

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y SISTEMAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



**DISEÑO DE UN CONTROLADOR BASADO EN LA LÓGICA FUZZY PARA
LA ADMINISTRACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA SOLAR DOMÉSTICA EN
EL DISTRITO DE PUNO**

TESIS

PRESENTADA POR:

CARLOS JAVIER SANCA SUCACAHUA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRÓNICO

PUNO – PERÚ

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y SISTEMAS**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**DISEÑO DE UN CONTROLADOR BASADO EN LA LÓGICA FUZZY PARA
LA ADMINISTRACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA SOLAR DOMÉSTICA EN
EL DISTRITO DE PUNO**

TESIS PRESENTADA POR:

CARLOS JAVIER SANCA SUCACAHUA

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 28-12-2018

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRÓNICO

APROBADA POR EL JURADO FIRMANTE CONFORMADO POR:

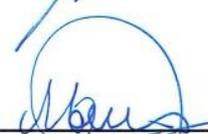


PRESIDENTE:



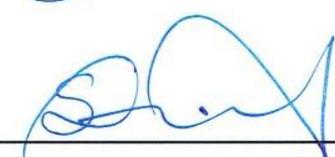
M.Sc. GUIDO HUMBERTO CAYO CABRERA

PRIMER MIEMBRO:



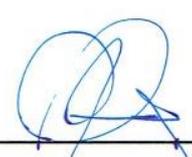
Mg. MARCO ANTONIO RAMOS GONZÁLEZ

SEGUNDO MIEMBRO:



M.Sc. EDWIN WILBER CHAMBI MAMANI

DIRECTOR / ASESOR:



Dr. IVAN DELGADO HUAYTA

Área : Aplicaciones Energéticas
Tema : Diseño de Controlador con Lógica Fuzzy

DEDICATORIA

A DIOS

Por darme la vida y estar siempre conmigo, guiándome en mi camino.

A mis Padres

El esfuerzo y las metas alcanzadas, refleja la dedicación, el amor que invierten sus padres en sus hijos. Gracias a mis padres son quien soy, orgullosamente y con la cara muy en alto agradezco a Mariano Sanca M. y Rosa Sucacahua B., mi mayor inspiración, gracias a mis padres he concluido con mi mayor meta.

A mi esposa Zusel e hijos Pamela y Adriano, personas que iluminan mi vida, que con su apoyo, alcance de mejor manera mis metas, a través de sus consejos, de su amor, y paciencia me ayudaron a concluir esta meta.

AGRADECIMIENTO

Me van a faltar páginas para agradecer a las personas que se han involucrado en la realización de este trabajo, sin embargo merecen reconocimiento especial mi Madre y mi Padre que con su esfuerzo y dedicación me ayudaron a culminar mi carrera universitaria y me dieron el apoyo suficiente para no decaer cuando todo parecía complicado e imposible.

Asimismo, agradezco infinitamente a mis Hermanos Liliana y Fredy que con sus palabras me hacían sentir orgulloso de lo que soy y de lo que les puedo enseñar. Ojala algún día yo me convierta en esa fuerza para que puedan seguir avanzando en su camino.

Agradezco a los todos docentes que con su sabiduría, conocimiento y apoyo, motivaron a desarrollarme como persona y profesional.

ÍNDICE GENERAL

Índice de tablas	8
Indice de figuras.....	9
Resumen.....	11
Abstract.....	12
CAPITULO I	13
1.1. Introducción	13
1.2. Objetivos	15
1.2.1. Objetivo general.....	15
1.2.2. Objetivos específicos	15
CAPITULO II.....	16
Marco teorico.....	16
2.1. Antecedentes del proyecto	16
2.2. Gestion de energia electrica	21
2.2.1. Energía y desarrollo sostenible	24
2.2.2. La demanda de electricidad y el contexto energético	25
2.2.3. Beneficios que puede aportar de electricidad	27
2.3. Sistema de gestión de la energía eléctrica.....	32
2.3.1. Control de la distribución de la energía	33
2.3.2. Fases del sistema de gestión de energía.....	34
2.3.3. Resumen de ventajas del sistema de gestión de energía.....	35
2.3.4. Gestión de la energía eléctrica basada en simatic.....	36
2.3.5. Gestión de la energía eléctrica	38
2.3.6. Innovaciones de la gestión de energía eléctrica.....	39
2.3.7. Gestión de cuentas costeadoras.....	42
2.3.8. Gestión de carga.....	43
2.4. El controlador fuzzy	46
2.4.1. Diseño de un sistema de control fuzzy	50
2.4.2. Manipulador robótico de igdl	50
2.4.3. Modelo del subsistema mecánico	51
2.4.4. Modelo del subsistema eléctrico.....	56
2.4.5. Conversión de energía eléctrica en mecánica	57
2.4.6. Ecuación de estado del sistema mr con $L_A \neq 0$	57

2.4.7.	Ecuación de estado del sistema mr con $l_a = 0$	58
2.4.8.	Control fuzzy del manipulador mr.....	58
2.4.9.	El proceso de fuzzyficación.....	60
2.4.10.	Método de defuzzyficación.....	63
2.5.	Microcontroladores.....	72
2.6.	Entornos de programación.....	74
2.6.1.	Arduino.....	75
2.6.2.	Por qué arduino.....	76
2.7.	Sensores.....	79
2.7.1.	Características de un sensor.....	80
2.7.2.	Tipos de sensores.....	81
2.7.3.	Fotorresistencia.....	83
2.8.	Actuadores.....	85
2.8.1.	Relé electromagnético.....	86
2.9.	Paneles solares.....	87
2.9.1.	La elección del panel.....	88
2.9.2.	Tipos cristalinos.....	88
2.9.3.	Thin film.....	88
2.9.4.	Número de células.....	89
2.10.	Baterías para sistemas fotovoltaicos.....	89
2.10.1.	Tipos de baterías.....	90
2.10.2.	Baterías de plomo.....	92
2.10.3.	Condiciones que afectan la vida de las baterías.....	93
2.10.4.	Eficiencia de las baterías solares.....	94
2.10.5.	Temperatura: factor decisivo para la vida de las baterías.....	94
2.11.	Hipótesis del trabajo.....	95
2.11.1.	Hipótesis específicas.....	95
CAPITULO III.....		96
Materiales y métodos.....		96
3.1.	Materiales.....	96
3.1.1.	Hardware.....	96
3.1.2.	Software.....	98
3.2.	Diseño, nivel y tipo de la investigación.....	98
3.2.1.	Diseño de la investigación.....	99
3.2.2.	Nivel de la investigación.....	99

3.3. Población y muestra de la investigación	99
3.3.1. Población.	99
3.3.2. Muestra.	100
3.4. Ubicación y descripción de la investigación	100
3.4.1. Ubicación	100
3.4.2. Descripción de la investigación	100
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	101
3.6. Diseño de la lógica fuzzy del controlador.....	102
3.7. Análisis de un prototipo convencional de paneles fotovoltaicos	113
3.7.1. Operación de un controlador convencional	113
3.7.2. Recolección de datos	114
3.7.3. Radiación	115
3.8. Diseño del prototipo.....	116
3.9. Panel fotovoltaico.....	119
3.10. Batería.....	120
3.11. Programación en arduino.....	121
CAPITULO IV	124
Resultados y discusión.....	124
CAPITULO V	
Conclusiones Especificas.....	128
CAPITULO VI	
Recomendaciones	129
CAPITULO VII	
Referencias.....	130
CAPITULO VIII	
ANEXO 1: Características del panel fotovoltaico	133
ANEXO 2: Características de la batería	134
ANEXO 3: Código para microcontrolador arduino.....	135

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 - Parámetros y variables del manipulador MR1.	52
Tabla 2.2 - Conjunto de reglas del controlador fuzzy mostradas en la forma de una matriz de memoria asociativa fuzzy (FAM-matrix).	61
Tabla 2.3 - Valores de $e(t)$ para los puntos extremos de las funciones de membresía. ..	62
Tabla 2.4 - Valores de $de(t)/dt$ para algunos puntos de las funciones de membresía.	62
Tabla 2.5 - Valores de la señal de control $u(t)$ para ñps singlestones.	63
Tabla 2.6 – Tipos de sensores	83
Tabla 3.1 - Técnicas e instrumentos para recolección de datos.....	101
Tabla 4.1 - Costo del sistema para un cliente.	126
Tabla 4.2 - Tabla de ahorro.....	126
Tabla 4.3 – Costos del Sistema.	127
Tabla 4.4 – Recuperación de Inversión.	127

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Distribución del consumo de energía primaria.	24
Figura 2.2 - Relación entre el índice de desarrollo humano y el consumo.....	26
Figura 2.3 - Consumo de energía eléctrica per cápita en el Perú.....	29
Figura 2.4 - Fases del sistema de gestión de energía.	34
Figura 2.5 - Automatización y distribución de la energía eléctrica optimizadas.....	38
Figura 2.6 - Diagrama de las aplicaciones del sistema.	39
Figura 2.7 - La distribución de energía eléctrica, valores actuales y curvas del consumo.	41
Figura 2.8 - Vista general de datos esenciales para el manejo.	43
Figura 2.9 - Sistema de control a lazo cerrado, donde el controlador convencional se reemplaza por un controlador fuzzy.	48
Figura 2.10 - Un Manipulador Robótico 6GDL.	51
Figura 2.11 - Esquema del Manipulador Robótico.....	53
Figura 2.12 - Brazo del manipulador robótico.....	54
Figura 2.13 - Funciones de membresía para las entradas error $e(t)$ y $de(t)/dt$, y para la salida $u(t)$	60
Figura 2.14 - Posición angular controlada en la simulación del sistema de control fuzzy del brazo robótico de 1GDL, para una señal de referencia fija.	66
Figura 2.15 - Posición angular controlada en el sistema de control fuzzy en tiempo real del brazo robótico de 1GDL, para una señal de referencia fija.	66
Figura 2.16 - Señal de control de la posición angular en el sistema de control fuzzy en tiempo real del brazo robótico de 1GDL, para una señal de referencia fija.	67
Figura 2.17 - Componentes que integran a un microcontrolador	73
Figura 2.18 - Diagrama de la placa de arduino UNO	77
Figura 2.19 - Partes de la fotorresistencia.....	84
Figura 2.20 - Forma de un relé electromagnético	86
Figura 2.21 - Panel Solar	87
Figura 2.22 - Número de células en un panel solar	89
Figura 2.23 - Batería de plomo	92
Figura 2.24 - Línea de Tiempo vs Temperatura	95
Figura 3.1 - Arduino UNO R3	97
Figura 3.2 - Comando para ingresar a Fuzzy Toolbox.	102

Figura 3.3 - Diseño Fuzzy Toolbox en Matlab.....	103
Figura 3.4 - Miembro del sistema configurado como entrada denominado panel-solar.	104
Figura 3.5 - Miembro del sistema configurado como entrada y denominado batería. .	105
Figura 3.6 - Salida del controlador como una función trapezoidal.....	106
Figura 3.7 - Reglas Fuzzy en formato verbal.....	107
Figura 3.8 - Reglas Fuzzy en formato simbólico.....	108
Figura 3.9 - Reglas Fuzzy en formato indexado.....	108
Figura 3.10 - Gráfica del sistema en tres dimensiones.	109
Figura 3.11 - Prueba de la lógica con entradas 10 y 12.....	110
Figura 3.12 - Prueba de la lógica con entradas 14 y 12.....	111
Figura 3.13 - Prueba de la lógica con entradas 18 y 10.....	112
Figura 3.14 - Prueba de la lógica con entradas 12 y 12.....	113
Figura 3.15 - Diagrama del sistema de panel fotovoltaico convencional.....	114
Figura 3.16 - Sistema de recolección de datos.....	115
Figura 3.17 - Radiación solar vs Tiempo.....	116
Figura 3.18 - Diagrama de bloques del prototipo de controlador.....	117
Figura 3.19 - Diagrama esquemático del prototipo de controlador.....	119
Figura 3.20 - Tensión del panel fotovoltaico durante un día.....	120
Figura 3.21 - Tensión de la batería en función del tiempo.....	121
Figura 3.22 - Diagrama de flujo de controlador mejorado.....	124
Figura 4.1 - Salida del sistema aplicando uno de los primeros algoritmos del controlador	124
Figura 4.2 - Salida del sistema utilizando el algoritmo final del controlador.....	125
Figura 4.3 - Evolución del consumo de energía de la red eléctrica.....	125

RESUMEN

Debido a la alta radiación solar existente en la ciudad de Puno, se plantea el diseño de un controlador basado en la lógica fuzzy, la lógica fuzzy no tiene un lenguaje computacional común, tal como el sistema binario basado en ceros y unos, tiene un lenguaje que como extremos se encuentran al cero y uno, y entre ellos se determinan valores que permiten precisar datos con una lógica parecida al cerebro de un ser vivo, donde no sólo existe valores como por ejemplo, caliente y frío; sino valores como muy caliente, caliente, tibio, frío y muy frío. Este controlador logrará permitir una mejor administración de la energía eléctrica obtenida del sol para su uso doméstico en el distrito de Puno. Se plantea una solución sencilla, más eficiente y barata, comparada con otras opciones en el mercado. No se ha planteado hacer un estudio de los paneles solares, ni de los accesorios que incluye el sistema, tampoco se ha planteado estudiar el fenómeno de radiación solar en el distrito de Puno, pero si se ha planteado aprovechar de forma eficiente la energía eléctrica solar con un nuevo diseño de controlador. Se inicia el desarrollo con el planteamiento del problema, para luego llegar a las hipótesis, a los objetivos e identificación de las variables. La hipótesis de la investigación es “El diseño de un controlador basado en la lógica fuzzy permitirá la mejor administración de la energía eléctrica solar doméstica en el distrito de Puno”, de esta forma se ha establecido el objetivo de la investigación “Diseñar un controlador basado en la lógica fuzzy para la mejor administración de la energía eléctrica solar doméstica en el distrito de Puno”; los resultados que se esperan obtener son: implementar un prototipo de controlador eficiente y que tendrá un costo igual o menor a dispositivos similares en el mercado actual. Finalmente la conclusión general que se esperan obtener con respecto al objetivo trazado, lograr el diseño de un controlador basado en la lógica fuzzy, eficiente y económico, para la administración de la energía eléctrica solar doméstica.

Palabras Clave: Panel Solar, Controlador de Panel Solar, Lógica Computacional, Energía Eléctrica Doméstica, lógica fuzzy

ABSTRACT

Due to the high solar radiation in the city of Puno, the design of a controller based on fuzzy logic is considered, the fuzzy logic does not have a common computational language, such as the binary system based on zeros and ones, it has a language that as extremes are at zero and one, and between them are determined values that allow us to specify data with a logic similar to the brain of a living being, where there are not only values such as, for example, hot and cold; but values as very hot, hot, warm, cold and very cold. This controller will manage to allow a better administration of the electric power obtained from the sun for its domestic use in the district of Puno. A simple, more efficient and cheaper solution is proposed, compared with other options in the market. He has not considered making a study of the solar panels, or the accessories included in the system, nor has he considered studying the phenomenon of solar radiation in the district of Puno, but has considered taking advantage of solar energy efficiently with a new controller design. The development begins with the approach of the problem, to then arrive at the hypothesis, the objectives and identification of the variables. The research hypothesis is "The design of a controller based on fuzzy logic will allow the best administration of domestic solar electric energy in the district of Puno", thus establishing the objective of the research "Designing a controller based in fuzzy logic for the best administration of domestic solar electric energy in the district of Puno"; The results that are expected to be obtained are: implementing an efficient prototype of the controller that will have an equal or lower cost to similar devices in the current market. Finally, the general conclusion that is expected to be obtained with respect to the objective, to achieve the design of a controller based on fuzzy logic, efficient and economical, for the administration of domestic solar electric energy.

Keywords: Solar Panel, Solar Panel Controller, Computational Logic, Domestic Electric Energy, fuzzy logic

CAPITULO I

1.1. INTRODUCCIÓN

Administrar la energía solar necesita de un controlador basado en la lógica fuzzy, un dispositivo que utilice esta energía de manera eficiente, y promueva el uso masivo de energía solar eléctrica en áreas urbanas y cause un gran impacto en el ahorro de energía de la red eléctrica convencional.

Los controladores convencionales son bastante limitados porque están diseñados para ser usado en zonas rurales, por esa razón se hace necesario el cambio de tecnologías para administrar el uso de la energía eléctrica solar, y la lógica fuzzy nos facilita este proceso, logrando así una mejora sobre dichos controladores.

El diseño de un controlador usando lógica fuzzy, nos lleva a modelar su funcionamiento sobre una placa ARDUINO, para monitorear el comportamiento de los componentes periféricos del sistema en tiempo real y así optimizar el diseño de nuestro controlador.

Un controlador de panel fotovoltaico basado en la lógica fuzzy administra la energía obtenida de la radiación solar, optimiza tanto la energía eléctrica, así como el funcionamiento de la batería y no requiere la constante preocupación del usuario acerca del estado del producto, no necesita que el usuario tome acciones sobre el mismo, porque la autonomía del controlador está administrada por sí mismo. El proyecto está organizado en siete capítulos, que se presentan de la siguiente manera:

Primer capítulo, se encuentra la presente introducción.

Segundo capítulo, se encuentra los antecedentes que en este caso son tesis de universidades nacionales e internacionales, así como otros documentos relacionados. Se encuentran también el sustento teórico que permite identificar y definir las variables, para adaptarlas a la lógica fuzzy. El capítulo concluye con la hipótesis y objetivos de la investigación, así como la operalización.

Tercer capítulo, se expone aspectos el diseño del controlador y funcionamiento sobre una placa de ARDUINO. El capítulo concluye con los resultados obtenidos de la monitorización de parámetros del panel sobre la batería.

Cuarto capítulo, se encuentran los resultados obtenidos de la investigación, así como la optimización del controlador, las que se muestran utilizando tablas y gráficos comparativos.

Quinto capítulo, se encuentran las conclusiones específicas.

Sexto capítulo, se presenta las recomendaciones respecto a las futuras investigaciones que podrían derivarse de este estudio.

Séptimo capítulo, se encuentran las referencias bibliográficas del presente proyecto de investigación.

Octavo capítulo, se encuentran los anexos referentes a características del panel fotovoltaico, batería y código para el microcontrolador ARDUINO.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar un controlador basado en la lógica fuzzy para la mejor administración de la energía eléctrica solar doméstica en el distrito de Puno.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar la lógica fuzzy en el diseño del controlador.
- Diseñar un controlador que administre la energía eléctrica solar.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO

Actualmente existen reguladores de carga, que no son flexibles en cuanto a la modificación de sus parámetros de regulación. Con estos reguladores no es posible verificar el estado de carga ni el de descarga de la batería, siendo estos estados influyentes en la vida útil de la misma. Los objetivos de la presente tesis son implementar un regulador que sea flexible en cuanto a la modificación de sus parámetros de regulación e implementar una tarjeta de adquisición de datos que se pueda usar en cualquier proceso y que acoplada al regulador podamos conocer el estado de carga y de descarga de la batería a través del tiempo. Para el desarrollo de lo antes expuesto se han aplicado recientes tecnologías en hardware y software como lo es el microcontrolador PIC 16C711 y la programación orientada a objetos. La presente tesis cumple con los objetivos planteados. Además, proyecta nuevas ideas que harán que el sistema de regulación sea también un sistema de medición y monitoreo de las variables que influyen en el óptimo rendimiento de un sistema de electrificación fotovoltaico. Gracias a la buena regulación, el nivel de tensión de la batería siempre está entre los niveles mínimo y máximo programados por software que en este caso fueron 11V y 13.5V. El regulador es para baterías de diferentes tensiones nominales como las comunes de 12, 24 y 48 Voltios (el sistema es muy flexible). Para cambio de niveles de tensión más altos hay que seleccionar los MOSFETS oportunos. La banda de igualación de la batería es la variación de tensión (medida en voltios) del panel solar en 10 segundos, que para un estado óptimo del clima vendría a ser .05 voltios (esto por la respuesta lenta del panel ante las variaciones de radiación). Esta banda de igualación se

puede cambiar por programa ajustando la modulación por ancho de pulso. La conexión y desconexión de la carga, no afecta la regulación, esto es debido a que en el diseño se ha considerado una histéresis de un voltio. Esta histéresis es modificable por software. La lectura de los niveles de tensión por una PC a través de la EEPROM cada minuto, permite obtener con precisión la curva de carga y descarga de la batería, esta curva es un indicador del estado de la profundidad de la descarga que se relaciona con la vida útil de la misma. Conectando sólo el panel en los bornes del regulador correspondientes a la batería, tenemos la curva de tensión del panel solar vs. tiempo teniendo esta curva para diferentes días y posiciones, se puede obtener la radiación del día aproximada y una óptima posición para los paneles. La tarjeta de adquisición de datos implementada no sólo es útil para el regulador, sino es útil para la mayoría de procesos en donde se requiera el almacenamiento de datos. La memoria de la tarjeta de adquisición de datos es expandible. Gracias a su direccionamiento físico que consta de 3 bits se pueden colgar 8 memorias EEPROM de una misma tarjeta y de la misma línea de datos, sólo bastaría una modificación en el software que se ejecuta desde la PC para descargar los 32768 datos. La conexión de un radio modem en la tarjeta permitiría el envío de datos para el constante monitoreo de la tensión en tiempo real. El uso de un sensor de corriente en la tarjeta (sensor hall) permitiría que esta envíe datos de corriente. Con esto se tendría en constante monitoreo los datos de tensión y corriente, lo que haría a la tarjeta además de un regulador, un totalizador. Otra ventaja del uso del sensor es la obtención de la capacidad de la batería. Esta variable es fundamental en la batería y va cambiando a medida que la batería se deteriora. Con la obtención de este valor se puede saber el estado de la batería y no sería necesario utilizar un densímetro (Henríquez, 2003).

En muchas zonas del Perú, debido a su difícil acceso y ubicación, es complicado que la energía eléctrica se extienda hacia ciertas comunidades lejanas, lo que significa una merma en el avance tecnológico y conlleva a un retraso si se compara con otras comunidades con mayor población y mucho más con las ciudades, que sí cuentan con energía eléctrica. Entonces, existe la necesidad en ciertos pueblos y zonas rurales de nuestro país, de contar con energía eléctrica que se pueda obtener a partir de una fuente segura y confiable; dado que esto llevaría consigo un desarrollo tecnológico; además, un fuerte desarrollo económico por las múltiples opciones de mejoras en los procesos de elaboración de productos que ellos comercializan, entre los que se pueden citar: una mejor producción de ganado vacuno y sus productos derivados, así como alimento para el ganado. Por ello, se tiene como objetivo, diseñar un sistema con paneles solares para poder cargar baterías y así, energizar motores para picadoras que se proyecta utilizar en la comunidad Micaela Bastidas en el distrito de Barranca, Lima. Se harán visitas a la comunidad Micaela Bastidas en la quebrada Venado Muerto con el fin de observar sus principales actividades y cómo, mediante el uso de la energía solar, se pueden mejorar las mismas. Se verá, con los pobladores y campesinos, sus necesidades reales para que el sistema diseñado vaya acorde con estas. Se evaluará, en el marco económico, el ahorro que les generaría un sistema así, los beneficios que presenta comparado con el sistema de carga de baterías que tienen actualmente. Finalmente, nuestro sistema se dimensionará de acuerdo a todos estos datos, para así satisfacer las necesidades energéticas de la población. El sistema con paneles solares para cargar baterías y energizar motores de picadoras para ser utilizado en la comunidad agrícola Micaela Bastidas es capaz de cumplir a cabalidad con los requerimientos de 2 329 kg de forraje picado que la comunidad necesita por día para poder alimentar a todo el ganado vacuno. El índice de incidencia solar debido a la ubicación en el mapa de Micaela Bastidas,

favorece a la obtención de suficiente energía para alimentar al motor de picadora de 5HP y el controlador de carga. El sistema, en general, es capaz de suministrar hasta 6 528W de potencia; capacidad lo bastante grande como para poder ampliar el sistema a futuro. Mediante el sistema, se mejora la eficiencia y eficacia de las actividades realizadas en la comunidad; evitando el uso de motores diesel y eliminando los costos mensuales por el uso de estos; favoreciendo el ahorro de los pobladores y la recuperación de su inversión en 2 años y 4 meses; y por ende, promoviendo su desarrollo. El sistema es pensado en el bienestar y protección no sólo del ecosistema, sino también de las personas que operarían este sistema y los que están alrededor. Además, el sistema está orientado a facilitarles el trabajo sin requerir una preparación previa para poder hacerlo funcionar; está desarrollado y orientado para su uso práctico. La ubicación de ciertas localidades en el orbe, y sobre todo la posición del Perú en el mapa, deben contribuir al desarrollo de sistemas como este; que permitan obtener energía a partir de fuentes renovables, y por lo tanto, un desarrollo sustentable. Sistemas como el presentado, traen muchos beneficios y ventajas, tanto para los centros poblados donde se puedan implementar, como también para el ecosistema de estos lugares. Es una alternativa muy eficiente para el desarrollo de pueblos alejados, que con el apoyo de empresas privadas y el Estado podría convertirse en realidad (Lazo, 2009).

Las instalaciones de sistemas fotovoltaicos son un tipo especial de obtención de electricidad que puede ser utilizado con el objeto de reducir el impacto ambiental, así como un medio de entrega de energía al usuario que, lógicamente, sustituye el uso del servicio eléctrico de la compañía de distribución. Este documento consiste en un sistema que agrupa un conjunto de paneles solares fotovoltaicos, que generan electricidad a partir de los rayos del sol, cuya electricidad obtenida en DC (corriente directa) es procesada por medio de un inversor que mediante sistemas sincronizados

convierte la corriente continua en corriente alterna de 120 voltios idénticos a la red eléctrica ya existente. El objetivo es diseñar un sistema en el que la calidad de la energía eléctrica, generada por el sistema fotovoltaico, sea similar a la de la red, orientando a la reducción de costos por los servicios prestados y al mismo tiempo satisfaciendo las necesidades de maestros y estudiantes de las escuelas ubicadas en el Corredor Seco de la región nororiente de Guatemala. Esta energía es totalmente renovable y limpia, cuya instalación es muy sencilla, rápida. Además, el hecho más importante es que la fuente principal de la generación (como son los rayos del sol) es ilimitada, no producen ningún impacto ambiental y sobre todo, que son gratuitos. En conclusión: El material que se utilizará en el prototipo propuesto refleja que los costos de fabricación están en el intervalo de capital planificado para la realización del mismo. Realizado un análisis económico utilizar el prototipo de generación solar es una alternativa factible para sustituir la energía eléctrica local, sabiendo que la estación de carga cumple con dicha función y con el tiempo les permite ahorrar dinero. Con la implementación de la estación de carga de dispositivos móviles por medio de paneles fotovoltaicos, el consumo de energía eléctrica local o tradicional tendrá una reducción aceptable en kW/h por los servicios prestados, esto a raíz de buen manejo y cuidado de la estación de carga. Ecológicamente, el uso de la estación solar es un beneficio para las escuelas ubicadas en el sector seco en el nororiente del país y para Guatemala en general, ya que hoy en día se han desarrollado muchos proyectos y tecnología incentivando la conservación del medio ambiente sustituyendo la energía producida por combustibles por energía pura, dando como resultado un impacto positivo a la naturaleza. Para efectos de las escuelas de los corredores secos se necesita de una sola estación de carga por medio de paneles fotovoltaicos por escuela (Spiegeler, 2014).

2.2. GESTIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

El desarrollo económico ha venido acompañado de un fuerte crecimiento de la demanda de energía. No debe suponerse que el crecimiento económico conlleva necesariamente un incremento de la demanda de energía sin que se cuestionen sus implicaciones, que son graves en términos de agotamiento de recursos energéticos, impacto medioambiental y desigualdades entre los pueblos. Numerosos estudios y experiencias muestran que es posible desacoplar hasta cierto punto el desarrollo económico y el consumo de energía, a través de acciones de ahorro y mejora de la eficiencia energética que resultan ser rentables para el conjunto de la sociedad. Se entiende por gestión de la demanda de electricidad el conjunto de acciones cuyo fin es influir sobre el uso que los consumidores hacen de la electricidad, para producir los cambios deseados relativos al ahorro y al momento de su consumo, en el ámbito individual y en la curva de demanda agregada. Se recomiendan las siguientes líneas de actuación (Pop, 2015).

A) Acciones para facilitar la respuesta de la demanda a los precios de la electricidad e incorporar progresivamente en ellos el coste de las externalidades.

- Se ha de facilitar que las verdaderas señales económicas del suministro eléctrico (precio de la energía, cargos de garantía de suministro y por utilización de las redes) lleguen a los consumidores.
- Las tarifas reguladas, ya sean las integrales por defecto o las de acceso, han de transmitir en cada momento una aproximación a los precios de la energía.
- Debe diseñarse un marco regulatorio tal que las empresas comercializadoras estén incentivadas a proponer a los consumidores tarifas avanzadas que fomenten una adecuada gestión de la demanda.

- Los mercados de energía han de mantener la posibilidad de que la demanda participe en igualdad de condiciones con la oferta.
- La demanda ha de poder participar en la operación del sistema, individualmente o mediante empresas agregadoras.
- No debe perderse de vista el objetivo de largo plazo de internalizar progresivamente el coste de todos los impactos de la producción y consumo de electricidad en el precio de la misma. Mientras no se esté cerca de conseguir este objetivo, el grueso de las acciones de gestión de la demanda debe orientarse hacia las medidas de tipo B y C, que se describen a continuación.

B) Acciones de promoción del ahorro y la eficiencia energética en el consumo eléctrico.

- Debe desarrollarse un conjunto eficaz de programas de gestión de la demanda eléctrica basado en incentivos económicos financiados por la tarifa eléctrica. Se deben incrementar en el futuro las dotaciones destinadas a los consumidores domésticos, las Pyme y el sector de los servicios públicos.
- Debe buscarse la complementariedad con los objetivos y programas de actuación del Plan de Acción para Impulsar la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética. Se debe transponer con urgencia la Directiva 2002/91/CE sobre eficiencia energética de edificios, y se han de establecer determinadas exigencias a los fabricantes e instaladores de bienes de equipo de consumo.
- Es fundamental el establecimiento del etiquetado eléctrico a partir de sistemas oficiales de garantías de origen, porque introduce la diferenciación de productos dentro del mercado de la electricidad, permitiendo al consumidor elegir la

empresa comercializadora, no sólo en función del precio o la atención al cliente, si- no también considerando la calidad ambiental de la energía que oferta.

- Se debe tratar de aprovechar el interés de las empresas distribuidoras para que, en su faceta de comercializadores de clientes a tarifa, gestionen la demanda de estos consumidores conectados a sus redes o, como gestoras de la red de distribución, efectúen contratos de interrumpibilidad y de control de tensión.

C) Acciones transversales de apoyo a las dos categorías anteriores.

- En principio parece ventajosa una implantación gradual de contadores avanzados que permitan medidas horarias, controlar la potencia demandada a distancia y la comunicación bilateral con todos los consumidores.
- Deben desarrollarse los instrumentos sociales que promuevan la participación social en la gestión de la energía, intentando implicar al conjunto de la sociedad en la resolución de esos problemas.
- Debe promoverse la realización de actividades de I+D específicas en pro de la gestión de la demanda. (González, O., Pavas, A. & Sánchez, S., 2016)

2.2.1. ENERGÍA Y DESARROLLO SOSTENIBLE

Para poder adentrarnos en las relaciones existentes entre la energía y el desarrollo sostenible, es preciso tener una visión integral de lo que significa el desarrollo. En la “Declaración sobre el derecho al desarrollo”, que aprobó la Asamblea General de las Naciones Unidas en diciembre de 1986, se dice que “el desarrollo es un proceso global económico, social cultural y político, que tiende a la mejora constante del bienestar de toda la población y de todos los individuos sobre la base de su participación activa, libre y significativa en este desarrollo y en la distribución justa de los beneficios que de él se derivan”.

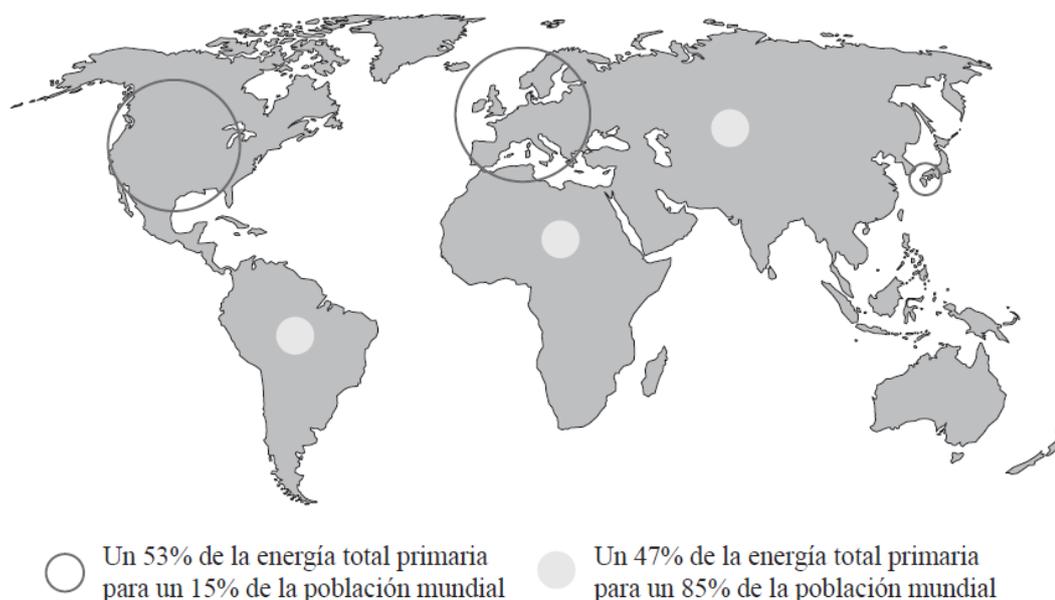


Figura 2.1 - Distribución del consumo de energía primaria.

Fuente: González, O., Pavas, A. & Sánchez, S., (2016), Cuantificación del Ahorro de Energía Eléctrica en Clientes Residenciales Mediante Acciones de Gestión de Demanda

El concepto de “desarrollo sostenible” fue formulado explícitamente en el informe presentado por la Comisión de Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas en 1987 (conocido como Informe Brundtland), como “el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades”. El desarrollo sostenible descansa sobre la aceptación de que el desarrollo es posible y necesario; de que debe hacerse perdurable y

viable en el tiempo, y de que la sostenibilidad debe ser triple: económica, social y ambiental.

Es indudable que la energía y los servicios que ésta proporciona son un factor esencial para el desarrollo de la humanidad, y que su disponibilidad contribuye muy positivamente al bienestar de los pueblos (O'Connor, 2016).

Sin embargo, la energía también conlleva aspectos negativos. Múltiples estudios, utilizando distintos enfoques y desde distintas perspectivas, realizados por instituciones de indiscutible solvencia y desde muy diversas perspectivas políticas, coinciden en afirmar que el actual modelo energético mundial es insostenible en términos económicos, sociales y medioambientales. Puede citarse como muestra el “Informe Mundial de la Energía” (PNUD, 2000), publicado conjuntamente en el año 2000 por el Consejo Mundial de la Energía, el Programa para el Desarrollo de las Naciones Unidas y el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas, que dice textualmente: “Aunque no parece haber límites físicos en el suministro mundial de energía durante al menos los próximos cincuenta años, el sistema energético actual es insostenible por consideraciones de equidad, así como por problemas medioambientales, económicos y geopolíticos que tienen implicaciones a muy largo plazo”. (González, O., Pavas, A. & Sánchez, S., 2016)

2.2.2. LA DEMANDA DE ELECTRICIDAD Y EL CONTEXTO ENERGÉTICO

La energía se ha convertido en uno de los factores productivos de mayor importancia, junto con la mano de obra y el capital, por lo que la evolución de su precio resulta fundamental a la hora de explicar determinados comportamientos de ciertas variables macroeconómicas, como la tasa de inflación (IPC) o el producto interior bruto (PIB), enormemente influidas por las variaciones del consumo energético.

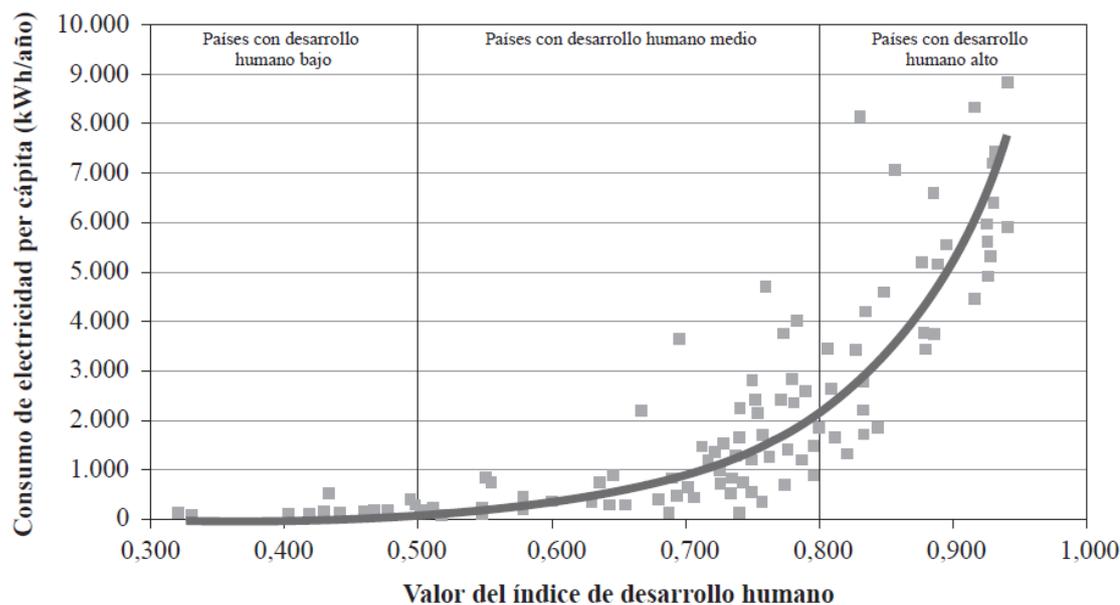


Figura 2.2 - Relación entre el índice de desarrollo humano y el consumo
 Fuente: La Energía en el siglo XXI., (2015)

La inflación implica el crecimiento simultáneo de los precios de los productos y de los factores productivos, aunque dado que el aumento de unos precios empuja a los demás en círculo vicioso, resulta difícil determinar en qué medida exacta un solo factor produce la variación de otro. Concretamente, la inflación de costes se debe al incremento de los costes de los inputs y los diferentes factores de producción, es decir, que es motivada por el incremento del coste de la mano de obra, los tipos de interés, los precios del suelo, de la energía, de las materias primas, etc. Pero la inflación de precios de los productos también origina inflación de costes. Ello implicaría que variaciones en el coste de cualquiera de estos factores tendrían repercusiones en la tasa de inflación, salvo que variaciones de signo contrario pudieran causar un efecto “neutralizador” sobre dicha tasa. Las tarifas integrales eléctricas se han reducido un 32% en términos reales durante el periodo 1997-2005. Si bien este hecho ha tenido sin duda un efecto positivo en el IPC, también supone al mismo tiempo un incentivo para aumentar el consumo de energía eléctrica. El consumo energético crece constantemente en el ámbito mundial, y las perspectivas a medio plazo son de un crecimiento mantenido. En los países

industrializados, las tasas de crecimiento energético resultan inferiores a las del PIB, lo que denota, en una primera aproximación, que la eficiencia en la utilización energética para generar una unidad de riqueza mejora (Isabella, 2016).

La economía impulsada especialmente por la inversión en construcción y el consumo privado, ha crecido en los últimos años por encima del crecimiento medio. Así, en 2003 (2002), la tasa de crecimiento del PIB fue del 2,4% (2%), frente al 0,7% (1,0%) de crecimiento medio de la Unión Europea. En consonancia con el crecimiento económico, la demanda energética primaria en el año 2003 tuvo un crecimiento respecto al año anterior del 2,5%, valor similar al medio de los últimos cinco años. Por consiguiente, en el caso español resulta haber un incremento del consumo de energía primaria superior al incremento del PIB. También se mantiene este efecto en la energía eléctrica: la relación entre la demanda de energía eléctrica y el PIB es directa y superior a la unidad. (La Energía en el siglo XXI., 2009)

2.2.3. BENEFICIOS QUE PUEDE APORTAR DE ELECTRICIDAD

Los beneficios teóricos que la gestión de la demanda puede ofrecer son de tipo privado y de tipo social. Los beneficios de tipo privado se refieren a la reducción de los costes de la electricidad y a la mejora en la seguridad del suministro para los consumidores. Estos beneficios se derivan de la reducción de los riesgos de gestión de la actividad de comercialización, de la disminución de las inversiones o de las congestiones y pérdidas técnicas en las redes de transporte y distribución, con lo que la operación del sistema es más segura y económica, y de la disminución de las necesidades de inversión de los generadores para cubrir las puntas del sistema y las reservas de potencia. No obstante, en un marco regulatorio orientado a la competencia, los beneficios privados de la gestión de la demanda son más difusos. Incluso podrían

considerarse negativos para la generación y para la comercialización, ya que el ahorro energético, la eficiencia en el consumo y la limitación de las puntas reducen el volumen de negocio de ambas actividades. Aunque no hay unanimidad en las cifras concretas de reducción de la demanda de energía que pueden obtenerse, las distintas estimaciones hablan de valores muy significativos que animan a dedicar un importante esfuerzo en esta línea. Se ha señalado en el “Informe Mundial de la Energía” (PNUD, 2000) que se malgasta el 30% de la energía y que los países industrializados podrían ahorrarse entre el 25%-35% de la energía primaria que consumen. De acuerdo con el Libro Verde, existe la posibilidad de ahorro del 18% de la energía que se consume y un potencial técnico del 20%. La Agencia Europea de la Energía (EEA, 2004) estima que existe un potencial para mejorar la eficiencia energética de forma económicamente rentable al menos en el 20% en la Unión Europea (UE-15) y aún más con la ampliación. En el propio documento de Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética se establece un potencial de ahorro de casi el 9% anual respecto al escenario base (Gregory, 2015).

De forma resumida, se pueden agrupar las principales aportaciones de los mecanismos asociados a la gestión de la demanda y el ahorro energético en el siguiente conjunto de beneficios:

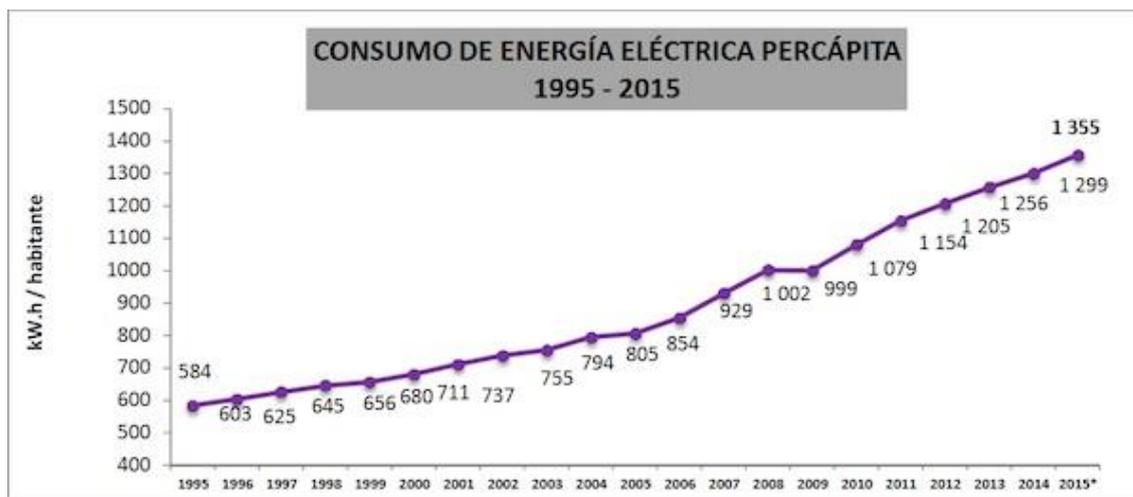


Figura 2.3 - *Consumo de energía eléctrica per cápita en el Perú.*

Fuente: La Energía en el siglo XXI., (2015)

- Es posible conseguir ahorros en las inversiones necesarias de generación. Es decir, en ocasiones es posible evitar realizar ciertas inversiones en generación si se consigue reducir la demanda. Ésta era la idea fundamental de la planificación integrada de recursos que se realizaba en los sistemas tradicionales. Se trata de una cuestión relacionada sobre todo con la potencia máxima que se requiere en el sistema, aunque no exclusivamente.
- Se pueden ahorrar inversiones en las redes de distribución. De nuevo, si se consigue reducir el crecimiento de la demanda, es posible que algunas de las inversiones en capacidad de red de distribución que se preveía realizar dejen de ser necesarias. Una parte de este ahorro está asociada al consumo de energía de cada agente, pero la mayoría del mismo tiene que ver con la capacidad máxima de la red; es decir, se trata sobre todo una cuestión de la potencia máxima que se requiere del sistema.
- Por otra parte, también es cierto que aumentar la elasticidad de la demanda puede ayudar a controlar el poder de mercado. En efecto, si una parte de la demanda deja de consumir cuando los precios son elevados, las posibilidades de las grandes empresas de subir los precios se reducen, ya que, de alguna forma, la

demanda actúa como si fuera un competidor más, aumentando la competencia del mercado. Teniendo en cuenta que la demanda generalmente sólo reacciona a precios bastante altos, esto sólo se activa en situaciones de emergencia, por lo que, de nuevo, se trata de un ahorro asociado fundamentalmente a la potencia.

- Además, las medidas sobre la demanda pueden hacer que se reduzca el consumo en general. Esto es muy útil cuando se tienen en cuenta los criterios medioambientales asociados a la contaminación que generan las centrales energéticas. Lo anterior es cierto, tanto desde el punto de vista de cumplir con los requisitos explícitos asociados al protocolo de Kioto, como desde el punto de vista de las externalidades no incluidas en el precio de la energía y el problema de la sostenibilidad en general. En este caso, no se trata de un ahorro asociado a la máxima potencia que se pide al sistema, sino a la energía total consumida por los clientes, sin diferenciar en qué hora se utiliza la electricidad.
- Por último, la demanda puede realizar algunas funciones asociadas a los servicios complementarios. De hecho, la posibilidad de que algunos clientes reduzcan su consumo cuando la demanda agregada del sistema es mayor (y conseguir los ahorros mencionados en los tres primeros puntos de esta lista) puede ser considerada una reserva de operación, si existen los mecanismos técnicos adecuados para que la demanda reaccione con la suficiente rapidez. Además de esto, existen beneficios asociados al control de tensiones y la potencia reactiva, en los que claramente la demanda podría jugar un papel destacado, modulando su consumo de reactiva a las necesidades del sistema.

Las acciones posibles por el lado de la demanda de electricidad son muy numerosas y diversas en sus planteamientos. Además, los mecanismos concretos que se pueden utilizar son muy dependientes del marco regulatorio vigente, de la estructura

organizativa de las empresas, de la estructura de la sociedad en términos demográficos, y de los modelos de urbanismo, de transporte y otros, entre los que destacan los estilos de vida y los niveles culturales. En particular, en un marco regulatorio en competencia, las posibilidades de actuación de los consumidores se refieren a su participación, mediante sus ofertas de adquisición, en la formación de los precios del mercado, reduciendo su consumo habitual o desplazándolo a los momentos de menor precio, y participando en el suministro de servicios complementarios, en la operación del sistema, mediante la interrumpibilidad parcial o total de su consumo, o mediante el control de tensión. El consumo total de energía necesario para obtener un determinado servicio (p.e. iluminación de un edificio) o producto (p.e. cemento, acero o aluminio) es el resultado de multiplicar el volumen deseado de este producto o servicio por el consumo energético necesario por cada unidad del servicio o producto. Si se centra la atención en el consumo de energía final, entonces interesan tanto las acciones encaminadas a reducir el consumo energético específico del uso de la energía (p.e. utilización de lámparas de bajo consumo o el desplazamiento a las horas nocturnas y festivos de la producción de acero, aluminio o cemento) para un servicio o producto final dado (mejora de la eficiencia energética), como las estrategias encaminadas a reducir (p.e. iluminación “inteligente” de un edificio o interrupción voluntaria de un determinado consumo eléctrico por su elevado coste) la demanda de productos y servicios energéticos (ahorro de energía), manteniendo un deseable desarrollo económico y social (Boxwell, 2017).

Los indicadores que pueden describir mejor la efectividad de las acciones de respuesta en la línea del ahorro y la eficiencia energética son los que muestran, por una parte, la evolución en el consumo total de energía, ya sea primaria o final, y, por otra, la evolución del consumo de energía per cápita y de la intensidad energética, que en parte caracterizan la eficiencia energética. Pero existen otros indicadores, que son los que van

a hacer o no posible los anteriores, como son los niveles de información, conocimiento, conciencia y disposición al cambio de los agentes sociales activos (la sociedad, las organizaciones sociales, empresariales y las administraciones públicas). Es también muy relevante conocer cuál es el verdadero potencial existente de ahorro (p.e. por mejores pautas de consumo) y de mejora de eficiencia (p.e. en un electrodoméstico) en cada uno de los sectores y actividades más relevantes desde el punto de vista del consumo de electricidad. Igualmente relevante, es conocer las barreras culturales y mentales existentes, y cómo superarlas, para el ahorro y la eficiencia energética. (La Energía en el siglo XXI., 2009)

2.3. SISTEMA DE GESTIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.

La energía eléctrica, el agua o el gas, con sus precios en constante aumento y una mayor sensibilidad frente a cuestiones medioambientales, son recursos cada vez más valiosos. Esto representa un desafío considerable para los sectores en donde incide de manera decisiva el manejo de un gran volumen de energía, la máxima disponibilidad y una reducción permanente de los costos: las industrias de procesos y las manufactureras, así como las construcciones para fines determinados. En estos sectores el tema ahorro de energía es cuestión permanente a tratar. Pero, ¿dónde hay que actuar? ¿Qué medidas son necesarias para aprovechar mejor el mayor potencial? Y una vez implementada la medida correspondiente, ¿cómo se reconoce y documenta su eficacia? Estas preguntas tienen una única respuesta: con nuestro sistema de gestión de la energía eléctrica.

El sistema de gestión de la energía eléctrica Siemens le ofrece soluciones innovadoras para un uso optimizado de la energía que, con un potencial de ahorro de hasta un 20%, permitiendo reducir notablemente sus costos energéticos. Este sistema

global ofrece la máxima transparencia en el consumo y en la calidad de la energía, así como la seguridad de una distribución de la energía eléctrica con la mayor disponibilidad. La captación precisa de datos de los aparatos de maniobra, protección y medición como, por ejemplo, el multimedidor SENTRON PAC3200, constituye la base ideal para las medidas de optimización. SIMATIC WinCC powerrate y SIMATIC PCS 7 powerrate, son paquetes adicionales de software para la gestión de energía eléctrica integrados en TIA (Totally Integrated Automation); permiten representar y evaluar con facilidad los valores energéticos, con la asistencia de numerosas funciones. De esta manera no sólo obtendrá una representación transparente del consumo de energía sino también la asignación a la cuenta costeadora que origina el gasto y un manejo automático de las cargas. Sistema de gestión de la energía eléctrica (Milenkovic, M. & Amft, O., 2013)

2.3.1. CONTROL DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA

Siemens ofrece un espectro universal único para toda la distribución de energía eléctrica de baja tensión y todo esto de un sólo proveedor. En este mercado nuestro portafolio es el más amplio del mundo. Comprende tableros de distribución y mando, sistemas distribuidores de barras, aparatos de maniobras, de protección y de medición, así como soluciones inteligentes para la gestión de la energía eléctrica. La universalidad, modularidad, e inteligencia de nuestros componentes ofrece innumerables ventajas a lo largo de toda la vida útil de sus instalaciones. Nuestros productos y sistemas de primera categoría son parte integrante de TIP (Totally Integrated Power), nuestra plataforma tecnológica para una distribución de energía eléctrica universal, rentable y segura en construcciones industriales y para fines determinados. Nuestro portafolio se completa con una amplia oferta de servicios

técnicos. Quédese tranquilo, cuando se trata de su distribución de energía eléctrica, ;nosotros le prestamos nuestra asistencia. (Milenkovic, M. & Amft, O., 2013)

2.3.2. FASES DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE ENERGÍA.

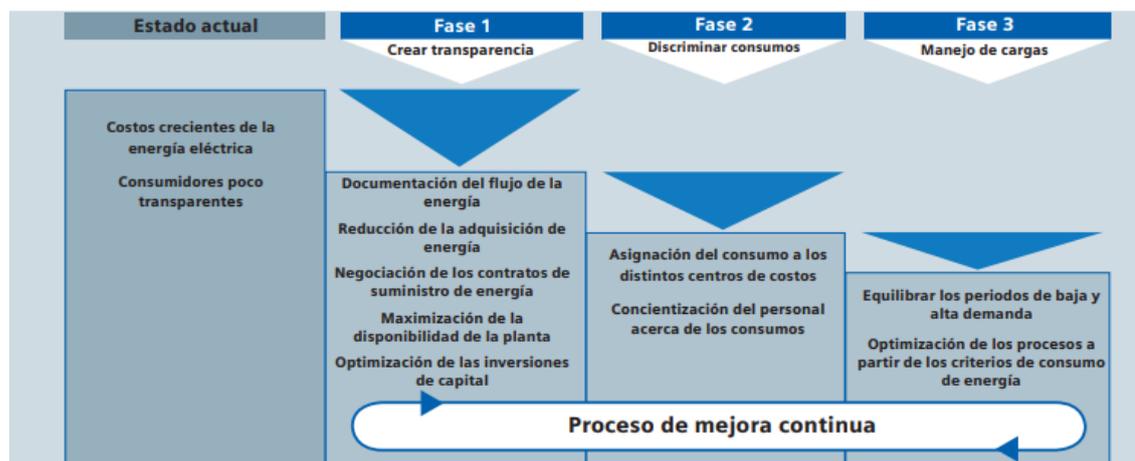


Figura 2.4 - *Fases del sistema de gestión de energía.*

Fuente: González, O., Pavas, A. & Sánchez, S., (2016), Cuantificación del Ahorro de Energía Eléctrica en Clientes Residenciales Mediante Acciones de Gestión de Demanda.

Con el sistema universal de gestión de la energía eléctrica de Siemens podrá optimizar en forma sencilla su presupuesto en materia energética y en tres fases reducir drásticamente los costos de la utilización obteniendo resultados importantes a cada paso. En primer lugar, obtiene la base para mejorar su eficiencia energética: un registro constante de los datos le permite alcanzar la máxima transparencia en la circulación de la energía. La mayor claridad en los consumos también permitirá reconocer y aprovechar mejor los potenciales de ahorro de energía existentes.

En la segunda fase se presentan los datos de los consumos asignados a los consumidores. Esto le muestra dónde se consume qué cantidad de energía. Este conocimiento le permite incrementar la conciencia por los costos en su empresa. En el último paso podrá planificar y controlar perfectamente la carga energética para evitar

con toda seguridad los costosos picos en el consumo y aprovechar al máximo los recursos no utilizados. (González, O., Pavas, A. & Sánchez, S., 2016)

2.3.3. RESUMEN DE VENTAJAS DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE ENERGÍA.

Reducción de los gastos de explotación:

- Identificación de los equipos que consumen energía eléctrica en forma intensiva a fin de implementar medidas que mejoren la eficiencia energética.
- Asistencia a los compradores de energía eléctrica suministrando perfiles de demanda históricos y modelos de consumos de energía eléctrica.
- Optimización de los gastos de capital invertidos en los proyectos de ampliación de las instalaciones por medio de la localización de reservas ocultas en la distribución de energía eléctrica.
- La asignación exacta de los consumos a las cuentas costeadoras mejora la conciencia por los costos en las diferentes secciones.
- La limitación de los picos de carga permite obtener una reducción en el precio por potencia consumida cuando se negocian los contratos de suministro de energía eléctrica.
- Se eliminan los costos adicionales que implica el manejo de las cargas.

Aumentando la disponibilidad de las instalaciones

- El reconocimiento inmediato y automático de condiciones críticas (por ejemplo, protocolos de alarmas y eventos) permite incrementar las horas de operación.

- La detección temprana de los límites de capacidad de la distribución de energía eléctrica evita problemas de sobrecargas.
- La supervisión y el análisis continuos aseguran la calidad de la energía eléctrica.
- El análisis del uso de los componentes de la distribución de la energía eléctrica permite optimizar los costos del mantenimiento. Fuente: La Energía en el siglo XXI., (2015)

2.3.4. GESTIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA BASADA EN SIMATIC.

Con nuestra gestión de la energía eléctrica le ofrecemos una solución única, basada en SIMATIC e integrada completamente en TIA (Totally Integrated Automation). Con un portafolio con el sistema de gestión de la energía eléctrica basado en SIMATIC podrá:

- Beneficiarse con la integración completa de su distribución de energía eléctrica en el panorama de su automatización.
- Operar en forma global su gestión energética porque todas las fuentes de energía se soportan óptimamente.
- Recibir continuamente evaluaciones y posibilidades de análisis de sus consumos de energía.
- Sobre la base de la transparencia, crear los fundamentos para lograr un incremento persistente y el control de la eficiencia energética en su empresa.

La plataforma de automatización de SIMATIC –única en su clase– y los aparatos de campo inteligentes ofrecen una gestión de la energía eléctrica innovadora a los sectores de la automatización de los procesos y de la fabricación, para que puedan aprovechar un espacio de acción adicional para incrementar la eficiencia y reducir los costos. Aquí el enfoque tecnológico de un sistema de gestión de la energía eléctrica basado en

SIMATIC es siempre el mismo: los datos de la energía se miden por medio de sensores y actuadores inteligentes, se recopilan y elaboran con SIMATIC PCS 7 / SIMATIC WinCC, para luego ser almacenados en PCS 7 estándar o archivos WinCC. Los datos se visualizan en puestos de operación HMI SIMATIC y también se podrán realizar evaluaciones adicionales (Gregersen, 2014).

Aproveche las ventajas que le ofrece un sistema basado en SIMATIC único en su clase:

- El enfoque sistémico integrado le brinda una notable reducción de costos: se pueden aprovechar componentes de automatización existentes tales como controladores, puestos de operación y estructuras de bus.
- La tecnología uniforme sólo requiere un reducido gasto de ingeniería con mayor aceptación.
- Se evitan almacenamientos redundantes de datos e islas de información.
- Se aseguran informaciones consistentes tales como sello horario y secuencia de eventos.
- El acceso directo al estado de la distribución de energía eléctrica y la orientación del proceso hacia condiciones energéticas optimizadas ofrece la máxima flexibilidad.
- Notable ahorro de gastos y costos, dada la gran cantidad de valores energéticos provistos por las Soluciones de Automatización (S7 / PCS 7).
- El aprovechamiento de interfaces estándar como, por ejemplo, las de SIMATIC IT permiten evitar, en gran medida, los trabajos adicionales de integración.

2.3.5. GESTIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

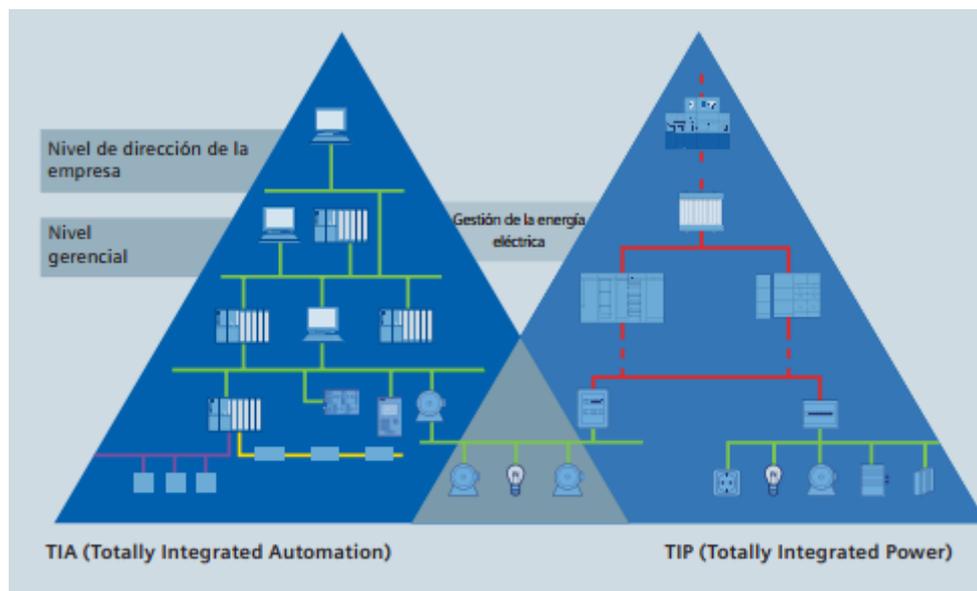


Figura 2.5 - *Automatización y distribución de la energía eléctrica optimizadas.*
Fuente: Milenkovic, M. & Amft, O., (2013), Recognizing Energy-related Activities Using Sensors Commonly Installed in Office Buildings.

Con la gestión de la energía de Siemens invertirá en un sistema innovador y de futuro seguro. Sobre la base de tecnología industrial, satisface requerimientos especiales de calidad y disponibilidad porque como integrante de TIA (Totally Integrated Automation) y TIP (Totally Integrated Power) usted podrá aprovechar la universalidad de los productos y sistemas, el uso de componentes estándar, de la aplicación de una filosofía de operación uniforme y de un gasto energético reducido. En una palabra: con el sistema de gestión de la energía eléctrica de Siemens podrá aprovechar todo el potencial de optimización de una solución universal. Aplicación flexible: componentes potentes Los productos con capacidad de comunicación de los programas SENTRON y SIRIUS como, por ejemplo, el PAC3200 de SENTRON, el sistema de gestión de motores SIMOCODE pro o los interruptores automáticos de potencia SENTRON 3WL pueden integrarse en forma sencilla en el sistema de gestión de la energía de nivel superior. Así, por ejemplo, el módulo de valores de medición SIMOCODE pro de SIMATIC PCS 7 con la potencia activa eléctrica suministra las magnitudes de entrada

para los módulos de registro de la energía de SIMATIC PCS 7 powerrate. También pueden integrarse fácilmente aparatos de media tensión o para la medición de magnitudes no eléctricas. Incluso se ponen a disposición los datos de aparatos de campo sin capacidad de comunicación por medio de la conexión al bus PROFIBUS a través de módulos periféricos como los SIMATIC ET200. Los datos de los consumos de otras clases de energías podrán registrarse aplicando las técnicas de medición correspondiente y los periféricos centralizados o descentralizados de SIMATIC S7. (Milenkovic, M. & Amft, O., 2013)

2.3.6. INNOVACIONES DE LA GESTIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

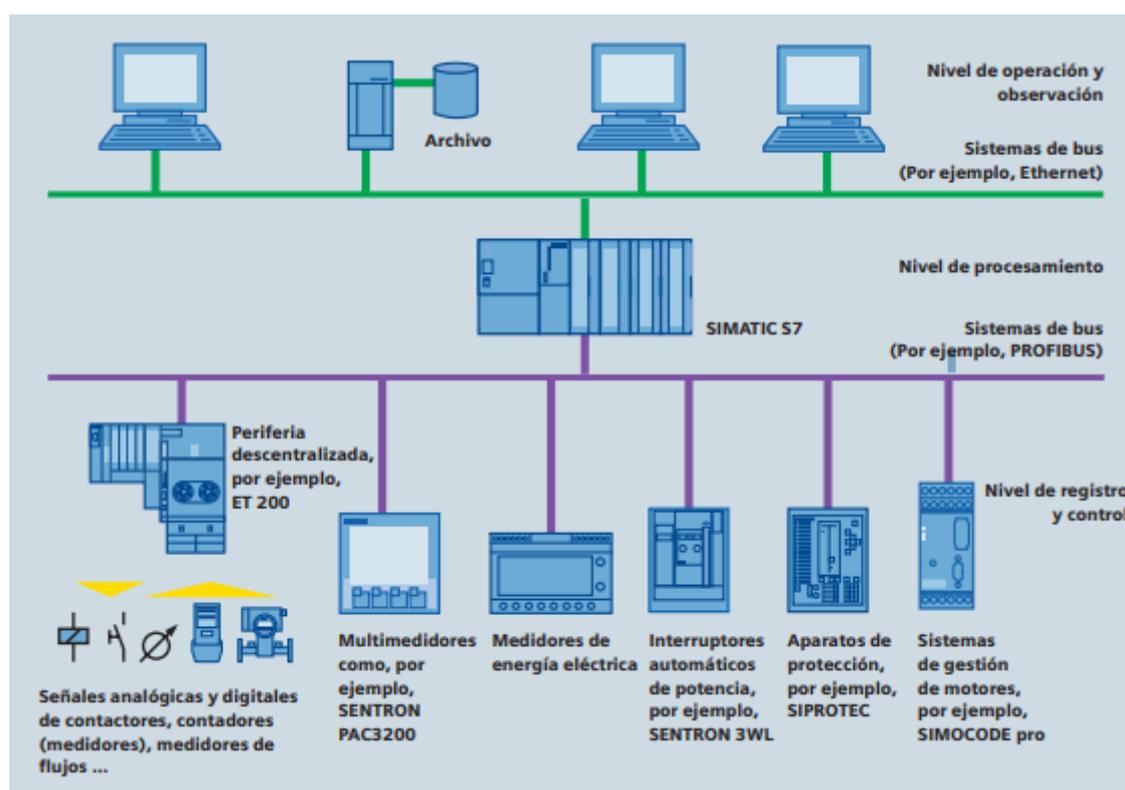


Figura 2.6 - Diagrama de las aplicaciones del sistema.
Fuente: Milenkovic, M. & Amft, O., (2013), *Recognizing Energy-related Activities Using Sensors Commonly Installed in Office Buildings*.

Con los paquetes adicionales de software SIMATIC PCS 7 powerrate y SIMATIC WinCC powerrate, basados en una acreditada tecnología industrial podrá

obtener transparencia y control en su distribución de energía eléctrica y en los costos tal como ya lo acostumbraron sus procesos tecnológicos que aplican SIMATIC WinCC y PCS 7. Una gran cantidad de confiables funciones le permiten registrar en forma continua, archivar, procesar y asignarlos a los diferentes consumidores, al igual que supervisar los picos del consumo. Todo esto posibilita adquirir la energía eléctrica con tarifas convenientes y con ello, reducir sus costos energéticos y de explotación. La transparencia en su distribución de energía eléctrica es la base para toda optimización en materia energética. Desde la alimentación hasta cada consumidor, SIMATIC PCS 7 powerrate y SIMATIC WinCC powerrate le señalan de manera perfecta sus consumos de energía.

Crear transparencia en materia energética es la base para futuras optimizaciones. El registro continuo de la energía y la evaluación centralizada le ofrecen una amplia información de la circulación de la energía. Además, se aclara la relación entre el desarrollo del proceso y los consumos. En este proceso se aplican los paquetes adicionales de software de múltiples formas: SIMATIC PCS 7 powerrate y SIMATIC WinCC powerrate no sólo pueden utilizarse para energía eléctrica sino para todos los demás portadores de energía como, por ejemplo, agua, gas, calor o aire comprimido.

Mejor informado: determinación y visualización de los datos de los consumos ¿Sabe cuánta energía se consume en cada sector de su instalación? Ambos paquetes adicionales satisfacen este requerimiento desde múltiples puntos de vista. Podrá visualizar “online” todos los valores energéticos registrados en pantalla según plantillas/faceplates predefinidas e introducir directamente en el sistema los datos de las energías medidas por contadores sin capacidad de comunicación. Para registrar los valores energéticos le ofrecemos el multimedidor SENTRON PAC3200 que por medio

de controladores prefabricados puede integrarse sin discontinuidades en el universo de TIA (Totally Integrated Automation).

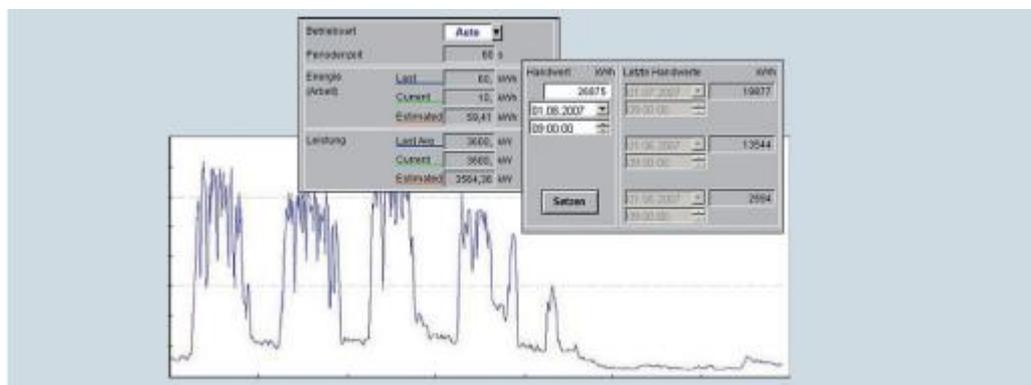


Figura 2.7 - La distribución de energía eléctrica, valores actuales y curvas del consumo.
Fuente: Milenkovic, M. & Amft, O., (2013), *Recognizing Energy-related Activities Using Sensors Commonly Installed in Office Buildings*.

Los datos energéticos no sólo se visualizan “online”, también se almacenan como valores promedio o de trabajo. Para adaptarlos a los diferentes medios se los podrá formar y archivar con diferentes barridos de tiempos. Los valores promedio podrán visualizarse como curvas para facilitar la comparación entre sí. Sobre la base de los consumos actuales determina y representa en pantalla una tendencia al finalizar cada periodo para realizar la supervisión predictiva de los límites de potencia. De esta manera podrán reconocerse inmediatamente las tendencias que eventualmente puedan exceder los límites. Además, podrá decidir si desea trabajar con valores de trabajo o de potencia, ambas maneras son posibles.

Procesamiento eficiente de datos: interfaces y función exportación La integración sin discontinuidades en TIA permite aprovechar sin problemas todos los mecanismos estándar existentes, tales como avisos o una vinculación a SIMATIC IT. Las interfaces abiertas le brindan, además, numerosas posibilidades para adaptaciones específicas. Así, por ejemplo, tiene a disposición una función para el cálculo de la entalpía térmica. La exportación a Excel ofrece otra opción para el sencillo

procesamiento posterior de los datos: con sólo predeterminar el intervalo de tiempo y las variables a exportar, dispondrá inmediatamente de todas las magnitudes de medición para realizar en forma simple el procesamiento posterior requerido. (Milenkovic, M. & Amft, O., 2013)

2.3.7. GESTIÓN DE CUENTAS COSTEADORAS

La asignación automática de la energía consumida y los costos a los sectores correspondientes de la empresa le brinda variadas posibilidades. Por una parte, la transparencia en la asignación de los costos energéticos y, por la otra, una formidable base para las actividades de control para el seguimiento de las medidas destinadas a economizar energía.

Saber cuánta energía se consume en cada sector y la asignación de costos directamente al consumidor presupone una estructura de costos en la que cada sector tiene su cuenta costeadora. Con los macros Excel predefinidos de SIMATIC WinCC powerrate y SIMATIC PCS 7 powerrate podrá asignar en forma sencilla sus cuentas costeadoras a los puntos de medición de consumos correspondientes. Para obtener una adaptación óptima al proceso existe la posibilidad de asignar esos puntos de medición en forma porcentual a una cuenta costeadora o interrelacionar las mediciones por medio de una fórmula definida libremente. Aquí también podrán tenerse en cuenta datos de consumos ingresados en forma manual.

Manejo más rentable del presupuesto no sólo el consumo puro de energía tiene importancia, los costos emergentes del mismo adquieren un significado decisivo. En los macros Excel de SIMATIC WinCC powerrate y de SIMATIC PCS 7 powerrate podrá predefinir tarifas altas, bajas y de feriados para calcular los costos de la energía consumida y asignarlos a cada cuenta costeadora.

Evaluación confortable sobre la base de los datos de consumos exportados, las cuentas costeadoras proyectadas y las tarifas, SIMATIC WinCC powerrate y SIMATIC PCS 7 powerrate determinan en Excel el consumo total y los costos de la energía para un periodo predeterminado. Aquí dispone de dos informes estándar: con forma de tablas o de gráficos de barras. Con Excel como herramienta estándar se podrán adaptar o ampliar los informes específicamente para cada usuario. (Milenkovic, M. & Amft, O., 2013)

2.3.8. GESTIÓN DE CARGA

La mayoría de los contratos celebrados con las empresas de distribución de la energía eléctrica contienen no sólo estipulaciones relacionadas con el consumo en kWh sino también cláusulas que obligan a respetar la potencia promedio máxima / periodo que, en el caso de la energía eléctrica es, en general, de 15 minutos. En el caso que se sobrepasen estos límites podrán aplicarse drásticas recargas en los costos. Por lo tanto, la supervisión de sus límites de potencia representa un aspecto muy importante para el cumplimiento de su presupuesto en materia de energía eléctrica.

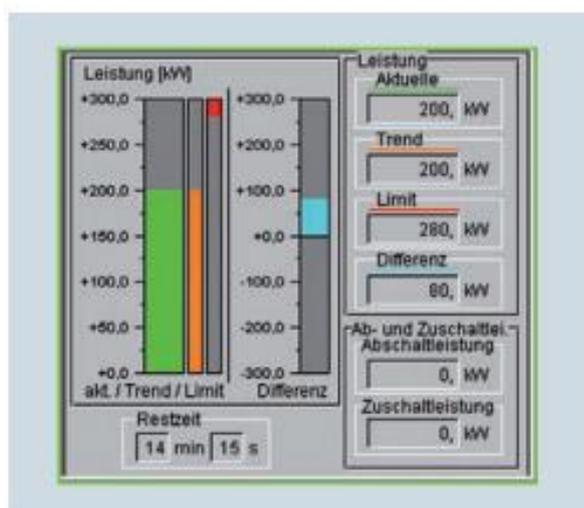


Figura 2.8 - Vista general de datos esenciales para el manejo.

Fuente: Milenkovic, M. & Amft, O., (2013), *Recognizing Energy-related Activities Using Sensors Commonly Installed in Office Buildings*.

Cálculo de tendencias y su comparación Se debe determinar la tendencia hacia el final del periodo de registro como base para el mantenimiento de los límites de potencia dentro de este periodo. Esta tendencia se compara con los límites de potencia prefijados y en el caso que se pronostique un sobrepaso de los límites recibirá una advertencia o alarma en la lista de avisos de WinCC. Esta información le permitirá, por una parte, intervenir en el proceso en forma manual para evitar un sobrepaso del límite y, por la otra, una indicación del grado en el que el proceso realmente aprovecha los límites predefinidos.

Supervisión segura: gestión automática de cargas Además del cálculo de tendencias y de la generación de avisos ante un eventual sobrepaso de los límites, también tiene la posibilidad de manejar directamente a sus consumidores, es decir, sobre la base de una lista de prioridades predeterminadas el sistema genera señales de liberación o de bloqueo. Estas señales originan una desconexión directa del consumidor o se los reconecta en la forma correspondiente. Para liberarlo de maniobras innecesarias dispone de diferentes parámetros para adaptar la gestión de las cargas a las características específicas del proceso y de los consumidores, de esta manera podrán determinarse tiempos de estabilización, por ejemplo, tiempos de desconexión mínimos / máximos, así como tiempos de conexión mínimos.

Manejo confortable: realización sencilla del proyecto y visualización clara Las pantallas suministradas le permitirán adaptar fácilmente su gestión de cargas a las características de su proceso. Las pantallas de conformación clara le muestran siempre el estado actual de la gestión de cargas y le ofrecen la posibilidad de modificar directamente por medio de la pantalla los parámetros más variados como, por ejemplo, los límites de potencia y las prioridades de los consumidores. Además, se indica si

todavía quedan suficientes consumidores para efectuar eventuales intervenciones por parte de la gestión de las cargas.

Resumen de las ventajas que brindan SIMATIC WinCC powerrate y SIMATIC PCS 7 powerrate:

- La mayor transparencia en la circulación de la energía permite reducir los costos de explotación de su instalación.
- La asignación de costos a cada consumidor incrementa la conciencia hacia los costos energéticos.
- La supervisión de los límites de la potencia acordados en el marco del contrato de adquisición de energía eléctrica evita los elevados recargos o multas previstos por sobrepasar esos límites.
- Los componentes sistémicos certificados y conformes con TIA ofrecen seguridad a la aplicación. (Milenkovic, M. & Amft, O., 2013)

2.4. EL CONTROLADOR FUZZY

Un controlador fuzzy, denominado también difuso o borroso, emplea ciertas reglas para procesar las variables de entrada con el fin de generar una señal de control que actúa sobre el proceso (planta o proceso) a controlar. En varios casos, estas señales de entrada son el error y su derivada.

El sistema de control fuzzy emplea un procesamiento cíclico que comprende tres grandes partes: fuzzification, evaluación de reglas y defuzzification, temas que se tratan en la siguiente sección. Para verificar el método de diseño propuesto en este Capítulo, se desarrolla una aplicación: control fuzzy de la posición angular de un manipulador de un grado de libertad.

El controlador Fuzzy lleva a la planta a cero de manera satisfactoria, la respuesta presenta un pequeño sobre-impulso, corto tiempo en alcanzar a la referencia ($ref = 0$), estado estacionario oscilatorio de muy pequeña amplitud, si la salida del proceso es captadora de ruido, este tiene poca incidencia en las acciones de control en contraste con controlador PID que es muy susceptible al ruido de alta frecuencia (debido a la parte derivativa). La respuesta del sistema en general es comparable con la respuesta del sistema con controlador PID.

Mientras que, en un controlador convencional, por ejemplo, PID, el algoritmo de control procesa las señales de entrada, en el controlador fuzzy, el procesamiento se basa en el cumplimiento de ciertas reglas que se aplican a las entradas. Dicho procesamiento fuzzy está mucho más cercano al razonamiento del experto humano. Por esta razón, tales reglas son específicas para cada aplicación.

El procesamiento en un controlador fuzzy es cíclico, como también lo es en los controladores convencionales. Así, los valores de las variables de entrada son evaluadas por las reglas, lo cual sirve para una toma de decisión relacionada con los cambios a realizar en las variables de salida. Una vez actualizadas las mismas, éstas ejercerán un cambio sobre la salida controlada de la planta o proceso. Luego, con nuevas variables de entrada, se repite el ciclo.

Con el propósito de desarrollar un controlador fuzzy, primero se debe de identificar el problema. Esto es, definir los objetivos de control para los cuales desarrollaremos tal controlador. Luego debemos de diseñar el sistema de control fuzzy. Para ello podemos usar el sistema de control a lazo cerrado mostrado en la Fig. 2.9, donde el controlador convencional del sistema está siendo reemplazado por un controlador fuzzy. Tal controlador posee tres partes:

El fuzzyficador (palabra derivada del inglés fuzzifier), en donde la entrada al controlador se convierte en variables de entrada tipo fuzzy, usando para ello funciones de membresía.

El conjunto de reglas fuzzy, en donde las variables fuzzy de entrada son evaluadas para generar variables fuzzy de salida. Estas últimas pasan luego al defuzzyficador (palabra derivada del inglés defuzzifier).

El defuzzyficador, el cual toma como base las variables fuzzy de salida para generar un conjunto de valores de salida: las señales de control.

Las funciones de membresía poseen una forma geométrica característica. Por ejemplo pueden ser de forma triangular, de forma trapezoidal, o de alguna forma arbitraria, siempre que permita ser descrita y evaluada mediante una función.

El conjunto de reglas fuzzy son las sentencias del tipo "if/then" que se definen en conformidad con los objetivos de control. Tales reglas constituyen la clave del sistema de control fuzzy, ya que ellas deciden el comportamiento del sistema para diferentes entradas.

Con el fin de generar las señales de control, el defuzzyficador puede hacer uso de varios métodos, todos relacionados con el procesamiento de las variables fuzzy para generar señales que se puedan implementar en tiempo real. Por ejemplo, es común tomar el promedio ponderado de las variables ya procesadas con las reglas fuzzy. Esta metodología será aplicada a un manipulador robótico de un grado de libertad, el cual se describe en detalle en la sub-siguiente sección.

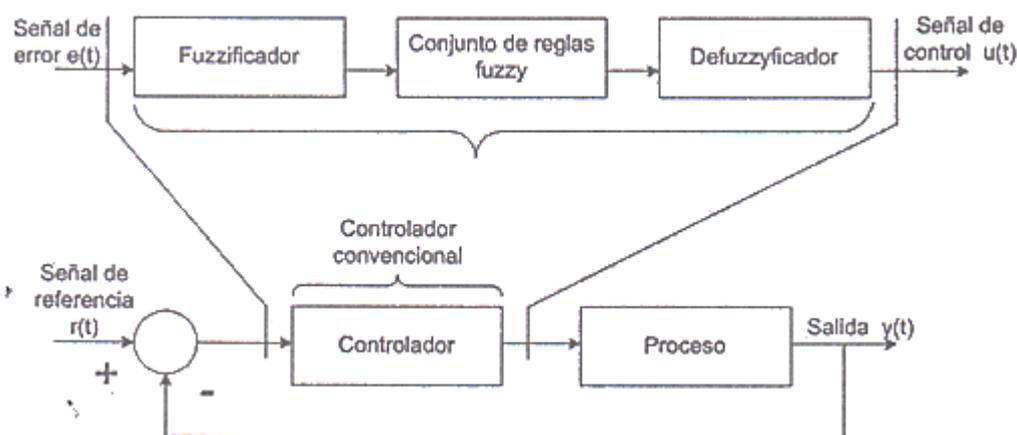


Figura 2.9 - Sistema de control a lazo cerrado, donde el controlador convencional se reemplaza por un controlador fuzzy.

Fuente: Rojas, 2012.

La mayor ventaja del control difuso es que provee una eficiente y efectiva metodología para desarrollar en forma experimental un controlador no lineal sin usar matemática avanzada. Hacer un controlador difuso requiere de una descripción lingüística de la ley de control, tal descripción es capturada por los conjuntos difusos, los operadores difusos, y las reglas difusas. El controlador no necesita explícitamente del modelo del proceso a controlar. En muchas situaciones no lineales, el problema de

control puede usualmente ser solucionado de manera más efectiva y eficiente que el control clásico.

Se puede trabajar tanto con sistemas SISO como MIMO sin usar matemática sofisticada, desde el punto de vista de los sistemas no lineales, esta es una gran ventaja.

Se cuenta con la manipulación de varias variables del controlador, como ser, conjuntos difusos, factores de escalamiento, etc., junto con simulaciones y el método de prueba y error, se puede desarrollar un controlador no lineal con buenas prestaciones. Esta es una ventaja importante desde el punto de vista industrial. Se cuenta con software especializado para desarrollar controladores difusos, Matlab Fuzzy Logic ToolboxTM, Matemática Fuzzy LogicTM, FuzzyTechTM, TILShellTM, y SieFuzzyTM.

El control no difuso es en esencia no lineal y no cuenta con herramientas de análisis y diseño muy sofisticadas, principalmente debido a la complejidad matemática, esta es mayor si los conjuntos y demás partes de controlador son más complejas. Las herramientas disponibles en sistemas no lineales son un punto de partida para el desarrollo matemático de los sistemas difusos.

Ningún software matemático genera la estructura del controlador, de ahí que el análisis de estabilidad (o de cualquier otra propiedad) es muy complejo y solo está basado en que la implementación del conocimiento genere un sistema estable. La estabilidad no es garantizada desde el punto de vista matemático, si puede serlo desde el punto de vista experimental.

El ajuste de los parámetros del controlador (factores de escalamiento) no cuenta con técnicas tan difundidas como es el caso de los controladores PID. La construcción de un controlador difuso es más parecido a un arte que a una ciencia. La cantidad de

parámetros en un controlador difuso es mucho mayor que en un PID, hay una gran variedad de definición de operadores, formas de conjuntos, etc., peor aún, no hay una clara relación entre ellos.

El procedimiento de diseño y ajuste del controlador puede requerir de mucho trabajo, la herramienta de simulación de prueba y error es frecuentemente utilizada.

Esta tecnología es efectiva en algunas aplicaciones, pero en otras no, como p.ej., ingeniería nuclear, aeroespacial, biomédica, etc. De todos modos, se investiga en estos campos.

2.4.1. DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL FUZZY

En esta sección se diseña un sistema de control fuzzy para controlar la posición angular del manipulador de un grado de libertad (MRL), cuyo modelo dinámico, para propósitos de simulación, se determina en la siguiente subsección.

2.4.2. MANIPULADOR ROBÓTICO DE 1GDL

La Figura 2.10 muestra al Manipulador Robótico de 1GDL, mientras que la Figura 2.11 ilustra su esquema de estudio. Este sistema se compone de un subsistema eléctrico y un subsistema mecánico. El subsistema eléctrico comprende un servomotor DC con decodificador de posición (encoder en inglés) incorporado, el cual se emplea para medir la posición angular del brazo del manipulador en cada instante de tiempo. El servomotor posee una caja de engranajes para reducir la velocidad en su eje de salida; de esta manera se facilita el control de posición del manipulador

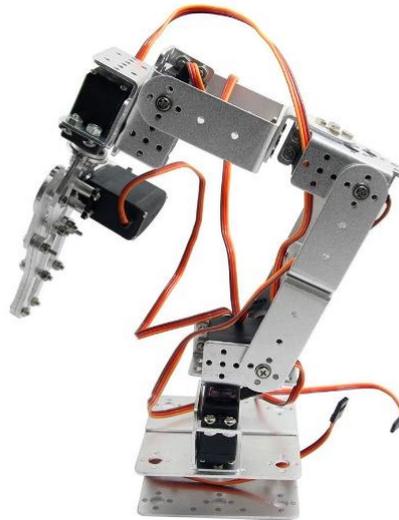


Figura 2.10 - Un Manipulador Robótico 6GDL.

Fuente: electropro.pe.

El subsistema mecánico consiste de un brazo accionado por el torque rotacional generado en el eje de salida del servomotor DC (el actuador). En el extremo libre del brazo robótico se puede acoplar un efector final, el cual puede ser una pinza para asir objetos, una herramienta para soldar, una herramienta para pintar, etc. En nuestro caso usaremos una pinza con dos grados de libertad: un grado para rotar la pinza y otro para abrirla y cerrarla. Para propósitos de modelado, vamos a suponer que el efector final y su carga se pueden modelar mediante una masa m_h variable. La Tabla 1 describe las variables y los valores de los parámetros del manipulador mostrado en la Fig. 10.

El sistema MR1 es del tipo SISO ya que sólo posee una entrada: el voltaje de control u aplicado a la armadura del servomotor, y una salida: la posición angular θ del brazo.

2.4.3. MODELO DEL SUBSISTEMA MECÁNICO

Para modelar el subsistema mecánico del manipulador empleamos la segunda ley de Newton para los movimientos lineal y rotacional. La aplicación de esta segunda

ley se traduce en una ecuación de balance mecánico. Con respecto a la Fig. 2.11, la ecuación de balance mecánico en el eje del servomotor articulado al primer engranaje se formula como:

$$T_m = J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + T_{g1} \quad \theta = \frac{d\theta_m}{dt} \quad \dot{\theta}_m = \frac{d^2\theta_m}{dt^2} \quad (2.1)$$

Símbolo	Descripción	Valor	Unidades
u	Voltaje de entrada al sistema		V
K_A	Ganancia del amplificador	8.5	
V_a	Voltaje de armadura		V
R_a	Resistencia de armadura	3.5	Ω
L_a	Inductancia de armadura	0.004	H
i_a	Corriente de armadura		A
K_m	Constante del torque motor	0.0436	N-m/A
T_m	Torque motor		N-m
T_L	Torque de carga		N-m
τ_L	Torque causado por pesos de la carga		N-m
T_{g1}	Torque de entrada a los engranajes		N-m
T_{g2}	Torque de salida de los engranajes		N-m
J_m	Inercia del motor	0.00059	kg-m ²
J_g	Inercia de los engranajes	0.066	kg-m ²
J_L	Inercia de la carga		kg-m ²
B_m	Constante de fricción del motor	0.00014	N-m/rad/s
B_g	Constante de fricción en engranajes	0.0124	N-m/rad/s
B_L	Constante de fricción en la carga	0.0023	N-m/rad/s
m_h	Masa del efector final	0.1	kg
m_b	Masa del brazo	0.4	kg
L	Longitud del brazo	0.25	m
r_h	Distancia al centro de masa del efector	0.02	m
V_b	Voltaje contra electromotriz		V
K_b	Constante contra electromotriz	0.0565	V/rad/s
g	Aceleración de la gravedad	9.81	m/s ²
N_1, N_2	Nº de dientes de los engranajes	$N_2 > N_1$	
n	Relación de engranajes ($n = N_2/N_1$)	18.5	
θ_m	Posición angular del motor		rad
θ	Posición angular de la carga		rad
ω	Velocidad angular de la carga		rad/s
ω_m	Velocidad angular del motor	$\omega_m = n\omega$	rad/s
K_w	Constante de elasticidad	0.052	N-m/rad

Tabla 2.1 - Parámetros y variables del manipulador MR1.
Fuente: Rojas, 2012.

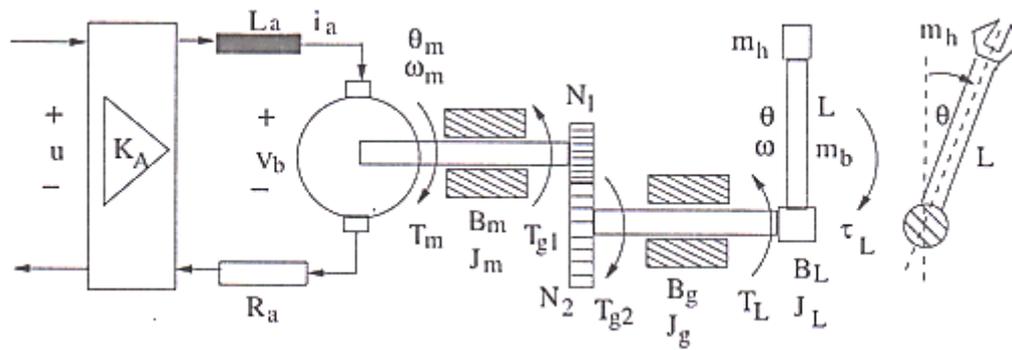


Figura 2.11 - Esquema del Manipulador Robótico.
Fuente: Rojas, 2012.

En (2.1), J_m y B_m representan el momento de inercia y la constante de fricción viscosa del rotor respectivamente, T_m es el torque del servomotor, T_{g1} es el torque de reacción debido al primer engranaje y θ_m es la posición angular en el lado del motor. Para los engranajes de reducción del servomotor podemos formular:

$$n = \frac{N_2}{N_1} = \frac{\theta_m}{\theta} \quad \theta_m = n\theta \quad n > 1 \quad (2.2)$$

Donde N_1 y N_2 es el número de dientes de los engranajes y $n > 1$ es la relación entre ellos. Para formular la ecuación (2.2) se ha tenido en cuenta que el espacio angular recorrido por el engranaje de menor radio es n veces mayor que el espacio recorrido por el engranaje de radio mayor. Por otra parte, el principio de la conservación de la energía establece que el trabajo realizado por el engranaje de la izquierda debe ser igual al trabajo realizado por el engranaje de la derecha, es decir:

$$T_{g2}\theta = T_{g1}\theta_m = T_{g1}n\theta; \quad T_{g2} = nT_{g1} \quad (2.3)$$

En (2.3), T_{g2} es el torque de reacción debido al segundo engranaje. El balance mecánico en el eje articulado al brazo del manipulador produce:

$$T_{g2} = J_g\theta + B_g\theta + T_L \quad (2.4)$$

En la cual J_g y B_g representan el momento de inercia y la constante de fricción viscosa de la caja de reducción respectivamente. El torque de carga T_L se formula como (ver Figura 12):

$$T_L = J_g\theta + B_L\theta + T_L \tag{2.5}$$

$$T_L = m_b g \frac{L}{2} \text{sen}\theta + m_h g (L + r_h) \text{sen}\theta = Q \text{sen}\theta \tag{2.6}$$

$$Q = m_b g \frac{L}{2} + m_h g (L + r_h) \tag{2.7}$$

Donde J_L y B_L representan el momento de inercia y la constante de fricción viscosa de la carga no lineal (brazo más efector final), g es la constante gravitacional, m_b y m_h denotan las masas del brazo y del efector final (esta masa también incluye la masa de la carga en el efector) respectivamente, y r_b , denota la distancia desde el extremo del brazo al centro de masa de m_h .

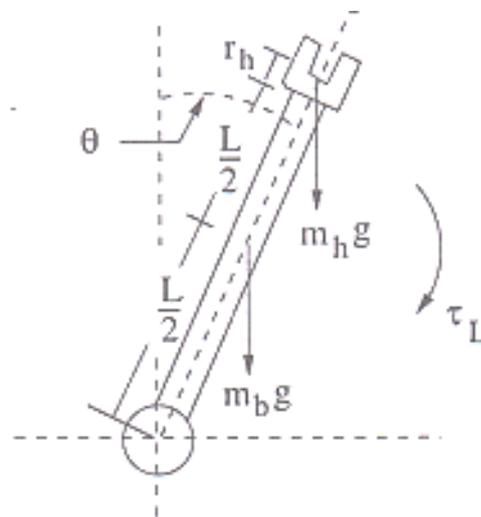


Figura 2.12 - Brazo del manipulador robótico.
Fuente: Rojas, 2012.

Notar en (2.6) que el torque T_L se debe a las fuerzas ejercidas por los pesos del brazo y de la esfera. Así, el torque $m_b g \frac{L \text{sen}\theta}{2}$ es el producto del peso $m_b g$ del brazo

por su brazo de palanca $\frac{L \operatorname{sen} \theta}{2}$, mientras que el torque $m_h g(L + r_h) \operatorname{sen} \theta$ es el producto del peso $m_h g$ del efector por su brazo de palanca $(L + r_h) \operatorname{sen} \theta$.

El momento de inercia J_L de la carga es la suma del momento de inercia del brazo J_b más el momento de inercia del efector J_h . Por otra parte, el teorema de los ejes paralelos, establece que el momento de inercia de una masa m alrededor de un eje de rotación que no pasa por su C.M. está dado por:

$$J = J_o + ma^2 \quad (2.8)$$

donde J_o es el momento de inercia de m alrededor del eje de rotación que pasa por su centro de masa y a es la distancia entre los dos ejes. Asumiendo que la masa m_b del brazo se concentra en su C.M., su momento de inercia con relación a un eje perpendicular que pasa por su C.M. es:

$$J_{bo} = \frac{1}{12} m_b L^2 \quad (2.9)$$

Considerando que la masa del brazo está distribuida a lo largo de su longitud y aplicando el teorema de los ejes paralelos, el momento de inercia J_b con respecto al punto de articulación se formula como:

$$J_b = J_{bo} + m_b \left(\frac{L}{2}\right)^2 = \frac{1}{3} m_b L^2 \quad (2.10)$$

Asumiendo que la masa m_h del efector está concentrada en su C.M., su momento de inercia se formula como:

$$J_h = m_h (L + r_h)^2 \quad (2.11)$$

Empleando (2.2), (2.3), (2.4), (2.5), (2.6) y (2.7) en (2.1) y operando se obtiene:

$$nT_m = J_{eq}\theta + B_{eq}\dot{\theta} + T_L = J_{eq}\omega + B_{eq}\dot{\omega} + Q\sin\theta \quad (2.12)$$

Donde:

$$J_L = J_h + J_b \quad J_{eq} = n^2J_m + J_g + J_L \quad B_{eq} = n^2B_m + B_2 + B_L \quad (2.13)$$

Las expresiones de Q , J_h y J_b se dan en (2.7), (2.11) y (2.10), respectivamente.

2.4.4. MODELO DEL SUBSISTEMA ELÉCTRICO

El voltaje de armadura V_a viene expresado por (ver la descripción de las variables y parámetros en la Tabla 2.1):

$$V_a = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + V_b \quad (2.14)$$

Donde i_a , R_a y L_a son la corriente, la resistencia y la inductancia en la armadura del servomotor respectivamente, y V_b es el voltaje de fuerza contra electromotriz gobernado por la relación:

$$V_b = K_b \omega_m = K_b n \omega = K_b n \dot{\theta} \quad (2.15)$$

Donde K_b es la constante de fuerza contra electromotriz y ω_m es la velocidad angular del motor. El voltaje de armadura V_a es:

$$V_a = K_A u \quad (2.16)$$

Siendo K_A la ganancia del amplificador.

2.4.5. CONVERSIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN MECÁNICA

Sabemos, que el torque motor T_M (energía mecánica) es proporcional a la corriente de armadura i_a (energía eléctrica):

$$T_m = K_m i_a \quad (2.17)$$

Donde K_m es la constante del motor. Reemplazando (2.12) en (2.17) se obtiene la siguiente ecuación de conversión de energía eléctrica a energía mecánica:

$$nK_m i_a = J_{eq} \ddot{\theta} + B_{eq} \dot{\theta} + T_L \quad (2.18)$$

Por otra parte, igualando (2.14) con (2.16) obtenemos:

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{K_A}{L_a} u - \frac{K_b n}{L_a} \omega - \frac{R_a}{L_a} i_a \quad (2.19)$$

Empleando (2.17) en (2.12) y despejando $\omega = d\omega/dt$ obtenemos:

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{Q}{J_{eq}} \text{sen}\theta - \frac{B_{eq}}{J_{eq}} \omega + \frac{nK_m}{J_{eq}} i_a \quad (2.20)$$

2.4.6. ECUACIÓN DE ESTADO DEL SISTEMA MR CON $L_A \neq 0$

Las ecuaciones (2.19) y (2.20) describen el modelo no lineal del sistema de tercer orden. Eligiendo en dichas ecuaciones como variables de estado: $x_1 = \theta$ (posición angular), $x_2 = \dot{\theta}$ (velocidad angular) y $x_3 = i_a$ (corriente de armadura), se obtiene:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (2.21)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{Q}{J_{eq}} \text{sen}x_1 - \frac{B_{eq}}{J_{eq}} x_2 + \frac{nK_m}{J_{eq}} x_3 \quad (2.22)$$

$$\dot{x}_3 = -\frac{nK_b}{L_a}x_2 - \frac{R_a}{L_a}x_3 + \frac{K_A}{L_a}u \quad (2.23)$$

Donde la salida es la posición x_1 y la señal de control es u (la tensión de armadura).

2.4.7. ECUACIÓN DE ESTADO DEL SISTEMA MR CON $L_A = 0$

En la Tabla 2.1 podemos observar que la inductancia de armadura L_a del servomotor es bastante pequeña, de modo tal que puede despreciarse sin que se pierda considerable exactitud en los resultados. Considerando el producto $x_3L_a = 0$ en la tercera ecuación de (2.23) y despejando la corriente de armadura x_3 resulta:

$$x_3 = \frac{K_A}{R_a}u - \frac{nK_b}{R_a}x_2 \quad (2.24)$$

Reemplazando (2.24) en la segunda ecuación de (2.23), se obtiene la ecuación de estado no lineal de orden dos del manipulador:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (2.25)$$

$$\dot{x}_2 = -a_1 \text{sen}x_1 - a_2x_2 + bu \quad (2.26)$$

Dónde:

$$a_1 = \frac{Q}{J_{eq}} \quad a_2 = \left(\frac{B_{eq}R_a + n^2K_mK_b}{J_{eq}R_a} \right) \quad b = \frac{nK_mK_A}{J_{eq}R_a} \quad (2.27)$$

2.4.8. CONTROL FUZZY DEL MANIPULADOR MR

Un sistema de control de posición angular convencional tradicionalmente emplea un controlador PD. Por ello, el controlador fuzzy empleado es del tipo PD, el cual se logra haciendo que sus entradas sean el error $e(t)$ y la derivada del error $de(t)/dt$, y que su salida sea la señal de control $u(t)$.

En esta parte empleamos funciones de membresía del tipo triangular para las entradas y funciones singletons (o únicas) para la salida. El procedimiento de fuzzyficación emplea el método de descomposición mínima de las funciones de membresía, mientras que el procedimiento de defuzzification emplea el método del centroide: ponderación de las variables promediadas para obtener un valor.

La Figura 2.13 muestra las funciones de membresía para el controlador fuzzy tipo PD, mientras que la Tabla 2.2. presenta el conjunto de reglas del controlador en la forma de una matriz de memoria asociativa fuzzy (en inglés, FAM: Fuzzy Associative Memory matrix). En dicha matriz, las letras tienen el siguiente significado: NL: Negative Large (negativo grande), NM: Negative Médium (negativo medio), NS: Negative Small (negativo pequeño), ZE: zero (cero), PS: Positive Small (positivo pequeño), PM: Positive Médium (positivo medio). PL: positive Large (positivo grande).

Notar que en las funciones de membresía estamos usando los factores de escalamiento p para el error, f para la derivada del error y uu para la salida. Estos factores nos van a permitir sintonizar en tiempo real el controlador difuso para cumplir el objetivo de control. Debemos anotar que los rangos de $e(t)$ y $de(t)/dt$ son sólo estimaciones. Para el caso de la salida $u(t)$, estamos asumiendo un rango de salida de -2.5 V a $+2.5 \text{ V}$.

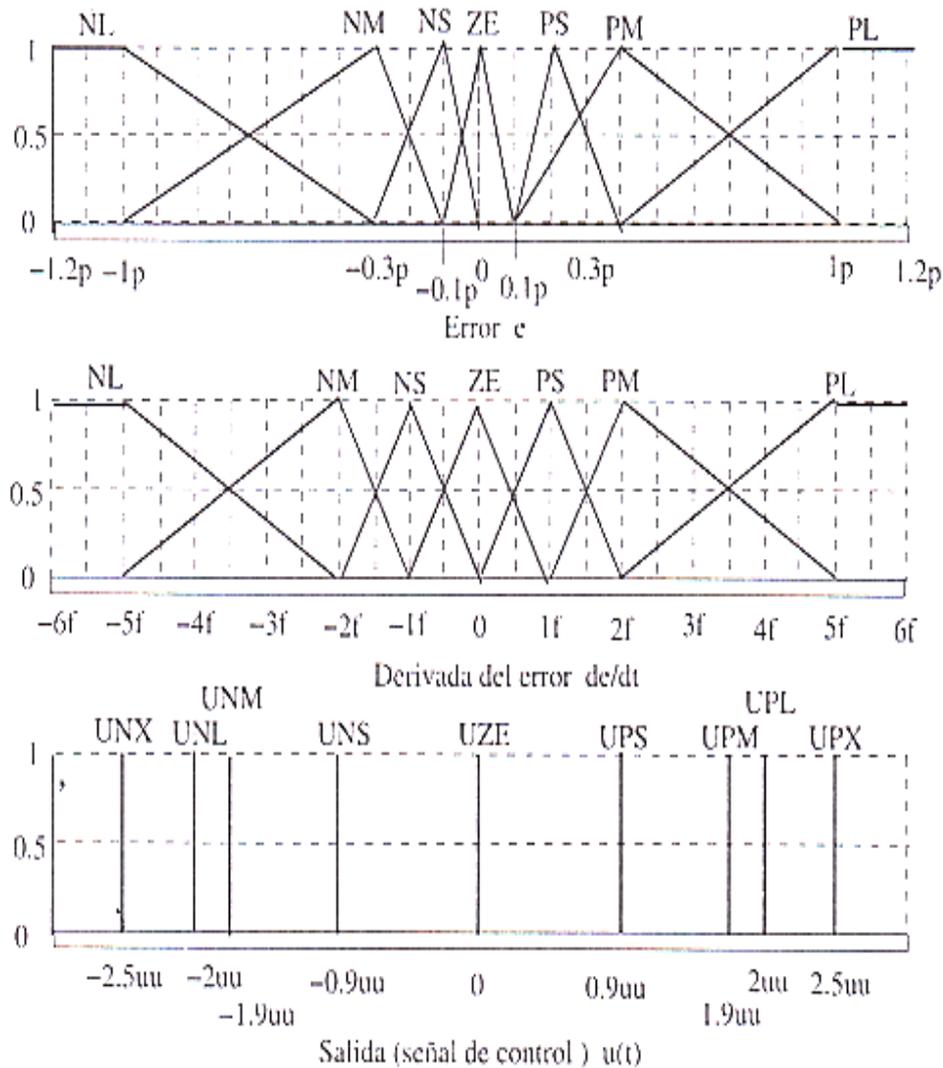


Figura 2.13 - Funciones de membresía para las entradas error $e(t)$ y $de(t)/dt$, y la salida $u(t)$.
Fuente: Rojas, 2012.

2.4.9. EL PROCESO DE FUZZYFICACIÓN

El proceso de fuzzyficación emplea básicamente la información de la Figura 2.12 por consiguiente, primero definimos los rangos de las funciones de membresía del error, de la derivada del error y de la salida (Tablas 2.3, 2.4 y 2.5), donde las abreviaturas en minúsculas min, nom y max significan mínimo, nominal y máximo respectivamente. El valor nominal siempre se sitúa entre los valores mínimo y máximo de la función.

de \ e	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
DNL	NX	NX	NX	NX	NS	ZE	PX
DNM	NX	NX	NL	NL	NS	PS	PX
DNS	NX	NL	NL	NM	PS	PS	PX
DZE	NX	NL	NL	ZE	PL	PL	PX
DPS	NX	NS	NS	PM	PL	PL	PX
DPM	NX	NS	PS	PL	PL	PX	PX
DPL	NX	ZE	PS	PX	PX	PX	PX

Tabla 2.2 - Conjunto de reglas del controlador fuzzy mostradas en la forma de una matriz de memoria asociativa fuzzy (FAM-matrix).

Fuente: Rojas, 2012.

Cabe anotar que esta nomenclatura también se emplea en el programa de simulación del sistema de control fuzzy.

Para explicar el procedimiento de fuzzyficación, tomemos como ejemplo los dos primeros tramos de la función de membresía NL(t) versus el error e(t). De acuerdo a la la Figura 2.12 y a la Tabla 2.3, $nlmin = - 1.2p$ es el valor del error e(t) correspondiente al valor de membresía $NLmin = 0$, mientras que $nlnom = - lp$ es el valor del error e(t) para el valor de membresía $NLnom = 1$. Por consiguiente, para el rango:

$$nlmin > e(t) > nlnom: NL(t) = 1 \tag{2.28}$$

Para el rango $nlnom: > e(t) > rilrnax$, la función de membresía es una recta de la forma: $NL(t) = me(t) + b$, donde m es la pendiente de dicha recta y b una constante. Las expresiones de m y b se determinan de las siguientes ecuaciones y con los datos tomados de la Figura 2.12 y de la Tabla 2.3:

$$NL_{nom} = 1 = m(-1p) + b \qquad NL_{max} = 0 = m(-0.3p) + b \qquad (2.29)$$

Reemplazando las expresiones de m y b en la ecuación de la recta se obtiene:

$$N(L) = \frac{e(t)+0.3p}{0.7p} \qquad (2.30)$$

Del mismo modo podemos deducir todas las ecuaciones de las membresías correspondientes al proceso de fuzzyficación de las entradas e(t) y de(t)/dt. Tales ecuaciones se muestran en código MATLAB en el programa fuzzyposition.m listado abajo. Notar que sólo para fines de inicialización, se están añadiendo los valores iniciales nulos de las funciones de membresía.

El grado de satisfacción que se puede alcanzar con la aplicación de las reglas fuzzy se obtiene a partir de la matriz FAM de la Tabla 2.2.

<code>nlnmin = - 1.2p</code>	<code>nlnom = - 1.0p</code>	<code>nlnmax = - 0.3p</code>
<code>nmmin = - 1.0p</code>	<code>nmnom = - 0.3p</code>	<code>nmmax = - 0.1p</code>
<code>nsmin = - 0.3p</code>	<code>nsnom = - 0.1p</code>	<code>nsmax = + 0.0p</code>
<code>zemin = - 0.1p</code>	<code>zenom = + 0.0p</code>	<code>zemax = + 0.1p</code>
<code>psmin = + 0.0p</code>	<code>psnom = + 0.1p</code>	<code>psmax = + 0.3p</code>
<code>pmmmin = + 0.1p</code>	<code>pmmnom = + 0.3p</code>	<code>pmmmax = + 1.0p</code>
<code>plmin = + 0.3p</code>	<code>plnom = + 1.0p</code>	<code>plmax = + 1.2p</code>

Tabla 2.3 - Valores de e(t) para los puntos extremos de las funciones de membresía. Fuente: Rojas, 2012.

<code>dnlmin = - 6.0f</code>	<code>dnlnom = - 5.0f</code>	<code>dnlmax = - 2.0f</code>
<code>dnmmin = - 5.0f</code>	<code>dnmnom = - 2.0f</code>	<code>dnmmax = - 1.0f</code>
<code>dnsmin = - 2.0f</code>	<code>dnsnom = - 1.0f</code>	<code>dnsmax = + 0.0f</code>
<code>dzemin = - 1.0f</code>	<code>dzenom = + 0.0f</code>	<code>dzemax = + 1.0f</code>
<code>dpsmin = + 0.0f</code>	<code>dpsnom = + 1.0f</code>	<code>dpsmax = + 2.0f</code>
<code>dpmmin = + 1.0f</code>	<code>dpmnom = + 2.0f</code>	<code>dpmmax = + 5.0f</code>
<code>dplmin = + 2.0f</code>	<code>dplnom = + 5.0f</code>	<code>dplmax = + 6.0f</code>

Tabla 2.4 - Valores de de(t)/dt para algunos puntos de las funciones de membresía. Fuente: Rojas, 2012.

$$\begin{aligned}
 u_{nx} &= - 0.7uu & u_{nl} &= - 0.6uu & u_{nm} &= - 0.4uu \\
 u_{ns} &= - 0.2uu & u_{ze} &= 0uu & u_{ps} &= + 0.2uu \\
 u_{pm} &= + 0.4uu & u_{pl} &= + 0.6uu & u_{px} &= + 0.7uu
 \end{aligned}$$

Tabla 2.5 - Valores de la señal de control u(t) para los singlesteps.
Fuente: Rojas, 2012.

Cada elemento de dicha matriz es el resultado de la operación fuzzy intersección, que es simplemente una operación de determinación del mínimo entre dos variables. Por ejemplo, el elemento cuarta fila y sexta columna de la matriz FAM, denominada w46, se determina como sigue:

$$w46 = \min(PM, DZE); \tag{2.31}$$

El resultado w46 nos indica el mínimo entre los valores de PM(t) y DZE(t), correspondiente a determinados valores de e(t) y de(t)/dt, respectivamente. Los cálculos para los otros elementos w_{ij}, i,j = 1,...,7, se muestran en el listado del programa fuzzyposition.m.

2.4.10. MÉTODO DE DEFUZZYFICACIÓN

Existen diversos métodos de defuzzificación. En el problema del control de posición angular del manipulador MR1 empleamos el método del centroide. En el caso que nos ocupa, la señal de control fuzzy a aplicar sobre el manipulador MR1 en cada tiempo de muestreo es:

$$\begin{aligned}
 u &= u1/ww \\
 u1 &= w11*unx+w12*unx+w13*unx+w14*unx+w15*uns+w16*uze+w17*upx+... \\
 &w21*unx + w22*unx + w23*unl + w24*unl + w25*uns + w26*uns + w27*upx + \\
 &... \\
 &w31*unx + w32*unx + w33*unl + w34*unl + w35*uns + w36*uns + w37*upx + \\
 &...
 \end{aligned}$$

```

w41*unx + w42*unx + w43*unl + w44*unl + w45*uns + w46*uns + w47*upx +
...
w51*unx + w52*unx + w53*unl + w54*unl + w55*uns + w56*uns + w57*upx +
...
w61*unx + w62*unx + w63*unl + w64*unl + w65*uns + w66*uns + w67*upx +
...
w71*unx + w72*unx + w73*unl + w74*unl + w75*uns + w76*uns + w77*upx +
...
ww = w11 + w12 + w13 + w14 + w15 + w16 + w17 + ...

w21 + w22 + w23 + w24 + w25 + w26 + w27 + ...
w31 + w32 + w33 + w34 + w35 + w36 + w37 + ...
w41 + w42 + w43 + w44 + w45 + w46 + w47 + ...
w51 + w52 + w53 + w54 + w55 + w56 + w57 + ...
w61 + w62 + w63 + w64 + w65 + w66 + w67 + ...
w71 + w72 + w73 + w74 + w75 + w76 + w77 + ...

```

El programa `fuzzyposition.m` escrito en código MATLAB y cuyo listado se muestra al final de este Capítulo, simula el comportamiento del sistema de control fuzzy para controlar la posición angular del brazo manipulador MR1. Para ello emplea el modelo no lineal de segundo orden dado en (2.18). La Figura 2.14 muestra el resultado de tal simulación.

Las Figuras 2.15 y 2.16 ilustran en tiempo real la posición controlada y su respectiva señal de control fuzzy para varias señales de referencia tipo escalón.

```

% fuzzyposition.m SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN FUZZY

clear all; close all; clc;

```

```
% DATOS DEL SUBSISTEMA MECÁNICO
```

```
L = 0.25; rh = 0.02; g = 9.81; n = 18.5; Jm = 0.00059; Bm = 0.00014;
```

```
mb = 0.4; mh = 0.1; Jg = 0.066; Bg = 0.0124; BL = 0.0023;
```

```
Jho = 2*mh*rh^2/5; Jh = mh*(L+rh)^2; Jbo = mb*L^2/12;
```

```
Jb = Jbo + mb*(L/2)^2; JL = Jh + Jb; Jeq = n^2*Jm + Jg + JL;
```

```
Beq = n^2*Bm + Bg + BL; Q = mb*g*L/2 + mh*g*(L + rh);
```

```
% DATOS DEL SUBSISTEMA ELÉCTRICO
```

```
km = 0.0436; kb = 0.0565; La = 0.004; Ra = 3.5; KA = 8.5;
```

```
% ECUACIÓN DE ESTADO Y DE SALIDA DE SEGUNDO ORDEN
```

```
a1 = Q/Jeq; a2 = (Beq*Ra+n^2*Km*Kb) / (Jeq*Ra);
```

```
b = n*Km*KA / (Jeq*Ra);
```

```
% dx1/dt = x2; dx2/dt = -a1sin(x1) - a2*x2 + b*u
```

```
% VALORES DE e(t) PARA PUNTOS EXTREMOS DE LA FUNCIÓN DE  
MEMBRESÍA:
```

```
p=0.6;
```

```
nlmin=-1.2p; nlnom=-1.0*p; nlmax=-0.3*p;
```

```
nmmin=-1.0p; nmnom=-0.3*p; nmmax=-0.1*p;
```

```
nsmin=-0.3p; nsnom=-0.1*p; nsmax=+0.0*p;
```

```
zemin=-0.1p; zenom=-1.0*p; zemax=+0.1*p;
```

```
psmin=+0.0p; psnom=+0.1*p; psmax=+0.3*p;
```

```
pmmin=+0.1p; pmnom=+0.3*p; pmmax=+1.0*p;
```

```
plmin=+0.3p; plnom=+1.0*p; plmax=+1.2*p;
```

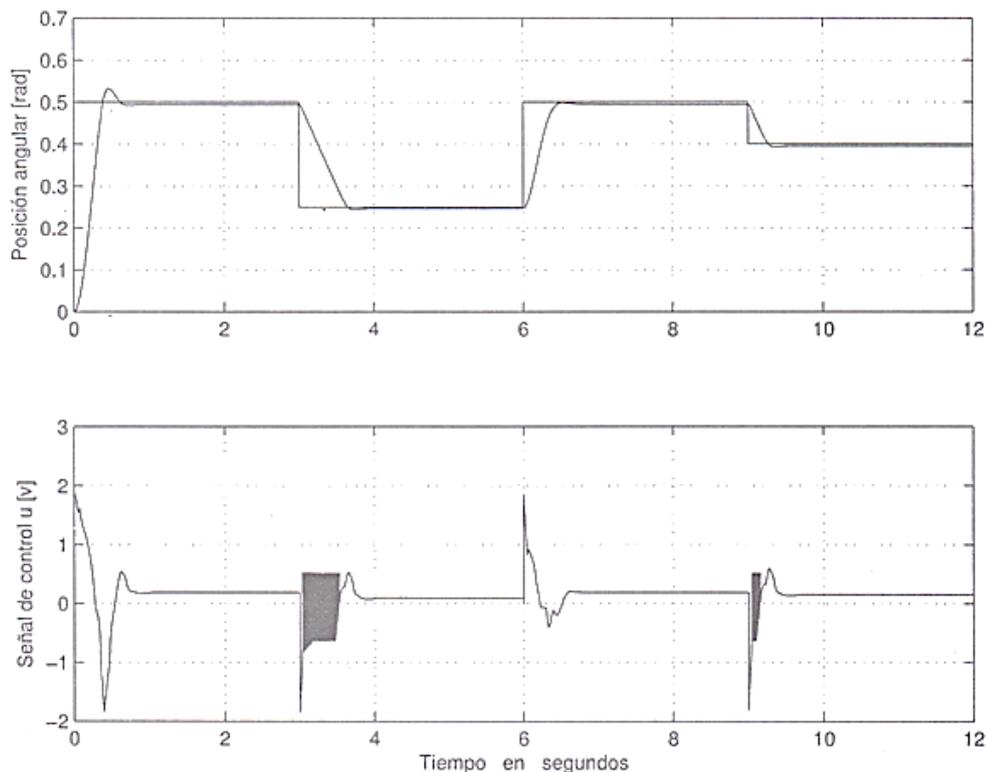


Figura 2.14 - Posición angular controlada en la simulación del sistema de control fuzzy del brazo robótico de 1GDL, para una señal de referencia fija.
Fuente: Rojas, 2012.

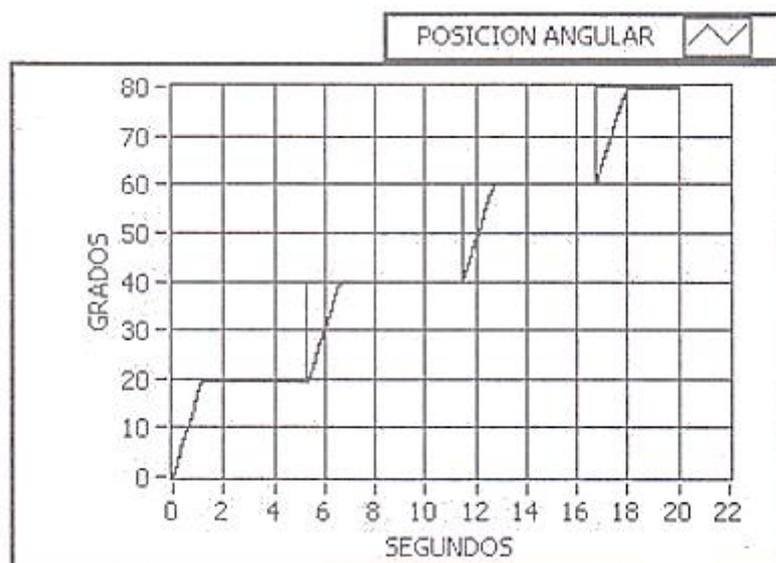


Figura 2.15 - Posición angular controlada en el sistema de control fuzzy en tiempo real del brazo robótico de 1GDL, para una señal de referencia fija.
Fuente: Rojas, 2012.

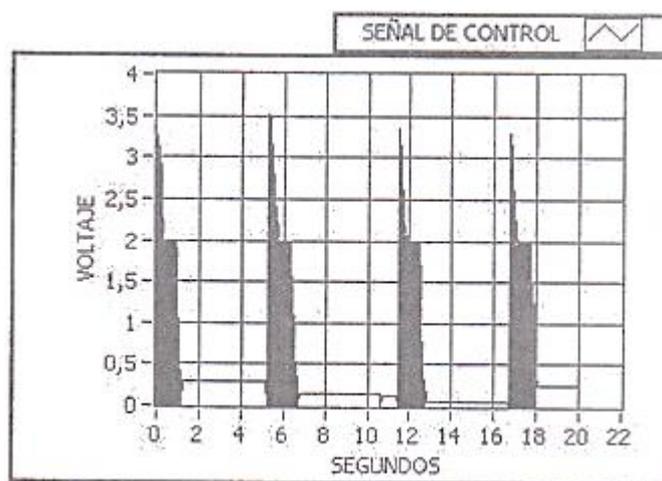


Figura 2.16 - Señal de control de la posición angular en el sistema de control fuzzy en tiempo real del brazo robótico de 1GDL, para una señal de referencia fija.

Fuente: Rojas, 2012.

% VALORES DE $De(t)/DT$ PARA PUNTOS EXTREMOS DE LA FUNCION DE MEMBRESIA:

$f=0.4$;

$dnlmin = -6.0*f$; $dnlnom = -5.0*f$; $dnlmax = -2.0*f$;

$dnmmin = -5.0*f$; $dnmnom = -2.0*f$; $dnmmax = -1.0*f$;

$dnsmin = -2.0*f$; $dnsnom = -1.0*f$; $dnsmax = +0.0*f$;

$dzemin = -1.0*f$; $dzenom = +0.0*f$; $dzemax = +1.0*f$;

$dpsmin = +0.0*f$; $dpsnom = +1.0*f$; $dpsmax = +2.0*f$;

$dpmmin = +1.0*f$; $dpmnom = +2.0*f$; $dpmmax = +5.0*f$;

$dplmin = +2.0*f$; $dplnom = +5.0*f$; $dplmax = +6.0*f$;

% VALORES DE $u(t)$ PARA LOS SINGLETONS

$ur = 3$

$unx=-0.7*ur$; $unl=-0.6*ur$; $unm=-0.4*ur$; $uns=-0.2*ur$; $uze=0*ur$;

$ups=0.2*ur$; $upm=0.4*ur$; $upl=0.6*ur$; $upx=0.7*ur$;

$ep = 0$; $x1 = 0$; $x2 = 0$; % CONDICIONES INICIALES

```

% ***** LAZO DEL SISTEMA DE CONTROL FUZZY *****

Mm=12000; A = 0.5; T=0.001;

for k = 1 : Mm

% SEÑAL DE REFERENCIA

    if(k >= 0 && k <= Mm/4)

        r = A;

    elseif(k >= Mm/4 && k <= Mm/2)

        r = 0.5*A;

    elseif(k >= Mm/2 && k <= 3*Mm/4)

        r = 1*A;

    elseif(k >= 3*Mm/4 && k <= Mm)

        r = 0.8*A;

    end

R(k)=r; e = r - x1; Y(k) = x1; de = (e - ep)/T;

% FUZZYFICACION DE LAS FUNCIONES DE MEMBRESIA PARA EL ERROR e:

NL = 0; if(e>= nlmin && e <= ninom) , NL = +1;

elseif(e >= nlnom && e <= nlmax) , NL = -(e*0.3*p)/(0.7*p) ; end

NM = 0; if(e >= nmmin && e <= nmnom) , NM = +(e+1.0*p)/(0.7*p);

elifeif(e >= nmnom && e <= nmmax) , NM = - (e*0.1*p)/(0.2*p) ; end

NS = 0; if(e >= nsmin && e <= nsnom) , NS = +(e+0.3*p)/(0.2*p) ;

elseif (e >0 nenom && e <= nsmax) , NS = -(e-0.0)/(0.1*p) ; end

```

```

ZE = 0; if(e >= Zemin && e <= zenom) , ZE = +(e+0.1*p)/(0.1*p) ;

elseif(e >= zenom && e <= zemax) , ZE = -(e-0.1*p)/(0.1*p) ; end

PS = 0; if(e >= psmin && e <= psnom) , PS = +(e-0.0)/(0.1*p) ;

elseif(e >= psnom && e <= psmax) , PS = -(e-0.3*p)/(0.2*p) ; end

PM = 0; if(e >= pmmin && e <= pmnom) , PM = +(e-0.1*p)/(0.2*p) ;

elseif(e >= pmnom && e <= pnmax) , PM = -(e-1.0*p)/(0.7*p); end

PL = 0; if(e >= plmin && e <= plnom) , PL = +(e-0.3*p)/(0.7*p) ;

elseif(e >= plnom && e <= plmax) , PL = +1; end

% FUZZYFICACION DE LAS FUNCIONES DE MEMBRESIA PARA LA DERIVADA DEL
ERROR de:

DNL = 0; if(de >= dnlmin && de <= dnlnom) , DNL = +1;

elseif(de >= dnlnom && de <= dnlmax) , DNL = (-de-2*f)/(3*f); end

DNM = 0; if(de >= dnmmin && de <= dnmnom) , DNM = +(de+5*f)/(3*f) ;

elseif(de >= dnmnom && de <= dnmmax) , DNM = (-de-1*f)/f; end

DNS = 0; if(de >= dnsmin && de <= dnsnom) , DNS = +(de+2*f)/f;

elseif(de >= dnsnom && de <= dnsmax) , DNS = (-de-0.0*f)/f; end

DZE = 0; if(de >= dzemin && de <= dzenom) , DZE = +(de+1*f)/f;

elseif(de >= dzenom && de <= dzemax) , DZE = (-de+1*f)/f; end

DPS = 0; if(de >= dpsmin && de <= dpsnom) , DPS = +(de+0.0)/f;

elseif(de >= dpsnom && de <= dpsmax) , DPS = (de-2*f)/f; end

DPM = 0; if(de >= dpmin && de <= dpmnom) , DPM = +(de-1*f)/f;

elseif(de >= dpmnom && de <= dpmmax) , DPM = (-de+5*f)/(3*f); end

```

```

DPL = 0; if(de >= dplmin && de <= dplnom) , DPL = +(de-2*f)/(3*f);

elseif(de >= dplnom && de <= dplmax) , DPL = +1; end

% GRADO DE SATISFACCION

w11=min(NL,DNL); w12=min(NM,DNL); w13=min(NS,DNL); w14=min(ZE,DNL);

w15=min(PS,DNL); w16=min(PM,DNL); w17=min(PL,DNL);

w21=min(NL,DNM); w22=min(NM,DNM); w23=min(NS,DNM); w24=min(ZE,DNM);

w25=min(PS,DNM); w26=min(PM,DNM); w27=min(PL,DNM);

w31=min(NL,DNS); w32=min(NM,DNS); w33=min(NS,DNS); w34=min(ZE,DNS);

w35=min(PS,DNS); w36=min(PM,DNS); w37=min(PL,DNS);

w41=min(NL,DZE); w42=min(NM,DZE); w43=min(NS,DZE); w44=min(ZE,DZE);

w45=min(PS,DZE); w46=min(PM,DZE); w47=min(PL,DZE);

w51=min(NL,DPS); w52=min(NM,DPS); w53=min(NS,DPS); w54=min(ZE,DZE);

w55=min(PS,DPS); w56=min(PM,DPS); w57=min(PL,DPS);

w61=min(NL,DPM); w62=min(NM,DPM); w63=min(NS,DPM); w64=min(ZE,DPM);

w65=min(PS,DPM); w66=min(PM,DPM); w67=min(PL,DPM);

w71=min(NL,DPL); w72=min(NM,DPL); w73=min(NS,DPL); w74=min(ZE,DPL);

w75=min(PS,DPL); w76=min(PM,DPL); w77=min(PL,DPL);

% DEFUZIFICACION

ul = (w11*unx+w12*unx+w13*unx+w14*unx+w15*uns+w16*uze+w17*upx+...

w21*unx + w22*unx + w23*unl + w24*unl + w25*uns + w26*ups + w27*upx

+
    
```

```

w31*unx + w32*unl + w33*unl + w34*unm + w35*uns + w36*ups + w37*upx
+
w41*unx + w42*unl + w43*unl + w44*uze + w45*uns + w46*upl + w47*upx
+
w51*unx + w52*uns + w53*uns + w54*upm + w55*uns + w56*upl + w57*upx
+
w61*unx + w62*uns + w63*ups + w64*upl + w65*uns + w66*upx + w67*upx
+
w71*unx + w72*uns + w73*ups + w74*upl + w75*upl + w76*upx + w77*upx
+
ww = w11 + w12 + w13 + w14 + w15 + w16 + w17 + ...
      w21 + w22 + w23 + w24 + w25 + w26 + w27 + ...
      w31 + w32 + w33 + w34 + w35 + w36 + w37 + ...
      w41 + w42 + w43 + w44 + w45 + w46 + w47 + ...
      w51 + w52 + w53 + w54 + w55 + w56 + w57 + ...
      w61 + w62 + w63 + w64 + w65 + w66 + w67 + ...
      w71 + w72 + w73 + w74 + w75 + w76 + w77; WW(k) = ww;

u=u1/(ww+0.0001); U(k)=u; U1(k)=u1; %0.0001 IMPIDE DIVIDIR ENTRE 0

% MODELO DE SEGUNDO ORDEN DEL PROCESO (DISCRETIZACION DIRECTA)

x1 = x1 + T*x2;

x2 = x2 + T*(-a1*sin(x1)-a2*x2+b*u);

ep = e;

end

% ***** FIN DEL LAZO *****

```

2.5. MICROCONTROLADORES

Un microcontrolador (o MCU para unidad de microcontrolador) es una computadora pequeña en un solo circuito integrado. En la terminología moderna, es similar, pero menos sofisticado que un sistema en un chip o SoC; un SoC puede incluir un microcontrolador como uno de sus componentes. Un microcontrolador contiene una o más CPU (núcleos de procesador) junto con memoria y periféricos de entrada / salida programables. Un microcontrolador tiene los mismos bloques de funcionamiento básicos de una computadora lo que nos permite tratarlo como un pequeño dispositivo de cómputo. Un microcontrolador puede usarse para muchas aplicaciones algunas de ellas son: manejo de sensores, controladores, juegos, calculadoras, agendas, avisos lumínicos, secuenciador de luces, cerrojos electrónicos, control de motores, relojes, alarmas, robots, entre otros. El límite es la imaginación.

La memoria de programa en forma de RAM Ferroeléctrica, Flash NOR u ROM OTP también se incluye a menudo en el chip, así como también una pequeña cantidad de RAM. Los microcontroladores están diseñados para aplicaciones integradas, en contraste con los microprocesadores utilizados en computadoras personales u otras aplicaciones de uso general que consisten en varios chips discretos.

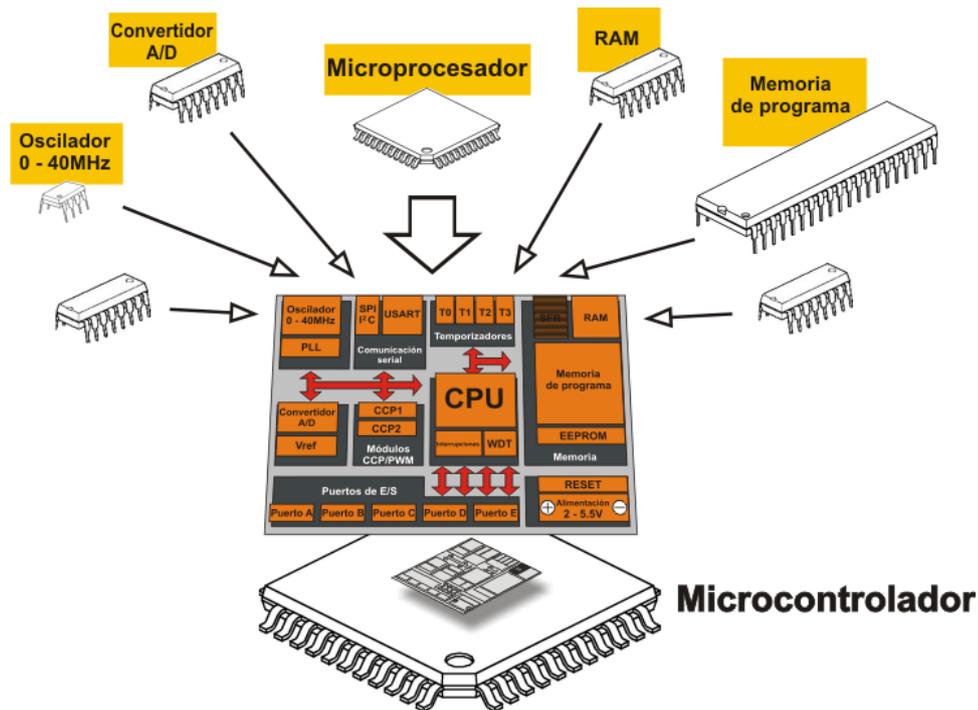


Figura 2.17 - Componentes que integran a un microcontrolador

<https://learn.mikroe.com/ebooks/microcontroladorespicc/chapter/introduccion-al-mundo-de-los-microcontroladores/> Fuente: Verle, M. (2017)

Los microcontroladores se utilizan en productos y dispositivos controlados automáticamente, como sistemas de control de motores de automóviles, dispositivos médicos implantarles, controles remotos, máquinas de oficina, electrodomésticos, herramientas eléctricas, juguetes y otros sistemas integrados . Al reducir el tamaño y el costo en comparación con un diseño que utiliza un microprocesador , memoria y dispositivos de entrada/salida separados, los microcontroladores hacen que sea económico controlar digitalmente más dispositivos y procesos. Los microcontroladores de señal mixta son comunes, integrando componentes analógicos necesarios para controlar sistemas electrónicos no digitales. (Verle, 2017, p.90)

Algunos microcontroladores pueden usar palabras de cuatro bits y operar a frecuencias tan bajas como 4 kHz, para un bajo consumo de energía (milivatios o microvatios de un dígito). Por lo general, tendrán la capacidad de conservar la

funcionalidad mientras esperan un evento, como presionar un botón u otra interrupción; el consumo de energía mientras duerme (el reloj de la CPU y la mayoría de los periféricos apagados) pueden ser tan solo nanowatts, lo que hace que muchos de ellos sean adecuados para aplicaciones de batería de larga duración. Otros microcontroladores pueden desempeñar roles críticos para el desempeño, donde pueden necesitar actuar más como un procesador de señal digital (DSP), con mayores velocidades de reloj y consumo de energía. (Verle, 2017, p.97)

2.6. ENTORNOS DE PROGRAMACIÓN

Los microcontroladores originalmente se programaron solo en lenguaje ensamblador, pero varios lenguajes de programación de alto nivel, como C, Python y JavaScript, ahora también son de uso común para apuntar a microcontroladores y sistemas integrados. Estos lenguajes están diseñados especialmente para cualquiera de los fines, o versiones de lenguajes de propósito general como el lenguaje de programación C. Compiladores para los lenguajes de propósito general, normalmente tendrá algunas restricciones, así como también mejoras para soportar mejor las características únicas de los microcontroladores. Algunos microcontroladores tienen entornos para ayudar a desarrollar ciertos tipos de aplicaciones. Los proveedores de microcontroladores a menudo hacen que las herramientas estén disponibles gratuitamente para facilitar la adopción de su hardware.

Muchos microcontroladores son tan raros que requieren efectivamente sus propios dialectos no estándar de C, como SDCC para el 8051, lo que impide utilizar herramientas estándar (como bibliotecas de códigos o herramientas de análisis estáticas) incluso para códigos no relacionados con las características del hardware. A menudo, los intérpretes se utilizan para esconder esas peculiaridades de bajo nivel.

El firmware del intérprete también está disponible para algunos microcontroladores. Por ejemplo, BASIC en los primeros microcontroladores Intel 8052; BASIC and FORTH en el Zilog Z8, así como algunos dispositivos modernos. Por lo general, estos intérpretes son compatibles con la programación interactiva.

Los simuladores están disponibles para algunos microcontroladores. Estos permiten que un desarrollador analice cuál debería ser el comportamiento del microcontrolador y su programa si estuvieran usando la parte real. Un simulador mostrará el estado del procesador interno y también el de las salidas, además de permitir la generación de señales de entrada. Si bien, por un lado, la mayoría de los simuladores estarán limitados por la imposibilidad de simular mucho otro hardware en un sistema, pueden ejercer condiciones que, de lo contrario, podrían ser difíciles de reproducir a voluntad en la implementación física y pueden ser la forma más rápida de depurar y analizar problemas.

Los microcontroladores recientes a menudo se integran con los circuitos de depuración en un chip que, cuando se accede mediante un emulador en circuito (ICE) a través de JTAG, permiten depurar el firmware con un depurador. Un ICE en tiempo real puede permitir la visualización y/o manipulación de estados internos mientras se ejecuta. Un ICE de rastreo puede registrar un programa ejecutado y estados de MCU antes / después de un punto de activación. (Verle, 2017, p.180)

2.6.1. ARDUINO

Arduino es una plataforma electrónica de código abierto basada en hardware y software fáciles de usar. Las placas Arduino pueden leer entradas (luz en un sensor, un dedo en un botón o un mensaje de Twitter) y convertirlo en una salida, activar un motor, encender un LED y publicar algo en línea. Puede decirle a su tablero qué hacer

enviando un conjunto de instrucciones al microcontrolador en el tablero. Para hacerlo, usa el lenguaje de programación Arduino (basado en Cableado) y el Software Arduino (IDE) , basado en Procesamiento .

A lo largo de los años, Arduino ha sido el cerebro de miles de proyectos, desde objetos cotidianos hasta complejos instrumentos científicos. Una comunidad mundial de fabricantes, estudiantes, aficionados, artistas, programadores y profesionales, se ha reunido en torno a esta plataforma de código abierto, sus contribuciones han agregado una cantidad increíble de conocimiento accesible que puede ser de gran ayuda para novatos y expertos por igual.

Arduino nació en el Ivrea Interaction Design Institute como una herramienta fácil para prototipos rápidos, dirigido a estudiantes sin experiencia en electrónica y programación. Tan pronto como llegó a una comunidad más amplia, la placa Arduino comenzó a cambiar para adaptarse a las nuevas necesidades y desafíos, diferenciando su oferta de tableros simples de 8 bits a productos para aplicaciones IoT , portátiles, impresión 3D y entornos integrados. Todas las placas Arduino son completamente de código abierto, lo que permite a los usuarios construirlas de forma independiente y eventualmente adaptarlas a sus necesidades particulares. El software también es de código abierto y está creciendo gracias a las contribuciones de los usuarios de todo el mundo. (Arduino, 2017)

2.6.2. POR QUÉ ARDUINO

Gracias a su experiencia de usuario simple y accesible, Arduino se ha utilizado en miles de proyectos y aplicaciones diferentes. El software Arduino es fácil de usar para principiantes, pero lo suficientemente flexible para usuarios avanzados. Funciona en Mac, Windows y Linux. Los maestros y los estudiantes lo usan para construir

instrumentos científicos de bajo costo, para probar los principios de la química y la física, o para empezar a usar la programación y la robótica. Diseñadores y arquitectos construyen prototipos interactivos, músicos y artistas lo usan para instalaciones y para experimentar con nuevos instrumentos musicales. Los fabricantes, por supuesto, lo utilizan para construir muchos de los proyectos exhibidos en el Maker Faire, por ejemplo. Arduino es una herramienta clave para aprender cosas nuevas. Cualquier persona (niños, hobbistas, artistas, programadores) puede comenzar a jugar simplemente siguiendo las instrucciones paso a paso de un kit.

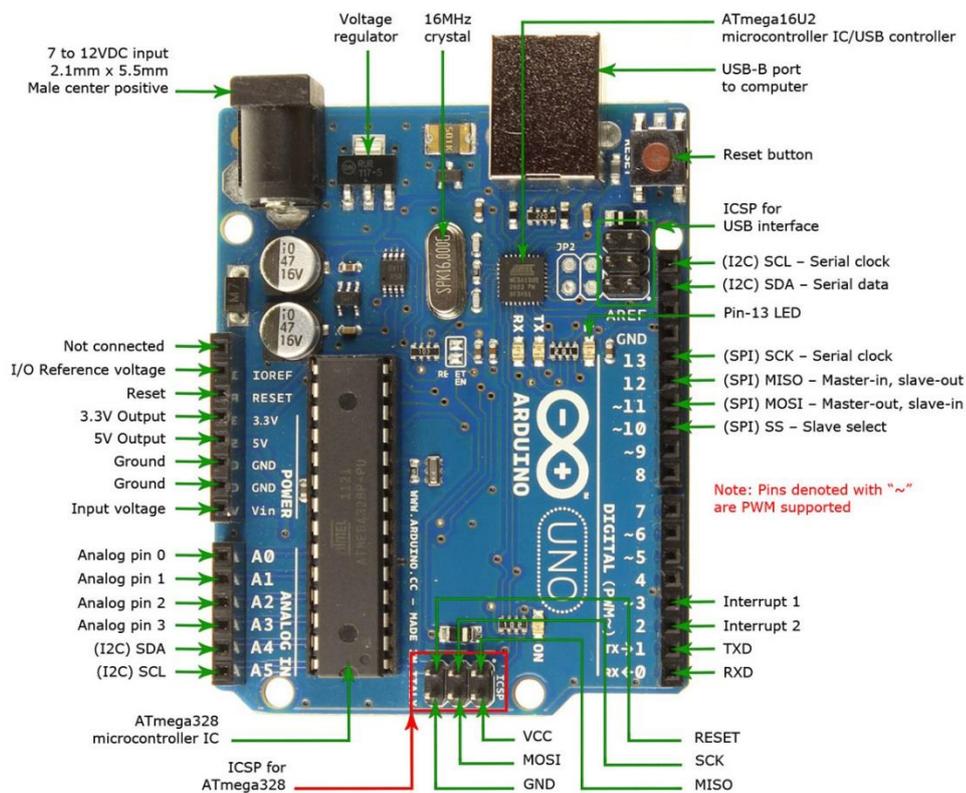


Figura 2.18 - Diagrama de la placa de arduino UNO

Fuente: Arduino (2017) <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>

Existen muchos otros microcontroladores y plataformas de microcontroladores disponibles para la informática física. Parallax Basic Stamp, Netmedia's BX-24, Phidgets, el Handyboard de MIT y muchos otros ofrecen una funcionalidad similar.

Todas estas herramientas toman los detalles desordenados de la programación del microcontrolador y la envuelven en un paquete fácil de usar. Arduino también simplifica el proceso de trabajo con microcontroladores, pero ofrece cierta ventaja para los profesores, estudiantes y aficionados interesados sobre otros sistemas:

- Barato: las placas Arduino son relativamente baratas en comparación con otras plataformas de microcontroladores. La versión menos costosa del módulo Arduino se puede ensamblar manualmente, e incluso los módulos Arduino premontados cuestan menos de \$ 50
- Multiplataforma - El software de Arduino (IDE) se ejecuta en Windows, Macintosh OS X, y Linux. La mayoría de los sistemas de microcontroladores están limitados a Windows.
- Entorno de programación simple y claro: el software Arduino (IDE) es fácil de usar para principiantes, pero lo suficientemente flexible para que los usuarios avanzados también lo puedan aprovechar. Para los profesores, está convenientemente basado en el entorno de programación de Procesamiento, por lo que los estudiantes que aprenden a programar en ese entorno estarán familiarizados con cómo funciona el Arduino IDE.
- Software de código abierto y extensible: el software Arduino se publica como herramientas de código abierto, disponibles para su extensión por programadores experimentados. El lenguaje se puede expandir a través de las bibliotecas de C++, y las personas que quieran comprender los detalles técnicos pueden hacer el salto de Arduino al lenguaje de programación AVR C en el que se basa. De manera similar, puede agregar el código AVR-C directamente en sus programas Arduino si lo desea.

- Hardware de código abierto y extensible: los planos de los paneles de Arduino se publican bajo una licencia de Creative Commons, por lo que los diseñadores experimentados de circuitos pueden crear su propia versión del módulo, ampliándola y mejorándola. Incluso los usuarios relativamente inexpertos pueden construir la versión del módulo para comprender cómo funciona y ahorrar dinero. (Arduino, 2017)

2.7. SENSORES

Un sensor es un dispositivo que está capacitado para detectar acciones o estímulos externos y responder en consecuencia. Estos aparatos pueden transformar las magnitudes físicas o químicas en magnitudes eléctricas. Por ejemplo: existen sensores que se instalan en los vehículos y que detectan cuando la velocidad de desplazamiento supera la permitida; en esos casos, emiten un sonido que alerta al conductor y a los pasajeros.

Otro tipo de sensor muy habitual es aquel que se instala en la puerta de entrada de las viviendas y reacciona ante el movimiento. Si una persona se acerca al sensor, éste emite una señal y se enciende una lámpara. La utilización de estos sensores está vinculada a la seguridad, ya que evitan que alguien aproveche la oscuridad para ocultarse e ingresar en la casa sin ser advertido. El termómetro también es un tipo de sensor que aprovecha la capacidad del mercurio para reaccionar ante la temperatura y, de este modo, permite detectar si una persona tiene fiebre.

Los sensores, en definitiva, son artefactos que permiten obtener información del entorno e interactuar con ella. Así como los seres humanos apelan a su sistema sensorial para dicha tarea, las máquinas y los robots requieren de sensores para la interacción con el medio en el que se encuentran.

Cuando se desarrollan computadoras capaces de responder a órdenes de voz, por ejemplo, se las provee de micrófonos, que son sensores capaces de captar las ondas sonoras y transformarlas. Si estos sensores están conectados con otros circuitos, la máquina podrá reaccionar al estímulo de acuerdo a lo requerido por el usuario. (Schaffers, Komninos, Pallot, rousse, Nilsson & Oliveira, 2013, p.120)

2.7.1. CARACTERÍSTICAS DE UN SENSOR

Muchas de las características de los sensores dependen de la variable a medir, pero otras son comunes a todos los sensores. Algunos de los aspectos a tener en cuenta en el momento de seleccionar un sensor son los siguientes:

- Exactitud: especifica la diferencia entre el valor medido y el valor real de la variable que se está midiendo.
- Conformidad o repetitividad: el grado con que mediciones sucesivas difieren unas de las otras.
- Resolución: es el cambio más pequeño que se puede medir.
- Precisión se compone de las características de conformidad y resolución.
- Sensibilidad: viene dado por el mínimo valor de la variable medida que produce un cambio en la salida.
- Error: es la desviación entre valor verdadero y valor medido.
- Linealidad: nos indica que tan cerca está la correlación entre la entrada y la salida a una línea recta.
- Rango es la diferencia entre el mayor valor y el menor valor que se puede medir.
- Rapidez de respuesta: capacidad del instrumento de seguir las variaciones de la entrada.

Existen otros aspectos a toma en consideración, por ejemplo, la alimentación del sensor, el tipo de salida, el tipo de conexión (a dos hilos o a tres hilos) de la salida. Los sensores de proximidad, que es uno de los más usados, son de varios tipos: ópticos, inductivos, capacitivos, ultrasónicos y finales de carrera. Estos aspectos serán tratados más adelante en otras entradas.

Un sensor es un tipo de transductor que transforma la magnitud que se quiere medir o controlar, en otra, que facilita su medida. Pueden ser de indicación directa (e.g. un termómetro de mercurio) o pueden estar conectados a un indicador (posiblemente a través de un convertidor analógico / digital, un computador y un visualizador) de modo que los valores detectados puedan ser leídos por un humano. Por lo general, la señal de salida de estos sensores no es apta para su lectura directa y a veces tampoco para su procesado, por lo que se usa un circuito de acondicionamiento, por ejemplo un puente de Wheatstone, amplificadores y filtros electrónicos que adaptan la señal a los niveles apropiados para el resto de los circuitos. (Schaffers, Komninos, Pallot, rousse, Nilsson & Oliveira, 2013, p.130)

2.7.2. TIPOS DE SENSORES

Existen diferentes tipos de sensores, en función del tipo de variable a medir:

Magnitud	Transductor	Característica
Posición lineal y angular	Potenciómetro	Analógica
	Encoder	Digital
	Sensor Hall	Digital
Desplazamiento y deformación	Galga extensiométrica	Analógica
	Magnetostrictivos	A/D
	Magnetorresistivos	Analógica
	LVDT	Analógica

Magnitud	Transductor	Característica
Velocidad lineal y angular	Dinamo tacométrica	Analógica
	Encoder	Digital
	Detector inductivo	Digital
	Servo-inclinómetros	A/D
	RVDT	Analógica
	Giróscopo	
Aceleración	Acelerómetro	Analógico
	Servo-accelerómetros	
Fuerza y par (deformación)	Galga extensiométrica	Analógico
	Triaxiales	A/D
Presión	Membranas	Analógica
	Piezoeléctricos	Analógica
	Manómetros Digitales	Digital
Caudal	Turbina	Analógica
	Magnético	Analógica
Temperatura	Termopar	Analógica
	RTD	Analógica
	Termistor NTC	Analógica
	Termistor PTC	Analógica
	Bimetal - Termostato	I/O
Sensores de presencia	Inductivos	I/O
	Capacitivos	I/O
	Ópticos	I/O y Analógica
Sensores táctiles	Matriz de contactos	I/O
	Piel artificial	Analógica
Visión artificial	Cámaras de video	Procesamiento digital
	Cámaras CCD o CMOS	Procesamiento digital
Sensor de proximidad	Sensor final de carrera	
	Sensor capacitivo	Analógica
	Sensor inductivo	Analógica
	Sensor fotoeléctrico	Analógica

Magnitud	Transductor	Característica
Sensor acústico (presión sonora)	micrófono	Analógica
Sensores de acidez	ISFET	
Sensor de luz	fotodiodo	Analógica
	Fotorresistencia	Analógica
	Fototransistor	Analógica
	Célula fotoeléctrica	Analógica
Sensores captura de movimiento	Sensores inerciales	

Tabla 2.6 – Tipos de sensores

Fuente: Schaffers, Komninos, Pallot, rousse, Nilsson & Oliveira (2013) Smart cities and the future internet: Towards cooperation frameworks for open innovation.

Algunas magnitudes pueden calcularse mediante la medición y cálculo de otras, por ejemplo, la velocidad de un móvil puede calcularse a partir de la integración numérica de su aceleración. La masa de un objeto puede conocerse mediante la fuerza gravitatoria que se ejerce sobre él en comparación con la fuerza gravitatoria ejercida sobre un objeto de masa conocida (patrón). (Schaffers, Komninos, Pallot, rousse, Nilsson & Oliveira, 2013, p.150)

2.7.3. FOTORRESISTENCIA

Es un componente electrónico cuya resistencia disminuye con el aumento de intensidad de luz incidente. Puede también ser llamado concha de day coronel fotorresistor, fotoconductor, célula fotoeléctrica o resistor dependiente de la luz, cuyas siglas, LDR, se originan de su nombre en inglés light-dependent resistor. Su cuerpo está formado por una célula o celda y dos patillas.

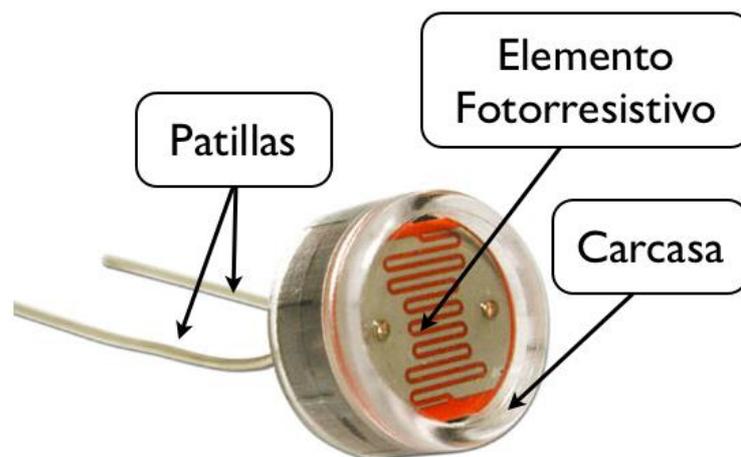


Figura 2.19 - Partes de la fotorresistencia
Fuente EcuRed.co (2017) Fotorresistencia

Un fotorresistor está hecho de un semiconductor de alta resistencia como el sulfuro de cadmio, CdS. Si la luz que incide en el dispositivo es de alta frecuencia, los fotones son absorbidos por la elasticidad del semiconductor dando a los electrones la suficiente energía para saltar la banda de conducción. El electrón libre que resulta, y su hueco asociado, conducen la electricidad, de tal modo que disminuye la resistencia. Los valores del enlace típico varían entre $1\text{ M}\Omega$, o más, en la oscuridad y $100\ \Omega$ con luz brillante. Las células de sulfuro del cadmio se basan en la capacidad del cadmio de variar su resistencia según la cantidad de luz que incide la célula. Cuanta más luz incide, más baja es la resistencia. Las células son también capaces de reaccionar a una amplia gama de frecuencias, incluyendo infrarrojo (IR), luz visible, y ultravioleta (UV). La variación del valor de la resistencia tiene cierto retardo, diferente si se pasa de oscuro a iluminado o de iluminado a oscuro. Esto limita a no usar los LDR en aplicaciones en las que la señal luminosa varía con rapidez. El tiempo de respuesta típico de un LDR está en el orden de una décima de segundo. Esta lentitud da ventaja en algunas aplicaciones, ya que se filtran variaciones rápidas de iluminación que podrían hacer inestable un sensor (ej. tubo fluorescente alimentado por corriente alterna). En otras aplicaciones

(saber si es de día o es de noche) la lentitud de la detección no es importante. Se fabrican en diversos tipos y pueden encontrarse en muchos artículos de consumo, como por ejemplo en cámaras, medidores de luz, relojes con radio, alarmas de seguridad o sistemas de encendido y apagado del alumbrado de calles. (EcuRed.co, 2017).

2.8. ACTUADORES

Un actuador es un dispositivo capaz de transformar energía hidráulica, neumática o eléctrica en la activación de un proceso con la finalidad de generar un efecto sobre un proceso automatizado. Este recibe la orden de un regulador o controlador y en función a ella genera la orden para activar un elemento final de control, como por ejemplo una válvula. Son los elementos que influyen directamente en la señal de salida del automatismo, modificando su magnitud según las instrucciones que reciben de la unidad de control. Existen varios tipos de actuadores como son:

- Electrónicos
- Eléctricos
- Hidráulicos
- Neumáticos

Los actuadores hidráulicos, neumáticos y eléctricos son usados para manejar aparatos mecatrónicos. Por lo general, los actuadores hidráulicos se emplean cuando lo que se necesita es potencia, y los neumáticos son simples posicionamientos. Sin embargo, los hidráulicos requieren mucho equipo para suministro de energía, así como de mantenimiento periódico. Por otro lado, las aplicaciones de los modelos neumáticos también son limitadas desde el punto de vista de precisión y mantenimiento. (AUMA, 2017, p.5)

2.8.1. RELÉ ELECTROMAGNÉTICO

También se le llama relevador es un dispositivo electromagnético. Funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico en el que, por medio de una bobina y un electroimán, se acciona un juego de uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes. Fue inventado por Joseph Henry en 1835. Dado que el relé es capaz de controlar un circuito de salida de mayor potencia que el de entrada, puede considerarse, en un amplio sentido, como un amplificador eléctrico. Como tal se emplearon en telegrafía, haciendo la función de repetidores que generaban una nueva señal con corriente procedente de pilas locales a partir de la señal débil recibida por la línea. Se les llamaba "relevadores".

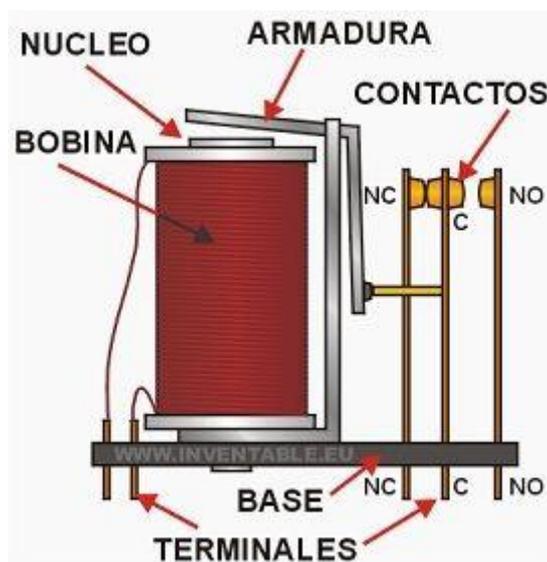


Figura 2.20 - Forma de un relé electromagnético

Fuente: Funcionamiento Aprende Facil, (2018),
<http://www.areatecnologia.com/electricidad/rele.html>

En la Figura 2.20 se representa, de forma esquemática, la disposición de los distintos elementos que forman un relé de un único contacto de trabajo o circuito. El electroimán hace girar la armadura verticalmente al ser alimentada, cerrando los contactos dependiendo de si es NA ó NC (normalmente abierto o normalmente cerrado). Si se le aplica un voltaje a la bobina se genera un campo magnético, que provoca que

los contactos hagan una conexión. Estos contactos pueden ser considerados como el interruptor, que permite que la corriente fluya entre los dos puntos que cerraron el circuito. (Funcionamiento Aprende Fácil, 2018)

2.9. PANELES SOLARES

Un panel solar es un dispositivo para aprovechar la energía solar. También se le puede llamar módulo solar. Los paneles solares fotovoltaicos contienen un conjunto de células solares que convierten la luz en electricidad. Se llama solar porque el sol es una de las fuentes de energía más fuertes para este tipo de uso. Las células solares a veces se llaman células fotovoltaicas, y la fotovoltaica significa literalmente "luz-electricidad". Las células solares tienen el efecto fotovoltaico para absorber la energía del sol y hacer que la corriente eléctrica fluya entre dos capas cargadas en la dirección opuesta.

Se puede utilizar la denominación de panel solar tanto para la energía solar fotovoltaica como para la energía solar térmica. De este modo, distinguimos:

- Colectores solares. Utilizados en las instalaciones de energía solar térmica. Su función es elevar la temperatura de un fluido mediante la radiación solar.
- Paneles fotovoltaicos. Se trata de un conjunto de células fotovoltaicas cuya función es generar una corriente eléctrica.



Figura 2.21 - Panel Solar

Fuente.: <https://solar-energia.net/definiciones/panel-solar.html>

2.9.1. LA ELECCIÓN DEL PANEL

El elemento principal de un sistema para convertir la energía solar en energía eléctrica es la célula fotoeléctrica, también llamada célula solar o célula fotovoltaica. Todas las células solares funcionan por el mismo principio: la luz incide en la superficie superior de la célula, y "empuja" los electrones del material con el que se ha fabricado hacia una capa inferior. Conectando las dos capas, conseguimos crear un circuito de "regreso a casa" para dichos electrones.

2.9.2. TIPOS CRISTALINOS

Las células solares más eficientes, basadas en el silicio que se encuentra en abundancia en la arena, son las de tipo monocristalino, donde cada célula se corta con un fino espesor a partir de una barra de silicio que ha recibido un tratamiento específico. Existen también las células de tipo policristalino, que combinan diferentes cortes pequeños de silicio. El tipo policristalino es algo menos eficiente que el monocristalino en condiciones ideales de iluminación, pero es algo mejor cuando el sol alcanza ángulos más bajos de incidencia sobre el panel. Es en la práctica el tipo más usado, aunque no tolera deportivamente la inclusión de sombras, o los días nublados.

2.9.3. THIN FILM

Se trata de un tipo de silicio amorfo (no cristalino) que se usa ampliamente en calculadoras y que tienen un rendimiento inferior a la mitad del rendimiento de un panel basado en células de tipo cristalino. Las únicas ventajas de este tipo de células es que permiten su aplicación en paneles flexibles y que son más económicas de fabricar

2.9.4. NÚMERO DE CÉLULAS

Hay disponibles paneles de 36, 33 ó 30 células. Los paneles con una cantidad superior de células necesitan sistemas de regulación porque alcanzan un voltaje excesivo, pero como veremos más adelante en el artículo, esa es su mayor ventaja.

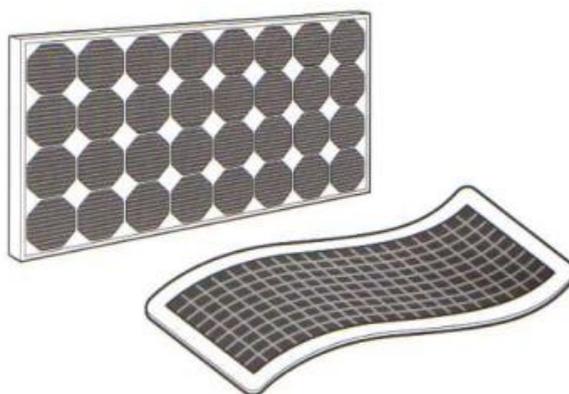


Figura 2.22 - Número de células en un panel solar

Fuente.: http://www.agenergia.org/wp-content/uploads/2018/05/1234260365_Uso_dePanelesSolaresBarcos_MARVIVA.pdf

2.10. BATERÍAS PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

La disponibilidad de energía solar y del viento para producir la electricidad raras veces coincide con el tiempo cuando la necesitamos. En generadores hidroeléctricos se puede aumentar el flujo de agua con válvulas, pero no podemos regular el sol ni el viento. Balancear la energía entre la producción y el uso es imprescindible.

Almacenar la energía se puede realizar en varias formas:

- Térmica, por ejemplo, calentar y almacenar el agua en tanques aislados.
- Mecánica, por ejemplo, aprovechando la energía potencial del agua en centrales hidroeléctricas reversibles, o la energía cinética de volantes de inercia.

- Eléctrica en condensadores eléctricos (supercondensadores y ultracapacitores por ejemplo en frenos regenerativos).
- Química en los diferentes tipos de baterías.

Todas estas formas tienen ventajas y desventajas, y en sistemas de energías solares y del viento, las más aptas son baterías a base de plomo (acumuladores). Otros tipos de baterías, sobre todo los de Ion de Litio (Li-Ion) están en desarrollo y cada vez más sustituyen las de plomo.

Las Baterías pueden ser consideradas el talón de Aquiles de los sistemas tipo 'isla', estos sistemas que no son conectados a la red. Las Baterías representan gran parte de la inversión, pero tienen frecuentemente la vida más corta de toda la instalación. Además, las baterías de plomo tienen riesgos importantes por ejemplo para la salud y el medio ambiente; reducir la frecuencia de cambiarlas contribuye significativamente a disminuir estos peligros.

Todas las baterías funcionan bien al inicio, las diferencias se muestran en su expectativa de vida. Hay baterías que pueden durar más de veinte años y otras, bajo las mismas condiciones, duran menos que dos. Con baterías la expresión 'quien compra barato, compra dos veces' es cierta.

2.10.1. TIPOS DE BATERÍAS

Hay diferentes tipos de baterías de plomo según el material de sus componentes. Para aplicaciones en sistemas fotovoltaicos y eólicos se usa en la gran mayoría baterías a base de plomo por su buena relación del precio por energía disponible. Este tipo fue inventado ya en 1859 por el francés Gastón Planté.

Las diferentes tecnologías de baterías comparan sus capacidades en relación a su peso y su volumen. Las baterías de ion de litio como las usadas en celulares y computadoras tienen características superiores.

Actualmente se investiga fuertemente en mejorarlas y en el desarrollo de alternativas como por ejemplo los de 'litio-aire' o de litio de estado sólido, principalmente motivado para solucionar los requerimientos de energía en vehículos eléctricos. Aunque hay noticias muy prometedoras, hasta el momento hay pocas alternativas económicamente viables a los acumuladores de plomo.

Elon Musk de Tesla anunció en Abril 2015 el 'Powerwall' con 7kW (con baterías de litio NMO tipo 18650) a un precio de fábrica de solamente 3,000.-US\$ (sin inversor e sin instalación). Aunque barato para baterías de litio, todavía cuestan más que el doble que las industriales de plomo. Este anuncio alertó la competencia y por ejemplo Mercedes Benz ahora ofrece su propio sistema de almacenamiento. Actualmente existe una alta variedad de ofertas a precios cada vez más accesibles.

De interés para energías renovables son las baterías de litio-ferrofosfato (LiFePO_4) que no contienen elementos tóxicos y tienen una eficiencia de hasta 98%. Se puede descargar por lo menos hasta un 20% de su capacidad y con un buen sistema de gestión (battery management system, BMS en inglés), pueden tener una vida hasta más de 10,000 ciclos. Son considerablemente más livianas y tienen menos volumen que baterías de plomo, pero algo más que otras de litio. La gran desventaja actual es el alto precio inicial (aproximadamente tres veces de una batería de plomo). Considerando su gran cantidad de ciclos y consecuente larga vida, es un ejercicio de cálculo para comprobar su rentabilidad.

2.10.2. BATERÍAS DE PLOMO

La mayoría de las baterías de plomo usadas en sistemas solares y eólicos se parecen a los que se usan en autos y camiones, pero son optimizadas para una aplicación diferente. Importante en los carros es la disponibilidad de mucha energía durante un tiempo muy corto, principalmente para arrancar el motor. Este alto flujo de amperes necesario se logra con capas de plomo delgadas.

En sistemas solares y eólicas las baterías tienen que dar la energía sobre un tiempo relativamente largo y frecuentemente se descargan a niveles más bajos. Estas baterías de tipo ciclo profundo tienen capas de plomo gruesas que además brindan la ventaja de significativamente prolongar su vida. Estas baterías son relativamente grandes y pesadas por el plomo. Son compuestas de celdas de 2 voltios nominales que se juntan en serie para lograr baterías de 6, 12 o más voltios para aplicaciones especiales.

Hay que diferenciar entre baterías para el uso cíclico (cargar y descargar diariamente) y las baterías para el uso en sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS). Internamente son diferentes, por ejemplo, varía el porcentaje de antimonio en el ácido.



Figura 2.23 - Batería de plomo
<https://deltavolt.pe/energia-renovable/baterias>

2.10.3. CONDICIONES QUE AFECTAN LA VIDA DE LAS BATERÍAS

La mayoría de baterías de carros viven menos de 200 ciclos si se descarga regularmente a 50% de su capacidad. Baterías líquidas de ciclo profundo (incluso las 'selladas') son capaces de 400 ciclos, baterías de AGM y de Gel superan fácilmente 800 ciclos. Hay baterías para el uso industrial (por ejemplo los tubulares OPzS o OPzV) que pueden manejar bajo buenas condiciones más de 10,000 ciclos.

Exponer las baterías a temperaturas elevadas o descargarlas por completo, aunque muy pocas veces, arruina este cálculo. Todas las baterías a base de plomo necesitan (quizás como humanos) una buena alimentación (carga). Baterías de calidad, siempre llenas, sin sobrecargarlas, pueden vivir 10 años o más. Si se descargan frecuentemente en forma profunda (aunque el término 'ciclo profundo' sugiere diferente), mueren más rápidas.

En la práctica es importante instalar suficiente capacidad para no descargar las baterías a menos de 50% de su valor nominal. (Nota: también se necesita suficiente capacidad de paneles solares o del aerogenerador para cargarlas por completo). Tener suficiente capacidad instalada además tiene el importante beneficio de aumentar las reservas por ejemplo para los días con poco sol o viento y para situaciones de emergencias cuando de repente se necesita más luz. Entonces, dependiendo de la necesidad de electricidad, es importante calcular un balance óptimo para la capacidad instalada. A lo largo es económicamente más favorable invertir en buenas y suficientes baterías.

2.10.4. EFICIENCIA DE LAS BATERÍAS SOLARES

La capacidad de las baterías varía según tipo, su calidad de construcción, la temperatura, vejez, y el estado de descarga. Una batería descargada con una corriente alta en poco tiempo tiene menos capacidad que la misma descargada con una corriente pequeña sobre un tiempo prolongado. Normalmente los fabricantes de baterías indican la capacidad de la batería descargada sobre 24 horas (C24), pero algunos miden la capacidad hasta 100 horas (C100) y así indican un valor comparativo más alto de la competencia.

Más importante es la diferencia entre la cantidad de energía que entra en la batería (cargando) y la que es disponible en la batería (descargando). Esta eficiencia de Coulomb (también conocido como eficiencia de Faraday) es en baterías normales de plomo entre 70 y 85%. Significa por ejemplo que de 100Ah usados para cargar la batería, solamente entre 70 y 85Ah son disponibles, el resto de la energía se pierde principalmente en calor y el proceso químico. Las baterías de buena calidad, sobre todo los de tipo AGM, pueden tener una eficiencia hasta 95%. Esta pérdida frecuentemente se olvida en la planificación de sistemas con baterías.

2.10.5. TEMPERATURA: FACTOR DECISIVO PARA LA VIDA DE LAS BATERÍAS

La temperatura tiene gran influencia sobre la batería. No quieren el frío, ni el calor: una temperatura entre 20 y 25°C es lo óptimo para una batería en uso. A más alta temperatura, la vida es más reducida. Una temperatura 10 grados arriba de 25°C puede cortar la vida por la mitad. Por otro lado, la capacidad de almacenar energía disminuye en temperaturas bajas, pero no reduce la vida. Entonces para una batería sin uso, es preferible mantenerla a una temperatura más baja, pero sin congelarla.

La temperatura también influye como cargar una batería. Con el aumento de la temperatura hay que disminuir el voltaje para evitar una gasificación, pero todavía asegurando una carga por completo. Por eso, todos los controladores buenos tienen una compensación de temperatura incorporada. Recordamos que una gasificación en baterías selladas (libre de mantenimiento) no es recuperable: el líquido se pierde por las válvulas sin tener la posibilidad de rellenarlas.

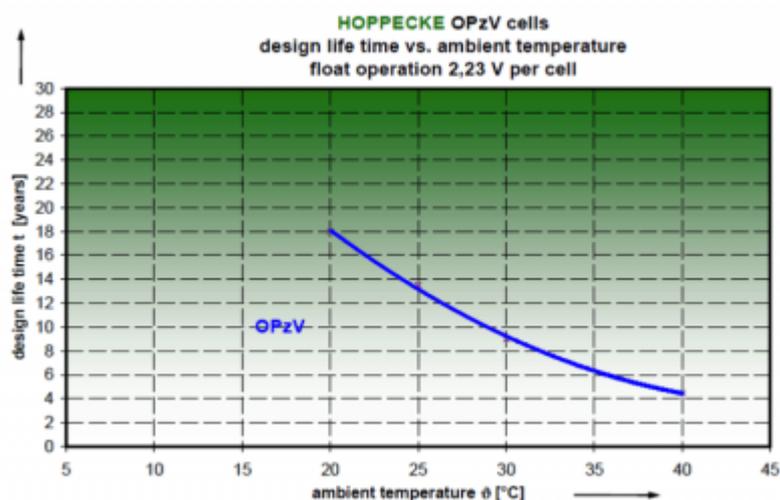


Figura 2.24 - Línea de Tiempo vs Temperatura
<https://deltavolt.pe/energia-renovable/baterias>

2.11. HIPÓTESIS DEL TRABAJO

El diseño de un controlador basado en la lógica fuzzy permitirá la mejor administración de la energía eléctrica solar doméstica en el distrito de Puno.

2.11.1. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

- La aplicación de la lógica fuzzy logrará un mejor diseño de controlador.
- El diseño del controlador logrará una mejor administración de la energía eléctrica solar.

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES

3.1.1. HARDWARE

- Ordenador para programación (laptop).

Modelo: HP 250

Procesador: Intel(R) Core(TM) i5-2430 2.40GHz

Memoria instalada (RAM): 4.00GB de RAM.

Tipo de sistema: Sistema Operativo de 64 bits Windows 10

- Arduino UNO R3

Microcontrolador ATmega328.

Voltaje de entrada 7-12V.

14 pines digitales de I/O (6 salidas PWM).

6 entradas análogas.

32k de memoria Flash.

Reloj de 16MHz de velocidad.



Figura 3.1 - Arduino UNO R3

Fuente: Arduino (2017) <https://www.arduino.cc/en/Arduino-UNO-R3>

- Panel Solar 60W.

Potencia (en Wattios): 60W

Voltaje en circuito abierto (V_{oc}): 22,1VVoltaje en el punto de máxima potencia (W_{mp}): 17,4VCorriente de cortocircuito (I_{sc}): 3,80^aCorriente nominal (I_{mpp}): 3,45^a

Sistema de voltaje máximo: 1000VDC

Rendimiento: 12,99%

Tolerancia: +/-3°C

Tipo de célula: Monocristalino

Número de células: 36

Tamaño de las células: 125 x 83,33 mm

Dimensiones: 840 x 550 x 35 mm

Peso: 6 Kg

- Batería de 12V y 60AH

Electrolito líquido

Bajo Mantenimiento

Larga vida de servicio

Voltaje 12V

Capacidad 60Ah

Peso 25Kg

Largo 32.4cm x Ancho 17.1 cm x Alto 24.8 cm

- Potenciómetros
- Resistencias
- Led (para prototipo)
- Pulsadores (para prototipo)
- Fotorresistencia (LDR)

3.1.2. SOFTWARE

- Sistema Operativo de 64 bits Windows 10.
- Software para la compilación Arduino IDE.
- DIALux 4.13
- Microsoft Word 2013 profesional.
- Block de notas de Windows.

3.2. DISEÑO, NIVEL Y TIPO DE LA INVESTIGACION

3.2.1. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación es experimental ya que se utilizará experimentos y los principios encontrados en el método científico. Los experimentos pueden ser llevados a cabo en el laboratorio de cómputo. Estos generalmente involucran un número relativamente pequeño de personas y abordan una pregunta bastante enfocada. Los experimentos son más efectivos para la investigación explicativa y frecuentemente están limitados a temas en los cuales el investigador puede manipular la situación en la cual las personas se hallan.

3.2.2. NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN

El nivel de investigación se refiere a la profundidad del conocimiento que se busca lograr con la investigación, por tanto, el nivel de la presente investigación es exploratoria, señalando que las investigaciones exploratorias buscan abrir nuevos caminos en el desarrollo del conocimiento humano. Y la presente investigación siendo un diseño de un controlador basado en la lógica fuzzy para la administración de energía eléctrica solar doméstica en el Distrito de Puno.

3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA DE LA INVESTIGACIÓN

3.3.1. POBLACIÓN.

Siendo la población el conjunto de las entidades, o cosas respecto a las cuales se basa las conclusiones de una investigación, para nuestro caso la población está definida por los usuarios del distrito de Puno y alrededores con una población de 13000 familias aproximadamente.

3.3.2. MUESTRA.

Se define la muestra como parte que se estudia y es representativa de la población, es decir un segmento que tiene las características y propiedades de la población, por tanto, se considerará como un muestreo no probabilístico y estará conformada por sólo un sector del distrito de Puno, es decir, en un laboratorio de computo, de esta forma se procede a desarrollar las pruebas. La muestra no servirá para hacer generalizaciones, pero sí para el estudio exploratorio, se ha elegido a los individuos utilizando diferentes criterios relacionados con las características de la investigación y está determinado por el autor.

3.4. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

3.4.1. UBICACIÓN

La investigación, tanto pruebas y diseño se desarrollará en un laboratorio de Electrónica de propiedad del autor. Las pruebas del prototipo y su aplicación masiva se desarrollarán en el distrito de Puno.

3.4.2. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

En la presente investigación se pretende diseñar un controlador basado en la lógica fuzzy para la administración de energía eléctrica solar doméstica en el distrito de Puno, esta investigación consta de cuatro etapas que se describen a continuación.

- **1ª etapa:** en esta etapa trata esencialmente búsqueda de información, consulta bibliográfica y sitios web, sobre plataformas de desarrollo, elección de componentes y técnicas o métodos implementación para el diseño.

- **2ª etapa:** comprende en las pruebas en simulaciones dentro de Fuzzy Toolbox en Matlab.
- **3º etapa:** ya realizadas algunas simulaciones se inicia con diseño del sistema con los componentes necesarios.
- **4ª etapa:** comprende la obtención y el proceso de verificación, que consiste en analizar los resultados, para luego ver el buen funcionamiento y su posterior corrección. Se determina usando un prototipo para obtener resultados y contrastarlos con las simulaciones.

3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

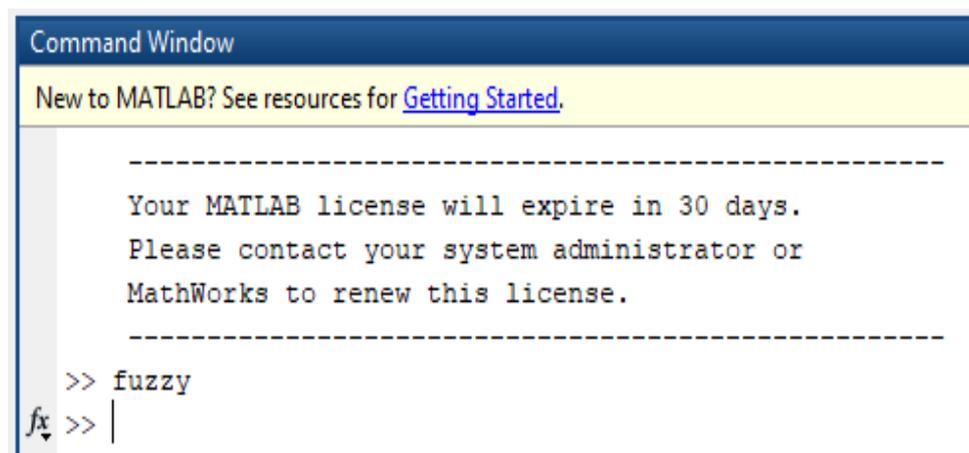
La recolección de datos se refiere a cómo y qué medios se usan para la obtención de la información que será de utilidad para la corroboración de nuestras hipótesis, por lo tanto, resumimos este apartado de la siguiente forma:

TÉCNICAS	INSTRUMENTOS
Consultas bibliográficas y de bases de datos.	Papers, foros, blogs, libros, videotutoriales y más fuentes de información publicadas en Internet
Observación de pruebas finales	Capturas a la pantalla, comunicación serial del Arduino a la computadora, memorias EEPROM de almacenamiento, software de Arduino, apuntes de simulaciones y fotos.

Tabla 3.1 - Técnicas e instrumentos para recolección de datos
Elaboración propia

3.6. DISEÑO DE LA LÓGICA FUZZY DEL CONTROLADOR

Para determinar el comportamiento de la lógica fuzzy del controlador, se usará la herramienta Fuzzy Toolbox en Matlab. En la línea de comandos de Matlab se ingresa el comando fuzzy para acceder a Fuzzy Toolbox.



```
Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.

-----
Your MATLAB license will expire in 30 days.
Please contact your system administrator or
MathWorks to renew this license.
-----

>> fuzzy
fx >> |
```

Figura 3.2 – Comando para ingresar a Fuzzy Toolbox.
Elaboración Propia.

En la herramienta se agregan dos entradas mostradas en la Figura 3.3 y de color amarillo, estas dos entradas son el voltaje del panel solar denominado panel-solar y el voltaje de la batería denominado “batería”, la salida en color celeste es la conmutación entre dos estados, usar la energía eléctrica de la red convencional o usar la energía eléctrica solar, a la salida se le denomina salida-conmutador. En medio se encuentra en color blanco el controlador con la lógica fuzzy. A las entradas y salidas que son agregadas se les denomina miembros.

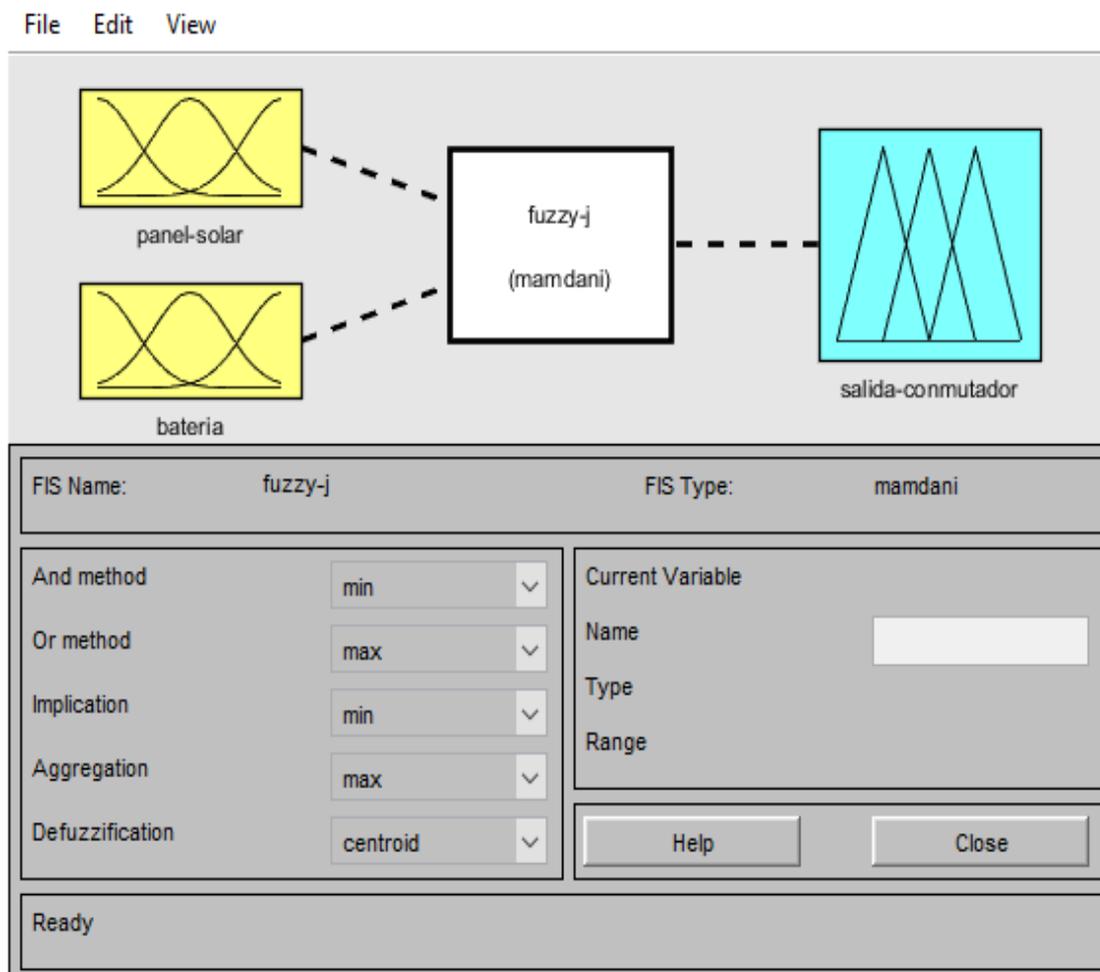


Figura 3.3 – Diseño Fuzzy Toolbox en Matlab.
Elaboración Propia.

Seguidamente se configura la naturaleza de los dos miembros de entrada, el primer miembro es el voltaje del panel solar (panel-solar), y su naturaleza es la de una función gaussiana, en los parámetros, el rango del voltaje del panel solar se determina entre 10 voltios y 19 voltios, en realidad el panel solar provee un voltaje desde 0 voltios hasta 19 voltios pero para el sistema se determina 10 voltios por ser el valor mínimo promedio que provee el panel solar en las muestras experimentales. Se han determinado tres estados para este elemento de entrada, rs-baja, rs-buena y rs-excelente; que son estados correspondientes a radiación solar baja, radiación solar buena y radiación solar excelente.

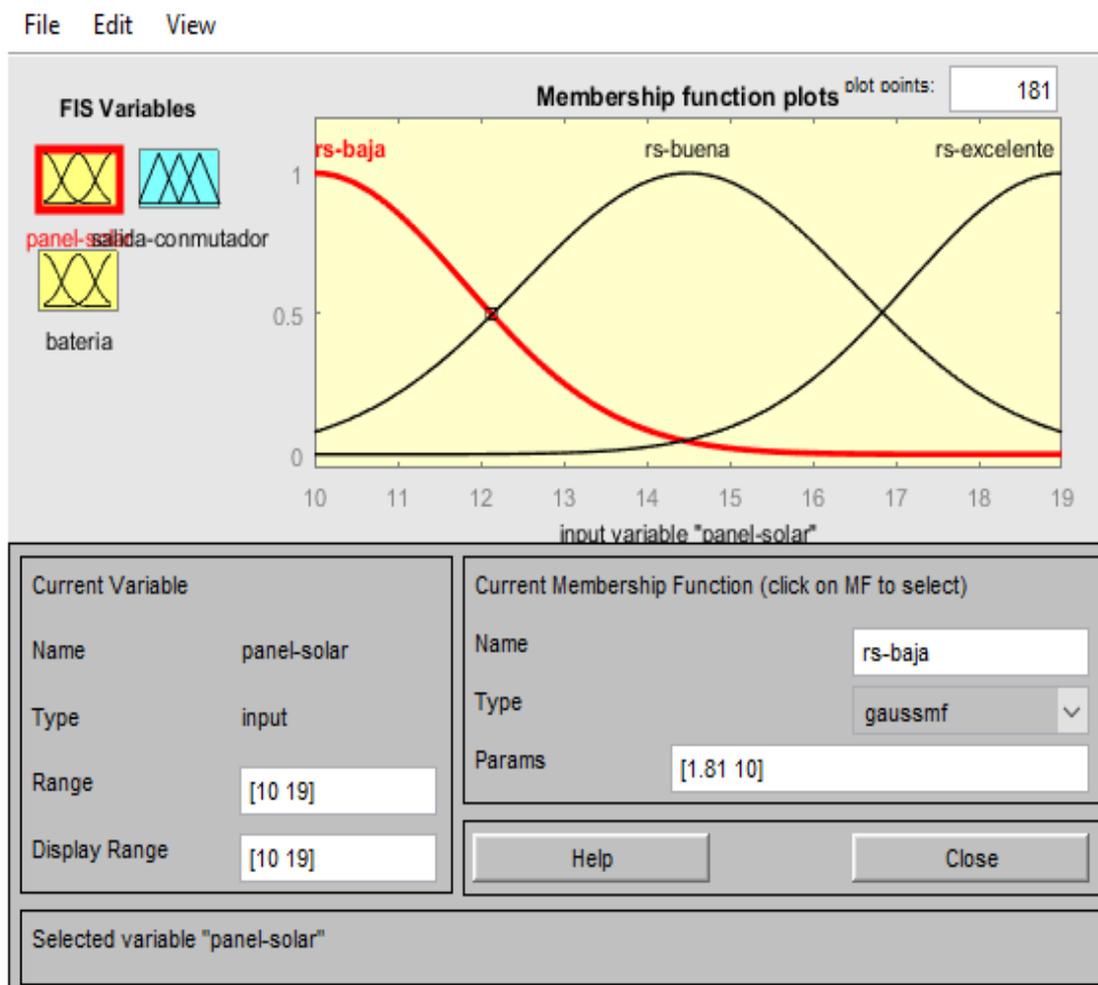


Figura 3.4 – Miembro del sistema configurado como entrada denominado panel-solar. Elaboración Propia.

El segundo miembro es el voltaje de la batería (bateria), y su naturaleza es también la de una función gaussiana, en los parámetros, el rango del voltaje de la batería se determina entre 10 voltios y 14 voltios, en realidad la batería provee un voltaje desde 0 voltios hasta 14 voltios pero para el sistema se determina 10 voltios por ser el valor mínimo promedio que provee el panel solar en las muestras experimentales. Se han determinado tres estados para este otro elemento de entrada, cb-baja, cb-buena y cb-excelente; que son estados correspondientes a la carga baja en la batería, carga buena en la batería y carga excelente en la batería.

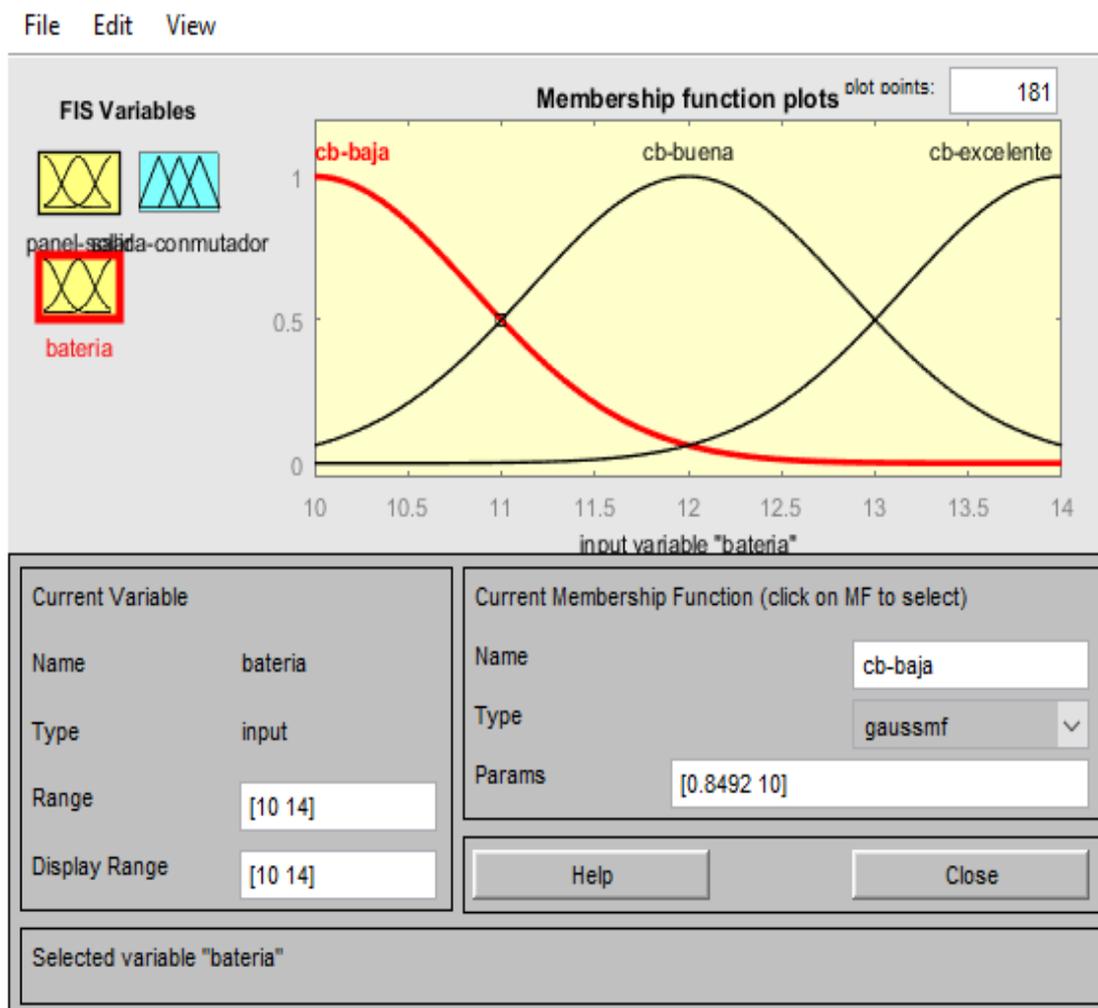


Figura 3.5 – Miembro del sistema configurado como entrada y denominado batería.
Elaboración Propia.

El tercer miembro es la salida del controlador denominado salida-conmutador, y su naturaleza es la de una función trapezoidal, en los parámetros, un valor alto indica que se usa la energía eléctrica solar y un valor bajo indica que se conmuta un circuito para usar energía eléctrica de la red eléctrica convencional. Por eso es que se determinaron dos estados para el circuito de conmutación, que para el diseño fuzzy se denominan: red-electrica y energia-solar; que corresponden a que el sistema usa como fuente de energía a la red eléctrica convencional o la energía eléctrica proveniente del sol; de esta forma el valor mínimo es 0 para red-electrica y el máximo es 1 para energia-solar.

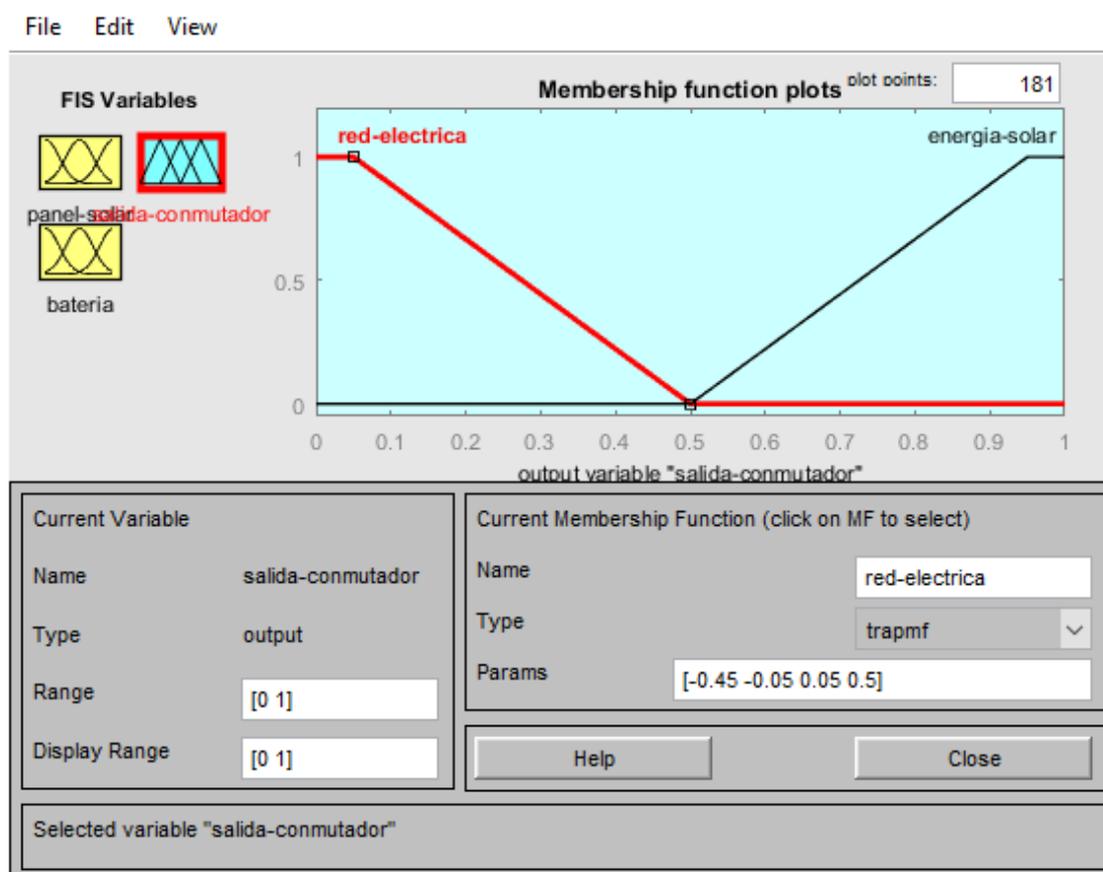


Figura 3.6 – Salida del controlador como una función trapezoidal.
Elaboración Propia.

Como parte fundamental del diseño fuzzy se configuran las reglas según las dos entradas del sistema, la primera entrada, el voltaje del panel solar, tiene tres estados: rs-baja, rs-buena y rs-excelente; la segunda entrada del sistema, el voltaje de la batería, también tiene tres estados: cb-baja, cb-buena y cb-excelente; se agrega un estado más a cada entrada por defecto, este estado (none) indica que la entrada no está ingresando ningún valor, que en electricidad se denomina también, sin conexión (N/C). En base a estos estados se crean las reglas utilizando la lógica fuzzy, las reglas creadas son nueve y se muestran en formato verbal en la figura 3.7., por ejemplo, la primera regla indica que si la radiación solar en el panel fotovoltaico es baja y al mismo tiempo la carga en la batería también es baja, la salida conmuta un circuito para usar como fuente de energía, la red eléctrica convencional. La última regla indica que si la radiación solar en

el panel fotovoltaico es excelente y al mismo tiempo la carga en la batería también es excelente, la salida conmuta un circuito para usar la energía eléctrica proveniente del sol.

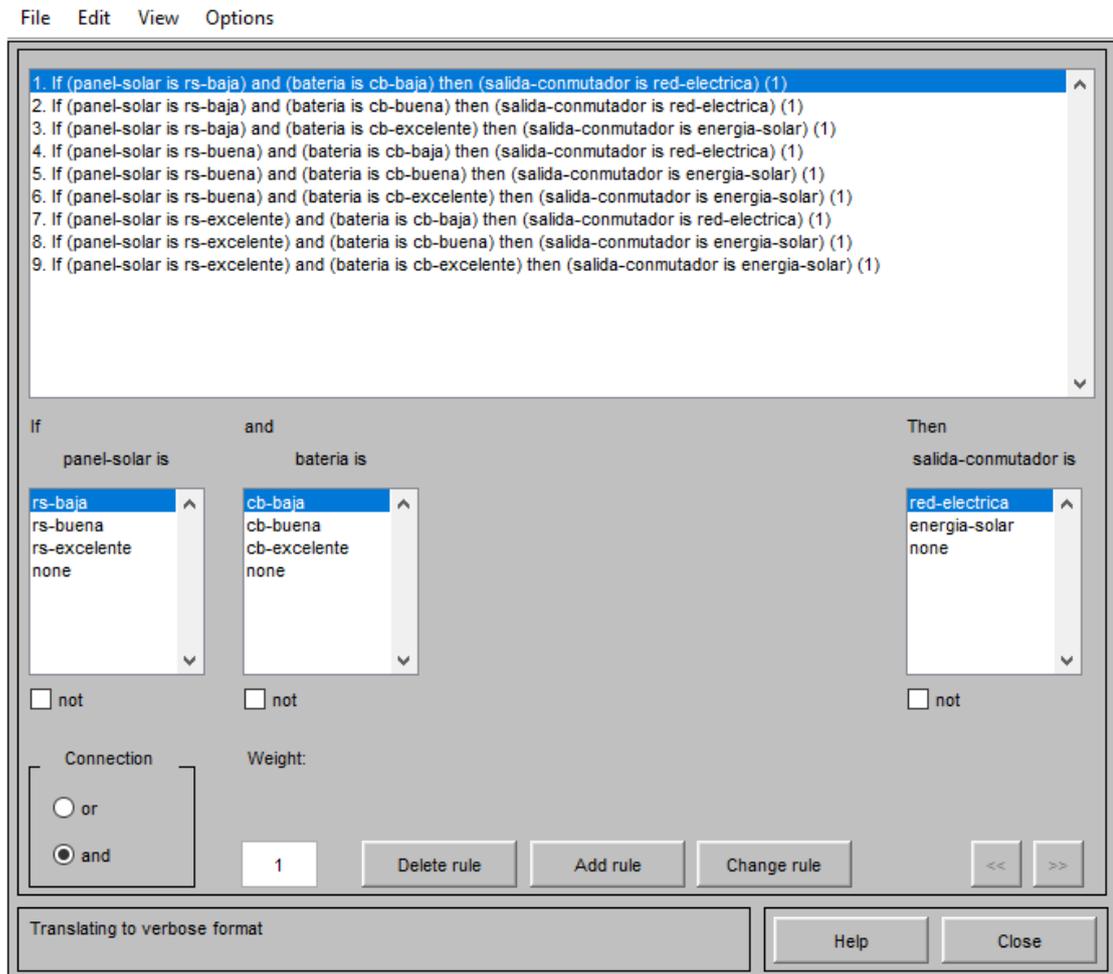


Figura 3.7 – Reglas Fuzzy en formato verbal.
Elaboración propia.

En la figura 3.8. se muestran las reglas en formato simbólico, por ejemplo la regla número 2 indica que si el voltaje del panel fotovoltaico corresponde a una radiación solar baja y al mismo tiempo la carga en la batería corresponde a un voltaje considerado como bueno; entonces el circuito de la salida conmuta para que la fuente de energía sea la red eléctrica convencional.

```

1. (panel-solar==rs-baja) & (bateria==cb-baja) => (salida-conmutador=red-electrica) (1)
2. (panel-solar==rs-baja) & (bateria==cb-buena) => (salida-conmutador=red-electrica) (1)
3. (panel-solar==rs-baja) & (bateria==cb-excelente) => (salida-conmutador=energia-solar) (1)
4. (panel-solar==rs-buena) & (bateria==cb-baja) => (salida-conmutador=red-electrica) (1)
5. (panel-solar==rs-buena) & (bateria==cb-buena) => (salida-conmutador=energia-solar) (1)
6. (panel-solar==rs-buena) & (bateria==cb-excelente) => (salida-conmutador=energia-solar) (1)
7. (panel-solar==rs-excelente) & (bateria==cb-baja) => (salida-conmutador=red-electrica) (1)
8. (panel-solar==rs-excelente) & (bateria==cb-buena) => (salida-conmutador=energia-solar) (1)
9. (panel-solar==rs-excelente) & (bateria==cb-excelente) => (salida-conmutador=energia-solar) (1)
    
```

Figura 3.8 – Reglas Fuzzy en formato simbólico.

Elaboración propia.

Seguidamente se muestran las mismas reglas Fuzzy en formato indexado, en la figura 3.9., este formato no es muy amigable para el humano, sin embargo, es el formato adecuado para que la lógica Fuzzy tenga efecto, es decir, una computadora entiende y procesa los datos en este lenguaje.

```

1 1, 1 (1) : 1
1 2, 1 (1) : 1
1 3, 2 (1) : 1
2 1, 1 (1) : 1
2 2, 2 (1) : 1
2 3, 2 (1) : 1
3 1, 1 (1) : 1
3 2, 2 (1) : 1
3 3, 2 (1) : 1
    
```

Figura 3.9 – Reglas Fuzzy en formato indexado.

Elaboración propia.

En la gráfica siguiente, figura 3.10, se muestra los tres elementos en tres dimensiones, en el eje X, la entrada panel-solar, en el eje Y la otra entrada bateria y la salida en el eje Z denominada salida-conmutador. En esta gráfica se muestra la naturaleza del sistema de salida en función a las dos entradas, por ejemplo, si panel-solar es igual a 10 bateria también es igual a 10, entonces salida-conmutador es igual a 0; esto se explica como sigue: si el voltaje de la batería es igual a 10 voltios y el voltaje del panel fotovoltaico también es igual a 10 voltios, entonces la salida conmuta a un valor 0 (usar la red eléctrica convencional como fuente de energía). Así se puede describir el comportamiento del sistema en cada coordenada de tres elementos.

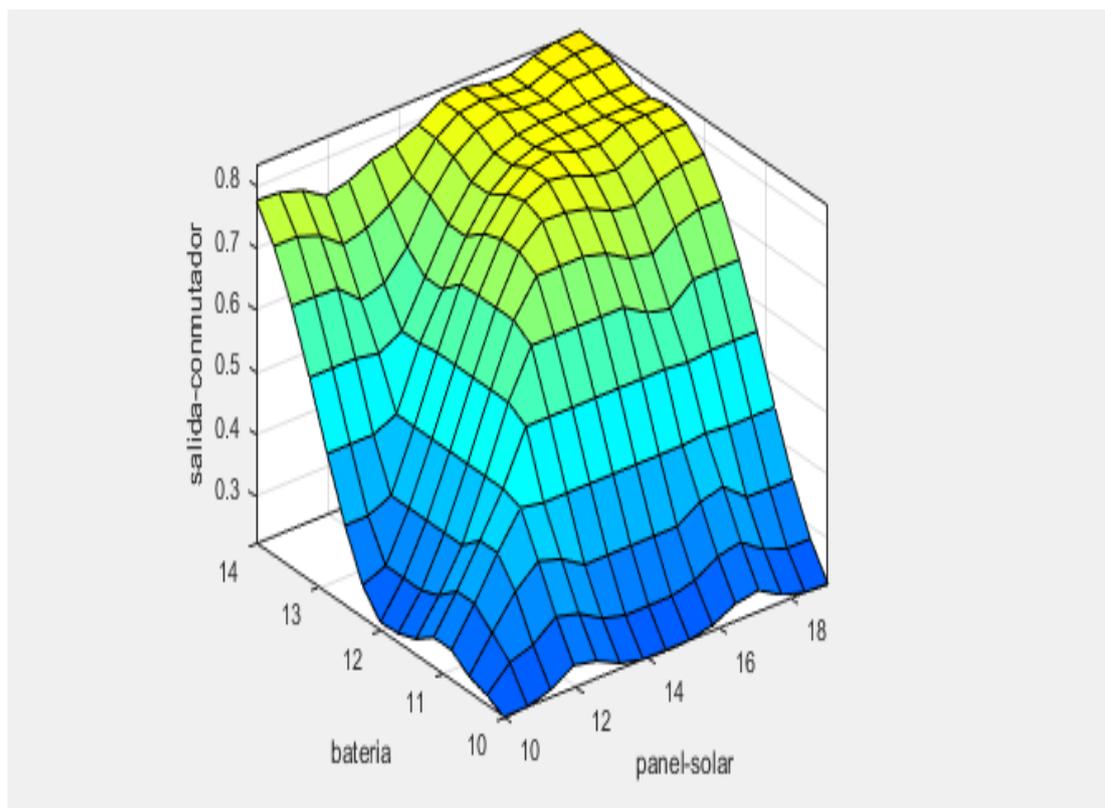


Figura 3.10 – Gráfica del sistema en tres dimensiones.
Elaboración propia.

Como parte final del diseño, corresponde realizar las pruebas del funcionamiento de la lógica en distintas situaciones, es decir cambiando las variables de entrada para verificar cómo se comporta la salida. En la figura 3.11. se describe de la siguiente forma: si el voltaje en el panel fotovoltaico es de 10 voltios y el voltaje en la batería es de 12 voltios, entonces la salida conmuta el circuito para usar la energía de la red eléctrica convencional, con un valor de 0.238, que para el sistema es suficiente para conmutar a 0.

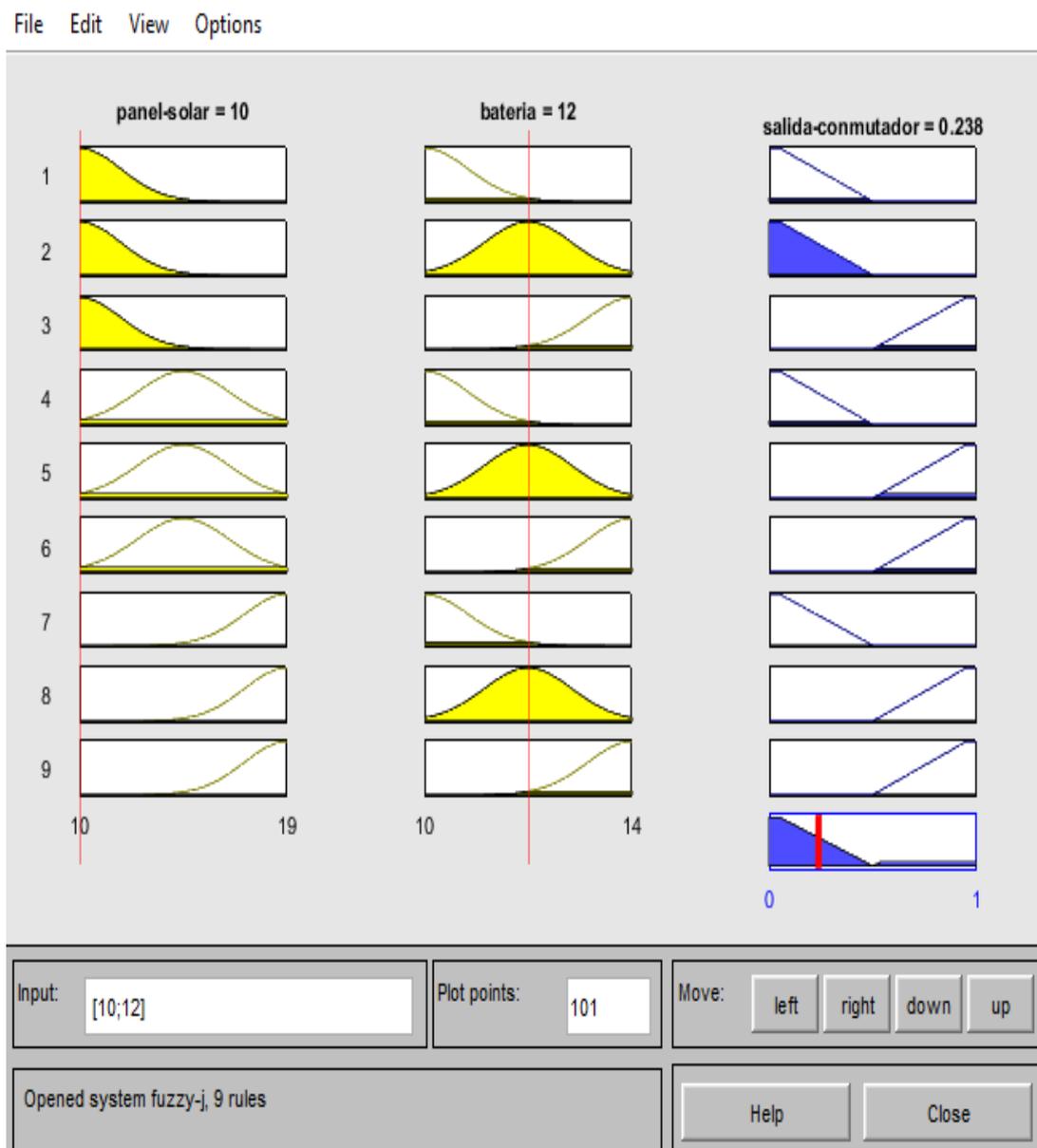


Figura 3.11 – Prueba de la lógica con entradas 10 y 12.
Elaboración propia.

Otro ejemplo se demuestra a continuación, figura 3.12., : si el voltaje en el panel fotovoltaico es de 14 voltios y el voltaje en la batería es de 12 voltios, entonces la salida conmuta el circuito para usar la energía eléctrica proveniente del sol, con un valor de 0.755, que para el sistema es suficiente para conmutar a 1.

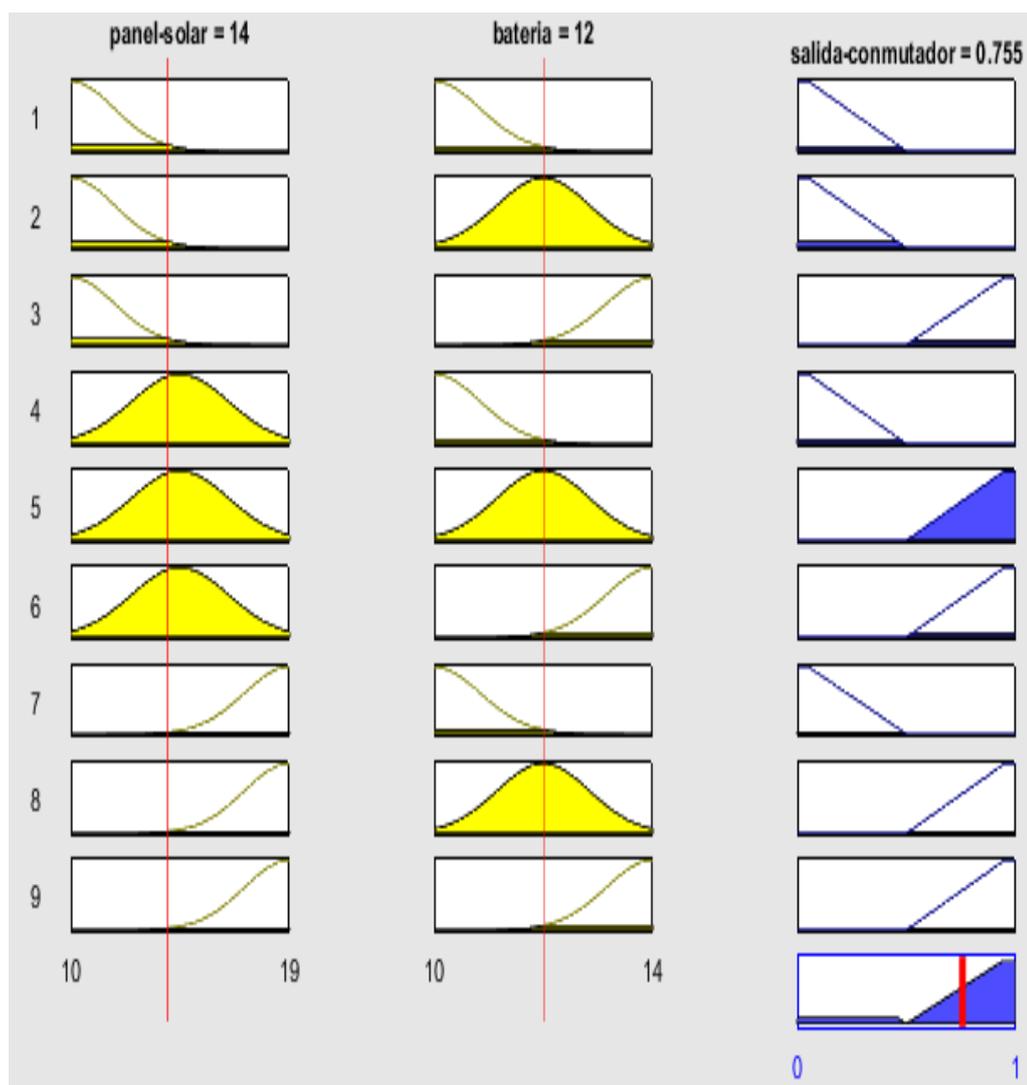


Figura 3.12 – Prueba de la lógica con entradas 14 y 12.
Elaboración propia.

Un caso muy particular se describe en la figura 3.13. : si el voltaje en el panel fotovoltaico es de 18 voltios y el voltaje en la batería es de solamente 10 voltios, entonces la salida conmuta el circuito para usar la energía eléctrica de la red convencional, con un valor de 0.231, que para el sistema es suficiente para conmutar a 0. Esto se explica que si la batería tiene un voltaje bajo pero el panel fotovoltaico tiene un voltaje muy alto, entonces se prefiere usar la energía solar.

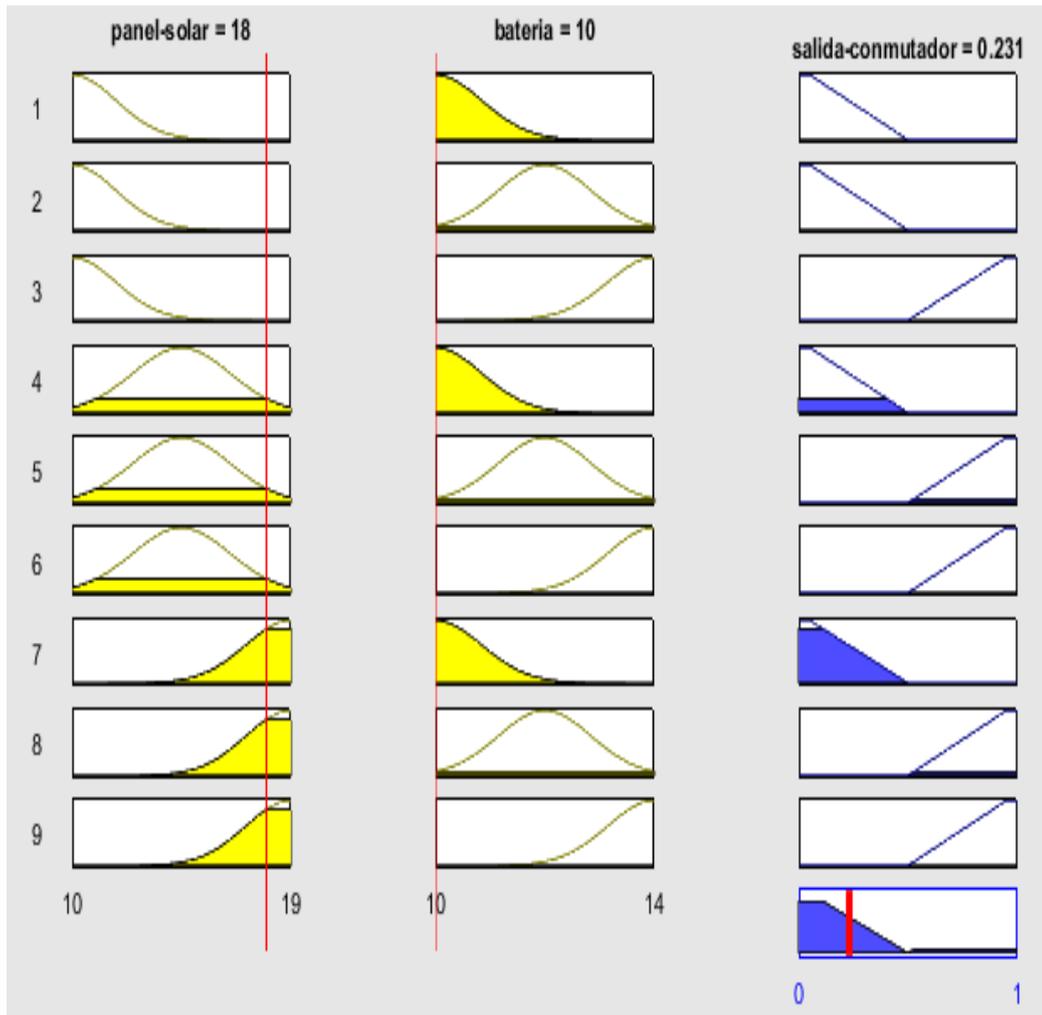


Figura 3.13- Prueba de la lógica con entradas 18 y 10.
Elaboración propia.

Otro caso muy particular se describe a continuación, figura 3.14., : si el voltaje en el panel fotovoltaico es de 12 voltios y el voltaje en la batería es también de 12 voltios, entonces la salida conmuta el circuito para usar la energía eléctrica de la red convencional, con un valor de 0.478, que es por muy poco pero suficiente para conmutar a 0. Esto se explica que si la batería tiene un voltaje de 12 voltios pero el panel fotovoltaico tiene un voltaje bajo, entonces se prefiere usar la red eléctrica convencional pero se está muy cerca de conmutar a la energía que proviene del sol, si es que la entrada panel-solar aumenta ligeramente su valor.

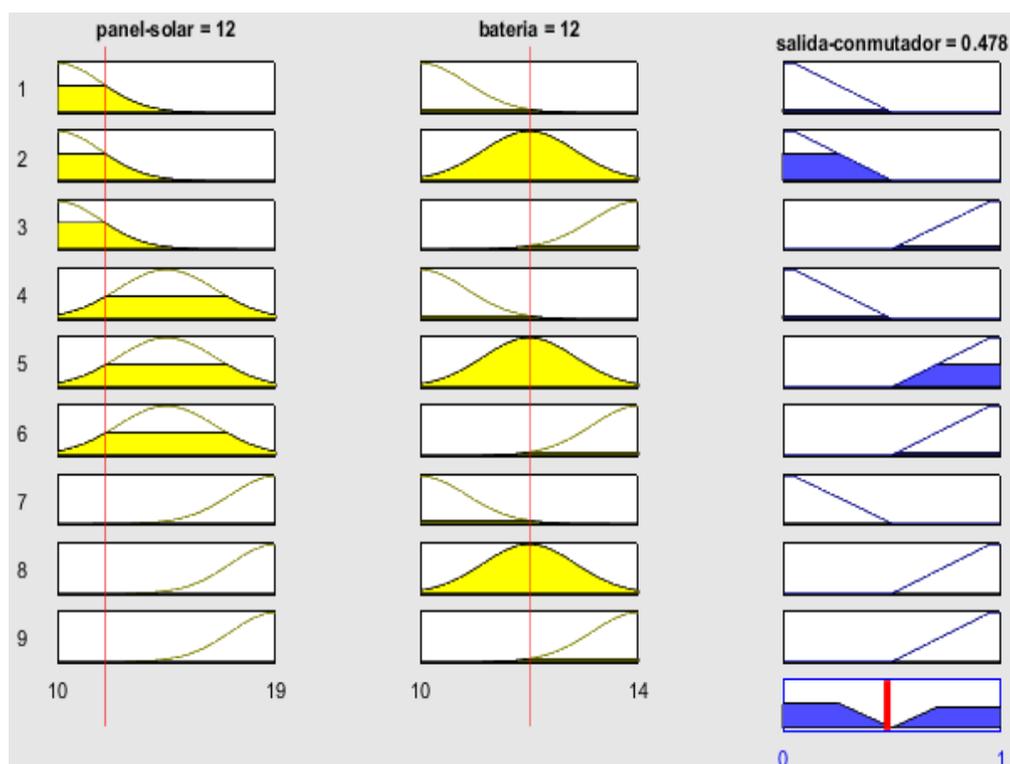


Figura 3.14 – Prueba de la lógica con entradas 12 y 12.
Elaboración propia.

3.7. ANÁLISIS DE UN PROTOTIPO CONVENCIONAL DE PANELES FOTOVOLTAÍCOS

El sistema consiste en un panel fotovoltaico para recibir energía solar, una batería para almacenar la energía, un controlador que administra la energía; y la carga.

3.7.1. OPERACIÓN DE UN CONTROLADOR CONVENCIONAL

Un controlador convencional, figura 3.15., tiene la función de cargar la batería de almacenamiento con energía eléctrica solar obtenida de un panel fotovoltaico, también tiene una salida para suministrar la energía de la batería a la carga, cuando el nivel de voltaje en la batería es inferior a 12 voltios en corriente continua, el controlador deja de proporcionar energía a la carga.

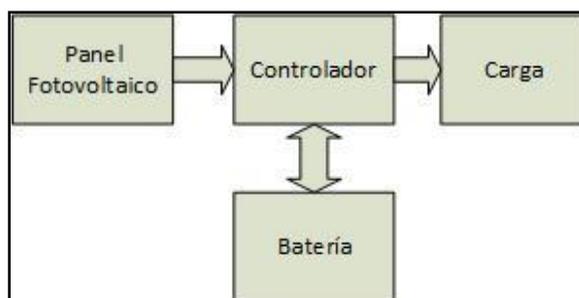


Figura 3.15 - Diagrama del sistema de panel fotovoltaico convencional.
Elaboración propia.

Un controlador convencional tiene la función de cargar la batería de almacenamiento con energía eléctrica solar obtenida de un panel fotovoltaico, también tiene una salida para suministrar la energía de la batería a la carga, cuando el nivel de voltaje en la batería es inferior a 12 voltios en corriente continua, el controlador deja de proporcionar energía a la carga.

ALGORITMO CONTROLADOR CONVENCIONAL

Mientras Controlador Encendido **hacer**

si Voltaje Batería \geq 12 Voltios **entonces**

Proveer energía hacia la carga.

sino {Voltaje Batería $<$ 12 Voltios}

No proveer energía hacia la carga.

fin si

fin mientras

3.7.2. RECOLECCIÓN DE DATOS

Para recopilar datos se usa un microcontrolador que interpreta los datos que se reciben en sus entradas analógicas de un sensor o directamente de los elementos del sistema. Luego estos datos se almacenan en una EEPROM y luego se transfieren a una computadora para poder desarrollar el nuevo diseño del sistema.



Figura 3.16 - Sistema de recolección de datos.
Elaboración propia.

El microcontrolador utilizado es el ATmega328P incluido en una placa Arduino UNO, la EEPROM utilizada es la 24LC256 y los sensores o elementos son específicos de acuerdo con el tipo de datos que desea obtener. Para programar el microcontrolador, obtener los datos de la EEPROM y realizar pruebas de prototipo; se usa una computadora con el software Arduino IDE. Para mostrsar los resultados, gráficos y prototipos de algoritmos; se usa MatLab (Blaabjerg, 2017).

Para desarrollar el prototipo, se hicieron simulaciones en MatLab hasta que se determinó el diseño óptimo, luego en el lenguaje Arduino se implementó el diseño también en un microcontrolador ATmega328P.

3.7.3. RADIACIÓN

La Figura 3.17 muestra el resultado de tomar muestras de radiación solar con un sensor LDR. Es importante resaltar que incluso en días nublados las gráficas no son considerablemente diferentes, esto sucede porque los rayos ultravioleta, que son parte importante de la radiación solar, traspasan las nubes; también se comprobó que el sistema funciona correctamente en días nublados.

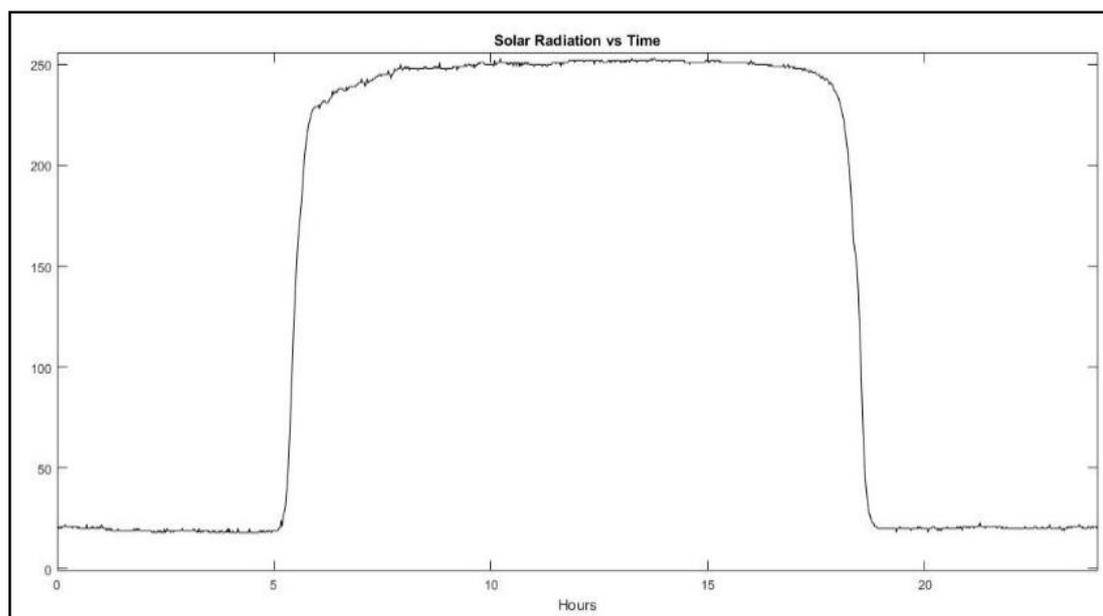


Figura 3.17 - Radiación solar vs Tiempo.
Elaboración propia.

3.8. DISEÑO DEL PROTOTIPO

El diagrama de bloques del nuevo diseño del prototipo de controlador se muestra en la Figura 3.18, no se incluyen los módulos de red ni de sistema de posicionamiento global porque su utilidad será descrita posteriormente.

Los bloques verdes conforman el prototipo controlador y los bloques grises son los elementos con los que interactúa; las flechas azules son de control, mientras que las flechas naranjas identifican al voltaje en corriente continua de 12 voltios y las flechas rojas identifican al voltaje en corriente alterna a 220 voltios.

El panel fotovoltaico se conecta a un regulador de voltaje que también hace las funciones de amplificador de intensidad de corriente para cargar la batería y proveer energía al inversor, el microcontrolador lee el estado del voltaje del panel fotovoltaico y de la batería, cuando el microcontrolador toma una decisión envía datos a la salida del controlador para que un circuito conmute y tome energía a 220 voltios en corriente alterna del inversor o de la red eléctrica convencional para que se pueda proveer a la

carga. Cuando el panel fotovoltaico no recibe energía la única fuente que alimenta al inversor es la batería.

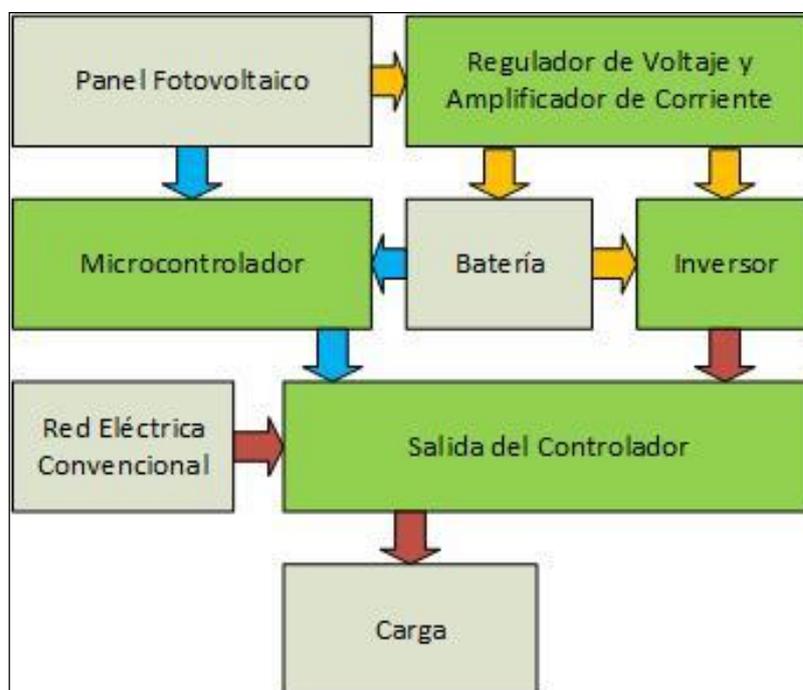


Figura 3.18 - Diagrama de bloques del prototipo de controlador.
Elaboración propia.

El diagrama esquemático del nuevo diseño del prototipo de controlador se muestra en la Figura 3.19, no se incluyen los módulos de red ni de sistema de posicionamiento global. Se utilizó el microcontrolador ATmega328P incluido en una placa Arduino UNO. Se diseñó una etapa directamente conectada al panel fotovoltaico para la amplificación de intensidad de corriente conformada por los transistores 2N3055, esta misma etapa actúa como regulador de voltaje y está conformada también por la resistencia R9, el diodo zener 1N4744A y el potenciómetro R8 que fue establecido al 90%, este regulador convierte el rango variable de voltajes del panel fotovoltaico con un pico de casi 20 voltios en corriente continua a un valor considerado estable de 14 voltios, muy adecuado para la carga de la batería y la entrada del inversor.

Se usó un divisor de voltaje conformado por R1 y R2 para obtener datos del voltaje del panel fotovoltaico por la entrada analógica A0 del microcontrolador; la utilidad del divisor de voltaje es adecuar el voltaje pico de 20 voltios del panel fotovoltaico a un voltaje que sea aceptado por el microcontrolador, 5 voltios. También se usó un divisor de voltaje conformado por R3 y R4 para obtener datos del voltaje de la batería por la entrada analógica A1. Los relés son controlados por las salidas digitales D6 y D7, cumplen la función de conmutar un circuito para que la carga del sistema utilice la red eléctrica de 220 voltios en corriente alterna o la batería que junto con un inversor proporciona 220 voltios en corriente alterna, de acuerdo a la necesidad.

El panel fotovoltaico utilizado tiene una potencia de 60W y proporciona de 17 a 20 voltios en corriente continua, la batería usada es una batería de calcio y proporciona 12 voltios en corriente continua y 60 amperios por hora; el inversor utilizado tiene una entrada que admite entre 12 a 14 voltios y tiene una potencia de 500 vatios. La carga consume aproximadamente 30 vatios para todas las pruebas.

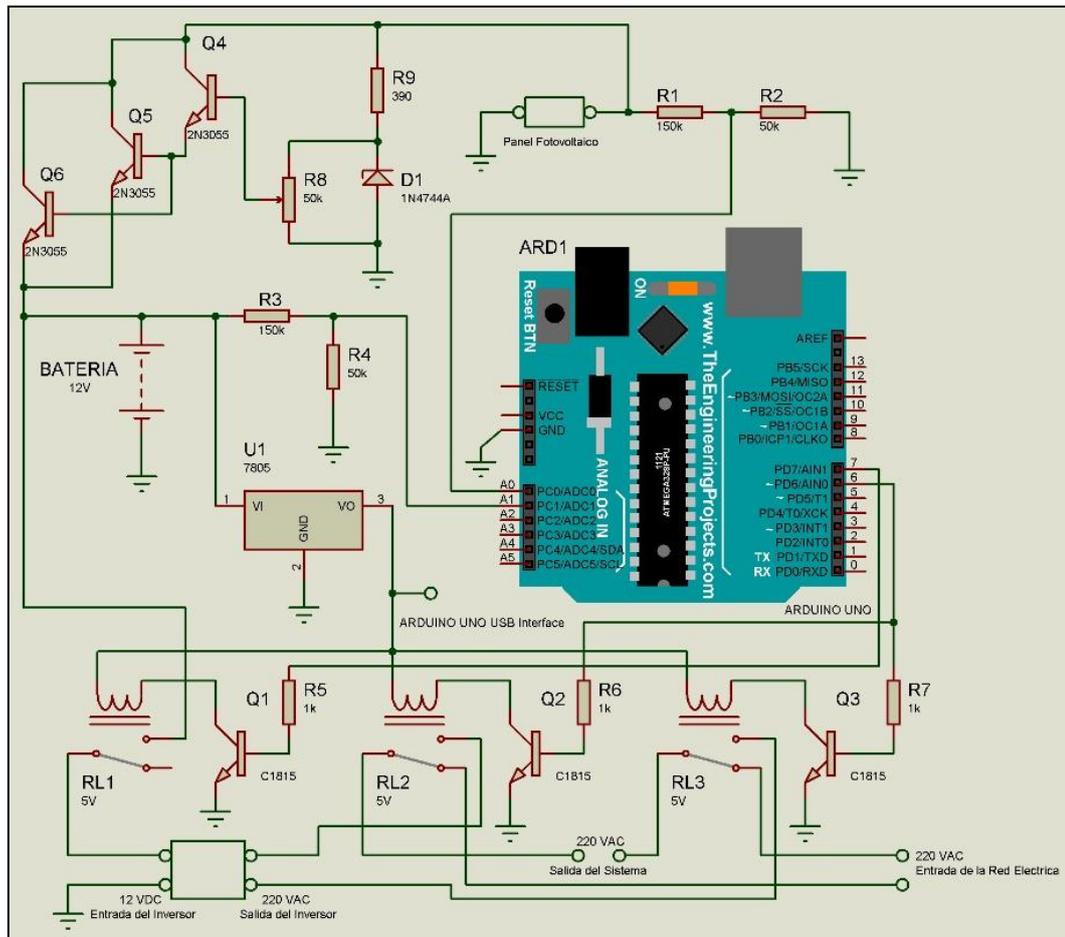


Figura 3.19 - Diagrama esquemático del prototipo de controlador.
Elaboración propia.

3.9. PANEL FOTOVOLTAICO

La Figura 3.20 muestra el resultado de tomar muestras de la tensión generada por el panel fotovoltaico cuando se expone a la radiación solar que se muestra en la Figura 3.17.

El voltaje en el panel fotovoltaico es directamente proporcional a la radiación solar, cuando se utiliza un panel fotovoltaico de 17 voltios en corriente continua, el valor máximo de casi 20 voltios se observa en horas de mayor radiación solar y casi 0 voltios en la noche. La señal no es muy estable porque transfiere energía a la carga, esto produce el efecto de cargar y descargar la batería que consume energía del panel fotovoltaico y, por lo tanto, su voltaje sube y baja.

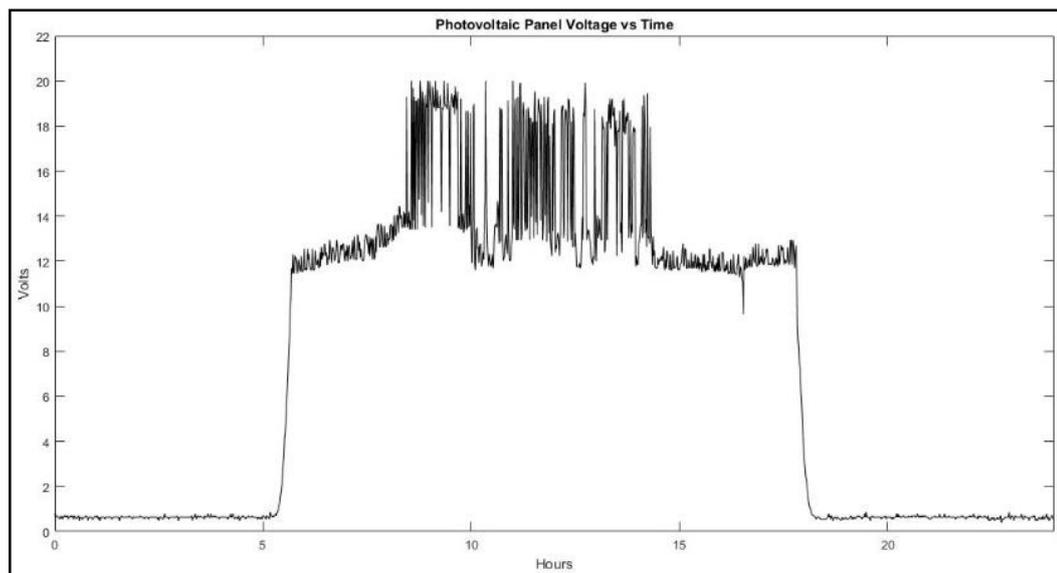


Figura 3.20 - Tensión del panel fotovoltaico durante un día.
Elaboración propia.

3.10. BATERÍA

La Figura 3.21. Muestra el resultado de tomar muestras del voltaje en la batería el mismo día que las muestras fueron tomadas del panel fotovoltaico que se muestra en la Figura 3.20. La batería almacena la energía, el voltaje puede alcanzar un nivel de un poco menos de 12 a 14 voltios cuando está cargada, pero al final del día se produce un efecto de rebote entre 16 y 20 horas, entre esas horas el sol se pone, la batería se descarga, alcanza un valor inferior a 12 voltios, por lo que el controlador cambia un circuito para no enviar energía desde la batería a la carga.

Sin embargo, la batería, al no estar conectada a la carga, aumenta el valor de su voltaje a 12 voltios o más, esto hace que el controlador cambie un circuito para proporcionar nuevamente energía a la carga de la batería, ya que esta vez la carga en el la batería está demasiado baja, el voltaje de la batería volverá a caer por debajo de los 12 voltios; esto se repite continuamente hasta que se toma una acción que suprime este rebote, esto se mejorará en el nuevo diseño del controlador.

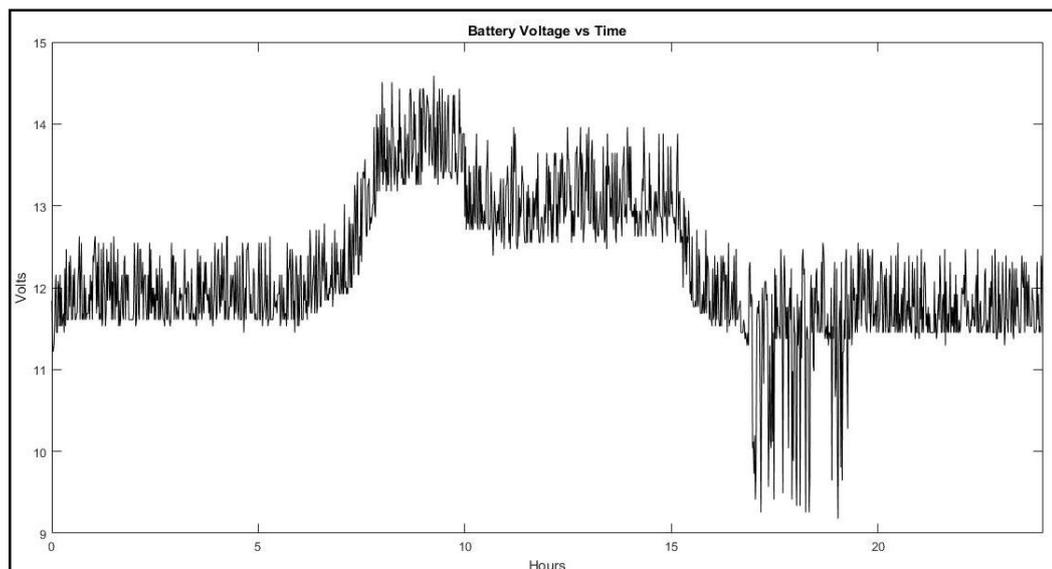


Figura 3.21 - Tensión de la batería en función del tiempo.
Elaboración propia.

3.11. PROGRAMACION EN ARDUINO

El proceso "Usar red eléctrica" significa que el sistema está utilizando la red eléctrica convencional para proporcionar energía a la carga, el proceso "Usar batería" significa que el sistema usa la batería local para proporcionar energía a la carga.

ALGORITMO CONTROLADOR MEJORADO

Inicio

Definir

Vp {Voltaje en el panel fotovoltaico}

Vb {Voltaje en la batería}

Vtp {Voltaje límite de panel fotovoltaico}

Vtb {Voltaje límite de batería}

Mientras Controlador Encendido hacer

Usar red eléctrica

Establecer Vtp=12 y Vtb=13

Leer Vp y Vb localmente

```

si Vp >= Vtp entonces

    si Vb >= Vtb entonces

        Usar batería

    sino {Vb < Vtb}

        Usar red eléctrica

        Esperar 10 minutos

    fin si

sino {Vp < Vtp}

    si Vb >= Vtb entonces

        Usar batería

    sino {Vb < Vtb}

        Usar red eléctrica

        Esperar 10 minutos

    fin si

fin si

Ir a "Leer Vp y Vb localmente"

fin mientras

```

Vp es la variable para el voltaje en el panel fotovoltaico local y Vb es la variable para el voltaje en la batería local, Vtp es la variable para el voltaje límite de panel fotovoltaico y Vtb es variable para el voltaje límite de batería; Vtp y Vtb son calculados localmente. El proceso "Esperar 10 minutos" elimina el rebote que se muestra en la Figura 3.21.

El controlador establece las variables Vtp a 12 y Vtb a 13, que son los valores mínimos requeridos y se establecieron para aprovechar de mejor forma la energía solar

en una situación normal, es decir, un día con una radiación solar promedio dentro de la región de estudio.

A continuación se expresa el diagrama de flujo para el pseudocódigo mostrado. El código para el microcontrolador Arduino se presenta en el Anexo C.

DIAGRAMA DE FLUJO CONTROLADOR MEJORADO

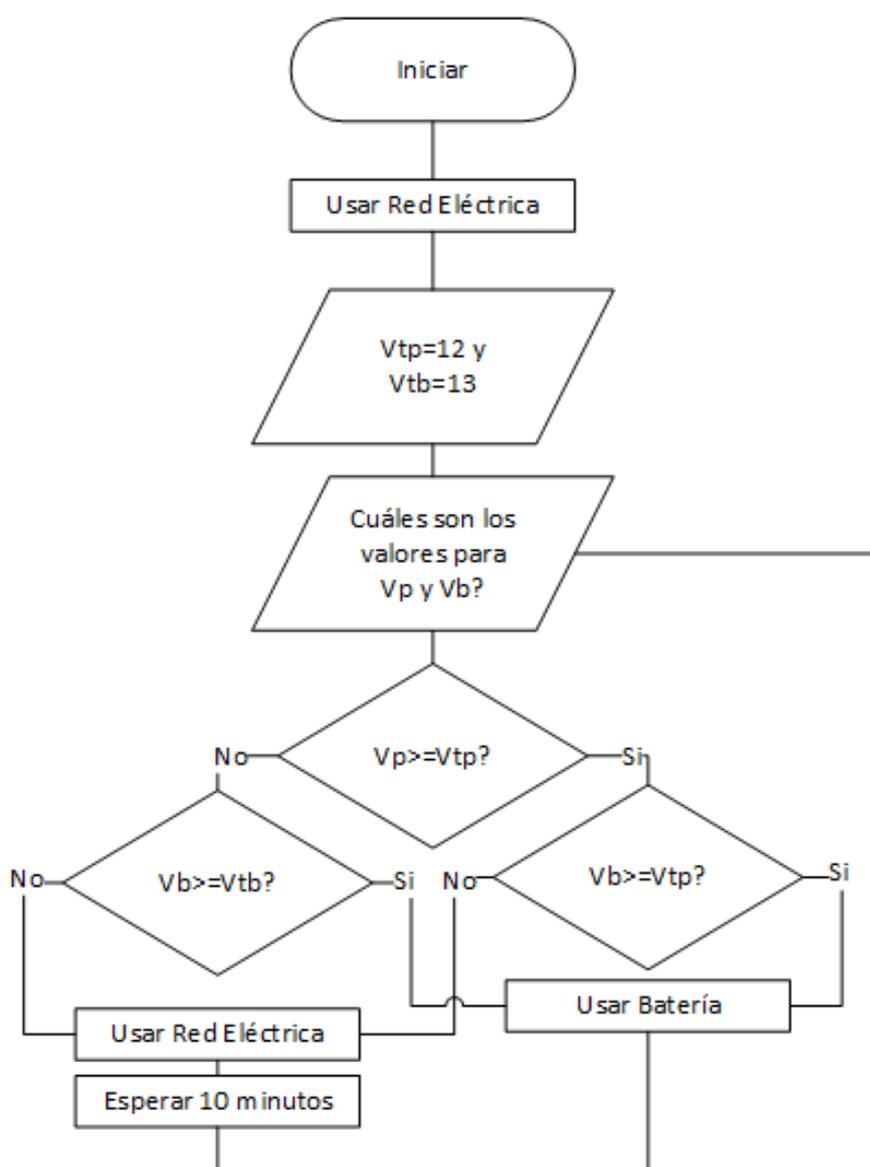


Fig 3.22 – Diagrama de flujo de controlador mejorado
Elaboración propia

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 4.1. Muestra el comportamiento de la salida del sistema como el resultado de aplicar uno de los primeros algoritmos del controlador (Sección 3.7.1) y con las señales de la Figura 3.20 y la Figura 3.21 como entradas. La figura muestra el resultado en la salida durante un día, donde un valor lógico alto significa que la batería del sistema se usa para proporcionar energía a la carga (energía solar) y un valor lógico bajo significa que la red eléctrica convencional se usa para proporcionar energía a la carga. El efecto de rebote es muy frecuente, especialmente al amanecer, entre 6 y 8 horas, y al atardecer, entre 16 y 20 horas. El rebote es perjudicial porque la conmutación del circuito, el cambio de amplitud y el cambio de fase constante pueden dañar la carga, generar una inestabilidad en la red eléctrica convencional y causar un mal funcionamiento de los dispositivos en la carga.

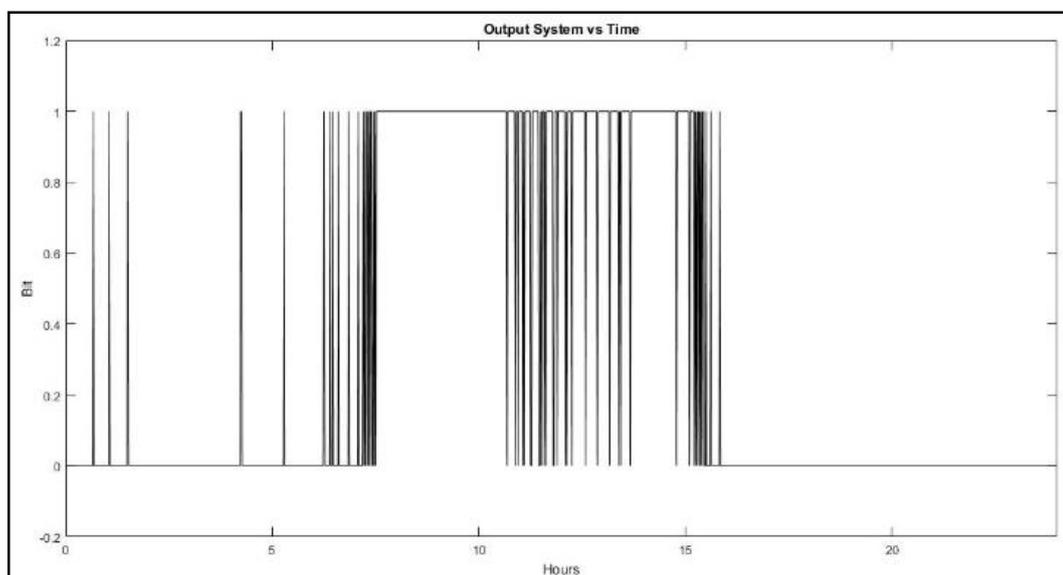


Figura 4.1 - Salida del sistema aplicando uno de los primeros algoritmos del controlador
Elaboración propia.

La Figura 4.2. Muestra el resultado de aplicar el algoritmo mejorado (sección 3.11) en el nuevo prototipo de controlador, con las señales de la Figura 3.20. y la Figura 3.21. como entradas. El efecto de rebote disminuye considerablemente, de esta manera se ha logrado un mejor rendimiento, mejor autonomía y eficiencia mediante la lógica Fuzzy.

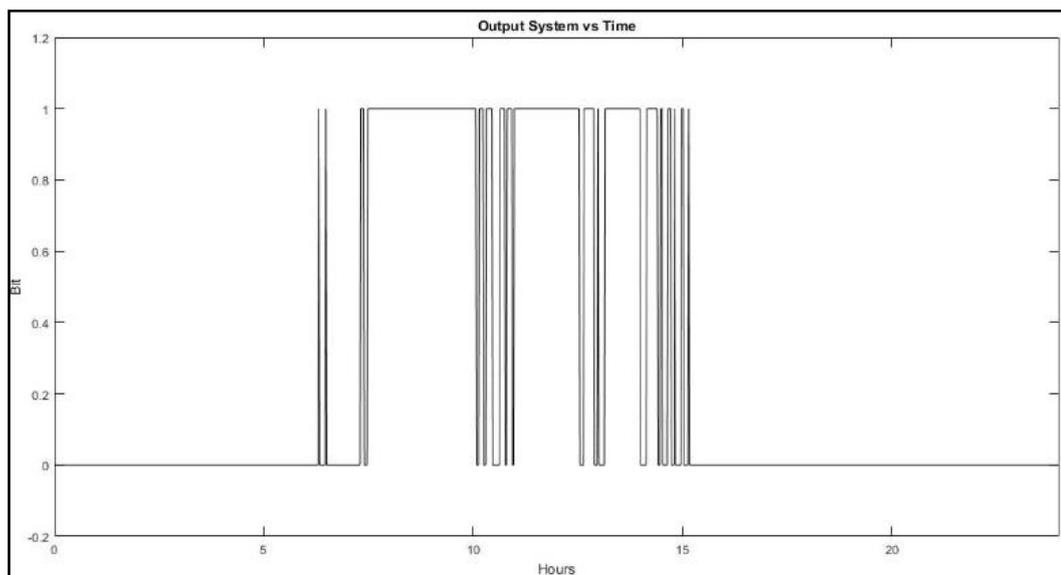


Figura 4.2 - Salida del sistema utilizando el algoritmo final del controlador.
Elaboración propia.

La siguiente figura muestra un recibo de la evolución del consumo de energía de la red eléctrica convencional, el prototipo del sistema entró en funcionamiento el 13 de febrero de 2017 y mostró un ahorro muy considerable.

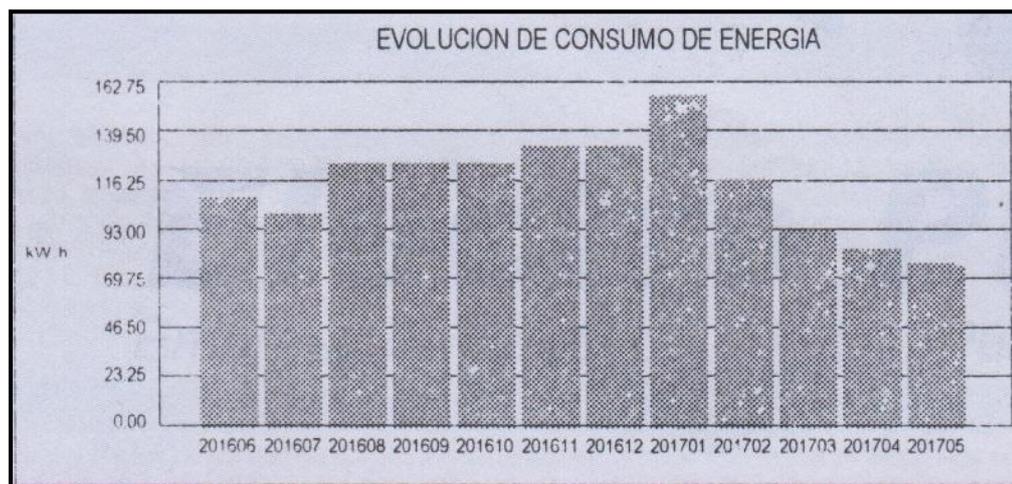


Figura 4.3 - Evolución del consumo de energía de la red eléctrica.
Elaboración propia.

Descripción	Cantidad
Panel fotovoltaico (tiempo de vida de 20 a 25 años ^a)	\$109.03 USD
Batería (tiempo de vida de 4 a 5 años ^a)	\$140.19 USD
Controlador + Módulo de Red + Módulo GPS (tiempo de vida de 5 años ^a)	\$45.17 USD
Inversor (tiempo de vida de 10 años ^a)	\$54.52 USD
Costo Total	\$348.91 USD

Tabla 4.1 - Costo del sistema para un cliente. (^aSegún especificaciones técnicas.)
Elaboración propia.

El tiempo de recuperación de la inversión es de 2 años, 3 meses y 26 días, mientras que el sistema puede seguir funcionando hasta por 25 años reemplazando piezas con una vida útil corta.

Descripción	Cantidad
Promedio de ahorro mensual ^b	\$10.96 USD
Promedio de ahorro anual ^b	\$131.48 USD
Promedio de ahorro de energía mensual ^b	49.88KWh
Promedio de ahorro de energía anual ^b	598.56KWh

Tabla 4.2 - Tabla de ahorro. (^bSegún la Figura 4.3)
Elaboración propia.

Potencialmente, el ahorro de energía anual de una pequeña población de 13,000 hogares con el sistema es de 7,78GWh, suficiente para proporcionar electricidad a 7969 hogares durante un año.

No se han encontrado investigaciones que traten el mismo diseño o el mismo objetivo, pero por ejemplo según Lazo en el 2009, se muestran las siguientes tablas que muestran los costos de un sistema fotovoltaico y el tiempo de recuperación de la inversión.

Componentes	Cantidad	Precio (\$)	Precio (S/.)	Subtotal
Picadora Nogueira PN-PLUS 2000	1	1130,56	3403,00	3403,00
Paneles solares 210W	4	730,10	2197,61	8790,44
Controlador de carga Outback MPPT 80 ^a	1	599,00	1802,99	1802,99
Batería Concorde SunXtender PVX-2120L	4	499,00	1501,99	6007,96
Diodos RURG 8060	1	5,78	17,40	17,40
Cable AWG # 2 (por metro)	15	1,97	5,93	88,95
Cable AWG # 0000 (por metro)	51	6,33	19,05	971,55
Desconector de batería	1	79,00	237,79	237,79
Elementos de seguridad (15 tapones + gafas + guantes)	1		30,00	30,00
3 Racks + Caja de madera			1400,00	1400,00
			TOTAL (S/.)	22750,08

Tabla 4.3 – Costos del Sistema.

Fuente: Lazo, 2009.

Costo de alquiler de tractor	100
Horas mensuales de alquiler	8
Gasto mensual	800
Inversión	22750,08

Tiempo de recuperación (meses)	28,44
Tiempo de recuperación (años)	2,37

Tabla 4.4 – Recuperación de Inversión.

Fuente: Lazo, 2009.

Como se puede comparar, por ejemplo, en los costos de controlador de carga, paneles solares y baterías; incluso calculando proporciones de acuerdo a la propuesta de esta investigación, los costos de la tesis de Lazo en el 2009 son más altos que la propuesta actual. En cuanto al tiempo de recuperación de la inversión se nota claramente una equidad de ambas investigaciones de aproximadamente dos años y cuatro meses. Esto refuerza las propuestas presentadas, basadas en otra investigación.

CAPITULO V

CONCLUSIONES ESPECIFICAS

El diseño de un controlador basado en la lógica Fuzzy para la administración de energía eléctrica solar doméstica en el distrito de Puno es de gran avance en cuanto al ahorro energético que se toma cada vez más en cuenta para la conservación del medio ambiente, también es indispensable para el ahorro de dinero del usuario; el sistema es automático por lo que no requiere de la intervención del usuario para su administración. El ahorro energético permite que otras poblaciones puedan beneficiarse de la energía eléctrica de la red convencional; mientras que la economía de la población se enfoca en las energías renovables.

Se ha logrado diseñar el sistema, implementar el prototipo y hacer pruebas de campo. El sistema presenta resultados favorables para la investigación, ya que el funcionamiento presentado en los resultados, la implementación del prototipo y el diseño preliminar son congruentes.

El impacto del sistema de administración de energía solar doméstica, constituye una herramienta útil para diagnosticar la situación energética, al permitir identificar las principales deficiencias energéticas, los equipos de mayor incidencia en eficiencia energética y con esto crear los potenciales de ahorro, también aplicar un enfoque para lograr el uso racional de la energía.

CAPITULO VI

RECOMENDACIONES

Se puede implementar un servidor web en el microcontrolador que gestione el sistema, es decir, que se pueda visualizar por web los cambios realizados en el transcurso del tiempo y operar las funciones propias; a esto también se agregaría otras funciones.

Es posible que los controladores puedan compartir sus datos con otros controladores para mejorar la eficiencia del sistema y predecir situaciones no convencionales.

La lógica Fuzzy puede ser mejorada usando y optimizando las entradas del sistema y agregando más niveles o estados de las entradas y de la salida.

CAPITULO VII

REFERENCIAS

Arduino (2017) <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>

Boxwell, M. (2017). Solar Electricity Handbook: 2017 Edition: A simple, practical guide to solar energy: designing and installing solar photovoltaic systems. United States: Greenstream Publishing.

González, O., Pavas, A. & Sánchez, S., (2016), Cuantificación del Ahorro de Energía Eléctrica en Clientes Residenciales Mediante Acciones de Gestión de Demanda

Gregersen, S. (2014). Build Your Own Low-Budget Solar Power System. United States: CreateSpace Independent Publishing Platform.

Gregory, C. (2015). Solar Energy for Beginners: The Complete Guide to Solar Power Systems, Panels & Cells. United States: Loco Media.

Henríquez, C. (2003). Regulador de Panel Solar - Batería - Carga Con Microcontrolador Pic. Universidad de Piura.

Isabella, O. Jager, K. Smets, A. van Swaaij, R. and Zeman, M. (2016). VirtualBox: Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems. United States: UIT Cambridge Ltd.

LaCroix, J. (2016). Mastering Ubuntu Server Paperback. United States: Packt Publishing - ebooks Account.

Lammle, T. (2013). CCNA Routing and Switching Study Guide: Exams 100-101, 200-101, and 200-120 1st Edition. United States: Sybex.

Lazo, N. (2009). Diseño de un Sistema con Paneles Solares Para Cargar Baterías y Energizar Motores de Picadoras en una Comunidad Agrícola. Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú.

Isabella P. (2009). La Energía en el siglo XXI.,

Loayza, F. (2012). Diseño e Implementación de un Seguidor Solar Para el Control Electrónico de un Reflector Scheffler. Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú.

Marshall, N. Lowe, S. Orchard, G. and Atwell, J. (2015). Mastering VMware vSphere 6 1st Edition. United States: Sybex.

Milenkovic, M. & Amft, O., (2013), Recognizing Energy-related Activities Using Sensors Commonly Installed in Office Buildings.

Nathan, S. (2015). VirtualBox at Warp Speed: Virtualization with VirtualBox Kindle Edition. United States: Senthil Nathan.

Nutter, R. (2014). VMware - A Guide for New Admins Kindle Edition. United States: TechBytes Press.

O'Connor, J. (2016). Off Grid Solar: A handbook for Photovoltaics with Lead-Acid or Lithium-Ion batteries. United States: CreateSpace Independent Publishing Platform.

Odom, W. (2016). CCENT/CCNA ICND1 100-105 Official Cert Guide 1st Edition. United States: Cisco Press.

Petersen, R. (2016). Ubuntu 16.04 LTS Server: Administration and Reference Paperback. United States: Surfing Turtle Press.

Pop, L. and Avram, D. (2015). Solar Power Demystified: The Beginners Guide To Solar Power, Energy Independence And Lower Bills. United States: Digital Publishing Ltd.

Rankin, K. and Mako, B. (2013). The Official Ubuntu Server Book (3rd Edition) 3rd Edition. United States: Prentice Hall.

Rojas, A. (2012). Control de Procesos Práctico y Avanzado. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería Editorial Universitaria - EDUNI.

Schaffers, Komninos, Pallot, rousse, Nilsson & Oliveira (2013) Smart cities and the future internet: Towards cooperation frameworks for open innovation.

Spiegeler, C. (2014). Diseño de Estación Solar Para Carga Eléctrica De Equipo Electrónico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

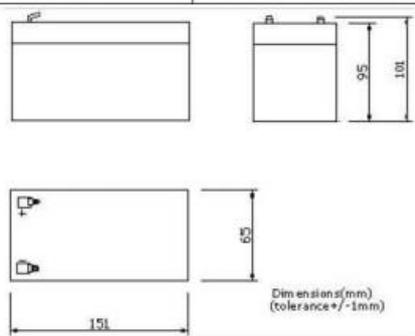
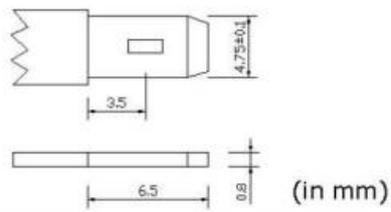
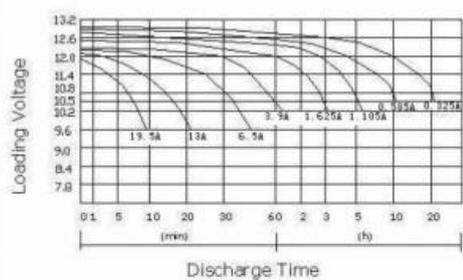
Verle, M. (2017) Introducción al mundo de los microcontroladores
<https://learn.mikroe.com/ebooks/microcontroladorespicc/chapter/>

CAPITULO VIII

ANEXO 1: CARACTERÍSTICAS DEL PANEL FOTOVOLTAICO

No. de Modelo	60W 18V
Características Eléctricas en STC	
Potencia Máxima (Pmax)	60 Wp
Tensión en el Punto de Máxima Potencia (Vmax)	18 V
Corriente en el punto de máxima potencia (Imax)	3.33 A
Tensión en Circuito Abierto (Voc)	21.6 V
Corriente de cortocircuito (Isc)	3.49 A
<i>Condiciones de prueba estándar (STC): Masa de aire AM 1.5, radiación 1000W/m², temperatura de célula 25°C.</i>	
Características Mecánicas	
Dimensiones (A/A/F) 	700x670x35 mm
Peso	6.3 kg
Tipo de Células	Policristalino
Numero de Células	36
Tipo de Vidrio	Templado
Encapsulado de células	EVA
Cobertura posterior	PET

ANEXO 2: CARACTERÍSTICAS DE LA BATERÍA

PHYSICAL SPECIFICATION			
Nominal Voltage		12V	
Nominal Capacity (20HR)		7.0Ah	
Dimension	Length	151±1mm	(5.94 inches)
	Width	65±1mm	(2.56 inches)
	Container Height	95±1mm	(3.74 inches)
	Total Height	101±1mm	(3.98 inches)
Weight		Approx. 1.97Kg (4.34lbs)	
Standard Terminal		Fasten Tab No.187E	
			
		<p>F1(Fasten Tab No.187E) Standard Terminal</p>  <p style="text-align: right;">(in mm)</p>	
ELECTRICAL SPECIFICATION			
Characteristics			Discharge curves @ 25°C (77 ° F)
Capacity	20 hour rate	(0.325A) 6.5Ah	<p style="text-align: center;">Discharge Characteristics(20°C/ 68° F)</p> 
	10 hour rate	(0.585A) 0.59Ah	
	5 hour rate	(1.105A) 5.53Ah	
	3 hour rate	(1.625A) 4.88Ah	
	1hour rate	(3.9A) 3.9Ah	
Capacity affected by temperature	40°C (104 °F)	102%	
	25°C (77 °F)	100%	
	0°C (32 °F)	85%	
Internal Resistance		Full charged battery (25°C,77 °F) 25m Ω	
Constant Voltage Charge	Cycle	Initial Charging Current less than 1.95A Voltage 14.4~15.0V at 25°C (77 °F) Temperature Coefficient -30mV/°C	
	Standby	No limit on Initial Charging Current Voltage 13.5~13.8V at 25°C (77 °F) Temperature Coefficient -20mV/°C	

ANEXO 3: CÓDIGO PARA MICROCONTROLADOR ARDUINO

```
#include <LiquidCrystal.h>

LiquidCrystal lcd1(7,8,9,10,11,12);

float Vp;

float Vb;

float Vlp;

float Vlb;

float Vlb2;

float a0;

float a1;

int i;

void setup() {

    // put your setup code here, to run once:

    lcd1.begin(16,2);

    Vp = 0;

    Vb = 0;

    //Vlp = 13.7;

    //Vlb = 13.2;
```

```
Vlp = 13.5;

Vlb = 11.5;

Vlb2 = Vlb + 2;

a0 = 0;

a1 = 0;

pinMode(5, OUTPUT);

pinMode(6, OUTPUT);

digitalWrite(5, LOW);

digitalWrite(6, LOW);

lcd1.setCursor(0,0);

lcd1.print("VP=");

lcd1.setCursor(0,1);

lcd1.print("VB=");

}

void loop() {

    // put your main code here, to run repeatedly:

    a0 = analogRead(0);

    Vp = (a0*20)/1024;
```

```
lcd1.setCursor(3,0);

lcd1.print(Vp);

lcd1.setCursor(9,0);

lcd1.print(a0);

a1 = analogRead(1);

Vb = (a1*20)/1024;

lcd1.setCursor(3,1);

lcd1.print(Vb);

lcd1.setCursor(9,1);

lcd1.print(a1);

if ((Vp>Vlp && Vb>Vlb) || (Vp<Vlp && Vb>Vlb2)){

// if ((Vb>Vlb) || (Vp<Vlp && Vb>Vlb2)){

// if (Vb>Vlb){

digitalWrite(5, HIGH);

digitalWrite(6, HIGH);

delay(100);

}else{

digitalWrite(5, LOW);
```

```
digitalWrite(6, LOW);

for ( i=0; i<=600; i++ ) {

    a0 = analogRead(0);

    Vp = (a0*20)/1024;

    lcd1.setCursor(3,0);

    lcd1.print(Vp);

    lcd1.setCursor(9,0);

    lcd1.print(a0);

    a1 = analogRead(1);

    Vb = (a1*20)/1024;

    lcd1.setCursor(3,1);

    lcd1.print(Vb);

    lcd1.setCursor(9,1);

    lcd1.print(a1);

    delay(1000);

}

}

}
```