: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, < CONTROL AUTOMÁTICO>, <SISTEMAS DE CONTROL>, <AUTOMATIZACIÓN>, <EFICIENCIA>, <LÓGICA DIFUSA>, <MOTOR DE PASOS>, <PRUEBA NO PARAMÉTRICA>.

SUMMARY

In this study, a two-axis solar tracking system with diffuse controller was designed to make the best use of solar radiation, the proposed technology and innovation implemented a solar tracking system of axes controlled by diffuse algorithm. This system allows the sun's trajectory to be followed throughout the entire day, to optimize capturing solar energy in comparison to fixed-orientation solar panels, which are the most commonly used in our country. The diffuse control is implemented via a platform developed in LabVIEW. This control involves the entry of two signals corresponding to the position error with both latitude and azimuth and two output signals generated in the diffuse control to control two stepper motors that allow for these errors to be corrected, resulting in continuous monitoring of the solar path. The diffuse system corresponds to the MIMO system (multiple input, multiple output). In order to verify the hypothesis that a solar panel located on a two-axis solar tracker makes better use of solar energy as compared to a fixed-orientation panel, a prototype was constructed. A solar panel was mounted and solar readings were taken for three days at fixed intervals. The measurements taken from the panel located on the tracking system and the fixed panel were compared, then the nonparametric Mann-Whitney U test was used, which compares medians and not means, as the distribution given by the sun does not have a normal distribution. The proposed system had a higher yield with 10.66% solar energy uptake obtained as compared to a fixed panel. In future research this present study can be taken as a reference to investigate the application of other possible control algorithms, for example a continuous PID controller, digital PID controller or a discrete controller.

KEY WORDS: <ENGINEERING TECHNOLOGY AND SCIENCES>, <AUTOMATIC CONTROL>, <AUTOMATION>, <EFFICIENCY>, <DIFFUSE LOGIC > <STEPPER MOTOR>, <NONPARAMETRIC TEST>.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Tema de investigación

El tema por desarrollarse en el presente proyecto de tesis es “Diseño de un Sistema de Control Difuso de Seguimiento Solar de Dos Ejes”

1.2. Problema

En la actualidad se ha habla mucho sobre la crisis energética y la necesidad de substituir las fuentes de energía utilizadas actualmente, debido a que estas escasean cada vez más y al mismo tiempo tienen un alto índice de contaminación, por energías renovables más limpias es decir con efectos de escasa o nula contaminación.

Una de las energías que pueden solucionar este problema es la solar que es la que se obtiene a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del Sol.

Por medio de captadores que mediante diferentes tecnologías como por ejemplo células fotovoltaicas, colectores térmicos, helióstatos, etc. que son capaces de transformar la radiación solar que alcanza la Tierra, en energía eléctrica o térmica es esta la manera como se puede aprovechar este tipo de energía proveniente del sol.

1.3. Justificación

Según Greenpeace, la energía solar fotovoltaica podría suministrar electricidad a dos tercios de la población mundial en el año 2030 (GREENPACE, 2008).

La potencia de la radiación varía según el momento del día; las condiciones atmosféricas que la amortiguan y la latitud. Se puede asumir que en buenas condiciones de radiación el valor es de aproximadamente 1000 W/m^2 en la superficie terrestre. A esta potencia se la conoce como irradiancia (AOPAC CASTILLO & CASANOVA GONZALEZ, 2010).

La luz o radiación emitida por el sol es disponible en sus componentes directa y difusa, o en la suma de ambas. La radiación directa es la que llega del foco solar, sin reflexiones o refracciones intermedias. La difusa es la emitida por la bóveda celeste diurna gracias a los múltiples fenómenos de reflexión y refracción solar en la atmósfera, en las nubes y el resto de elementos atmosféricos y terrestres. La radiación directa puede reflejarse y concentrarse para su utilización, mientras que no es posible concentrar la luz difusa que proviene de todas las direcciones.

Se puede indicar que los rendimientos típicos por ejemplo de una célula fotovoltaica (aislada) de silicio policristalina oscilan alrededor del 10%. Para células de silicio monocristalino, los valores fluctúan en el 15%. Los más altos que se consiguen son los colectores solares térmicos a baja temperatura (que puede alcanzar el 70% rendimiento en transferencia de energía solar a térmica).

Asimismo, la energía solar termoeléctrica de baja temperatura, con el sistema de nuevo desarrollo, ronda el 40% en sus incipientes versiones. Este sistema posee la ventaja que puede trabajar todo el día a base de agua caliente acumulada durante las horas de sol.

Los paneles solares fotovoltaicos tienen un rendimiento aproximado a un 15 % y estos no producen calor que pueda ser reaprovechado, aunque existen líneas de investigación sobre paneles híbridos que permiten generar energía eléctrica y térmica simultáneamente. Sin embargo, estos paneles solares fotovoltaicos, son muy apropiados para instalaciones sencillas en terrazas y para autoabastecimiento, se los utiliza generalmente en proyectos de electrificación rural o en zonas que no poseen una red eléctrica, aunque su precio es todavía algo inasequible para muchas personas.

En el Ecuador se podría aprovechar de gran manera este tipo de energía, especialmente la emitida por la radiación directa debido a que por su situación geográfica está en una posición favorecida con respecto a otros países porque tiene un alto índice de incidencia solar.

Un seguidor solar consiste en que su panel sigue al Sol desde su salida hasta su puesta (este seguimiento puede ser con uno o dos ejes, es decir en latitud como en azimut o elevación). De esta manera, aprovecha la radiación solar mucho mejor que los sistemas fijos.

Si se desea aumentar la eficiencia en la captación de energía solar, se debe aumentar la irradiación. De esta manera, la cantidad de radiación será mayor cuando el plano del panel este completamente perpendicular a la fuente de luz.

1.4. Formulación del problema

¿Qué método de control de ángulo de giro permite definir el ángulo correcto de inclinación de un panel solar?

El problema del que se ocupa este proyecto es el de controlar el ángulo de giro (en el caso del sistema de un eje un ángulo, o de dos ángulos en el caso del de dos ejes) para definir el ángulo correcto de inclinación de un panel solar de tal manera que se optimice la adquisición de energía solar, colocándolo a éste siempre de una manera perpendicular a la radiación solar.

1.5. Sustentación del problema

¿Cómo se puede seguir la trayectoria del sol?

Para conseguir la perpendicularidad del seguidor a la radiación solar se dispondrá de sensores de luz que colocados de una manera adecuada dos de ellos recibirán luz y dos estarán bajo sombra si el panel no se encuentra perpendicular a la radiación solar, esta diferencia de luminosidad será captada o adquirida por el sistema difuso que hará que un servo motor se accione y actúe sobre la inclinación del panel haciéndolo girar hasta que la intensidad luminosa sea igual en todos los sensores, en este momento el panel estará perpendicular a la incidencia de la radiación solar.

¿Cuál es la relevancia y justificación del problema?

“La estrategia de acumulación de riqueza mediante actividades productivas sustentables requiere que la transformación de la matriz productiva se enmarque en un contexto de respeto a los derechos de la naturaleza y de justicia intergeneracional. Si bien la acumulación de la riqueza, en primera instancia, va a depender de procesos extractivos, la estrategia busca que el impulso de nuevas industrias no contaminantes y la diversificación de las exportaciones basadas en

bioproductos y servicios ecológicos, disminuyan significativamente la presión sobre el medio ambiente a largo plazo” (SEMPLADES, 2013).

El Plan del Buen Vivir 2013 - 2017 indica “En el marco de la estrategia de acumulación, distribución y redistribución, el desarrollo de las fuerzas productivas se centra en la formación de talento humano y en la generación de conocimiento, innovación, nuevas tecnologías, buenas prácticas y nuevas herramientas de producción, con énfasis en el bioconocimiento y en su aplicación a la producción de bienes y servicios ecológicamente sustentables. Estos procesos se orientan en función de la satisfacción de las necesidades del país y, por ello, conllevan el fomento de los sectores productivos priorizados para la transformación de la matriz productiva a mediano y largo plazo” (SEMPLADES, 2013).

En cuanto a energía la SEMPLADES indica “La energía es el flujo sanguíneo del sistema productivo, de ahí la relevancia de incrementar la representatividad de la energía obtenida de fuentes renovables, de fortalecer el stock energético nacional no renovable y de establecer una gestión adecuada de la demanda de energía, a fin de lograr la sostenibilidad en el tiempo y minimizar el riesgo en el abastecimiento energético para la productividad sistémica” (SEMPLADES, 2013).

¿Qué se pretende?

Se pretende con el presente proyecto desarrollar y construir de un sistema automático de seguimiento solar que aproveche de mejor manera la intensidad luminosa y calorífica del Sol como fuente de energía limpia y renovable.

El proyecto dejará planteado los siguientes parámetros:

- La energía solar como fuente aprovechable
- Cuáles son los sistemas automáticos y servomecanismos que permiten realizar un seguimiento automático.
- Diseño de un servomecanismo de seguimiento de la máxima intensidad de luminosidad solar.
- Construcción del sistema de seguimiento solar, montaje y pruebas.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general:

Diseñar un sistema de seguimiento solar de dos ejes con control difuso que aproveche de mejor manera la radiación solar.

1.6.2. Objetivos específicos.

Construir un panel solar de dos ejes

Elaborar el algoritmo difuso de control

Realizar la medición de la energía captada

1.7. Hipótesis.

Un sistema de seguimiento solar de dos ejes con lógica difusa permite captar mayor cantidad de radiación solar durante el día.

1.8. Variables

1.8.1. Independiente

Sistema de seguimiento solar.

1.8.2. Dependiente

Cantidad de radiación solar captada durante el día.

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Energías renovables

Son denominadas así a todas las energía que son obtenidas de fuentes naturales que prácticamente son interminables, esto se debe a la considerable cantidad de energía que poseen, o porque son capaces de renovarse por medios naturales, también se puede hablar de energía alternativa que es un concepto similar al de energía renovable, pero no equivalente, una fuente de energía alternativa, es aquella que puede reemplazar a las energías o fuentes energéticas actuales, ya sea por su menor efecto contaminante, o primordialmente por su posibilidad de renovación.

En la actualidad la discusión del uso de energía alternativa no es una simple clasificación de las fuentes de energía, sino que representa un cambio que necesariamente tendrá que producirse durante el presente siglo.

Hacia los años de 1970 apareció el concepto de renovación de energías y que es necesario ir hacia las energías renovables, es cuando se empezó a tenerse en cuenta la posibilidad de que las energías tradicionales, energías de procedencia fósil, se agotasen en un plazo relativamente corto (idea especialmente extendida a partir de la publicación, en 1972, del informe al Club de Roma, Los límites del crecimiento), que indicaba que: “Si el actual incremento de la población mundial, la industrialización, la contaminación, la producción de alimentos y la explotación de los recursos naturales se mantiene sin variación, alcanzará los límites absolutos de crecimiento en la Tierra durante los próximos cien años”, en una nueva publicación 30 años más tarde y en base a datos y estudios más fiables, sobre todo en el comportamiento del clima y la biosfera, este criterio se ha actualizado, se ha indicado que ya estaríamos en los límites físicos (MEADOWS & RANDERS, 2012), por lo que es necesario e inevitable encontrar alternativas más duraderas. Actualmente ya no se puede decir que sean una posibilidad alternativa: son una realidad y el uso de estas energías, por entonces casi soñadas, se extiende por todo el mundo y forman parte de los medios de generación de energía normales.

Aun siendo renovables las energías alternativas, son limitadas y, como cualquier otro recurso natural tienen un potencial máximo de explotación, lo que no quiere indicar que se puedan

terminar. Por tanto, incluso aunque se pueda realizar una transición a estas nuevas energías de forma suave y gradual, tampoco van a permitir continuar con el modelo económico actual basado en el crecimiento perpetuo. Por ello ha surgido el concepto de “Desarrollo Sostenible” (MEADOWS & RANDERS, 2012). Dicho modelo se basa en los siguientes indicadores:

- El uso de fuentes de energía renovable, ya que las fuentes fósiles actualmente explotadas terminarán agotándose, según los pronósticos actuales, en el transcurso de este siglo.
- El uso de fuentes limpias, abandonando los procesos de combustión convencionales y la fisión nuclear.
- La explotación extensiva de las fuentes de energía, proponiéndose como alternativa el fomento del autoconsumo, que evite en la medida de lo posible la construcción de grandes infraestructuras de generación y distribución de energía eléctrica.
- La disminución de la demanda energética, mediante la mejora del rendimiento de los dispositivos eléctricos.
- Reducir o eliminar el consumo energético innecesario. No se trata solo de consumir más eficientemente, sino de consumir menos, es decir, desarrollar una conciencia y una cultura del ahorro energético y condena del despilfarro.

El ser humano en la actualidad tiene la obligación de producir y usar energías limpias, alternativas y renovables.

Estas energías se las puede clasificar en:

- La llegada de masas de agua dulce a masas de agua salada: energía azul.
- El viento: energía eólica.
- El calor de la Tierra: energía geotérmica.
- Los ríos y corrientes de agua dulce: energía hidráulica o hidroeléctrica.
- Los mares y océanos: energía mareomotriz.
- El Sol: energía solar.
- Las olas: energía undimotriz.

Desde tiempos remotos las energías renovables han constituido una parte importante de la energía utilizada por los humanos, especialmente la solar, la eólica y la hidráulica.

Con el invento de la máquina de vapor por James Watt, se fueron abandonando estas formas de aprovechamiento, por considerarse inestables en el tiempo y caprichosas y se inició una utilización cada vez mayor de los motores térmicos y eléctricos.

Hacia la década de años 1970, como se mencionó anteriormente, se comienza a presentar la necesidad del uso de energías alternativas que a diferencia de los combustibles fósiles que precisan miles de años para su formación, las energías renovables tienen una disponibilidad presente y futura garantizada como por su menor impacto ambiental en el caso de las energías limpias, y por esta razón fueron llamadas energías alternativas. Actualmente muchas de estas energías son una realidad, no una alternativa, por lo que el nombre de alternativas ya no debería emplearse.

En la actualidad una de estas energías más utilizadas es la energía potencial acumulada en los saltos de agua que puede ser transformada en energía eléctrica. Las centrales hidroeléctricas aprovechan la energía de los ríos o saltos de agua para poner en funcionamiento unas turbinas que mueven un generador eléctrico.

El problema del uso de esta energía es la necesidad de construir las necesarias infraestructuras que permitan aprovechar el potencial disponible con un coste nulo de combustible y otro de los principales problemas de este tipo de energía es que depende de las condiciones climatológicas.

2.2. Energía solar

La energía solar es el origen de la mayoría de las demás formas de energía en la Tierra. Cada año la radiación solar contribuye a la Tierra la energía equivalente a varios miles de veces la cantidad de energía que consume la humanidad.

Realizando una adecuada captación de la radiación solar, ésta puede transformarse en otras formas de energía como energía térmica o energía eléctrica utilizando para ello algunos métodos principalmente los paneles solares.

Utilizando paneles fotovoltaicos la energía lumínica puede transformarse en energía eléctrica y mediante paneles o colectores solares, la energía solar puede transformarse en energía térmica,

En la radiación solar se diferencian dos componentes: la radiación directa y la radiación difusa. La radiación directa es aquella que llega directamente del foco solar, sin reflexiones o refracciones intermedias. En cambio, la difusa es la emitida por la bóveda celeste en el día o jornada diurna debida a los fenómenos de reflexión y refracción solar en la atmósfera, nubes, elementos atmosféricos y reflexión sobre las imperfecciones terrestres. La radiación directa puede reflejarse y concentrarse para su utilización, mientras que no es posible concentrar la luz difusa que proviene de muchas direcciones. Pese a ello la radiación directa como la radiación difusa son aprovechables.

Se puede diferenciar entre receptores activos y pasivos en que los primeros utilizan mecanismos para orientar el sistema receptor hacia el Sol llamados seguidores y captar mejor la radiación directa.

Mediante la unificación arquitectónica en edificios la energía solar permite la generación de energía en el mismo lugar de consumo. Así, se puede dar lugar a sistemas de generación distribuida en los que se elimina casi por completo las pérdidas relacionadas con el transporte que suponen aproximadamente un 40 % del total de la dependencia energética.

Las diferentes tecnologías fotovoltaicas se adaptan para sacar el máximo rendimiento posible de la energía que recibimos del sol. De esta forma por ejemplo los sistemas de concentración solar fotovoltaica (CPV por sus siglas en inglés) utiliza la radiación directa con receptores activos para maximizar la producción de energía y conseguir así un coste menor por kWh producido. Esta tecnología resulta muy eficiente para lugares de alta radiación solar, pero actualmente no puede competir en precio en localizaciones de baja radiación solar.

La radiación solar total sobre una superficie inclinada a partir de la radiación horizontal que considera períodos relativamente cortos (BÉRRIZ PÉREZ & ÁLVAREZ GONZÁLEZ, 2007), por ejemplo, de una hora, está representada por la ecuación 1.

$$I_{\beta} = I_{HD}R_D + I_{Hd} \frac{1+\cos\beta}{2} + I_{HD} + I_{Hd} \frac{1-\cos\beta}{2} \rho \quad \text{Ecuación 1-2}$$

donde:

- I_{β} Radiación total sobre una superficie inclinada.
- I_{HD} Componente directa de la radiación sobre el plano horizontal.
- I_{Hd} Componente difusa de la radiación solar sobre el plano horizontal.
- R_D Relación entre la componente directa de la radiación solar sobre una superficie inclinada y la radiación directa sobre una superficie horizontal.
- ρ Reflexividad del suelo.

Asimismo,

$\frac{1+\cos\beta}{2}$ mide la proporción de bóveda celeste vista por la superficie inclinada respecto a la que ve un plano horizontal.

$\frac{1-\cos\beta}{2}$ mide la proporción de suelo que ve la superficie inclinada.

Asimismo, la eficiencia de un panel solar está representada por la ecuación 2.

$$\eta = \frac{P_m}{E \times A_c} \quad \text{Ecuación 2-2}$$

2.2.1. Energía solar térmica.

La energía solar térmica trata de recoger la energía del sol a través de paneles solares y convertirla en calor el cual puede destinarse a satisfacer numerosas necesidades como, por ejemplo:

- Se puede obtener agua caliente para consumo doméstico o industrial,
- Dar calefacción a hogares, hoteles, colegios o fábricas,
- También se podrá conseguir refrigeración durante las épocas cálidas,
- En agricultura se pueden conseguir otro tipo de aplicaciones como invernaderos solares,
- Secaderos agrícolas que consumen mucha menos energía si se combinan con un sistema solar, y plantas de purificación o desalinización de agua.

Con este tipo de energía se podría reducir más del 25 % del consumo de energía convencional en viviendas de nueva construcción con la consiguiente reducción de quema de combustibles fósiles y deterioro ambiental. La obtención de agua caliente supone en torno al 28 % del consumo de energía en las viviendas.

2.2.2. Energía solar fotovoltaica

Esta energía es producida por los paneles o módulos fotovoltaicos llamados comúnmente paneles solares que están formados por un conjunto de células fotovoltaicas que producen electricidad a partir de la luz que incide sobre ellos mediante el efecto fotoeléctrico.

En función del tipo de célula que los forman, los paneles fotovoltaicos se dividen en:

- Cristalinas
- Monocristalinas: se componen de secciones de un único cristal de silicio (Si)
- Policristalinas: cuando están formadas por pequeñas partículas cristalizadas.
- Amorfas: cuando el silicio no se ha cristalizado.

Cuanto mayor son los cristales su efectividad es mayor, pero también su peso, grosor y costo. El rendimiento de las primeras puede alcanzar el 22 % mientras que el de las últimas puede no llegar al 10 %, sin embargo, su costo y peso es muy inferior.

Desde que se fabricaron las primeras células solares comerciales el costo de los paneles fotovoltaicos se ha reducido de forma constante (SWANSON, 2009) (PDF) y su coste medio de generación eléctrica ya es competitivo con las fuentes de energía convencionales en un cada vez mayor número de regiones geográficas, alcanzando la paridad de red. (Energía Solar y Desarrollo Sostenible, 2012)

2.3. Mapa solar del Ecuador

El Ecuador tiene altos niveles de radiación solar, pero la participación de esta fuente para cubrir la demanda energética nacional es mínima, por lo que el país está perdiendo la oportunidad de convertir a la energía solar en la tercera fuente de energía, luego del petróleo y la hidroelectricidad. (INER, 2017)

El Ecuador al estar en la mitad del mundo tiene un enorme potencial de energía solar que puede ser aprovechado; su uso incluso ayudaría a alcanzar una independencia energética de largo plazo, por lo que es necesario que el país disponga de un mapa solar con la cuantificación de este recurso, antes de proponer un proyecto de investigación e inversión que beneficie al país. (INER, 2017).

El INER (Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables) realizó un proyecto para el desarrollo del mapa solar del Ecuador preliminar, el mismo contó con la instalación de 17 estaciones meteorológicas en el cantón Cuenca y 10 estaciones meteorológicas en la provincia de Chimborazo, además de la colocación de sensores para repotenciar estaciones meteorológicas existentes en la provincia de Chimborazo. Con los datos obtenidos se han aplicado métodos de estimación de radiación solar para completar series de datos históricos. (INER, 2017)

En el estudio realizado se obtuvo el siguiente mapa solar para la provincia de Chimborazo.

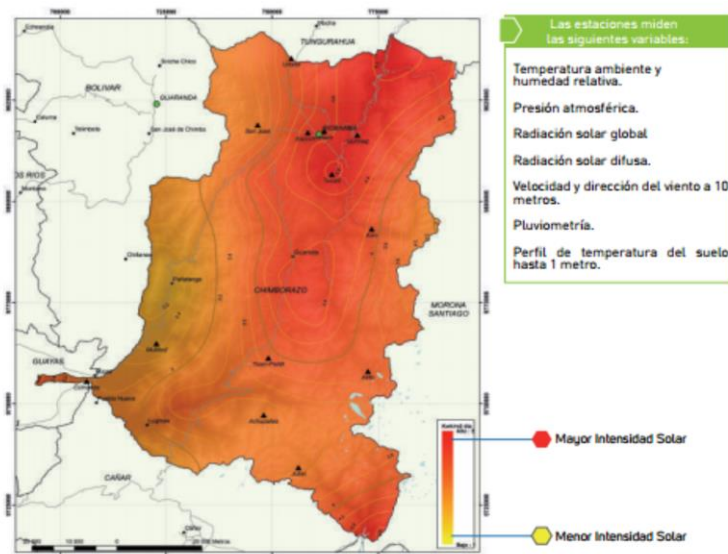


Figura 1-2. Mapa solar de la provincia de Chimborazo

Fuente: (CIE 2013)

Con fines de generación eléctrica, el CIE, (Corporación para la Investigación Energética), dentro de su labor de investigación en el campo de las energías renovables y eficiencia energética para usos productivos y protección ambiental, ha elaborado el “Atlas de Radiación Solar del Ecuador,”,

para el Consejo Nacional de Electricidad, CONELEC, el mismo se presenta en la siguiente figura. (CIE, 2013)

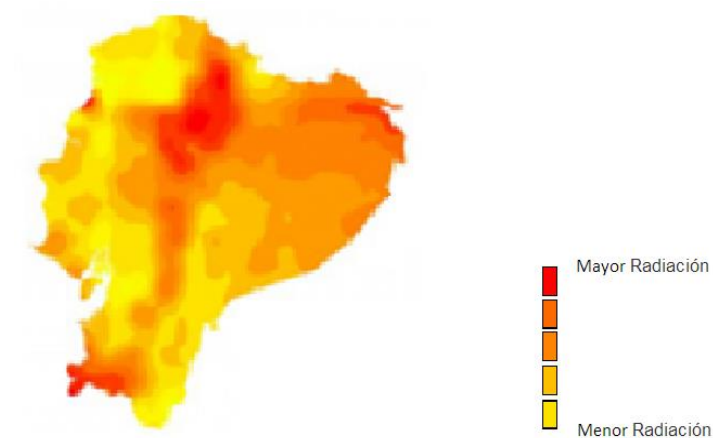


Figura 2-2. Mapa solar del Ecuador CIE
Fuente: (CIE 2013)

De las figuras anteriores se puede concluir que el Ecuador tiene un gran potencial de irradiación solar especialmente en las provincias de Imbabura, Pichincha y Chimborazo y parte de la provincia del Oro seguido de la zona oriental.

2.4. Seguidores solares

Con el objetivo de mantener perpendicular o aproximadamente perpendicular a los rayos solares, un seguidor solar es capaz de orientar los paneles solares, siguiendo al sol desde el este en la alborada o inicio del día hasta el oeste en la puesta del sol. Los seguidores solares son usados en todas las tecnologías de seguimiento solar: energía solar fotovoltaica convencional, energía solar fotovoltaica de concentración y energía termosolar de concentración.

Existen los siguientes tipos:

- **En dos ejes:** la superficie se mantiene siempre perpendicular al sol. Existen de dos tipos:
 - *Monoposte:* un único apoyo central.
 - *Carrusel:* varios apoyos distribuidos a lo largo de una superficie circular.

- **En un eje polar:** la superficie gira sobre un eje orientado al sur o al norte, según el hemisferio, e inclinado un ángulo igual a la latitud. El giro se ajusta para que la normal a la superficie coincida en todo momento con el meridiano terrestre que contiene al Sol. La velocidad de giro es de 15° por hora, como la del reloj.
- **En un eje azimutal:** la superficie gira sobre un eje vertical, el ángulo de la superficie es constante e igual a la latitud. El giro se ajusta para que la normal a la superficie coincida en todo momento con el meridiano local que contiene al Sol. La velocidad de giro es variable a lo largo del día.
- **En un eje horizontal:** la superficie gira en un eje horizontal y orientado en dirección norte-sur o sur norte, según el hemisferio donde nos encontremos. El giro se ajusta para que la normal a la superficie coincida en todo momento con el meridiano terrestre que contiene al Sol.

2.5. Lógica difusa

A diferencia de la lógica booleana que está representada por dos valores lógicos (0 o 1), verdadero o falso, la lógica difusa tiene grados de pertenencia entre cero y uno, por ejemplo, en la lógica booleana podemos decir que una persona que mide más de 170 cm es alta y si mide menos es pequeña, lo que representaríamos de la siguiente manera:

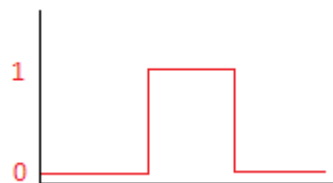


Figura 3-2. Señal lógica booleana
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Por otro lado, en la lógica difusa expresamos de la siguiente manera, si mide más de 170 cm es 100% alta valor lógico 1, y si mide menos de 160 cm es 0 % alta valor lógico 0, por lo tanto, si mide 164 cm sería 40% alto lo que en lenguaje cotidiano diríamos más o menos alto que es un término lingüístico difuso.

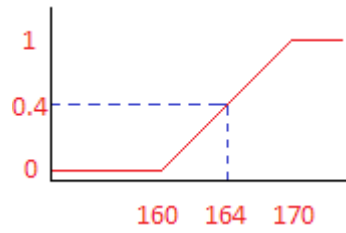


Figura 4-2. Señal lógica difusa
 Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

El gráfico siguiente muestra la pertenencia o no pertenencia al conjunto booleano del ejemplo anterior.

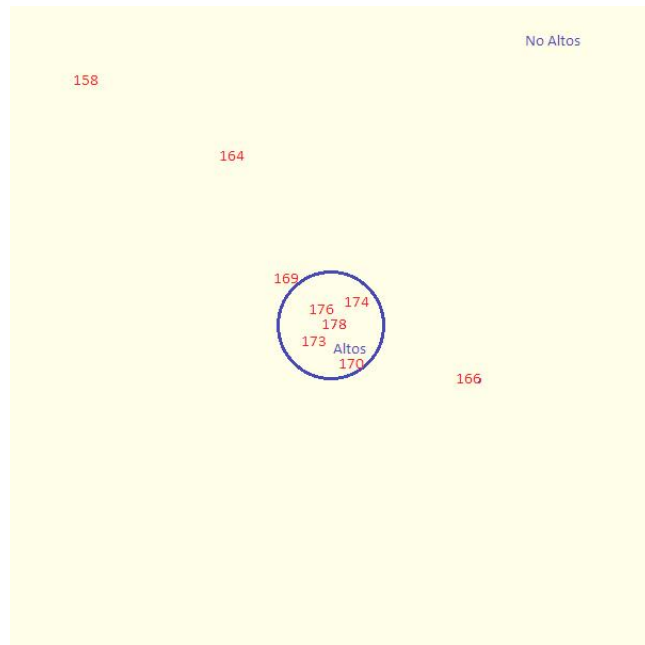


Figura 5-2. Conjunto booleano
 Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

En cambio, el conjunto difuso se representaría de la siguiente manera:

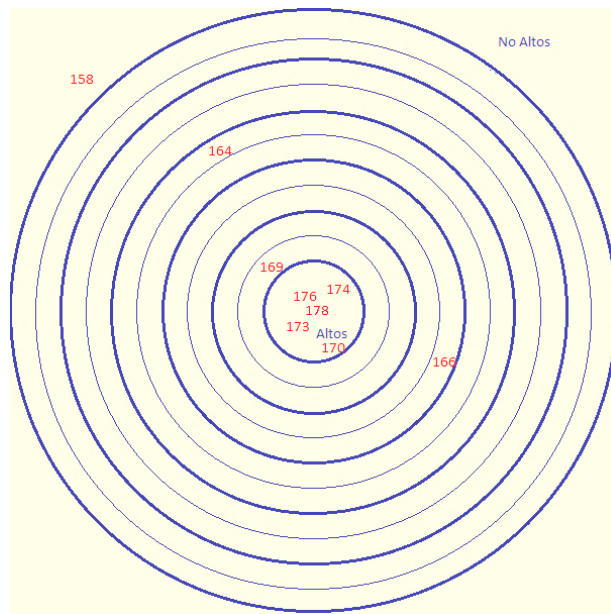


Figura 6-2. Conjunto difuso
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

2.5.1. Operaciones con conjuntos difusos

En forma similar a las operaciones con conjuntos booleanos también se puede intersectar, unificar y negar conjuntos difusos. L. A. Zadeh¹ sugirió el operador mínimo para la intersección y el operador máximo para la unión de dos conjuntos difusos, estos operadores coinciden con la unificación e intersección booleana si se consideran únicamente los grados miembros 0 y 1.

Por ejemplo: Sea A un intervalo difuso entre 7 y 11 y B un número difuso en torno a 6. Las figuras correspondientes se muestran a continuación:

¹ Lotfi Asker Zadeh, matemático, ingeniero eléctrico, informático y profesor azerbaiyano de la Universidad de Berkeley. En 1965 escribió la teoría de conjuntos difusos o lógica difusa

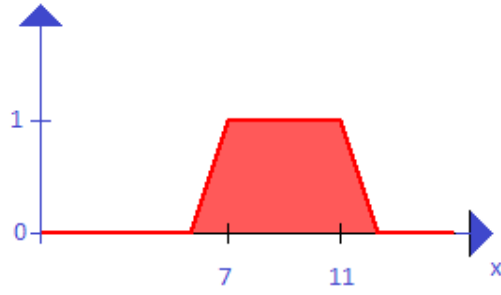


Figura 7-2. Conjunto difuso A
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

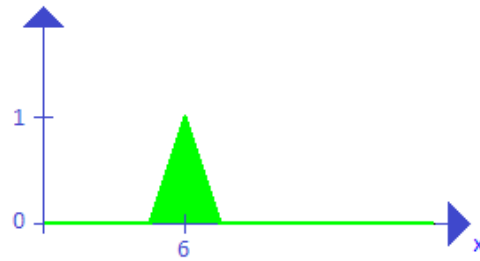


Figura 8-2. Número difuso B
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

A continuación, se muestra la figura de la operación AND (Y) del conjunto difuso A y el número difuso B (el resultado es el conjunto de color azul).

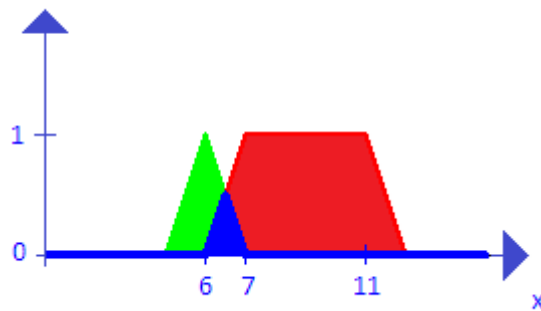


Figura 9-2. Conjunto difuso operación AND o intersección
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

La operación OR (O) del conjunto difuso A con el número difuso B se muestra con línea azul en la próxima figura.

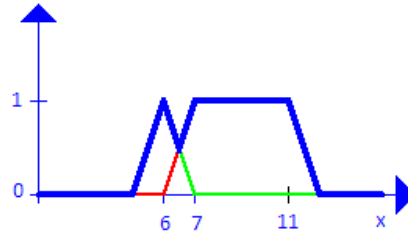


Figura 10-2. Conjunto difuso operación OR o unión
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

La negación del conjunto difuso A, así como la negación del número difuso B, se representan en las siguientes figuras (Color azul).

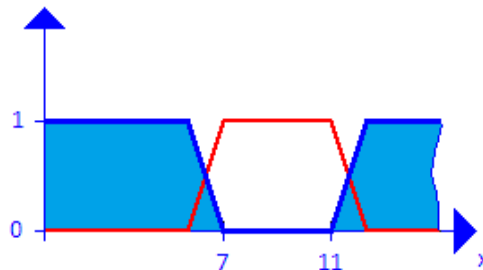


Figura 11-2. Negación del conjunto difuso A
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

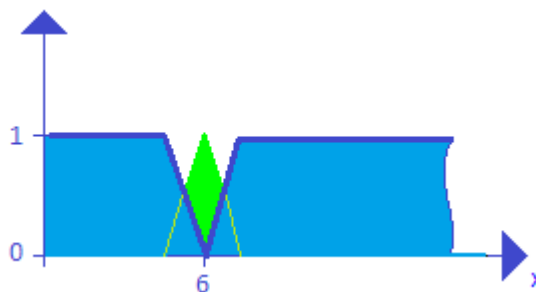


Figura 12-2. Conjunto negación del número difuso B
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

2.5.2.El control difuso

La aplicación más común, por no decir la más importante, de la teoría de la lógica difusa son los controles difusos. Su manera de trabajar es diferente a los controladores convencionales; en este tipo de control difuso es de suma importancia el criterio de uno o varios expertos en el sistema que se desea controlar, éstos deben informar cual es la forma como se comportan las variables a controlar y cuál debería ser la respuesta deseada a estas variaciones, estos expertos no solo deben saber que deben girar una perilla de control cuando aumenta el valor de temperatura, por ejemplo, sino que deben saber cuánto deben girarla para bajar la temperatura a un valor deseado; este criterio para describir un sistema, reemplaza en este caso a las ecuaciones diferenciales que se utilizan en los diseños de los controladores convencionales. El criterio expresado por los expertos se enuncia empleando variables lingüísticas que se representan en forma de conjuntos difusos.

En el ejemplo si tenemos que la temperatura es una variable de entrada junto con la velocidad con la que lo hace, el experto puede formar los siguientes términos difusos para obtener un conjunto de salidas adecuadas que regulen el giro de la perilla de control de la temperatura conocidas como reglas de fuzzificación, estas se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 1-2 Ejemplo de reglas de fuzzificación

dT/dt T	Varía rápido de forma negativa	Varía lentamente de forma negativa	No varía	Varía lentamente de forma positiva	Varía rápido de forma positiva
La temperatura es baja	Girar bastante a la derecha	Girar mucho a la derecha	Girar poco a la derecha	Mantener	Girar poco a la izquierda
La temperatura es correcta	Girar mucho a la derecha	Girar poco a la derecha	Mantener	Girar poco a la izquierda	Girar mucho a la izquierda
La temperatura es alta	Girar poco a la derecha	Mantener	Girar poco a la izquierda	Girar mucho a la izquierda	Girar bastante a la izquierda

Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Estas reglas de fuzzificación se pueden expresar de forma de un silogismo lógico de la siguiente manera:

Si P y Q entonces R

Por ejemplo:

Si la temperatura es baja y varía lentamente de forma negativa entonces girar poco la perilla a la derecha.

Las variables de entrada y salida se representan en forma gráfica para obtener el valor de membresía (μ), estos pueden ser representados en forma triangular, trapezoidal, sigleton, sigmoide (en forma de S), gaussiana o de una forma definida por la experiencia de un experto.

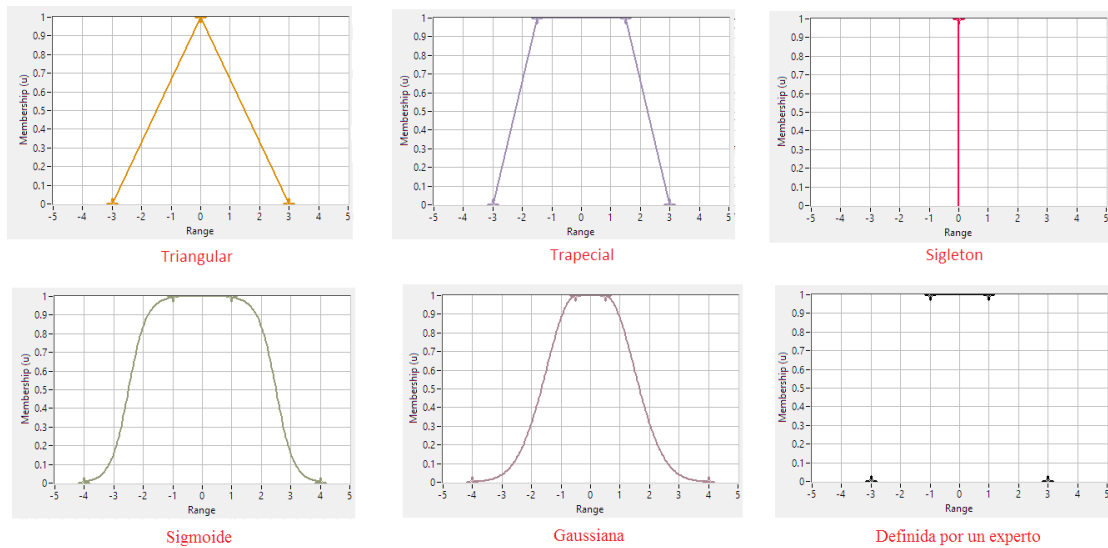


Figura 13-2. Formas de los conjuntos difusos

Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Para obtener el valor de control o señal de salida es necesario defuzzificar las reglas difusas que son afectadas por una o varias señales de entrada, esta defuzzificación da como resultado un conjunto difuso de la señal de salida.

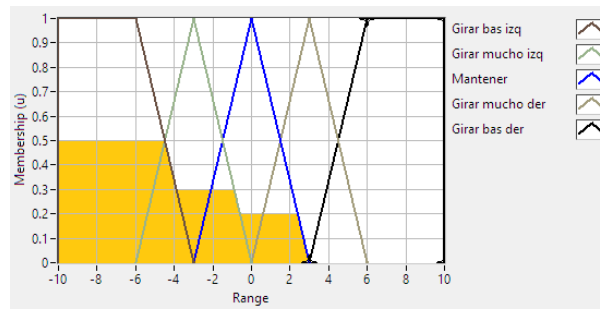


Figura 14-2. Área del conjunto difuso de salida
 Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

La defuzzificación se calcula encontrando el centro geométrico de las áreas, no hace falta calcular las dos coordenadas de este centro sino tan sola la referente al rango, siendo este valor el valor de la variable de salida.

El centro de áreas se puede encontrar dividiendo el área en figuras conocidas como rectángulos y triángulos, (el centro de área de un rectángulo se encuentra en el cruce de sus diagonales y las de un triángulo rectángulo a 1/3 de sus catetos).

En el conjunto difuso de la figura anterior podemos dividirlo de la siguiente manera:

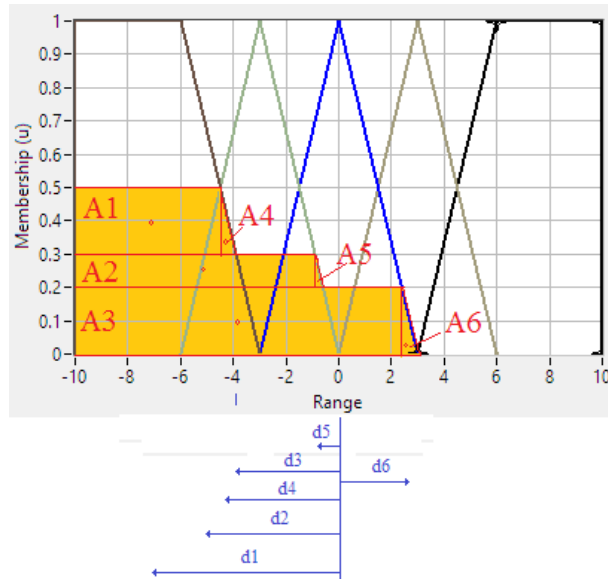


Figura 15-2. Conjunto difuso de salida dividido en figuras conocidas
 Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Para calcular el valor de la salida utilizamos la fórmula siguiente:

$$x = \frac{(A1 \times d1) + (A2 \times d2) + (A3 \times d3) + (A4 \times d4) + (A5 \times d5)}{AT} \quad \text{Ecuación 3-2}$$

Donde:

X valor de salida

A1 área del rectángulo 1

A2 área del rectángulo 2

A3 área de rectángulo 3

A4 área del triángulo 4

A5 área del triángulo 5

A6 área del triángulo 6

AT área total (Sumatoria de todas las áreas)

d1 distancia al centro de área del rectángulo 1

d2 distancia al centro de área del rectángulo 2

d3 distancia al centro de área del rectángulo 3

d4 distancia al centro de área del triángulo 4

d5 distancia al centro de área del triángulo 5

d6 distancia al centro de área del triángulo 6

Ejemplo:

Tenemos las variables “A” y “B” cada cual con su conjunto difuso (Bajo, Normal y Alto), las combinaciones de estas variables producen la salida expresadas con las siguientes reglas:

Tabla 2-2 Reglas difusas

	B	Bajo	Normal	Alto
A				
Bajo		Baja	Baja	Normal
Normal		Baja	Normal	Alta
Alto		Normal	Alta	Alta

Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

1. Si “Variable A” es “Bajo” y “Variable B” es “Bajo” entonces “Salida” es “Baja”
2. Si “Variable A” es “Normal” y “Variable B” es “Bajo” entonces “Salida” es “Baja”
3. Si “Variable A” es “Alto” y “Variable B” es “Bajo” entonces “Salida” es “Normal”
4. Si “Variable A” es “Bajo” y “Variable B” es “Normal” entonces “Salida” es “Baja”
5. Si “Variable A” es “Normal” y “Variable B” es “Normal” entonces “Salida” es “Normal”
6. Si “Variable A” es “Alto” y “Variable B” es “Normal” entonces “Salida” es “Alta”
7. Si “Variable A” es “Bajo” y “Variable B” es “Alto” entonces “Salida” es “Normal”
8. Si “Variable A” es “Normal” y “Variable B” es “Alto” entonces “Salida” es “Alta”
9. Si “Variable A” es “Alto” y “Variable B” es “Alto” entonces “Salida” es “Alta”

Las variables independientes o entradas “A” y “B” y la variable dependiente o de salida tienen los siguientes gráficos de sus conjuntos difusos, en los que se representan sus rangos de variación o regulación y su correspondiente función de membresía.

Variable A

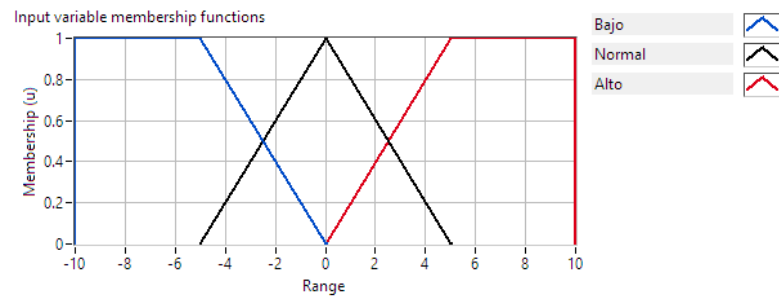


Figura 16-2. Conjunto difuso variable A
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Variable B

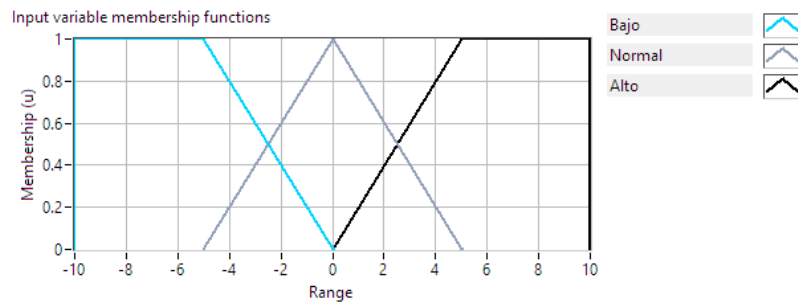


Figura 17-2. Conjunto difuso variable B
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Variable de salida

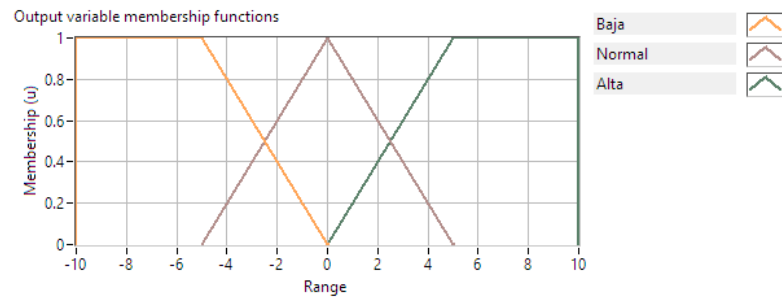


Figura 18-2. Conjunto difuso variable de salida
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Si a las variables “A” damos un valor de -8 y a “B” un valor de -6.2 como se muestran en el siguiente gráfico:

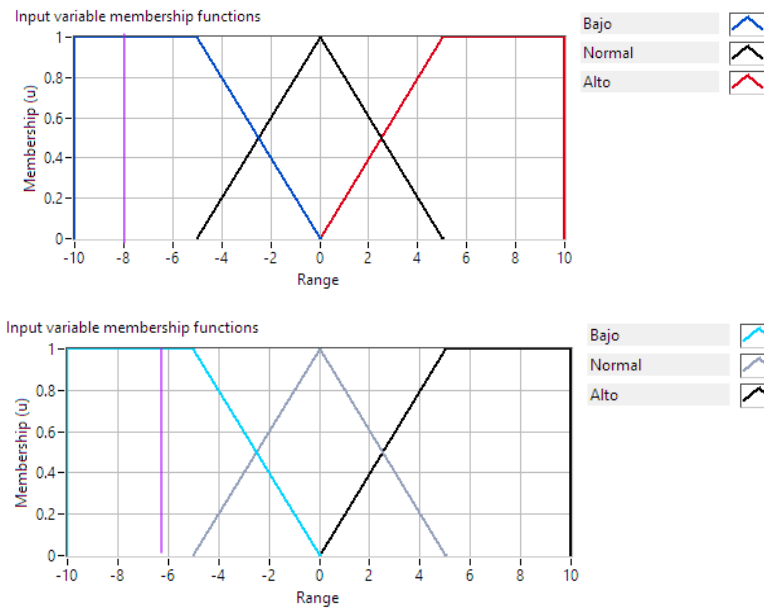


Figura 19-2. Valores de entrada variables A y B
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Obtenemos que se cumple la siguiente regla:

Si “Variable A” es “Bajo” y “Variable B” es “Bajo” entonces “Salida” es “Baja”

Tabla 2-3 Ejemplo de aplicación de la salida difusa

B \ A	Bajo	Normal	Alto
Bajo	Baja	Baja	Normal
Normal	Baja	Normal	Alta
Alto	Normal	Alta	Alta

Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Como el valor de membresía de “A” es 1 y de “B” es 1 la salida correspondería al siguiente conjunto difuso:

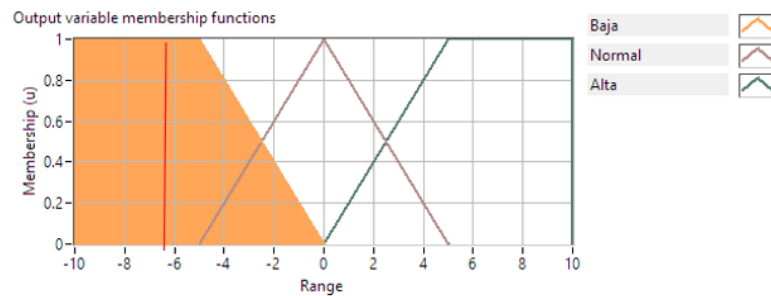


Figura 20-2. Conjunto difuso de salida para A bajo=1 y B bajo =1
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Calculando el centro del área indicada tenemos que:

$$\text{Salida} = \text{Centro de Área} = - 6.55$$

Si los valores de las variables de entrada cambian a -4 y 2 respectivamente tenemos los siguientes valores de membresía:

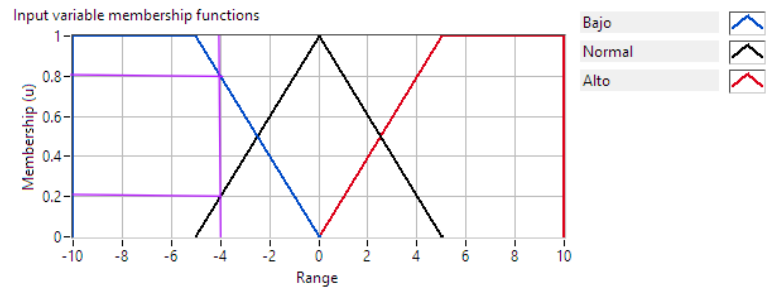


Figura 21-2. Membresía para un valor de entrada A = -4
 Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

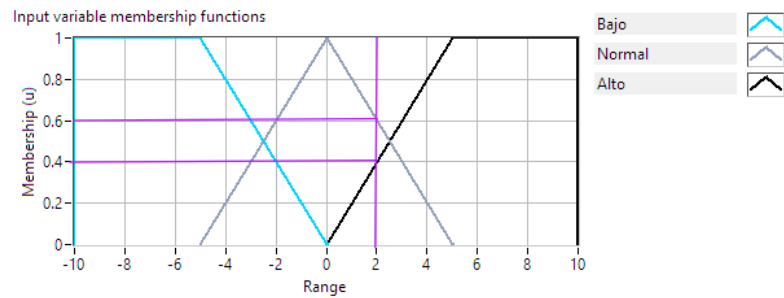


Figura 22-2. Membresía para un valor de entrada B = 2
 Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Estas entradas producen que se activen las siguientes reglas:

Tabla 2.4 Conjunto de salidas activadas

B \ A	Bajo	Normal	Alto
A			
Bajo	Baja	Baja	Normal
Normal	Baja	Normal	Alta
Alto	Normal	Alta	Alta

Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Las membresías correspondientes para la salida de estas reglas son:

Si “Variable A” es “Bajo” y “Variable B” es “Normal” entonces “Salida” es “Baja”

$A = 0.8$ y $B = 0.6$ entonces la salida = 0.6 (mínimo entre 0.8 y 0.6)

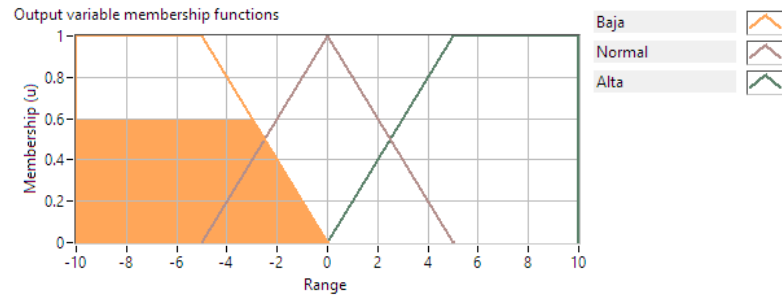


Figura 23-2. Conjunto difuso de salida Bajo = 0.6
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Si “Variable A” es “Normal” y “Variable B” es “Normal” entonces “Salida” es “Normal”

$A = 0.2$ y $B = 0.6$ entonces la salida = 0.2 (mínimo entre 0.2 y 0.6)

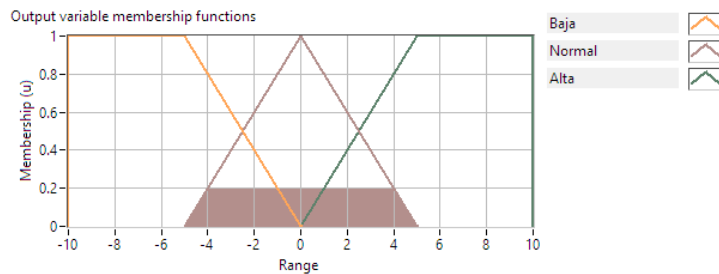


Figura 24-2. Conjunto difuso de salida Normal = 0.2
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Si “Variable A” es “Bajo” y “Variable B” es “Alto” entonces “Salida” es “Normal”

$A = 0.8$ y $B = 0.4$ entonces la salida = 0.4 (mínimo entre 0.8 y 0.4)

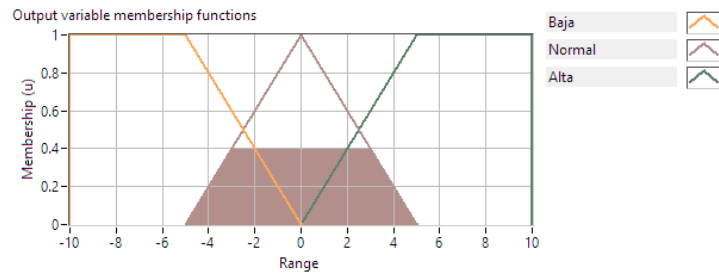


Figura 25-2. Conjunto difuso de salida Normal = 0.4
 Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Si “Variable A” es “Normal” y “Variable B” es “Alto” entonces “Salida” es “Alta”

$A = 0.2$ y $B = 0.4$ entonces la salida = 0.2 (mínimo entre 0.2 y 0.4)

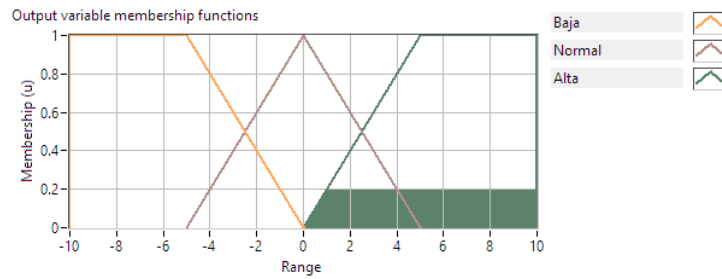


Figura 26-2. Conjunto difuso de salida Alta = 0.2
 Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Al unir estos conjuntos difusos tenemos el conjunto difuso de salida total y calculando su centro de áreas tenemos que la salida tiene un valor de -2.11 .

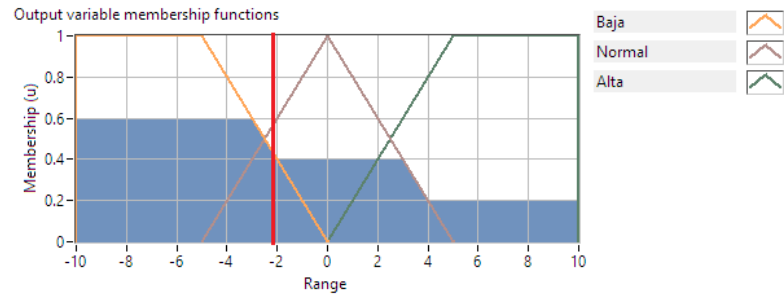


Figura 27-2. Conjunto difuso de salida y valor de salida = - 2.11
 Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Enfoque. - El enfoque de la investigación es cuantitativo y cualitativo, cuantitativo ya que es necesario realizar mediciones de la captación de radiación solar, procesarla y analizarla estadísticamente para así demostrar la hipótesis, cualitativo porque se busca la comprensión de los fenómenos, procesos y elementos en referencia a las variables de estudio como menciona (HERNAÁNDEZ, BAPTISTA, & FERNÁNDEZ, 2014), la investigación busca el acercamiento a la realidad subjetiva desde la aproximación cualitativa. Se presenta el estudio detallado del caso atípico, debido al contexto de la variable independiente, el cual indefectiblemente interviene en los resultados que se prevén conseguir con el desarrollo del objeto de estudio. En función de los elementos que se someten a análisis, interpretación y posterior propuesta de estructura de un seguidor solar, las conclusiones son particulares y pueden servir de base a investigaciones posteriores encaminadas a encontrar una solución específica. Se pretende generar un nuevo conocimiento, sobre las ventajas, desventajas y oportunidades, así como de las limitaciones de la incorporación tecnológica del seguidor solar.

Modalidad de la investigación. – la investigación es bibliográfica y experimental ya que es necesario realizar la recolección de toda la información pertinente para sustentar adecuadamente el trabajo, realizar las comparaciones necesarias y desarrollar un prototipo para la realización las pruebas de funcionamiento y tomar las mediciones para la demostración de la hipótesis, por lo tanto la modalidad de estudio es de caso; como argumentan (CAMBELLI & STANLEY, 2005), se estudia a un grupo específico para someterlo a la acción de algún agente o tratamiento que se presuma capaz de provocar cambio.

Se pretende con el presente trabajo explorar, describir, explicar evaluar y generar una solución estructurada para la construcción de un seguidor solar, la casualidad de la investigación está encaminada a producir razonamiento inductivo a partir de pruebas y observación en relación con el comportamiento del prototipo con el fin de garantizar la validez de la solución.

La investigación se fundamenta y desarrolla como se mencionó a partir de la recolección y valoración de la información referente al tema, luego se plantea el desarrollo de un algoritmo de

control difuso para el seguimiento solar que permita captar la mayor radiación solar durante el día.

Una vez determinado el algoritmo que satisfaga los requerimientos se procederá al diseño del mecanismo de seguimiento solar y se ejecutará las pruebas necesarias.

Se demostrará la hipótesis planteada y se presentarán las conclusiones y recomendaciones necesarias.

La metodología del proyectual que se aplica a este estudio es el propuesto por Bruce Archer, pues presenta las condiciones propicias para la planificación y desarrollo de esta investigación.

Archer propone como definición del método de diseño: “seleccionar los materiales correctos y darles forma para satisfacer las necesidades de función y estética dentro de las limitaciones de los medios de producción disponibles”. El proceso de diseño, por lo tanto, debe contener fundamentalmente las etapas analíticas, creativa y de ejecución (RODRÍGUEZ MORALES, 2004).

Con la fase de desarrollo del prototipo, se toma el motivo de diseño, como base para la representación del concepto y bajo especificaciones y fundamentos técnicos se prepara estudios y experimentos para revalidar la factibilidad del diseño.

Operacionalización de las variables. – se trabaja con una variable independiente y otra dependiente.

Variable independiente.

Sistema de seguimiento solar.

Indicadores:

Tabla 1-3 Indicadores de la variable independiente

Tipos	Características	Forma de captar la energía	Beneficios
<ul style="list-style-type: none"> • Fijo • Móvil 	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de algoritmo. • Funcionamiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Directa • Indirecta 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo • Instalación • Mantenimiento

Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Variable dependiente:

Cantidad de radiación solar captada durante el día.

Indicadores:

Captación de la energía solar mediante la medición de la energía incidente sobre una celda solar fotovoltaica fija con una inclinación de 15 grados hacia el norte, y otra de iguales características colocada en el seguidor de dos ejes, las mediciones se realizarán durante tres días en la ciudad de Ambato.

Para realizar la medición de la energía producida por cada celda fotovoltaica se les colocará una carga resistiva de $1k\Omega$ y se medirá la caída de voltaje y la corriente que circula por cada resistencia, con los datos obtenidos escalados a un área de un metro cuadrado.

Con los datos obtenidos se realizará la demostración de la hipótesis con la prueba estadística más óptima.

CAPÍTULO IV

4. PROPUESTA

4.1. Tema

“Diseño de un Sistema de Control Difuso de Seguimiento Solar de Dos Ejes”

4.2. Datos informativos

Institución: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH)

Provincia: Chimborazo

Cantón: Riobamba

Dirección: Panamericana Sur km 1 ½

Teléfono: 593(03) 2998-200

Código Postal: EC060155

4.3. Antecedentes

La crisis energética crea la necesidad de substituir las fuentes de energía utilizadas actualmente, debido a que estas escasean cada vez más y al mismo tiempo tienen un alto índice de contaminación, por energías renovables más limpias es decir con efectos de escasa o nula contaminación.

Una de las energías que pueden solucionar este problema es la solar que es la que se obtiene a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del Sol.

En el Ecuador se puede aprovechar de gran manera la energía solar, especialmente la emitida por la radiación directa debido a que por su situación geográfica está en una posición favorecida con respecto a otros países ya que tiene un alto índice de incidencia solar.

El seguidor solar consiste en que su panel sigue al Sol desde su salida hasta su puesta, este seguimiento se realiza de mejor manera con un sistema de dos ejes, es decir en latitud como en

azimut o elevación. De esta manera se aprovecha la radiación solar mucho mejor que los sistemas fijos.

4.4. Objetivos

4.4.1. Objetivo general

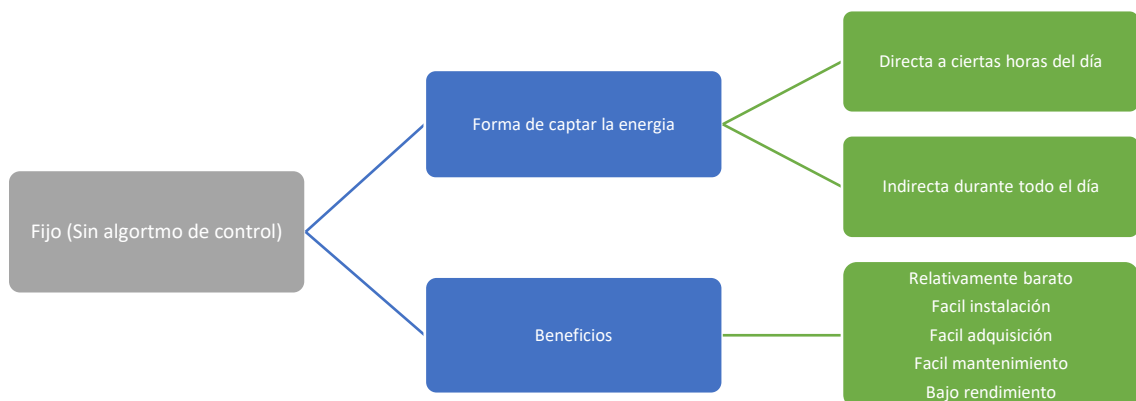
Diseñar un sistema de seguimiento solar de dos ejes con control difuso que aproveche de mejor manera la radiación solar.

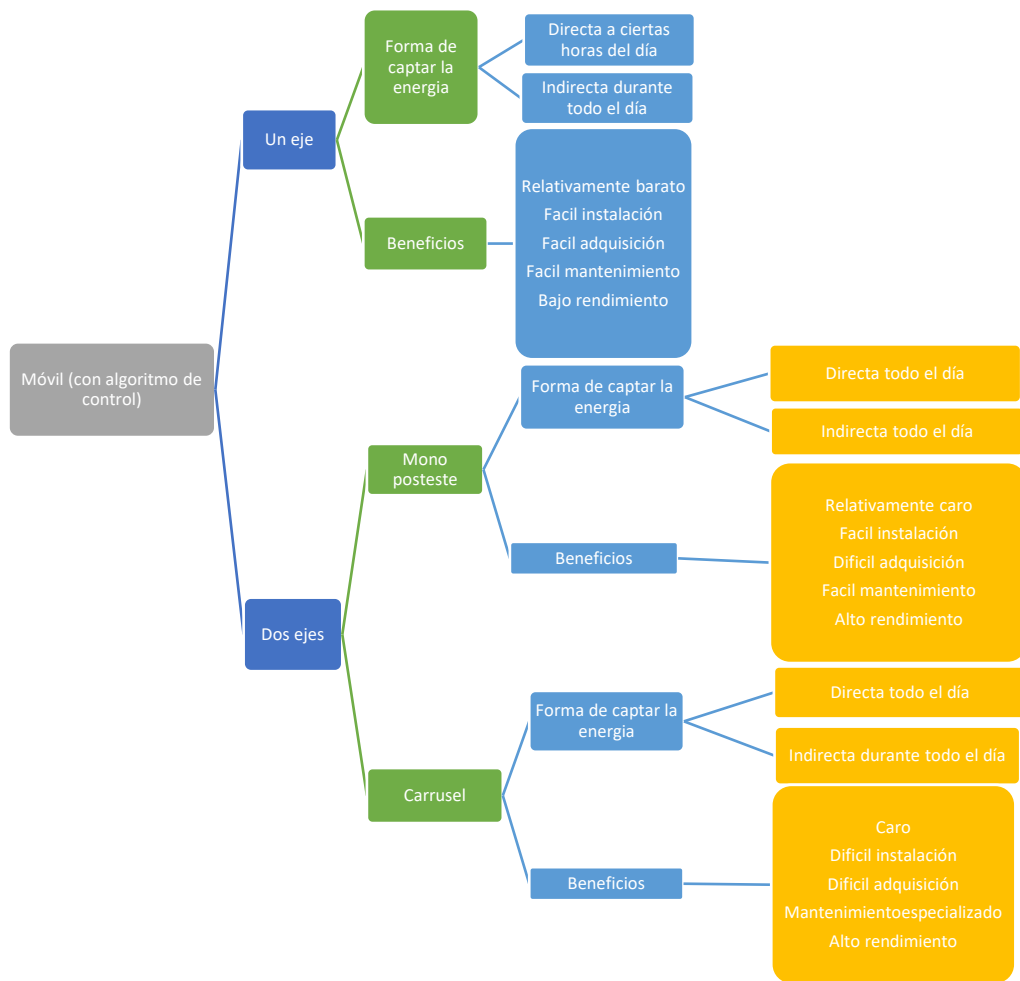
4.4.2. Objetivos específicos

- Construir un prototipo de seguidor solar de dos ejes
- Desarrollar el algoritmo difuso de control
- Realizar las mediciones necesarias para determinar la incidencia de la energía solar sobre un panel fijo y sobre un panel montado sobre un seguidor solar de dos ejes

4.5. Descripción de la propuesta

Para obtener un mejor aprovechamiento de la energía solar se realizará un seguidor solar de dos ejes del tipo *Monoposte* (Parante), es decir, con un único apoyo central en él un eje y un plato giratorio en el otro eje, decisión que se toma a partir de los diferentes sistemas de seguimiento solar, los mismos que presentan las siguientes características:





4.5.1.Principio de funcionamiento

El funcionamiento se basa en la captación de la luz emitida por una fuente luminosa, en este caso el sol, por cuatro fotorresistencias (LDR) montadas en un medio puente en una tarjeta de adquisición de datos, las fotorresistencias estarán separadas por dos paredes perpendiculares entre sí y éstas a su vez con respecto al plato.

Si el plato giratorio no se encuentra en una forma perpendicular a los rayos de luz emitidos por la fuente luminosa las paredes crearán sombra sobre ciertas fotorresistencias mientras que otras permaneces iluminadas dando una diferencia de caída de voltaje entre las fotorresistencias, la diferencia es considerada como un error que debe ser corregido por el algoritmo de control difuso hasta que todas las fotorresistencias estén iluminadas de igual manera, momento en el que se

tendrá un error igual a cero y el plato giratorio se encontrará dirigido de manera perpendicular a los rayos de luz.

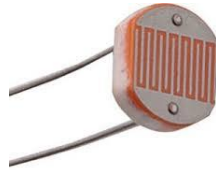


Figura 1-4. Fotorresistencia (LDR)
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

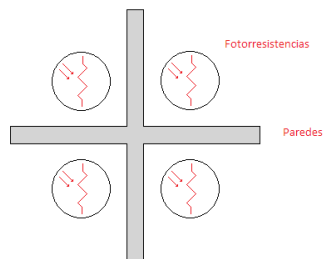


Figura 2-4. Ubicación de las fotorresistencias
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

El error (diferencia de iluminación de las fotorresistencias) se corregirá de la siguiente manera:

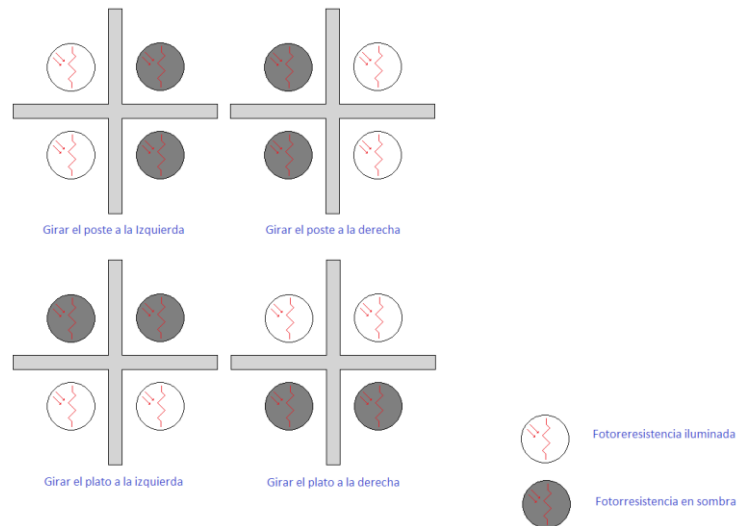


Figura 3-4. Acción que tomar para la corrección del error
 Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Las diferencias de iluminación de las fotorresistencias provocan una variación en su resistencia y si estas están conectadas en un divisor de tensión (medio puente) obtenemos diferentes caídas de voltaje.

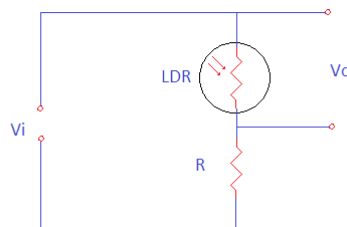


Figura 4-4. Caída de tensión en la fotorresistencia (Divisor de tensión o medio puente)
 Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Esta caída de voltaje será medida por una tarjeta de adquisición de datos de la manera indicada en la siguiente figura:

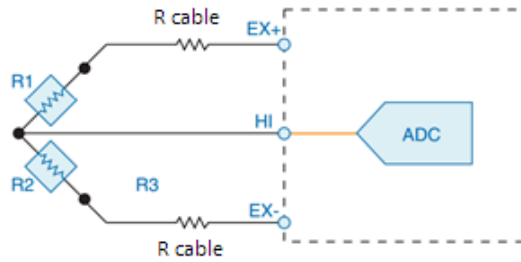


Figura 5-4. Lectura de caída de voltaje por la DAQ
 Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Ex (Entrada de voltaje V_i)

HI (Lectura de la caída de voltaje V_o)

El giro tanto del parante como del plato giratorio se conseguirá a través de dos servomotores de pasos.



Figura 6-4. Servomotor de pasos
 Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

4.5.2. Acondicionamiento de la señal de entrada

La señal de entrada para el sistema de control está constituida por el error obtenido al restar las caídas de voltaje en las fotorresistencias, este voltaje no siempre es igual en las cuatro fotorresistencias por lo que es necesario acondicionar esta señal, para lo cual seguimos el siguiente proceso:

- Se coloca las cuatro fotorresistencias sin ninguna iluminación y anotamos la caída de voltaje que éstas producen en el divisor de tensión, este valor le asignamos un valor de salida igual a cero.
- Se iluminan las cuatro fotorresistencias con una fuente de luz (lo más intensa posible), medimos la caída de voltaje que éstas provocan y le asignamos un valor de salida igual a 10
- Se obtiene el siguiente gráfico de linealización y de escala 0 a 10 en cada una de las cuatro fotorresistencias.

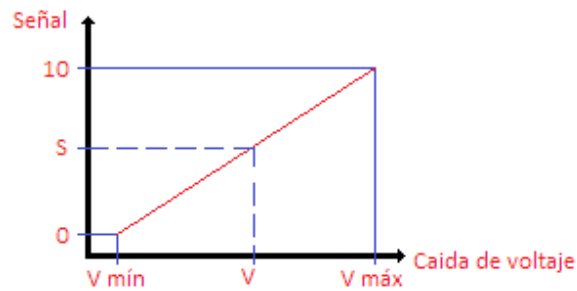


Figura 7-4. Acondicionamiento de la señal de entrada
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

$$S = \frac{10}{(V_{\text{máx}} - V_{\text{mín}})} \times V$$

Ecuación 1-4

- Con esto se tiene que las cuatro fotorresistencias den un valor similar a un mismo cambio de iluminación.
- Siendo las siguientes las señales corregidas emitidas por las fotorresistencias

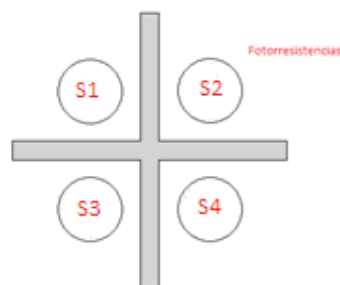


Figura 8-4. Señal corregida emitida por las fotorresistencias
Realizado por: Pablo Montalvo J

4.5.3.Lazo de control

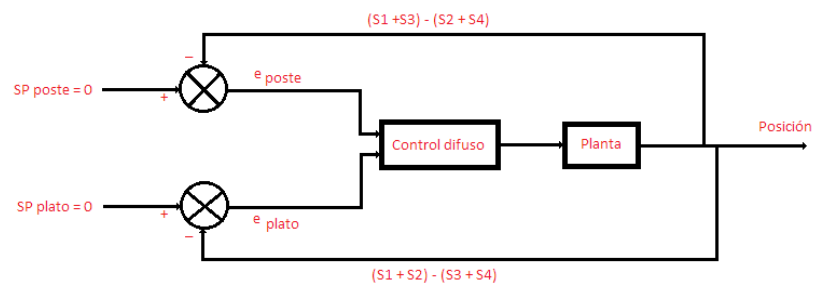


Figura 9-4. Lazo de control
Realizado por: Pablo Montalvo J

4.5.4.Obtención del error

El error que ingresa al control difuso se encuentra de la siguiente manera:

- Error de posición del paratante

$$e_{\text{poste}} = (S1 + S3) - (S2 + S4) \quad \text{Ecuación 2 - 4}$$

- Error de posición del plato

$$e_{\text{plato}} = (S1 + S2) - (S3 + S4) \quad \text{Ecuación 3 - 4}$$

4.5.5.Prototipo

Par poder desarrollar y demostrar el algoritmo de control difuso se ha construido un prototipo con las características mostradas en la siguiente figura:

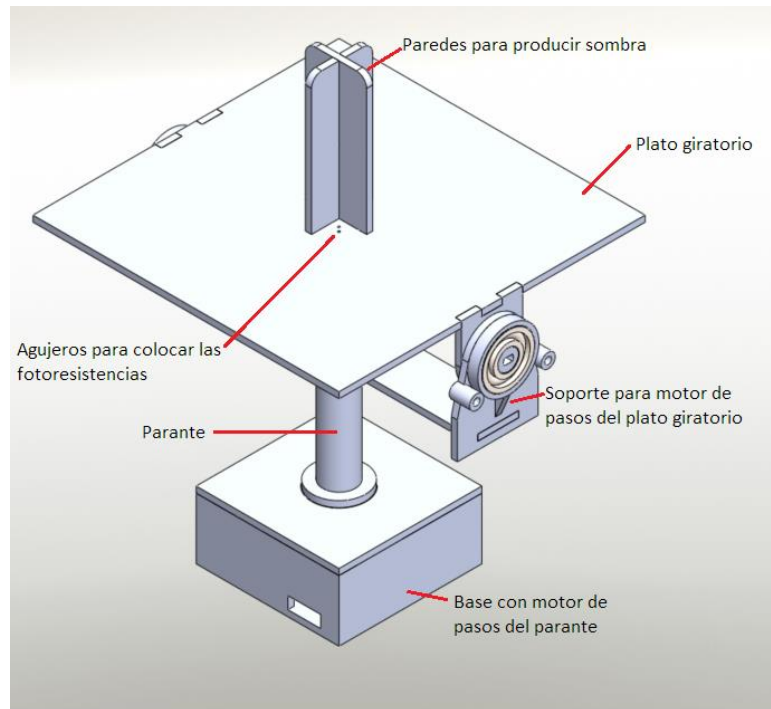


Figura 10-4. Prototipo
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

4.5.6. Lógica difusa de control

La lógica de control se realiza en el programa LabVIEW de National Instruments con los siguientes valores de membresía y utilizando las siguientes reglas difusas:

Error de posición del plato giratorio:

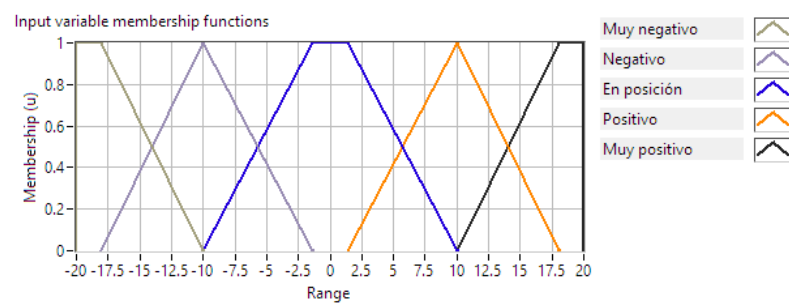


Figura 11-4. Membresía del error del plato giratorio
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Error de posición del parante:

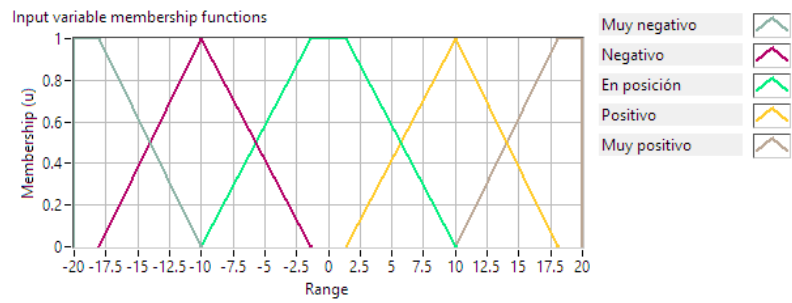


Figura 12-4. Membresía del error del parante
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Salida del plato:

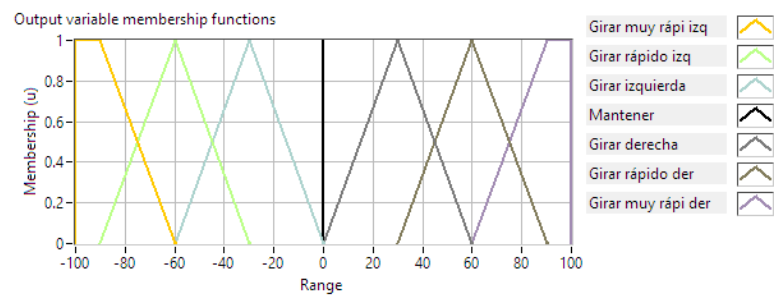


Figura 13-4. Membresía de la salida del plato giratorio
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Salida del parante:

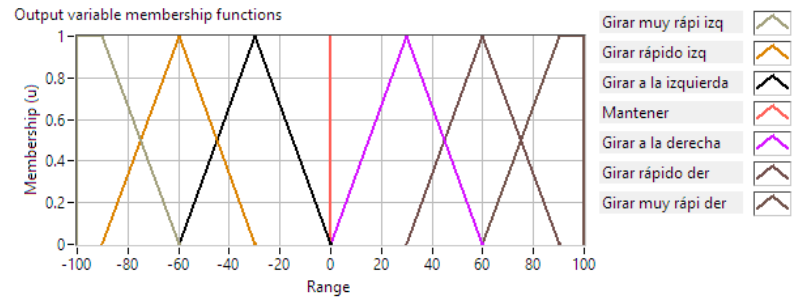


Figura 14-4. Membresía de la salida del parante
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Reglas difusas:

- IF 'Error posición plato' IS 'Muy negativo' AND 'Error posición parante' IS 'Muy negativo' THEN 'Salida Plato' IS 'Girar muy rápido der' ALSO 'Salida parante' IS 'Girar muy rápido der'
- IF 'Error posición plato' IS 'Negativo' AND 'Error posición parante' IS 'Muy negativo' THEN 'Salida Plato' IS 'Girar rápido der' ALSO 'Salida parante' IS 'Girar rápido der'
- IF 'Error posición plato' IS 'En posición' AND 'Error posición parante' IS 'Muy negativo' THEN 'Salida Plato' IS 'Mantener' ALSO 'Salida parante' IS 'Girar rápido der'
- IF 'Error posición plato' IS 'Positivo' AND 'Error posición parante' IS 'Muy negativo' THEN 'Salida Plato' IS 'Girar rápido izq' ALSO 'Salida parante' IS 'Girar rápido der'
- IF 'Error posición plato' IS 'Muy positivo' AND 'Error posición parante' IS 'Muy negativo' THEN 'Salida Plato' IS 'Girar muy rápido izq' ALSO 'Salida parante' IS 'Girar muy rápido der'
- IF 'Error posición plato' IS 'Muy negativo' AND 'Error posición parante' IS 'Negativo' THEN 'Salida Plato' IS 'Girar rápido der' ALSO 'Salida parante' IS 'Girar rápido der'
- IF 'Error posición plato' IS 'Negativo' AND 'Error posición parante' IS 'Negativo' THEN 'Salida Plato' IS 'Girar derecha' ALSO 'Salida parante' IS 'Girar a la derecha'
- IF 'Error posición plato' IS 'En posición' AND 'Error posición parante' IS 'Negativo' THEN 'Salida Plato' IS 'Mantener' ALSO 'Salida parante' IS 'Girar a la derecha'
- IF 'Error posición plato' IS 'Positivo' AND 'Error posición parante' IS 'Negativo' THEN 'Salida Plato' IS 'Girar izquierda' ALSO 'Salida parante' IS 'Girar a la derecha'
- IF 'Error posición plato' IS 'Muy positivo' AND 'Error posición parante' IS 'Negativo' THEN 'Salida Plato' IS 'Girar rápido izq' ALSO 'Salida parante' IS 'Girar rápido der'

- IF 'Error posición plato' IS 'Muy negativo' AND 'Error posición parante' IS 'En posición' THEN 'Salida Plato' IS 'Girar rápido der' ALSO 'Salida parante' IS 'Mantener'
- IF 'Error posición plato' IS 'Negativo' AND 'Error posición parante' IS 'En posición' THEN 'Salida Plato' IS 'Girar derecha' ALSO 'Salida parante' IS 'Mantener'
- IF 'Error posición plato' IS 'En posición' AND 'Error posición parante' IS 'En posición' THEN 'Salida Plato' IS 'Mantener' ALSO 'Salida parante' IS 'Mantener'
- IF 'Error posición plato' IS 'Positivo' AND 'Error posición parante' IS 'En posición' THEN 'Salida Plato' IS 'Girar izquierda' ALSO 'Salida parante' IS 'Mantener'
- IF 'Error posición plato' IS 'Muy positivo' AND 'Error posición parante' IS 'En posición' THEN 'Salida Plato' IS 'Girar rápido izq' ALSO 'Salida parante' IS 'Mantener'
- IF 'Error posición plato' IS 'Muy negativo' AND 'Error posición parante' IS 'Positivo' THEN 'Salida Plato' IS 'Girar rápido der' ALSO 'Salida parante' IS 'Girar rápido izq'
- IF 'Error posición plato' IS 'Negativo' AND 'Error posición parante' IS 'Positivo' THEN 'Salida Plato' IS 'Girar derecha' ALSO 'Salida parante' IS 'Girar a la izquierda'
- IF 'Error posición plato' IS 'En posición' AND 'Error posición parante' IS 'Positivo' THEN 'Salida Plato' IS 'Mantener' ALSO 'Salida parante' IS 'Girar a la izquierda'
- IF 'Error posición plato' IS 'Positivo' AND 'Error posición parante' IS 'Positivo' THEN 'Salida Plato' IS 'Girar izquierda' ALSO 'Salida parante' IS 'Girar a la izquierda'
- IF 'Error posición plato' IS 'Muy positivo' AND 'Error posición parante' IS 'Positivo' THEN 'Salida Plato' IS 'Girar rápido izq' ALSO 'Salida parante' IS 'Girar rápido izq'
- IF 'Error posición plato' IS 'Muy negativo' AND 'Error posición parante' IS 'Muy positivo' THEN 'Salida Plato' IS 'Girar muy rápi der' ALSO 'Salida parante' IS 'Girar muy rápi izq'
- IF 'Error posición plato' IS 'Negativo' AND 'Error posición parante' IS 'Muy positivo' THEN 'Salida Plato' IS 'Girar rápido der' ALSO 'Salida parante' IS 'Girar rápido izq'
- IF 'Error posición plato' IS 'En posición' AND 'Error posición parante' IS 'Muy positivo' THEN 'Salida Plato' IS 'Mantener' ALSO 'Salida parante' IS 'Girar rápido izq'
- IF 'Error posición plato' IS 'Positivo' AND 'Error posición parante' IS 'Muy positivo' THEN 'Salida Plato' IS 'Girar rápido izq' ALSO 'Salida parante' IS 'Girar rápido izq'
- IF 'Error posición plato' IS 'Muy positivo' AND 'Error posición parante' IS 'Muy positivo' THEN 'Salida Plato' IS 'Girar muy rápi izq' ALSO 'Salida parante' IS 'Girar muy rápi izq'

Diagrama de bloques del control difuso en LabVIEW

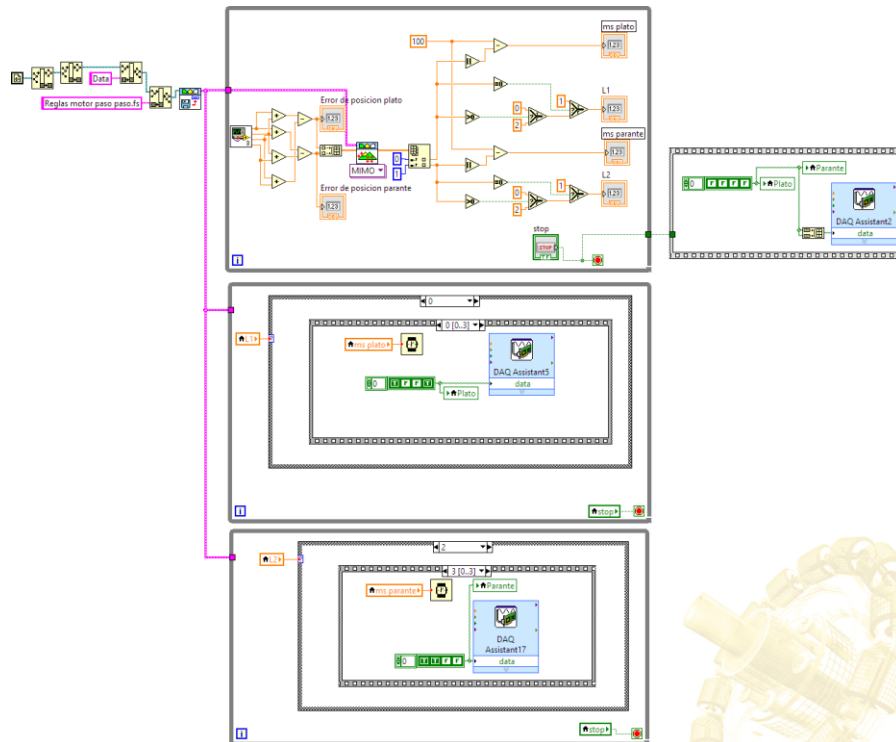


Figura 15-4. Diagrama de bloques del control difuso (LabVIEW)
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

La adquisición de datos de los sensores (S1, S2, S3, S4) con su acondicionamiento se muestra a continuación:

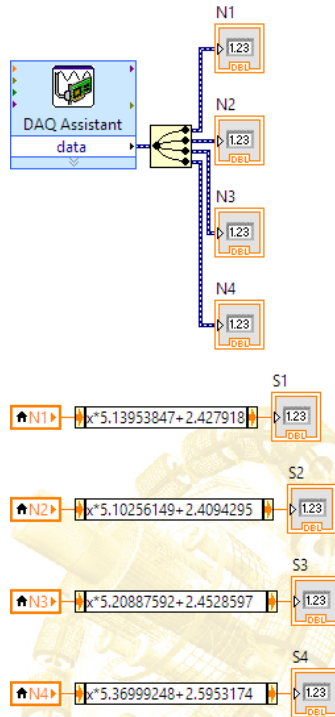


Figura 16-4. Adquisición y acondicionamiento de la señal de los sensores (caída de voltaje de las fotorresistencias)
 Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

La configuración de la tarjeta DAQ para adquirir las señales de las fotorresistencias se muestran a continuación:

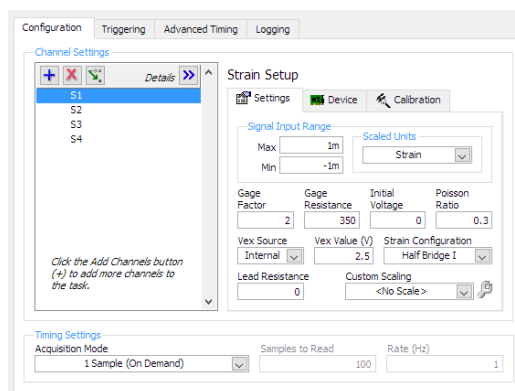


Figura 17-4. Configuración de la DAQ para la adquisición de datos
 Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

La señal de salida para el control de los motores de pasos se realiza enviando una señal booleana de 4 bits como se muestra en las siguientes figuras:

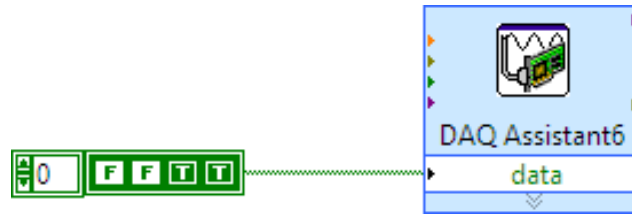


Figura 18-4. Envío de señal de control booleano al motor de pasos
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

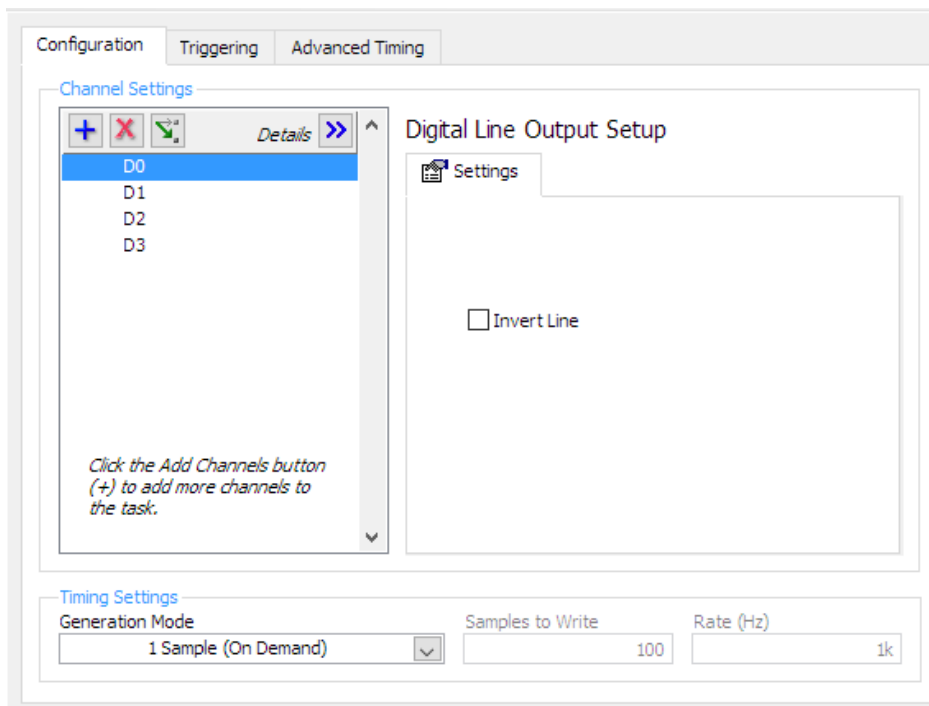


Figura 19-4. Configuración de la DAQ para salida de datos al motor de pasos
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Las membresías y reglas del control difuso se realizan en el Fuzzy System Designer de LabVIEW.

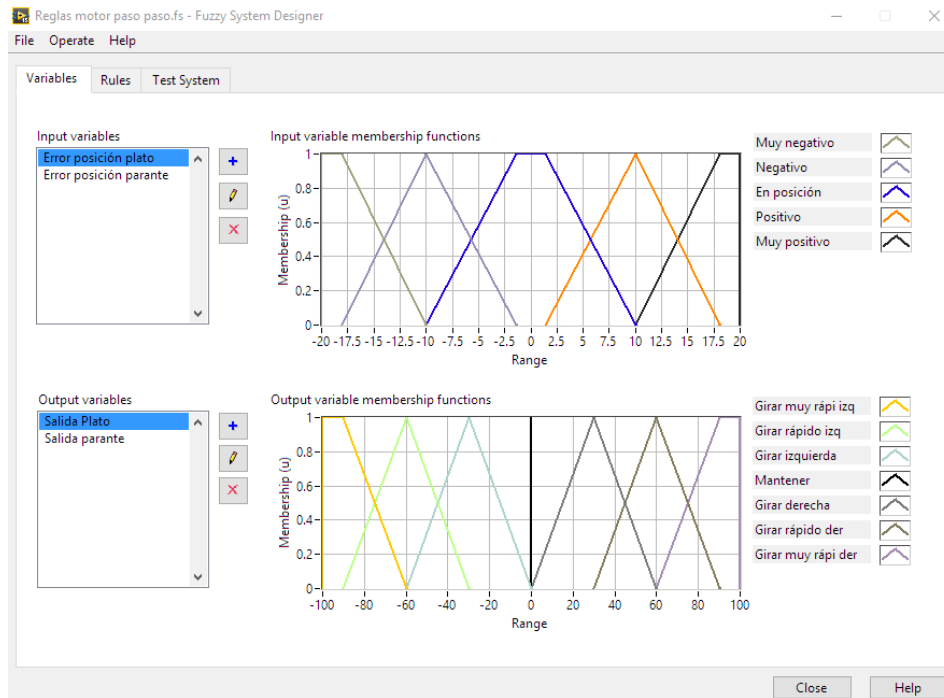


Figura 20-4. Reglas y membresías en el Fuzzy System Designer
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

La lectura de las membresías y reglas difusas se realiza de la siguiente manera:

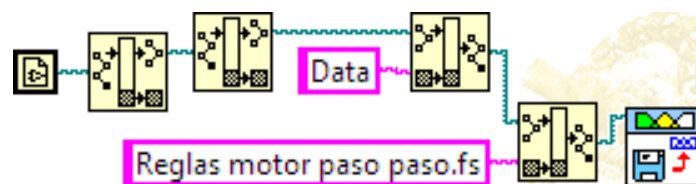


Figura 21-4. Lectura del archivo de las reglas y membresías
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

La señal adquirida por la DAQ es procesada matemáticamente para encontrar el error de posición tanto del plato giratorio como del parante, este error es analizado por las reglas difusas en un sistema MIMI (múltiple entrada, múltiple salida), dando un resultado del sentido de giro de los motores de pasos, así como de la velocidad con que deben girar el plato giratorio y el parante.

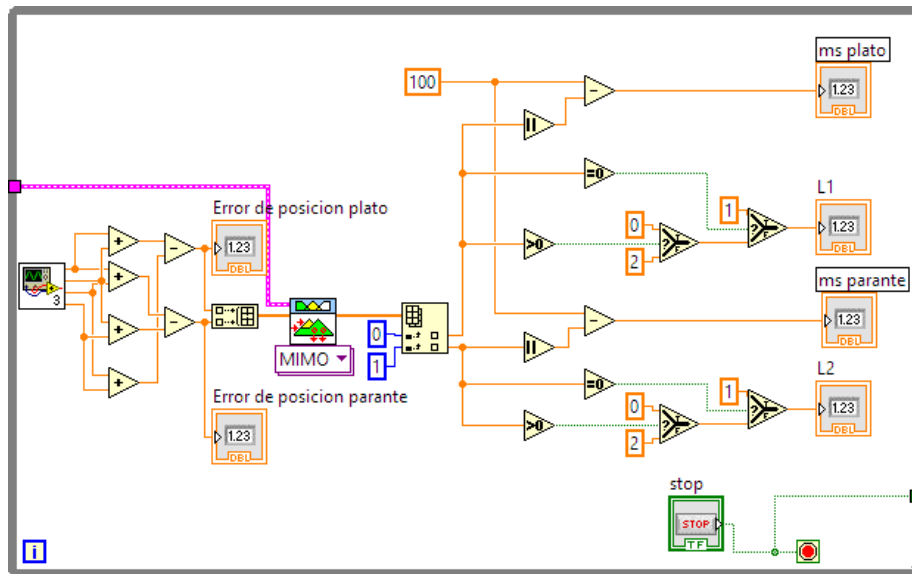


Figura 22-4. Procesamiento difuso del error de posición
 Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

La velocidad de giro de los motores de pasos está determinada por el tiempo en milisegundos que se demora cada paso de los motores, (ms del plato y ms del parante). El sentido de giro está dado por las variables L1 y L2.

El sentido de giro es controlado por una estructura de caso la misma que envía la secuencia de giro de cada motor.

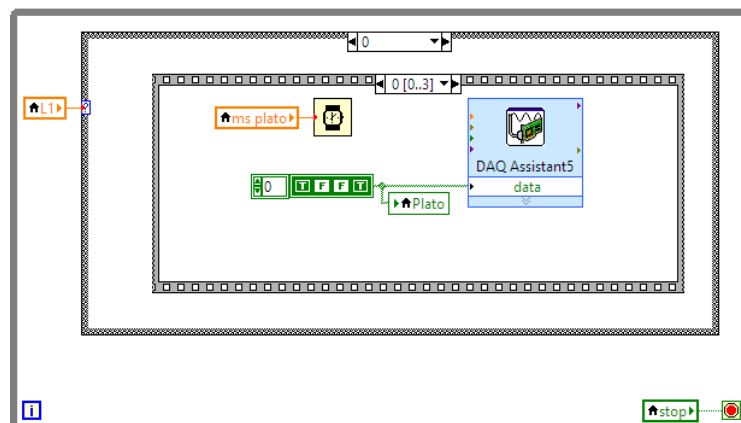


Figura 23-4. Sentido y secuencia de giro del motor de pasos del plato giratorio
 Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Cuando se detiene el programa se envía una señal booleana a través de un arreglo de cuatro bits para desenergizar las bobinas de los motores de pasos como se indica en la siguiente figura:

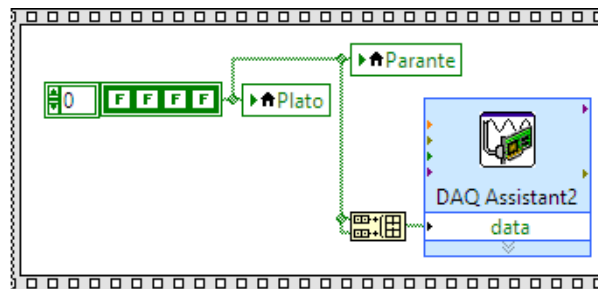


Figura 24-4. Señal para apagar las bobinas de los motores de pasos
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

El acople de la señal de salida hacia el motor de pasos se realiza con un opto acoplador o Driver consistente de un CI ULN 2003.



Figura 25-4. CI ULN 2003
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Este Driver realiza la conexión entre el motor de pasos y la tarjeta DAQ de la siguiente manera:

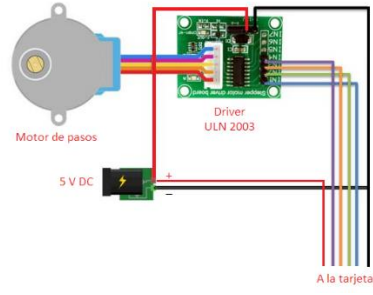


Figura 26-4. Conexión entre motor de pasos y la tarjeta DAQ
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

CAPÍTULO V

5. DEMOSTRACIÓN DE LA HIPÓTESIS

La hipótesis nula planteada es la siguiente:

Ho. Un sistema de seguimiento solar de dos ejes con lógica difusa permite captar mayor cantidad de radiación solar durante el día.

Par realizar la demostración de la hipótesis se ha realizado la medición de la energía incidente sobre una celda solar fotovoltaica fija con una inclinación de 15 grados hacia el norte y otra, de iguales características, colocada en el seguidor de dos ejes, las mediciones se realizaron durante tres días en la ciudad de Ambato.

Para realizar la medición de la energía producida por cada celda fotovoltaica se colocó una carga resistiva de $1k\Omega$ y se midió la caída de voltaje y la corriente que circulaba por cada resistencia, con los datos obtenidos escalados a un área de un metro cuadrado se obtuvo los siguientes datos:

Energía incidente sobre los paneles

Tabla 1-5 Energía incidente en el panel fotovoltaico

Energía Incidente en el Panel x 10^3 J/m ²								
Hora	1ª día		2º día		3ª día		Promedio	
	Panel fijo	Panel dos ejes	Panel fijo	Panel dos ejes	Panel fijo	Panel dos ejes	Panel fijo	Panel dos ejes
6:00:00	6987	6704	6640	6589	5980	6010	6535.67	6434.33
6:15:00	7312	7021	6890	6987	6030	6500	6744.00	6836.00
6:30:00	7100	7321	7000	7584	6540	6890	6880.00	7265.00
6:45:00	7146	7302	7050	7458	6489	7256	6895.00	7338.67
7:00:00	7470	7810	7458	7987	6500	7541	7142.67	7779.33
7:15:00	7298	7920	7240	8012	6700	7569	7079.33	7833.67
7:30:00	7674	7928	7400	8045	7210	7698	7428.00	7890.33
7:45:00	7343	7997	7200	8590	7140	7900	7227.67	8162.33
8:00:00	7208	7924	7005	8200	7150	7910	7121.00	8011.33
8:15:00	7802	7998	7400	7902	7562	7940	7588.00	7946.67
8:30:00	7927	8000	7500	7998	7689	8010	7705.33	8002.67

8:45:00	8010	8009	7947	8147	7810	8029	7922.33	8061.67
9:00:00	7945	8010	7650	8457	7890	8097	7828.33	8188.00
9:15:00	7389	8005	7254	8521	7510	8145	7384.33	8223.67
9:30:00	7890	7998	7650	8128	7650	8146	7730.00	8090.67
9:45:00	8178	8320	7800	8479	7890	8500	7956.00	8433.00
10:00:00	8200	8690	7980	8975	7891	8568	8023.67	8744.33
10:15:00	7993	8701	7993	9001	7820	8701	7935.33	8801.00
10:30:00	7980	8056	7980	9012	8010	9010	7990.00	8692.67
10:45:00	8002	8125	7958	9025	8000	9145	7986.67	8765.00
11:00:00	8098	8389	7945	8847	8045	9124	8029.33	8786.67
11:15:00	8308	8705	8012	8842	8145	9245	8155.00	8930.67
11:30:00	8412	8945	8158	8875	8254	9456	8274.67	9092.00
11:45:00	8345	8978	8218	8856	8298	9501	8287.00	9111.67
12:00:00	8212	9008	8210	9008	8147	9449	8189.67	9155.00
12:15:00	7987	8954	8001	8954	8200	9468	8062.67	9125.33
12:30:00	7942	8887	8010	9521	8120	9472	8024.00	9293.33
12:45:00	7865	8845	7989	9505	8000	9354	7951.33	9234.67
13:00:00	7862	8125	8010	9468	7900	9300	7924.00	8964.33
13:15:00	7814	8214	8000	9245	7850	9100	7888.00	8853.00
13:30:00	7812	8145	7915	9301	7745	9000	7824.00	8815.33
13:45:00	7810	8141	7954	9324	7654	8956	7806.00	8807.00
14:00:00	7659	8140	7954	9025	7598	8895	7737.00	8686.67
14:15:00	7702	8057	7452	9000	7548	8882	7567.33	8646.33
14:30:00	7569	8004	7458	8964	7220	8869	7415.67	8612.33
14:45:00	7200	7987	7450	8951	7200	8854	7283.33	8597.33
15:00:00	7254	7945	7589	8256	7145	8678	7329.33	8293.00
15:15:00	7224	8003	7568	8267	7458	8594	7416.67	8288.00
15:30:00	7008	8015	7458	8050	6987	8495	7151.00	8186.67
15:45:00	7026	8000	7240	8104	6950	8402	7072.00	8168.67
16:00:00	7001	7980	7128	8025	6987	8304	7038.67	8103.00
16:15:00	6986	7945	7012	8002	6942	8125	6980.00	8024.00
16:30:00	6974	7976	6987	7945	6895	8010	6952.00	7977.00
16:45:00	6974	7896	6889	7897	6740	7956	6867.67	7916.33
17:00:00	6987	7677	6789	7856	6650	7845	6808.67	7792.67
17:15:00	7002	7754	6874	7625	6548	7745	6808.00	7708.00
17:30:00	6950	7689	6789	7204	6689	7652	6809.33	7515.00
17:45:00	6853	7564	6899	7125	6700	7345	6817.33	7344.67
18:00:00	6847	7534	6847	7026	6652	7202	6782.00	7254.00
18:15:00	6240	7453	6584	6900	6648	7058	6490.67	7137.00
18:30:00	5987	7000	6325	6789	6020	6897	6110.67	6895.33
18:45:00	5420	6012	5459	6002	5978	6254	5619.00	6089.33
19:00:00	3500	4678	3258	4029	4010	5207	3589.33	4638.00
Promedio	7390.26	7933.66	7347.66	8186.51	7233.66	8193.57	7323.86	8104.58

Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

En las siguientes figuras se puede ver una comparación gráfica de las mediciones realizadas:

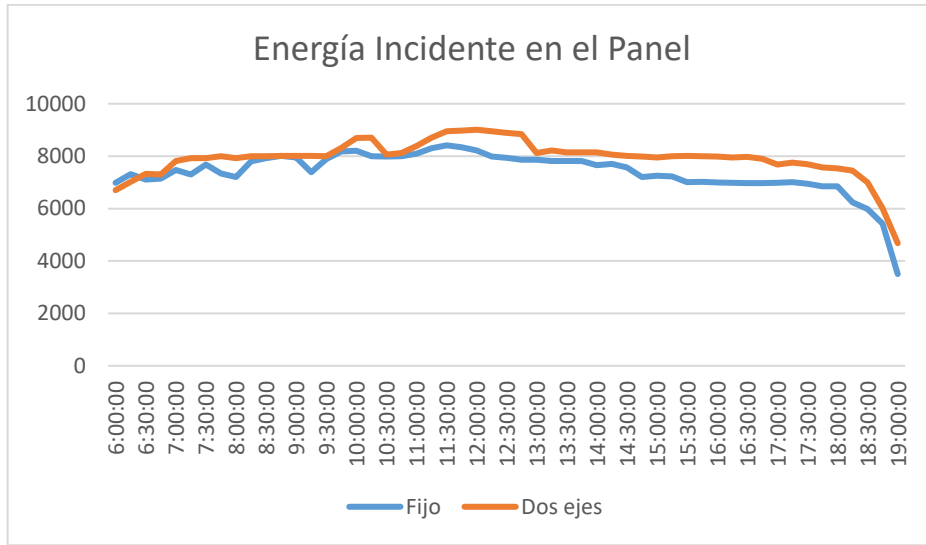


Gráfico 1-5. Energía incidente 1º día
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

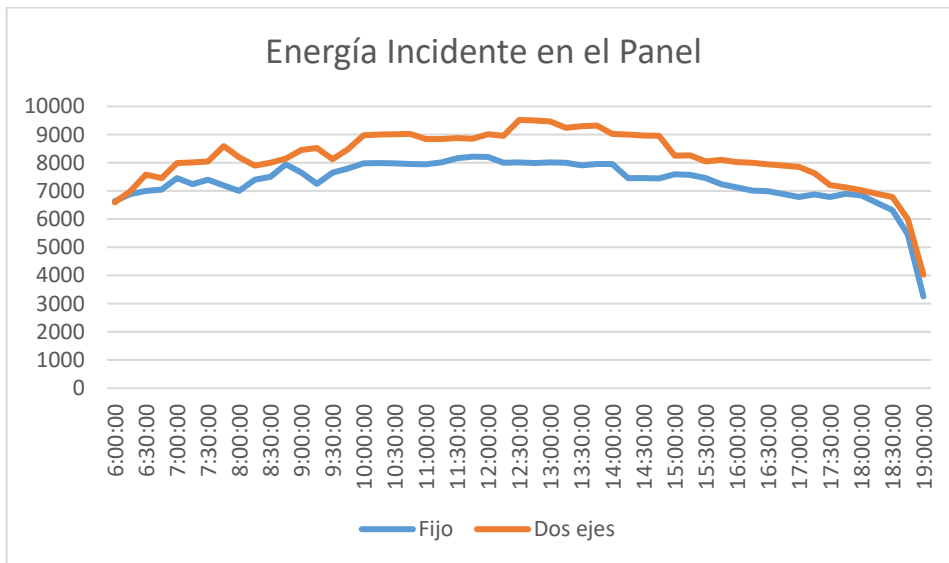


Gráfico 2-5. Energía incidente segundo día
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

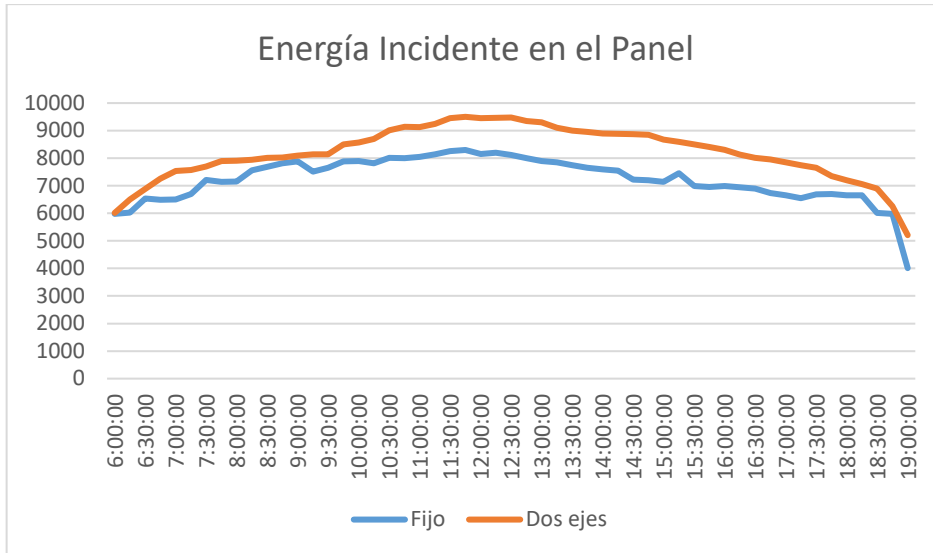


Gráfico 3-5. Energía incidente tercer día
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

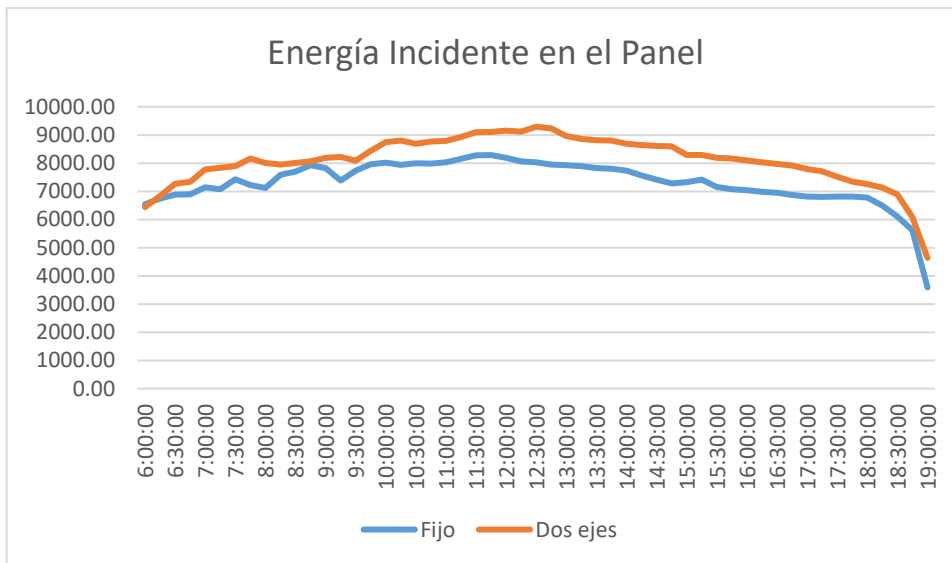


Gráfico 4-5. Promedio de energía incidente
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

De los datos obtenidos se ha procedido a determinar los valores medios de energía incidente en un día (6:00 a 19:00 horas) siendo estos los siguientes:

Tabla 2-5 Promedio de energía incidente

Promedio	Fijo	Dos ejes
	$7323.86 \times 10^3 \text{ J/ m}^2$	$8104.58 \times 10^3 \text{ J/ m}^2$

Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Para saber si esta diferencia es estadísticamente significativa se ha procedido a realizar las siguientes pruebas para variables independientes con una confiabilidad del 95%, es decir, $\alpha=0.05$.

Prueba de normalidad:

Tabla 3-5 Prueba de normalidad de la energía incidente

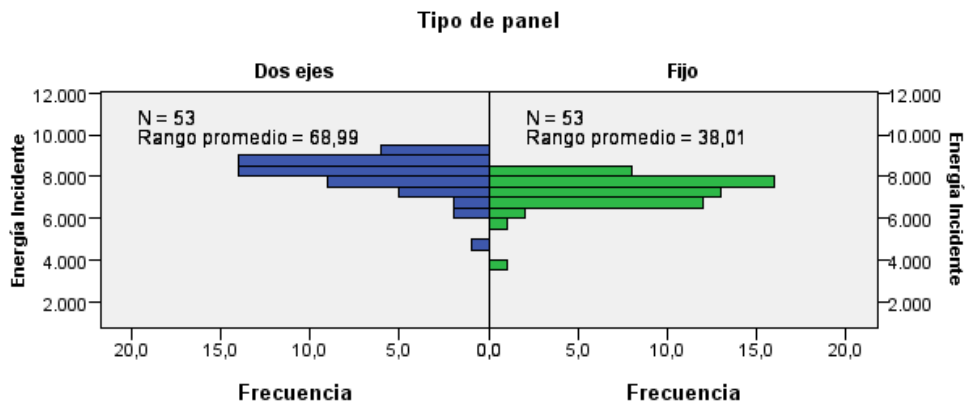
Pruebas de normalidad							
	Tipo de panel	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Energía Incidente	Fijo	,136	53	,015	,819	53	,000
	Dos ejes	,128	53	,029	,895	53	,000

Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Como se puede observar en la prueba Kolmogorov-Smirnov para muestras mayores a 30 casos el valor de significancia es de 0.015 para el panel fijo y de 0,029 par el de dos ejes, al ser estos menores a $\alpha = 0.05$ significa que los datos obtenidos no tienen una distribución normal.

Al ser muestras independientes y no normales se procede a realizar la prueba no paramétrica de U de Mann-Whitney que compara medianas y no medias, obteniéndose el siguiente resultado:

Prueba U de Mann-Whitney de muestras independientes



N total	106
U de Mann-Whitney	2.225,500
W de Wilcoxon	3.656,500
Probar estadística	2.225,500
Error típico	158,262
Estadística de prueba estandarizada	5,188
Sig. asintótica (prueba de dos caras)	,000

Gráfico 5-5. Resultados de la prueba U de Mann – Whitney
Realizado por: MONTALVO J, Pablo 2017

Al tener un valor de significancia de la prueba de $0.000 < 0.05$ concluimos que las medias de energía de incidencia sobre los paneles no son significativamente iguales, es decir se acepta la hipótesis:

H_0 . Un sistema de seguimiento solar de dos ejes con lógica difusa permite captar mayor cantidad de radiación solar durante el día.

Al determinar que la energía de incidencia en el panel de dos ejes es mayor que el panel fijo, podemos determinar la diferencia existente entre ellos:

$$n = \frac{8104.58 - 7323.86}{7323.86} \times 100 = 10.66 \%$$

Ecuación 1 - 5

CAPÍTULO VI

Resultados y discusión

- Se diseñó un sistema de seguimiento solar de dos ejes con control difuso que aprovecha de mejor manera la radiación solar, se demostró en la verificación de la hipótesis.
- Se elaboró el algoritmo difuso de control para un seguidor solar de dos ejes.
- Se construyó un prototipo de panel solar de dos ejes, el mismo que permitió realizar la demostración del algoritmo y verificación de la hipótesis
- Se realizó las medidas de la energía captada y se demostró la hipótesis que un sistema de seguimiento solar de dos ejes con lógica difusa permite captar mayor cantidad de radiación solar durante el día.
- Para la demostración de la hipótesis se procedió a realizar la medición de la energía incidente sobre un panel fijo inclinado 15 grados hacia el Norte que es la recomendación para ubicar paneles solares en el hemisferio sur, a la latitud de las ciudades de Ambato, la que se comparó con la energía incidente sobre un panel de seguidor solar dos ejes.
- Para la demostración de la hipótesis se aplicó la prueba no paramétrica de U de Mann – Whitney ya que la energía incidente captada sobre los paneles no cumple con una normalidad estadística.
- Realizada la comparación de la energía incidente captada en cada panel se determinó que el panel solar montado sobre el seguidor de dos ejes tubo una mejora del 10.66 % con respecto al fijo.

Conclusiones

Una vez justificada la necesidad de realizar la investigación referente al presente trabajo se ha obtenido las siguientes conclusiones:

- Se ha diseñado y ejecutado un sistema de seguimiento solar de dos ejes con control difuso que aprovecha de mejor manera la radiación solar.
- El prototipo de panel solar de dos ejes que ha permitido validar el algoritmo de control difuso para un seguidor solar de dos ejes

- Con las medidas de la energía incidente captada sobre un sistema de plato fijo y un sistema de dos ejes se demostró la hipótesis que un sistema de seguimiento solar de dos ejes con lógica difusa permite captar mayor cantidad de radiación solar durante el día.
- El sistema propuesto permitió obtener un rendimiento mayor en un 10.66 % de captación de energía solar con respecto a de un panel fijo

Recomendaciones

- Se puede revisar el rendimiento o aprovechamiento de la radiación solar en otros sistemas de seguidores solares diferentes a los de panel fijo y de dos ejes con mono poste que son los que se los ha estudiado en el presente trabajo.
- En siguientes trabajos se podrá tomar como referencia la presente investigación para investigar sobre la aplicación de otros posibles algoritmos de control como por ejemplo un control PID continuo, PID digital o sobre un control discreto, etc.
- Se recomendaría realizar las comparaciones de la energía incidente sobre los paneles solares en otras latitudes, (más al sur o más al norte), para ver si se obtienen mejores resultados de rendimiento.
- Se recomienda realizar una futura investigación sobre los costos y beneficios de construir sistemas de seguimiento solar de dos ejes comparados con los sistemas fijos que son los más comercializados.

BIBLIOGRAFÍA

AOPAC CASTILLO, A., & CASANOVA GONZALEZ, A. (2010). Sistema optimizado de adquisición de energía solar por el método de seguidores solares.

BARBADO SANTANA, J. (2009). *Automatismos Industriales*. México D.F.: Alfaomega.

Bérriz Pérez, L., & Álvares González, M. (s.f.). Influencia del ángulo de inclinación de una superficie captadora solar sobre la radiación incidente. *CUBAENERGIA*.

BÉRRIZ PÉREZ, L., & ÁLVAREZ GONZÁLEZ, M. (2007). Influencia del ángulo de inclinación de una superficie captadora solar sobre la radiación incidente. *CUBAENERGIA*.

BOLTON, W. (2001). *Mecatrónica : sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica*. México D.F: Alfaomega.

CAMBELLI, D., & STANLEY, J. (2005). *Diseños Experimentales y Cuasiexperimentales en la Investigación Social*. Buenos Aires: Amorrortu Editores S.A.

CIE. (2013). *Atlas de Radiación Solar del Ecuador*. Obtenido de http://www.energia.org.ec/cie/?page_id=39

CREAUS SOLÉ, A. (2006). *Instrumentación industrial*. México, D.F.: Alfaomega.

DORSEY, J. (2005). *Sistemas de control continuos y discretos*. México, D.F: Mcgraw-Hill, Interamerican.

Energía Solar y Desarrollo Sostenible. (9 de Noviembre de 2012). *El estudio PV Grid Parity Monitor pone de manifiesto que la paridad de red fotovoltaica ya empieza a ser una realidad*. Obtenido de <http://www.solarsostenible.org/2012/el-estudio-pv-grid-parity->

monitor-pone-de-manifiesto-que-la-paridad-de-red-fotovoltaica-ya-empieza-a-ser-una-realidad/

GARCIA MORENO, E. (2001). *Automatización de procesos industriales*. México D.F., México: Alfaomega.

GONZALEZ, C., & CALERO PÉREZ, R. (s.f.). *Centrales de Energía Renovable: Generación Eléctrica con Energías Renovables*. Madrid: Pearson.

GREENPACE. (2008). (a b Solar Energy can bring clean energy to over 4 billion people by 2030.

GUZMÁN SÁNCHEZ, J. L. (2012). *Control automático con herramientas interactivas*. Madrid: Pearson Educación.

HALACY, D. (s.f.). *Fun With the Sun Solar Energy Projects to Build and Use*. New York: Macmillan.

HERNAÁNDEZ, R. S., BAPTISTA, C., & FERNÁNDEZ, P. C. (2014). *Metodología de la Investigación*. México D.F.: Mc Graw Hill Educación.

INER. (2017). *Solar Presentación*. Obtenido de http://www.iner.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/12/SOLAR_DOSSIER.pdf

LAJARA VIZCAINO, J. R. (2007). *Labview: Entorno gráfico de Programación*. México: Alfaomega.

LAZARO ANTONI, M. (2005). *LabVIEW 7.1: Programación Gráfica Para el Control de Instrumentación*. Madrid: Thomson.

MARTÍNEZ SÁNCHEZ, V. A. (s.f.). *Automatización Industrial Moderna*. Bogota: RA-MA.

MEADOWS, D. e., & RANDERS, J. (2012). *Les limites à la croissance (dans un monde fini)*. Rue de l'Echiquier.

MILLER, T. G. (s.f.). *Ciencia Ambiental*. México D.F.: Thomson.

MONTESINOS Rodríguez, A. (s.f.). *Instalaciones Domóticas y Diseño de Proyectos*. Madrid: Paraninfo.

NAVARRO VIADANA, R. M. (2004). *Ingeniería de control : analógica y digital*. México, D.F: McGraw-Hill.

NICE, N. S. (2006). *Sistemas de control para ingeniería*. México, D.F: Compañía Editorial Continental.

PIEDRAFINA MORENO, R. (2004). *Ingeniería de la Automatización Industrial*. México, D.F.: Ra-Ma.

REYES CORTÉS, F. (s.f.). *Mecatrónica Control y Automatización*. México D.F.: Alfaomega.

RODRÍGUEZ MORALES, L. (2004). *Diseño: Estrategia y Táctica*. México D.F.: Siglo XXI.

RODRÍGUEZ PENIN, A. (2012). *Sistemas SCADA*. México, D.F: Alfaomega.

SANZ MOLINA, A. (1998). *Redes neuronales y sistemas difusos*. México, D.F: Alfaomega.

SEMPLADES. (2013). Buen Vivir Plan Nacional 2013 2017.

SWANSON, R. M. (2009). *Photovoltaics Power Up*. Obtenido de http://phys.iit.edu/~segre/phys100/science_2009_324_891.pdf

TOBAJAS, C. (2011). *Instalaciones Solares Fotovoltaicas*. Barcelona.

WIKIPEDIA. (2 de abril de 2016). *Seguidor Solar*. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Seguidor_solar

ANEXOS

ANEXO 1 PROTOTIPO