DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

Título:

"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA SEGUIMIENTO SOLAR AUTOMÁTICO, E IMPLEMENTACIÓN DE UN SOFTWARE DE SUPERVISION PARA UN SISTEMA MOVIL FOTOVOLTAICO"

PROYECTO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO.

REALIZADO POR:

- CARINA XIMENA VITERI CALVOPIÑA
- EDISON JAVIER ALMEIDA BAROJA

REVISADO POR:

DIRECTOR: ING. AYALA PAÚL

CODIRECTOR: ING. GUTIERREZ ROBERTO

ENERO 2014

SANGOLQUÍ – ECUADOR.

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto **"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA SEGUIMIENTO SOLAR AUTOMÁTICO, E MPLEMENTACIÓN DE UN SOFTWARE DE SUPERVISION PARA UN SISTEMA MOVIL FOTOVOLTAICO",** fue realizado en su totalidad por, Carina Ximena Viteri Calvopiña y Edison Javier Almeida Baroja como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecatrónico.

Sr. Ing. Paúl Ayala Msc.	**Sr. Ing. Roberto Gutiérrez. Msc.**
DIRECTOR	**CODIRECTOR**

Sangolquí, Enero 2014

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA SEGUIMIENTO SOLAR AUTOMÁTICO, E IMPLEMENTACIÓN DE UN SOFTWARE DE SUPERVISION PARA UN SISTEMA MOVIL FOTOVOLTAICO"

ELABORADO POR:

Carina Ximena Viteri Calvopiña

Edison Javier Almeida Baroja

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA.

Director de la Carrera de Ingeniería Mecatrónica.

Ing. Luis Echeverría Yánez.

Sangolquí, Enero 2014

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros: Carina Ximena Viteri Calvopiña y Edison Javier Almeida Baroja

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, la publicación, en la biblioteca virtual de la institución del proyecto de grado titulado: **"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA SEGUIMIENTO SOLAR AUTOMÁTICO, E IMPLEMENTACIÓN DE UN SOFTWARE DE SUPERVISION PARA UN SISTEMA MOVIL FOTOVOLTAICO",** cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Carina Ximena Viteri Calvopiña	Edison Javier Almeida Baroja

Sangolquí, Enero 2014

DEDICATORIA

A mis Padres René - Ximena y mis Abuelitos Manuel - Herminia,

Que con su eterno amor, afán, sacrificio y abnegación, supieron entregar todo se si, para hacer de mi un ser útil a la patria y a la sociedad, así haciendo posible que haya culminado con éxito esta etapa que me ha capacitado para un futuro mejor, que siempre pondré al servicio de la verdad y la justicia.

Carina Ximena Viteri Calvopiña

DEDICATORIA

A Dios sobre todas las cosas, por darme salud, inteligencia, la vida.

A mis queridos padres Mónica Baroja y Eduardo Almeida por su constante sacrificio, para permitirme tener lo mejor y lo necesario para alcanzar mis metas en la vida, a mis queridos hermanos David y Gabriel que han sido un apoyo constante en los momentos difíciles que hemos tenido que atravesar en la vida y a mi querida novia Karen por todo el amor y apoyo recibido a lo largo de este tiempo.

Edison Javier Almeida Baroja

AGRADECIMIENTOS

A tí Dios mío, por darme la oportunidad de existir. Gracias por iluminarme, darme salud, fuerzas, sabiduría para poder caminar por tu sendero.

A mis padres, por su incondicional apoyo, tanto al inicio como al final de esta etapa, por estar pendiente de mí a cada momento.

A mis abuelitos, por su amor y cariño, por estar siempre al pendiente mío, por darme fuerzas para seguir a delante, te agradezco abuelita Miñita, por inculcarme por el camino de la verdad y el bien.

A mis Ñaño Miguel y mi Mónica por su sacrificio, apoyo y paciencia, por todos los consejos, enseñanzas y cuidados que tiene hacia mí, También les agradezco por todo mis hermanos Vicky, María José y Roger.

A Cristian, por todo el amor, apoyo y ayuda incondicional brindado, por ser el amigo y consejero.

A mis tutores de tesis por el conocimiento y compromiso profesional que aplicaron para la culminación de este proyecto de tesis.

Carina Ximena Viteri Calvopiña

AGRADECIMIENTOS

Debo agradecer a Dios, por permitirme estar en este momento con salud y vida, por haberme dado la sabiduría y la fortaleza en los momentos de debilidad, por darme su fuerza y esperanza cuando veía que todo estaba perdido.

Agradezco a la noble institución de la ESPE, por haberme abierto las puertas de la enseñanza, brindándome sus conocimientos.

A mis padres Mónica y Eduardo que sin ellos esto que ahora se ha conseguido tan solo podría ser un sueño.

A mis hermanos David y Gabriel por ser el pilar fundamental de mi vida en cada momento, por estar ahí siempre pendientes de todo lo que ha sucedido en el transcurso de los estudios.

A mis amigos de toda la vida Gabo, Dany, Pablo, Christian, que fueron y serán parte esencial de mi vida.

A los compañeros y amigos de carrera Andrés, Jessica, Diego, Ricardo, que fueron en más de una ocasión, fueron ese respiro que me ayudó a continuar y a no desfallecer.

A mi novia Karen que se convirtió en un pilar muy fuerte en mi vida, ayudándome con sus palabras y sus oídos cuando más lo necesitaba.

A mis amigos electrónicos Daniel, Geovanny, Pablo, William, David, que se convirtieron muchas veces en profesores para mí, compartiendo sus conocimientos y solucionando los problemas y al Ing. Paúl Ayala por el esfuerzo y los retos que me ha planteado, que me han hecho crecer y darme cuenta que puedo dar más de lo que yo mismo imaginaba.

Edison Javier Almeida Baroja

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO ii

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO iii

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA iv

AUTORIZACIÓN iv

DEDICATORIA v

DEDICATORIA vi

AGRADECIMIENTOS vii

AGRADECIMIENTOS viii

ÍNDICE DE CONTENIDOS ix

ÍNDICE DE FIGURAS xvi

ÍNDICE DE TABLAS xxiii

CAPÍTULO I 1

1. INTRODUCCIÓN 1

1.1 ANTECEDENTES 1

1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA 2

1.3 ALCANCE DEL PROYECTO 3

1.4 OBJETIVOS 4

CAPÍTULO II 6

2. MARCO TEÓRICO 6

2.1 ENERGÍA 6

2.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS 24

2.2.1 ELECTRICIDAD OBTENIDA DEL SOL 24

2.2.2 ESTRUCTURA ATÓMICA 24

2.2.3 EFECTOS FOTOELÉCTRICOS 25

2.2.4 FORMACIÓN DE MATERIAL TIPO N Y TIPO P 26

2.2.5 EFECTOS FOTOVOLTAICOS EN LA UNIÓN P-N. 28

2.2.6 CIRCUITO EQUIVALENTE DE LA CELDA SOLAR. 29

2.2.7 CURVA CORRIENTE-VOLTAJE DE LA CELDA SOLAR 31

2.2.7.1 CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO (ICC O ISC) 32

2.2.7.2 VOLTAJE DE CIRCUITO ABIERTO (VCA O VOC) 32

2.2.7.3 POTENCIA MÁXIMA (PMAX) 33

2.2.8 EFICIENCIA DE LA CELDA SOLAR 33

2.2.9 FACTOR DE LLENADO (FILL FACTOR) 34

2.2.10 CARACTERÍSTICAS DE POLARIZACIÓN INVERSA. 34

2.3 INSTALACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA 35

2.3.1 CONEXIÓN DE CELDAS SOLARES. 37

2.3.2 PÉRDIDAS EN EL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA POR DESACOPLAMIENTO 39

2.3.3 PÉRDIDAS ESTÁTICAS POR DESACOPLAMIENTO. 39

2.3.4 PÉRDIDAS DINÁMICAS POR DESACOPLAMIENTO 40

2.3.4.1 SIN DIODO BYPASS 40

2.3.4.2 CON DIODO BYPASS 42

2.3.4.3 SOMBREADO HOMOGÉNEO 43

2.3.4.4 SOMBREADO PARCIAL. 45

2.3.4.5 OPTIMIZADORES DE POTENCIA 45

2.4 CARACTERIZACIÓN DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS 46

2.4.1 MÉTODOS PARA CARACTERIZAR MÓDULOS FOTOVOLTAICOS..... 47

2.4.1.1 MÉTODO DE CARGA CAPACITIVA 47

2.4.1.2 MÉTODO DE CARGA RESISTIVA..... 49

2.4.1.3 MÉTODO DE CARGA ELECTRÓNICA 49

2.4.1.3.1 RESISTENCIA DE ENTRADA EN UN CONVERSOR DC/DC REDUCTOR……..... 52

2.4.1.3.2 RESISTENCIA DE ENTRADA EN UN CONVERSOR DC/DC ELEVADOR…… 52

2.4.1.3.3 RESISTENCIA DE ENTRADA EN UN CONVERSOR DC/DC REDUCTOR - ELEVADOR 53

2.6 ALGORITMO MPPT..... 59

2.6.1 PERTURBACIÓN Y OBSERVACIÓN..... 61

CAPITULO III..... 66

3. DISEÑO MECÁNICO DEL EQUIPO PARA SEGUIMIENTO SOLAR AUTOMÁTICO..... 66

3.1 CONDICIONES INICIALES DE DISEÑO..... 66

3.1.1 MESA DE SOPORTE 66

3.1.2 ESTRUCTURA DE SUJECIÓN DE LOS PANELES SOLARES.... 68

3.1.3 MECANISMO DE GIRO DE LOS PANELES SOLARES……70

3.2 DISEÑO MECÁNICO…….72

3.2.1 ESTRUCTURA DEL SEGUIDOR SOLAR…..……72

3.2.1.1 ALTERNATIVA 1……72

3.2.1.2 ALTERNATIVA 2……73

3.2.1.3 ALTERNATIVA 3……75

3.2.1.4 MATRIZ DE DECISIÓN……76

3.2.1.5 SELECCIÓN DE MATERIALES……77

3.2.1.6 DISEÑO CAD DE LAS ESTRUCTURAS DEL SEGUIDOR SOLA..78

3.2.1.7 DISEÑO CAE DEL SEGUIDOR SOLAR……..84

3.2.1.8 VELOCIDADES DE LOS EJES DEL SEGUIDOR……92

3.2.1.9 SELECCIÓN DE MOTORES……92

3.2.1.10 DISEÑO DE ENGRANES……..95

3.2.1.11 DISEÑO CAJA REDUCTORA DE VELOCIDAD..... 111

3.2.1.12 DISEÑO DE FLECHAS..... 113

3.2.1.13 SELECCIÓN DE RODAMIENTOS..... 121

CAPITULO IV..... 122

4. DISEÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO - ELECTRÓNICO..... 122

4.1 CONVERSOR DC/DC..... 122

4.1.1 CONVERSOR SEPIC..... 122

4.1.2 ACOPLAMIENTO DEL PANEL CON EL CONVERTIDOR SEPIC124

4.1.3 MODELADO DEL CONVERTIDOR SEPIC 126

4.1.3.1 MODELO PROMEDIO DEL CONVERTIDOR SEPIC..... 127

4.1.3.2 ANÁLISIS EN ESTADO ESTABLE DEL CONVERTIDOR SEPIC 129

4.1.2 CONVERTIDOR BOOST..... 138

4.1.2.1 ENFOQUE DEL SISTEMA..... 139

4.1.2.2 RELACIONES CAUSA EFECTO LAS VARIABLES DE ESTADO Y LA ENTRADA……..... 142

4.1.2.3 MODELO MATEMÁTICO DEL CONVERTIDOR 143

4.1.2.3.1 CONSIDERACIONES DE DISEÑO 147

4.2 DISEÑO DE LOS ELEMENTOS DE LOS CONVERTIDORES DC/DC……147

4.2.1 DISEÑO DE LOS ELEMENTOS DEL CONVERTIDOR ELECTRÓNICO DE POTENCIA TIPO SEPIC 148

4.2.1.1 DISEÑO DE LOS INDUCTORES DEL CONVERTIDOR 148

4.2.1.2 DISEÑO DE LOS CAPACITORES DEL CONVERTIDOR 150

4.2.1.3 DISEÑO DEL SEMICONDUCTOR DEL CONVERTIDOR 151

4.2.2 DISEÑO DE LOS ELEMENTOS DEL CONVERTIDOR ELECTRÓNICO DE POTENCIA TIPO BOOST 152

4.2.2.1 DISEÑO DE LOS INDUCTORES DEL CONVERTIDOR 153

4.2.2.2 DISEÑO DE LOS CAPACITORES DEL CONVERTIDOR 153

4.2.2.3 DISEÑO DE LOS SEMICONDUCTORES DEL CONVERTIDOR 154

4.3 SELECCIÓN DE LOS SENSORES 155

4.3.1 SISTEMA DE MEDICIÓN DE TENSIÓN..... 155

4.3.1.1 DISEÑO DEL DIVISOR DE TENSIÓN..... 155

4.3.2 SISTEMA DE MEDICIÓN DE CORRIENTE 157

4.3.2.1 SELECCIÓN DE SENSOR DE CORRIENTE 157

4.3.2.1.1 SENSOR DE CORRIENTE HALL ACS715..... 157

4.3.2.1.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE CORRIENTE..... 158

4.3.2.1.3 ACONDICIONAMIENTO DEL SENSOR ACS715 160

4.3.3 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL PWM DEL MICROCONTROLADOR 161

4.3.4 CONSTRUCCIÓN DE LOS INDUCTORES..... 163

4.3.4.1 ALAMBRE LITZ 165

4.3.4.2 CÁLCULO DEL VALOR DEL INDUCTOR TOROIDAL LITZ..... 168

4.4 ELEMENTOS DE CONTROL 170

4.4.1 MICROCONTROLADOR ATMEGA128AP 171

4.4.1.1 DISTRIBUCIÓN DE LOS RECURSOS DEL MICROCONTROLADOR ATMEGA1284P. 172

4.5 SISTEMAS DE COMUNICACIÓN 174

4.5.1 COMUNICACIÓN SERIAL ASÍNCRONA 174

4.5.2 COMUNICACIÓN CON EL MICROCONTROLADOR ATMEGA1284P 177

4.6 SENSOR DE TEMPERATURA 178

4.6.1 CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR LM35 178

4.7 ALMACENAMIENTO DE DATOS EN LA TARJETA SD CARD .. 179

4.7.1.1 TARJETA SD (SECURE DIGITAL) 179

4.7.2 CONEXIONES Y SEÑALES 180

4.7.2.1 BUS SPI 180

4.8 PROGRAMA DE CONTROL 182

4.8.1 MÉTODO DE CONTROL 183

4.8.1.1 PROGRAMA PARA EL CONTROLADOR 184

4.8.1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA PRINCIPAL 184

4.9 SISTEMA DE VISUALIZACIÓN DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS 188

4.9.1 PANTALLA TFT HY32D 189

4.10 SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR 190

4.10.1 SENSORES DE LUZ AMBIENTAL 190

4.10.1.1 SISTEMA DE FILTRACIÓN DE LUZ 192

4.10.2 CONTROL DE MOTORES 196

CAPITULO V..... 198

5. PRUEBAS Y RESULTADOS 198

5.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO 199

5.1.1 PRUEBAS CON EL PANEL FOTOVOLTAICO FIJO 199

5.1.2 PRUEBAS CON EL EQUIPO DE SEGUIMIENTO……..203

5.1.3 PRUEBAS CON SEGUIMIENTO AUTOMÁTICO……..204

5.1.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS……208

CAPITULO VI……..213

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 212

7. REFERENCIAS 215

8. ANEXOS..... 220

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Faro alimentado por energía solar, situado en la isla Montague, en la costa este de Australia. 9
Figura 2 El espectro electromagnético. 13
Figura 3 Dirección del ángulo de rotación de la Tierra. 15
Figura 4 Ángulo de declinación. 16
Figura 5 Movimiento aparente del Sol en un punto de la Tierra. 17
Figura 6 Posicionamiento solar 18
Figura 7 Declinación solar 19
Figura 8 Gráfica representativa de las horas de sol. 23
Figura 9 Diagrama Estereográfico. 23
Figura 10 Efecto fotoeléctrico 26
Figura 11 Estructura atómica del silicio intrínseco o puro y bandas de valencia y conducción. 26
Figura 12 Estructura atómica del silicio dopado con fósforo (semiconductor tipo n). 27
Figura 13 Estructura atómica del silicio dopado con boro (semiconductor tipo p). 27
Figura 14 Efecto fotovoltaico en una célula solar. 29
Figura 15 Circuito eléctrico equivalente de la celda solar. 30
Figura 16 Curvas Corriente-Voltaje y Potencia-Voltaje de la celda solar. 32
Figura 17 Característica inversa de una celda solar. 35
Figura 18 Esquema de instalación particular autónoma 36
Figura 19 Esquema un sistema interconectado con la red 36
Figura 20 Conexión de celdas solares en un panel fotovoltaico. 37

Figura 21 Curva I-V para N celdas conectadas en serie y M celdas conectadas en paralelo. 38
Figura 22 Diodos bypass colocados en arreglos de celdas solares dentro de un módulo fotovoltaico y su funcionamiento. 39
Figura 23 Efecto en las curvas I-V sin usar diodo bypass: de una celda con distintos niveles de sombreado; b) de diferente número de celdas con sombreado constante. 41
Figura 24 Curva I-V combinada para una celda solar con diodo bypass. . 42
Figura 25 Efecto en las curvas I-V con diodo bypass: a) de una celda con distintos niveles de sombreado; b) de diferente número de celdas con sombreado constante. 43
Figura 26 Sombreado homogéneo (diferente ángulo de inclinación). 44
Figura 27 Efecto del sombreado homogéneo en la característica de un arreglo fotovoltaico. 44
Figura 28 a) Conexión en serie de 10 módulos; b) Efecto del sombreado parcial. 45
Figura 29 Unidades distribuidas para seguimiento del punto de máxima potencia. 46
Figura 30 Forma de conexión para el método de carga capacitiva..... 48
Figura 31 Forma de conexión para el método de carga resistiva. 49
Figura 32 Conexión Panel Solar – Conversor DC/DC. 50
Figura 33 a) Conversor Reductor, b) Resistencia de entrada vs. δ en conducción continua. 52
Figura 34 a) Conversor Elevador, b) Resistencia de entrada vs δ en conducción continúa. 52

Figura 35 a) Conversor Reductor-Elevador, b) Resistencia de entrada vs δ en conducción continua..... 53
Figura 36 Evolución de la tensión en bornes de una batería a lo largo de un proceso de carga y descarga..... 56
Figura 37 (a) Característica I-V de un panel comercial modelo BPSX60 para una temperatura y radiación dadas. (b) Característica P-V para las mismas condiciones..... 59
Figura 38 (a) Característica I-V de un generador fotovoltaico típico a 40ºC y diferentes niveles de radiación. (b) Característica I-V del mismo generador a 60ºC y diferentes niveles de radiación..... 60
Figura 39 Característica P-V de un generador fotovoltaico para distintos niveles de radiación..... 62
Figura 40 Diagrama de flujo del algoritmo Perturbación y Observación. ... 63
Figura 41 Ilustración del comportamiento errático del algoritmo P&O bajo cambios rápidos en la radiación..... 64
Figura 42 Mesa de Soporte Condiciones Iniciales..... 67
Figura 43 Caja de baterías de Mesa de Soporte. 67
Figura 44 Estructura de Soporte de Paneles..... 68
Figura 45 Sistema de Medición Graduado..... 68
Figura 46 Mecanismo de Giro de los Paneles. 69
Figura 47 Alternativa 1 del seguidor solar. a) base b)mecanismo c)soporte..... 72
Figura 48 Alternativa 2 del seguidor solar. a)base b)mecanismo c)soporte..... 74

Figura 49 Alternativa 3 del seguidor solar. a) base b) soporte c) mecanismo..... 75
Figura 50 Composición de Aceros AISI - SAE Seleccionados..... 77
Figura 51 Mesa de soporte del seguidor solar. 79
Figura 52 Estructura de sujeción de los paneles solares. 80
Figura 53 Cañón de giro del eje azimutal. 80
Figura 54 Cañón de giro del eje cenital. 81
Figura 55 Pedestal de soporte de paneles. 81
Figura 56 Soporto motor cenital. 82
Figura 57 Sistema de engranes eje azimutal. 82
Figura 58 Sistema de engranes eje cenital. 83
Figura 59 Simulación mesa de soporte. 84
Figura 60 Simulación FDS mesa de soporte. 85
Figura 61 Simulación FDS estructura paneles. 86
Figura 62 Simulación cañón del eje azimutal. 87
Figura 63 Simulación pedestal de soporte. 88
Figura 64 Simulación FDS pedestal de soporte. 88
Figura 65 Simulación soporte motor cenital. 90
Figura 66 Posición par máximo..... 94
Figura 67 Características Físicas Acero AISI 1018..... 96
Figura 68 Curvas del factor de flexión 98
Figura 69 Gráfico del factor dinámico (Kv) vs. Velocidad lineal (Vt) 100
Figura 70 Factor geométrico superficial. 102
Figura 71 Coeficiente AGMA Cp. 103
Figura 72 Resistencia a la fatiga superficial AGMA. 104

Figura 73 Resistencia a la fatiga por fricción AGMA. 105
Figura 74 Dimensiones internas del diente 108
Figura 75 Flecha principal eje azimutal. 113
Figura 76 Diagrama de cuerpo libre. 114
Figura 77 Diagramas de Fuerza Cortante y Momento Flector 116
Figura 78 Diagramas de Fuerza Cortante y Momento Flector 117
Figura 79 Diagrama zona crítica de esfuerzos. 118
Figura 80 Renderizado del Equipo de Seguidor Solar Automático 121
Figura 81 Convertidor SEPIC. 123
Figura 82 Circuito SEPIC en Ton 123
Figura 83 Circuito SEPIC en Toff 124
Figura 84 Topología SEPIC Aislada 124
Figura 85 Convertidor SEPIC conectado con el panel fotovoltaico. 125
Figura 86 Diagrama de funcionamiento del conversor SEPIC. 127
Figura 87 Circuito equivalente cuando U=1. 127
Figura 88 Circuito equivalente cuando U = 0. 128
Figura 89 Formas de onda de corriente y voltaje en el capacitor C_2, con $I_{Lmin} > I_o$. 137
Figura 90 Conversor DC/DC Boost (Elevador) 139
Figura 91 Diagrama de relaciones entre los subsistemas 142
Figura 92 Diagrama causal del pulsador elevador Boost. 143
Figura 93 Conversor Boost (Elevador) 143
Figura 94 Conversor Boost: (a) En estado ON. (b) En estado OFF 144
Figura 95 Corriente en el Inductor 145
Figura 96 Diseño del convertidor SEPIC. 148

Figura 97 Diseño del convertidor BOOST (Elevador). 152
Figura 98 Circuito esquemático del sistema de medición de voltaje..... 155
Figura 99 Diagrama del sensor ACS715 158
Figura 100 Circuito esquemático del acondicionamiento del sensor de corriente. 159
Figura 101 Esquemático del integrado AD620..... 160
Figura 102 Diagrama del integrado TLP250 162
Figura 103 Inductor con núcleo toroidal. 163
Figura 104 Configuración RL (Resistencia Bobina). 168
Figura 105 Funciones ejecutadas por el microcontrolador ATMEGA 1284P. 170
Figura 106 Diagrama del integrado ATMEGA1284P. 172
Figura 107 Circuito esquemático del microcontrolador ATMEGA 1284P.. 172
Figura 108 Formato de un carácter en la transmisión asíncrona en serie 175
Figura 109 Sensor de temperatura LM35. 178
Figura 110 Tarjeta de memoria SD..... 179
Figura 111 Tarjeta SD y la numeración de pines. 180
Figura 112 Transmisión SPI, modelo Master-Slave. 181
Figura 113 Esquema de Control 182
Figura 114 Diagrama de flujo del sistema de monitorización y control del panel fotovoltaico. 186
Figura 115 Esquema del algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia MPPT. 187
Figura 116 Interfaz gráfica con pantalla TFT HY32D. 188
Figura 117 TFT HY32D..... 189

Figura 118 Esquema del sistema de seguimiento solar..... 190
Figura 119 Sensor de luz ambiental TSL261R 191
Figura 120 Sistema de control manual joystick..... 192
Figura 121 Espectro Electromagnético 193
Figura 122 Luz Visible. 195
Figura 123 Esquema del puente H 197
Figura 124 Toma de datos en panel con seguidor y estático..... 198
Figura 125 Panel fotovoltaico en posición estática 199
Figura 126 Toma de datos con multímetro y luxómetro..... 200
Figura 127 Voltaje e Irradiancia en función del tiempo. 202
Figura 128 Corriente e Irradiancia en función el tiempo. 202
Figura 129 Potencia e Irradiancia en función del tiempo. 203
Figura 130 Sistema de Visualización..... 204
Figura 131 Visualizador de Datos de los sensores de luz. 205
Figura 132 Voltaje e Irradiancia en función del tiempo. 207
Figura 133 Corriente e Irradiancia en función del tiempo. 207
Figura 134 Potencia e Irradiancia en función del tiempo. 208
Figura 135 Potencia sin Seguidor Solar y con Seguimiento Solar en función del Tiempo..... 210

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Regiones del espectro electromagnético. 14

Tabla 2 Valores referenciales para la declinación..... 19

Tabla 3 Factores a y b para Heliofanía. 22

Tabla 4 Valores de R_i para las configuraciones principales de conversores DC/DC. 51

Tabla 5 Descripción problemas seguidor solar. 70

Tabla 6 Matriz de decisión 76

Tabla 7 Datos Engrane Cónico Recto..... 97

Tabla 8 Factor de aplicación de carga 99

Tabla 9 El factor de Lewis..... 108

Tabla 10 Datos de piñón..... 108

Tabla 11 Datos del Engrane 109

Tabla 12 Resultado de cálculos de engranes rectos. 110

Tabla 13 Resultados diseño de Flechas azimutal y cenital..... 120

Tabla 14 Tabla de selección de rodamientos..... 121

Tabla 15 Parámetros más importantes del elevador de voltaje Boost. 141

Tabla 16 Especificaciones del controlador de carga..... 147

Tabla 17 El valor de X para el alambre de cobre se determina por la siguiente fórmula. 167

Tabla 18 Funciones de los pines del microcontrolador ATMEGA 1284P... 173

Tabla 19 Distribución de Pines del conector DB9. 176

Tabla 20 Flujo radiante 194

Tabla 21 Flujo Radiante Continuación 195

Tabla 22 Ángulos de inclinación para sistemas fijos. 200

Tabla 23 Voltajes y Corrientes generados por el panel fotovoltaico e Iluminancia (luxes) e Irradiancia W/m^2 (a 555nm). 201
Tabla 24 Voltajes y Corrientes generados por el panel fotovoltaico e Iluminancia (luxes) e Irradiancia W/m^2 (a 555nm). 206
Tabla 25 Potencia obtenida con el panel estático y con el seguidor solar . 209
Tabla 26 Datos promediados por horas y potencia adquirida..... 211

RESUMEN

El proyecto se basa en habilitar un sistema móvil fotovoltaico, el mismo que cuenta con 3 paneles solares que generan una potencia efectiva de 300W pico. Se diseñó y construyó un dispositivo de seguimiento solar automático con dos grados de libertad, construyendo un mecanismo de movimiento dentro del eje acimutal y el eje cenital, realizando un movimiento independiente cada uno de estos, implementando un software de supervisión el cual sirve para llevar un histórico, que permite obtener las curvas características de funcionamiento y operatividad de los parámetros que intervienen dentro del sistema solar fotovoltaico. Este proyecto aprovecha la energía producida por las células fotovoltaicas, transformando la energía solar en electricidad, que es utilizada en el consumo local y abastecimiento del propio sistema, volviéndose un equipo autónomo. Se implementaron circuitos conversores DC-DC que permiten obtener las curvas características y el correcto funcionamiento del seguidor. El sistema opera con el algoritmo perturbar y observar (Maximum Power Point Tracking, MPPT) para el seguimiento del punto de máxima potencia del sistema fotovoltaico.

Palabras Claves. Convertidor DC-DC, Mecanismo, Algoritmo MPPT, Sistema fotovoltaico, Curvas características.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Hoy en día se ha puesto mucho énfasis en el desarrollo de proyectos de investigación relacionados con la preservación del medio ambiente. Siempre es necesario seguir investigando cómo se puede aprovechar el tipo de trabajo realizado por un cuerpo y canalizarlo en una nueva forma de obtención de energía. Este es el caso del aprovechamiento y transformación de la energía solar.

Es necesario dar a notar que el laboratorio de Energías Renovables cuenta con un sistema móvil solar fotovoltaico, que no se ha aprovechado en todo su potencial. Por este motivo se ha propuesto el presente proyecto con el fin de habilitar este sistema móvil fotovoltaico para diseñar y construir un dispositivo de seguimiento solar automático con 2 grados de libertad, junto con la implementación de un software de supervisión el cual servirá para llevar un histórico que permitirá realizar dentro del mismo programa un análisis de datos que servirán para obtener las curvas características de funcionamiento y operatividad de los parámetros de que intervienen dentro de este campo solar fotovoltaico.

El sistema móvil fotovoltaico cuenta con 3 paneles solares Isofotón I110, que en total genera una potencia efectiva de 300Wp; a partir de este valor, se plantea el diseño de los correspondientes componentes mecánicos - eléctricos -

electrónicos para que se satisfaga el alcance del proyecto sin exceder la potencia generada por los paneles.

Por lo anteriormente señalado el proyecto busca aprovechar este tipo de energía producida por las celdas fotovoltaicas. Transformar la energía solar en electricidad, almacenando la energía captada durante el día para ser utilizada por la noche tanto en luminosidad como en consumo de artefactos eléctricos, y para auto-alimentación energética del equipo y los dispositivos competentes para la implementación del software y adquisición de datos de funcionamiento y operatividad del sistema móvil fotovoltaico.

1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE está inmersa dentro de la docencia, investigación y vinculación con la colectividad, dentro de la propuesta escogida para el desarrollo del presente proyecto se logra estar presente dentro de estos tres campos.

Dentro de Docencia, ya que el aporte del presente proyecto es considerable para las aplicaciones de la maestría de Energías Renovables, dictada en la ESPE posgrados, junto a cátedras relacionadas de pre-grado del DECEM. Con este proyecto los docentes tienen una herramienta didáctica de enseñanza, para solidificar los conocimientos teóricos impartidos en clase. Con el término del proyecto se logrará obtener las curvas características de funcionamiento y operatividad del sistema móvil fotovoltaico, que ayudarán a comprender la eficiencia y desempeño del mismo.

Si bien es cierto ya existen investigaciones al respecto sobre el aprovechamiento de la energía solar, por tal razón se comercializan paneles

solares, con mecanismos de movimiento manual, pero el elevado costo de estos, hace que no se amerite la compra de uno de aquellos dispositivos; recalcando que los aparatos que hoy en día hay en el mercado, están diseñados de forma genérica y uno de los objetivos de este proyecto es diseñar el dispositivo de seguidor solar automático acorde a la situación geográfica en la que se sitúa el laboratorio de energías renovables con el respectivo control que este necesita, para que aparte que sea guiado por la luz solar, adicional tenga un programa de control acorde a los datos del Conelec en Ecuador, y de esta forma generar un seguidor solar automático inteligente; también implementar un software de supervisión el cual servirá para llevar un histórico que permitirá realizar dentro del mismo programa un análisis de datos que servirán para obtener las curvas características de funcionamiento y operatividad de los parámetros de que intervienen dentro de este campo solar fotovoltaico.

Es por estas razones como Universidad y como Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, se deben impulsar proyectos para el uso de Energías Renovables y de esta manera poder alcanzar importantes logros que puedan ser reorientados hacia el beneficio de la comunidad, partiendo de que el Ecuador dentro del ámbito de Energías Renovables es un Laboratorio Natural con importantes recursos energéticos.

1.3 ALCANCE DEL PROYECTO

Se realizará el diseño y construcción de un equipo para seguimiento solar automático de dos grados de libertad, a través de un mecanismo capaz de generar un torque suficiente para mover los paneles solares y el resto de la estructura, mediante el uso de dos motores, con el respectivo diseño de la placa electrónica,

tanto para el movimiento, como para el control de posicionamiento correcto del seguidor solar, esto se logrará con un sistema de control.

Desarrollar e implementar un equipo para la obtención de las curvas características de funcionamiento y operatividad de los parámetros que intervienen en un sistema móvil fotovoltaico, presentando una interface gráfica amigable al usuario, donde se muestre: voltaje, corriente y potencia, generando un historial de los parámetros funcionales y operativos. Adicional poseerá la opción de movimiento manual del seguidor solar.

1.4 OBJETIVOS

Los diferentes objetivos planteados, tienen como referencia al aprendizaje, destreza por parte del estudiante y mejoramiento continuo en las diferentes prácticas de los laboratorios que se presenten.

1.4.1 Objetivos Generales

Diseñar y construir un equipo de seguimiento solar automático de dos ejes, e implementar de un software para obtención de las curvas características de funcionamiento y operatividad de los parámetros que intervienen en un sistema móvil fotovoltaico de 300W pico para el laboratorio de energías renovables del DECEM.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Realizar el diseño mecánico del seguidor solar automático para dos grados de libertad.
- Realizar el diseño eléctrico y electrónico del sistema de seguimiento solar fotovoltaico.
- Diseñar y construir un sistema de control para el posicionamiento correcto a la incidencia solar para el seguidor solar
- Diseñar un equipo de supervisión para la generación de datos operativos e históricos así como las curvas de los parámetros operacionales y funcionales que intervienen dentro del sistema móvil fotovoltaico.
- Determinar los parámetros de funcionamiento y operatividad del sistema solar fotovoltaico.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ENERGÍA

Al mirar alrededor se observa que los seres vivos crecen, se trasladan, que las máquinas ejecutan las más variadas tareas, se observan diversos fenómenos naturales como rayos y erupciones volcánicas. Todas estas acciones tienen algo en común, la presencia de energía.

La energía es la fuerza vital, de ella dependen la iluminación, el calentamiento y refrigeración de las casas, el transporte de personas y mercancías, la obtención de alimento y su preparación, el funcionamiento de las fábricas, etc. La energía se considera como una propiedad que se manifiesta en los cambios, tanto físicos como químicos que se producen en la naturaleza (Santiago, Energías Renovables: Conceptos y Aplicaciones, Junio 2003).

2.1.1 Definición de la energía

El trabajo se define como la fuerza necesaria para mover algún objeto una distancia definida, simbólicamente:

$$W = F \times d \tag{2.1}$$

Donde:

W = Trabajo, que se mide en Joules [J]

F = Fuerza, que se mide en Newtons [N]

d = Distancia, que se mide en metros [m]

La energía por su parte se la define como la capacidad para realizar o producir un trabajo, y posee la misma unidad que la del trabajo, el Joule [J].

Mientras mayor es la fuerza que ejerce un cuerpo se requiere más energía, y de la misma manera si una misma fuerza se mantiene durante un mayor tiempo, esto igualmente demanda mayor energía, lo que se concluye es que para la realización de cualquier tipo de trabajo es necesario liberar una cierta cantidad de energía.

La energía se manifiesta de distintas formas, entre las que se tiene: térmica, radiante, mecánica, eléctrica, química, gravitacional, magnética y nuclear, cada una de las cuales tiene su origen, su forma de producción y sus usos específicos.

2.1.2 Eficiencia Energética

Una forma de energía puede transformarse en otra como consecuencia de un proceso, generalmente por la acción de una máquina, lo cual encamina el estudio hacia uno de los conceptos más importantes sobre energía, que se conoce como a Primera Ley de la Termodinámica o Ley de Conservación de Energía:

"La energía no se pierde ni se destruye, solo se transforma"

El balance energético de un proceso debe ser cero, es decir la energía que ingresa es igual a la energía que se produce. Un proceso energético es reversible cuando se puede ir de uno a otro lado del mismo sin modificar el total de energía involucrada en ese proceso. Es decir que, en este caso, la eficiencia es del 100%. Sin embargo, se sabe que en la vida real esto no es factible, pues existen pérdidas de energía por varios factores (Santiago, "Energías Renovables: Conceptos y Aplicaciones", Junio 2003). La eficiencia del proceso entonces nunca llega al 100%. En la realidad energética, todo proceso de transformación es irreversible y el grado de aprovechamiento de la energía introducida en el mismo viene determinado por su eficiencia:

$$\eta = \frac{W}{E} \tag{2.2}$$

Donde:

η = Eficiencia (a dimensional)

W = Trabajo resultante del proceso, se mide en Joules [J]

E = Energía introducida en el proceso, se mide en Joules [J]

2.1.3 Potencia y Energía

La potencia es la energía generada en una unidad de tiempo.

$$\mathrm{P} = \frac{\mathrm{E}}{\mathrm{t}} \tag{2.3}$$

Donde:

P = Potencia que se mide en vatios [W]

E = Energía que se mide en Joules [J]

t = Tiempo que se mide en segundos [s]

2.1.4 Energía Solar

La energía solar en una u otra forma es la fuente de casi toda la energía de la Tierra. Por ejemplo, los combustibles fósiles que se usan para transporte y generación de electricidad son esencialmente energía solar acumulada durante miles de años. De manera similar, la biomasa convierte la energía del Sol en un combustible, que después puede ser usado para calefacción, transporte o electricidad. La energía del viento, usa los flujos que son creados por aire calentado por el Sol y la rotación de la Tierra. La energía fotovoltaica es un simple y elegante método de tomar control de la energía solar.

Figura 1. Faro alimentado por energía solar, situado en la isla Montague, en la costa este de Australia.

(http://www.pveducation.org/pvcdrom/introduction/solar-energy)

Los dispositivos fotovoltaicos (celdas solares) son únicos, ya que convierten directamente la radiación solar incidente en electricidad, sin ruido, sin contaminación y sin partes móviles, haciéndolos robustos, confiables y de larga duración.

Además de la energía solar fotovoltaica, se puede comprender la importancia del Sol y sus fenómenos asociados con algunos ejemplos más:

- Una parte de la radiación solar (rayos infrarrojos), son absorbidos en su mayor parte en la atmósfera, produciendo el calentamiento de la Tierra y gracias a este fenómeno el Sol mantiene una temperatura que permite la vida existente en el planeta. El mismo principio se aplica a un invernadero.
- La energía solar térmica permite la producción de calor mediante colectores solares térmicos que transforman la radiación solar en calor. Los colectores solares se usan especialmente para el calentamiento de agua.
- Gracias a la radiación solar que reciben las plantas estas producen los azúcares para su subsistencia (fotosíntesis).

- Debido al calentamiento solar se originan los vientos por la diferencia de presión de las masas de aire en las zonas cálidas que ascienden y chocan con el aire frío de las zonas más altas.
- Los combustibles fósiles también deben su producción a la energía solar recibida durante su formación.

Y se puede seguir dando infinidad de ejemplos que demuestran la importancia del Sol y del porque es la fuente de energía primaria del planeta.

2.1.5 Radiación Solar y Espectro Electromagnético

El Sol como cuerpo incandescente emite radiación, pero no toda la radiación que se recibe del Sol es luz visible.

La luz que llega del Sol es aparentemente blanca, sin embargo esto no es así ya que este tipo de luz es un conjunto de luces de diversos colores.

La radiación que emite un cuerpo en función de la temperatura viene dada por la ley de Stefan-Boltzman:

$$M = \sigma T^4 \tag{2.4}$$

Donde:

M = Densidad total de flujo radiante emitida por cuerpo en W m^{-2}

σ = Constante de Stefan-Boltzman = 5,67 x 10^{-8}[W m^{-2} K^{-4}]

T = Temperatura del cuerpo en K

La energía radiada por el Sol se propaga en todas las direcciones y solamente una parte de esta emisión llega a la Tierra a través del espacio vacío. Esta energía se emite en dos formas, como:

a) Radiación electromagnética, se extiende desde los rayos gamma y los rayos X, pasando por la luz ultravioleta, la luz visible y los rayos infrarrojos, hasta las ondas de radio; y,

b) Viento solar, compuesto de partículas atómicas energizadas: neutrinos y protones.

La capa atmosférica protege a la Tierra del viento solar y de la radiación electromagnética, especialmente de los daños que causan los rayos ultravioletas.

Para conocer la radiación del Sol que llega a 1 m^2 de la superficie externa de la atmósfera de la Tierra se usa la ley de Stefan-Boltzman.

Se tienen los siguientes datos:

Temperatura en la superficie del Sol = 5.780 ºK

Radio del Sol= rsol = 695.500 Km

Distancia media Sol-Tierra = $r_{s\text{-}t}$ = 149,6 x 10^6 Km

Primero se calcula la radiación emitida por el Sol en su superficie (Msol), mediante (2.5):

$$Msol = (5.6 * 10^{-8} \left(\frac{W}{m^{2\circ}K^4}\right)(5780°K)^4 = 63.28[\frac{MW}{m^2}] \qquad (2.5)$$

Ahora por la ley de la conservación de la energía, se puede asumir que la radiación en la superficie del Sol es igual a la radiación en la órbita de la Tierra, entonces:

$$Msol \times Asol = Mtierra \times A_{sol-tienna} \qquad (2.6)$$

Donde:

Asol = Área del Sol en m^2 = π x $rsol^2$

Mtierra = Radiación del Sol en la órbita de la Tierra en W m^{-2}

Asol-tierra = Área del Sol a la Tierra en m^2 = π x $rs\text{-}t^2$

$$Msol \times \pi \times {r_{sol}}^2 = Mtierra \times \pi \times {r_{s-t}}^2 \quad (2.7)$$

$$Mtierra = Msol(\frac{r_{sol}}{r_{s-t}})^2 \quad (2.8)$$

$$Mtierra = 63.28\left[\frac{MW}{m^2}\right]\left(\frac{695.500}{149.6 \times 10^6}\right)^2 = 1367[\frac{W}{m^2}]$$

Este valor de 1367 W/m2 es conocido como la constante solar, y suele ser usado para cálculos en sistemas fotovoltaicos y termo solares.

La radiación electromagnética se la puede describir como un flujo de fotones, los cuales son partículas sin masa que se desplazan en forma de onda a la velocidad de la luz (c = 300000 Km/s) y transportan energía de un punto a otro. Cada fotón contiene una cantidad fija de energía o paquete de energía; dependiendo de la energía del fotón se puede ir desde las ondas de radio, que tienen la menor energía hasta los rayos gamma.

Los fotones con mayor energía tienen una menor longitud de onda (λ) o una mayor frecuencia (v) ya que:

$$v = \frac{c}{\lambda} \quad (2.9)$$

La distribución de los distintos tipos de radiación constituye el llamado espectro electromagnético, que consiste en una gráfica en la que figuran las diferentes longitudes de onda (figura 2).

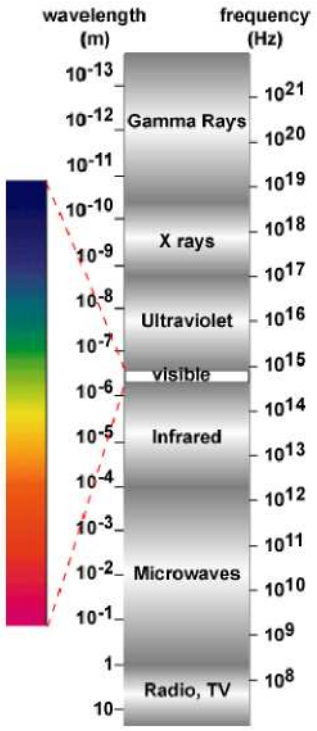


Figura 2. El espectro electromagnético.

(http://www.pveducation.org/pvcdrom/introduction/solar-energy)

Todas las radiaciones electromagnéticas se propagan a igual velocidad, pero se pueden distinguir por su longitud de onda, valor que se expresa generalmente en nanómetros (nm). La luz roja es la que tiene mayor longitud de onda entre las visibles, y la violeta la que tiene menos. Con longitudes de onda superiores a la del rojo, se tiene el infrarrojo, que produce una reacción de calor en la piel pero no es visible para el ojo humano. Para longitudes de onda superiores al violeta se tiene el ultravioleta, que tampoco es visible, pero cuyos efectos se dejan sentir en el fenómeno del bronceado de la piel.

La cantidad de energía que transporta un fotón se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$E = h \times v \quad (2.10)$$

Donde:

E = Energía de un fotón [J]

h = Constante de Planck $= 6{,}624 \times 10^{-34}$ [J/s]

v = Frecuencia [Hz]

La energía de un fotón se mide en electrón voltios [eV], 1 eV $= 1{,}602 \times 10^{-19}$J.

A continuación se presentan las características de las distintas regiones del espectro electromagnético:

Tabla 1. Regiones del espectro electromagnético.

ONDA	LONG. DE ONDA [m]	FRECUENCIA [Hz]	ENERGÍA [J]
Radio	$> 1 \times 10^{-1}$	$< 3 \times 10^{9}$	$< 2 \times 10^{-24}$
Microondas	$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-1}$	$3 \times 10^{9} - 3 \times 10^{11}$	$2 \times 10^{-24} - 2 \times 10^{-22}$
Infrarroja	$7 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{11} - 4 \times 10^{14}$	$2 \times 10^{-22} - 3 \times 10^{-19}$
Luz visible	$4 \times 10^{-7} - 7 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{14} - 7{,}5 \times 10^{14}$	$3 \times 10^{-19} - 5 \times 10^{-19}$
Ultravioleta	$1 \times 10^{-8} - 4 \times 10^{-7}$	$7{,}5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{16}$	$5 \times 10^{-19} - 2 \times 10^{-17}$
Rayos X	$1 \times 10^{-11} - 1 \times 10^{-8}$	$3 \times 10^{16} - 3 \times 10^{19}$	$2 \times 10^{-17} - 2 \times 10^{-14}$
Rayos Gamma	$< 1 \times 10^{-11}$	$> 3 \times 10^{19}$	$> 2 \times 10^{-14}$

(Santiago, "Energías Renovables: Conceptos y Aplicaciones", Junio 2003)

2.1.6 Posicionamiento Solar.

La Tierra, como cualquier cuerpo celeste, no se encuentra en reposo sino que está sometida a movimientos de diversa índole, además del movimiento de rotación alrededor de su eje, se sabe que se encuentra en el espacio orbitando alrededor del Sol, y que completa cada una de sus órbitas en un período de un año. Sin embargo para determinar las estrategias de control, para un seguimiento solar, es necesario entender los movimientos de los astros que se hallan dentro la gran superficie esférica de radio arbitrario denominada esfera celeste, vistos desde un punto en nuestro planeta.

Figura 3. Dirección del ángulo de rotación de la Tierra.

(http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Ecl%C3%ADptica-plano-lateral-ES.png)

El plano que contiene la órbita de la Tierra alrededor del sol se denomina eclíptica y el eje de rotación de la Tierra está inclinado respecto a dicho plano en un ángulo de 23º 27’ (figura 3).

Este hecho origina las estaciones y puede medirse mediante un ángulo llamado declinación, que es el ángulo con el que vería el Sol, un habitante de la Tierra situado en el Ecuador respecto al cénit.

La declinación coincide en los solsticios con el valor de los 23 o 27’ y se anula en los equinoccios. Los solsticios son los momentos del año en los que el

Sol alcanza una máxima declinación norte (+23 o 27') o declinación sur (-23 o 27') con respecto al ecuador terrestre, mientras que los equinoccios son los momentos donde los dos polos de la Tierra se encuentran a igual distancia del Sol y los días tienen una duración igual a la de las noches en todos los lugares de la Tierra, excepto en los polos.

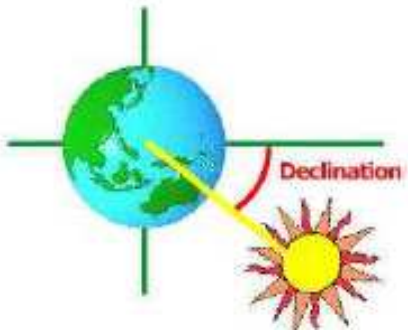


Figura 4. Ángulo de declinación.

(http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/declination-angle)

El ángulo de declinación se puede calcular fácilmente mediante la fórmula de Cooper:

$$d = 23.45 \times sen(360 \times \frac{284+n}{365}) \qquad (2.11)$$

Donde n es el día del año (n=1 para el primero de enero y n=365 para el 31 de diciembre). El valor de d se anula para el 22 de marzo y el 23 de septiembre, y alcanza el valor máximo positivo el 22 de junio y el valor máximo negativo el 22 de diciembre.

2.1.7 Características del Movimiento Aparente del Sol.

El movimiento aparente del Sol es motivado por la rotación de la Tierra, la cual gira sobre su eje en dirección oeste-este, provocando que parezca que es el Sol el que se mueve precisamente en la dirección contraria, de este a oeste.

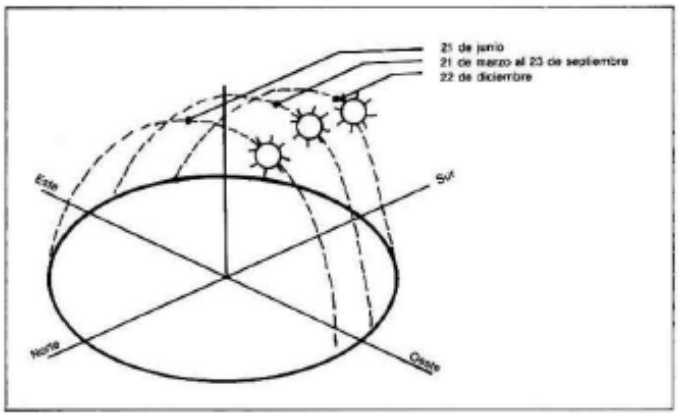


Figura 5. Movimiento aparente del Sol en un punto de la Tierra.

(Curso de Energía Solar, C.T.E., Cuarta Edición)

La Tierra gira sobre sí misma (movimiento de rotación) en un período de tiempo sumamente fijo y estable (24 horas) y gira alrededor del Sol en un período de 365 días, aproximadamente. El día solar medio, que es el que interesa en los cálculos de Energía Solar, se compone de 24 horas y se lo define como el período de tiempo medio necesario para que el Sol ocupe la misma posición, respecto a una dirección fija. El Sol no siempre sale o se pone por el mismo sitio, por ejemplo en un punto del hemisferio norte en invierno, el Sol sale por el sureste y se pone por el suroeste, en primavera y otoño sale por el este y se pone por el oeste, mientras que en verano sale por el noreste y se pone por el noroeste.

La trayectoria aparente que sigue el Sol sobre el firmamento también es la eclíptica, una circunferencia imaginaria de la cual solo se aprecia la mitad de ella

ya que el horizonte impide apreciar el arco que se encuentra por debajo del plano terrestre del observador (figura 5).

Para determinar la posición del sol se necesita tener el conocimiento de ciertos ángulos:

- **Ángulo de Zenit:** Posición del sol y la perpendicular al observador.

- **Ángulo Azimut de superficie:** Es el ángulo medido entre el meridiano del lugar y la desviación de la proyección en el plano horizontal de la normal de la superficie.

- **Altitud solar:** Es el ángulo entre la diferencia del perpendicular menos el zenit.

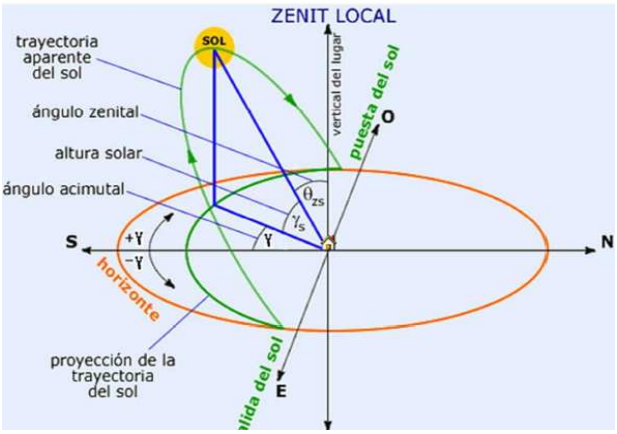


Figura 6. Posicionamiento solar

(http://www.ujaen.es/)

- **Latitud:** Es la distancia angular entre el Ecuador terrestre y un punto en la superficie de la tierra (Superficie Terrestre).

- **Declinación:** Es el ángulo formado entre la posición del sol al medio día y el plano ecuatorial.

Donde n es el número del día en el año y de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 2. Valores referenciales para la declinación.

MES	FECHA	N° día del año
ENERO	17	i
FEBRERO	16	31+i
MARZO	16	59+i
ABRIL	15	90+i
MAYO	15	120+i
JUNIO	11	151+i
JULIO	17	181+i
AGOSTO	16	212+i
SEPTIEMBRE	15	243+i
OCTUBRE	15	273+i
NOVIEMBRE	14	304+i
DICIEMBRE	10	334+i

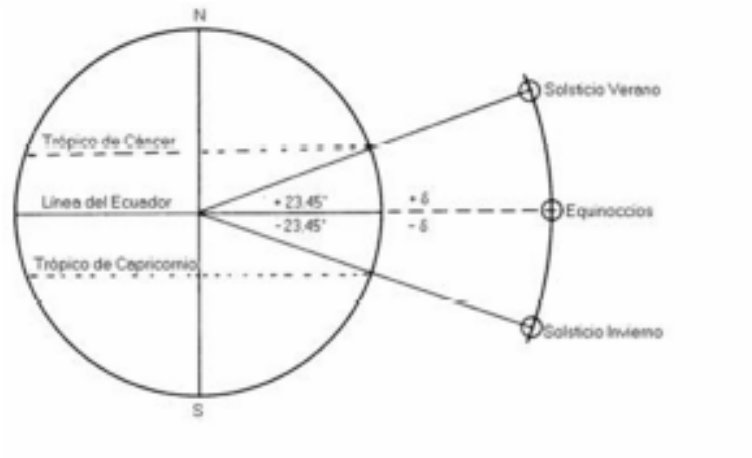


Figura 7. Declinación solar

(IDEAM, 2004)

- Ángulo Beta (β): Es el ángulo medido entre la superficie en análisis y la horizontal.

$$0° \leq \beta \geq 180° \tag{2.12}$$

- Ángulo Horario (ω): Es la desviación del sol con relación al meridiano del lugar.

$$-90° \leq \omega \geq 90° \tag{2.13}$$

Mañana (-) a las 11 am = -15°

Tarde (+) a las 3 pm = 45°

- Ángulo de Incidencia (θ): Es el ángulo formado entre la normal a la superficie y la posición del sol, tomada como una radiación directa.

$$cos\,\theta = sin\,\delta\,sin\,\emptyset\,cos\,\beta - sin\,\delta cos\emptyset\,sin\,\beta cos\gamma +$$

$$cos\delta cos\emptyset cos\beta cos\omega + cos\delta sin\emptyset sin\beta cos\gamma cos\omega +$$

$$cos\,\delta\,sin\,\beta\,sin\,\gamma\,sin\omega \tag{2.14}$$

De donde con $\beta = 0$:

$$cos\,\theta_2 = sin\delta\,sin\,\emptyset + cos\delta\,cos\emptyset\,cos\omega$$

$$cos\omega_s = -\,tan\,\delta\,tan\,\emptyset$$

$$N = \frac{2\,arccos\omega s}{15} \tag{2.15}$$

Donde:

N es el número de hora de brillo solar teórico.

Ws es el ángulo medido al ocaso.

- Azimut Solar: Desviación del meridiano del lugar y la proyección de la radiación directa.

$$sin\,\gamma SOLAR = \frac{cos\,\delta \times sin\omega}{sin\,\theta 2} \quad (2.16)$$

Donde:

Sur – Oeste (+)

Sur – Este (-)

- Radiación De Un Día: Esta radiación se la representa con Go y se determina mediante la siguiente relación:

$$Go = Gsc\left(1 + 0.033 * \cos\left(\frac{360*n}{365}\right)\right) * cos\theta_2[\frac{W}{m^2}] \quad (2.17)$$

Donde:

Gsc es la constante solar

n es el número de días con el cálculo de tabla

θ_2 es ángulo de zenit

- Energía: Es designada como Ho y es la energía que recibimos en un día.

$$Ho = \frac{24*3600*Gsc(\frac{W}{m^2})}{\pi} * [1 + 0.033\cos\left(\frac{360*n}{365}\right)][cos\emptyset cos\delta sin\omega s + \frac{2\pi\omega s}{360} sin\emptyset sin\delta] \quad (2.18)$$

Donde:

Ho es la energía recibida diaria y tiene unidades $[\frac{J}{m^2*dia}]$

Gsc es constante solar

n es el número de días con el cálculo de tabla

Ws es el ángulo horario al ocaso

Ø es el ángulo de latitud y

δ es el ángulo de declinación

- Índice De Claridad: Esta dado por:

$$K_T = \frac{H}{Ho} \quad (2.19)$$

Donde:

K_T = 0,3 Climas cubiertos (nublados)

K_T = 0,8 Climas soleados

Heliofanía: Son las horas de brillo solar real.

Tabla 3. Factores a y b para Heliofanía.

	a	**b**
Costa	0.28	0.54
Sierra	0.25	0.45

(http://www.biomed.engsoc.org/node/36)

Donde:

a = 0,23 y b = 0,56 para el Ecuador

H = Promedio mensual de la irradiación solar diaria global

Ho = es la energía recibida diaria y tiene unidades

n = número de horas de insolación para la que se calcula

N = número de horas de sol al día, desde la salida hasta la puesta de sol.

- Horas De Sol: Comprende las horas de insolación diaria que se puede alcanzar en la superficie terrestre y que se lo determina a través del heliógrafo.

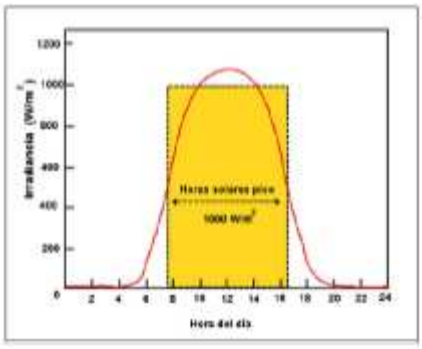


Figura 8. Gráfica representativa de las horas de sol.

(www.inamhi.gov.ec)

Con estos datos podemos obtener una gráfica del recorrido solar existente para todo el año y con esto obtener datos de insolación para los diferentes requerimientos para cálculo de demandas de recurso solar.

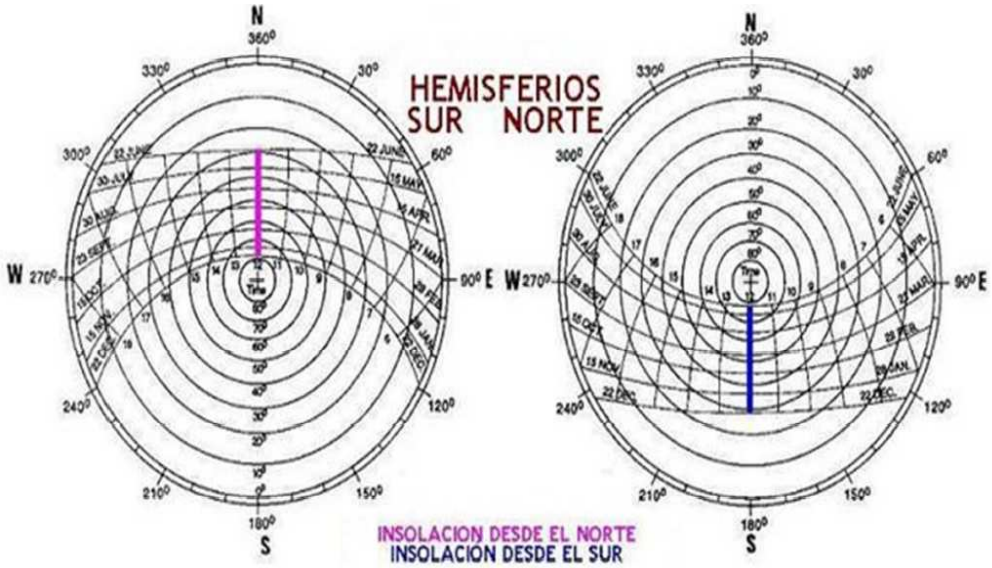


Figura 9. Diagrama Estereográfico.

(http://www.wikilengua.org/)

2.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

2.2.1 Electricidad Obtenida del Sol

El desarrollo tecnológico actual permite aprovechar la energía del Sol para los usos más diversos. Dentro de las aplicaciones de la energía solar se tiene la producción de calor y la producción directa de electricidad. La producción de electricidad permite el abastecimiento eléctrico en forma sencilla en zonas alejadas de la red eléctrica y en naves espaciales mediante paneles fotovoltaicos, los cuales por ser estáticos tienen una vida útil muy prolongada.

2.2.2 Estructura Atómica

El átomo está constituido por un núcleo, con protones de carga positiva, neutrones de carga neutra y electrones con carga negativa que giran alrededor del núcleo, el número de electrones que ocupan las órbitas de un átomo es fijo y lo determina su número cuántico, siendo mayor en las órbitas más exteriores. Una tabla periódica de los elementos permite conocer los orbitales (o niveles de energía) de los átomos por su número cuántico. La energía del átomo, entonces, no es continua sino discreta, es decir que aumenta a saltos o en paquetes denominados “cuantos” de energía.

Para que un electrón se mueva de una órbita interna a otra más externa necesita recibir una cierta cantidad de energía. Si la energía es insuficiente, permanece en su orbital pero si es suficiente puede saltar al orbital siguiente o quedar libre.

Si la energía es excesiva puede liberarse más de un electrón o eliminarse como pérdidas en forma de calor. El caso contrario ocurre si un electrón de un orbital exterior salta a uno interior, en este caso libera energía.

Cada nivel energético del átomo, determinado por sus niveles orbitales tiene una franja vacía (gap de energía, brecha de energía o zona prohibida), limitada en su parte superior por la llamada banda de conducción y en su parte inferior por la llamada banda de valencia. Cuando un electrón se encuentra en la banda de conducción es libre para movilizarse en el material. Al liberarse un electrón de un átomo, queda un hueco y el átomo se convierte en un ión de carga positiva, generándose un electrón-hueco.

2.2.3 Efectos Fotoeléctricos

El efecto fotoeléctrico se origina al irradiar un tipo de luz en un material conductor.

Con el impacto de los fotones, se liberan electrones y se genera una corriente eléctrica en un circuito. Para remover al electrón de la superficie de una placa de metal u otro material sólido, se necesita una cierta cantidad mínima de energía, la cual depende del material. Si la energía de un fotón es mayor que este valor mínimo, el electrón es emitido de la superficie del metal.

La cantidad de electrones liberados es función de la frecuencia de los fotones que inciden, más que de la intensidad de la luz. Solo fotones de ciertas frecuencias tienen la cantidad de energía necesaria para liberar los electrones. Un mayor número de fotones (mayor intensidad de radiación) de esa frecuencia liberará más electrones. Este efecto constituye la base del funcionamiento de una celda solar.

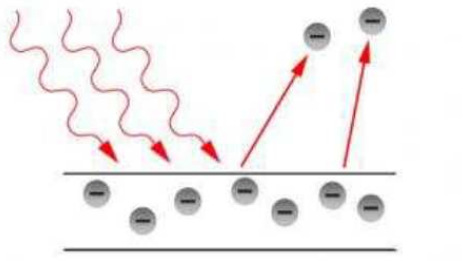


Figura 10. Efecto fotoeléctrico

(http://www.dforcesolar.com/energia-solar/efecto-fotoelectrico/)

2.2.4 Formación de Material Tipo N y Tipo P

En un cristal de silicio los átomos enlazan sus electrones con los huecos del átomo contiguo formando una unión muy sólida entre sí. Un cristal de silicio puro es un aislante pues no tiene electrones libres. Este se conoce como silicón intrínseco.

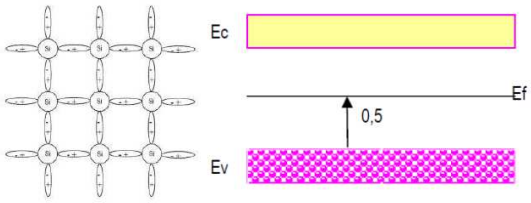


Figura 11. Estructura atómica del silicio intrínseco o puro y bandas de valencia y conducción.

(Santiago, Energías Renovables: Conceptos y Aplicaciones, Junio 2003)

Para el silicio puro el Nivel de Energía de Fermi (Ef), que es la energía del nivel más alto ocupado por un sistema cuántico a temperatura de 0 K, tiene un valor de 0,5 pues el elemento se encuentra en equilibrio. Si al silicón intrínseco se le introduce impurezas combinándolo con otro elemento, se puede cambiar las propiedades del material y favorecer la creación de electrones o huecos libres,

esto se denomina dopar el material. Dos elementos son los preferidos para este propósito: el fósforo (P), que tiene 5 electrones de valencia y el boro (B) que tiene 3 electrones de valencia.

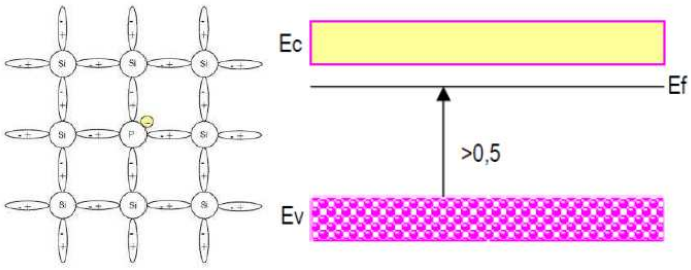


Figura 12. Estructura atómica del silicio dopado con fósforo (semiconductor tipo n).

(Santiago, Energías Renovables: Conceptos y Aplicaciones, Junio 2003)

El silicio así dopado se lo conoce como silicio extrínseco. Al introducir un átomo de fósforo se tiene un electrón adicional, el material es un donante de electrones y se llama material tipo n (por ser negativo). El nivel de energía de Fermi se acerca a la banda de conducción (figura 11).

En el caso del boro queda un hueco libre, el material es un receptor de electrones y se lo conoce como material tipo p (por positivo). El nivel de energía de Fermi se acerca a la banda de valencia (figura 12).

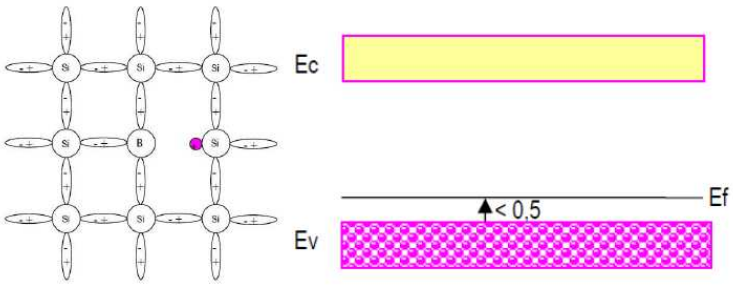


Figura 13. Estructura atómica del silicio dopado con boro (semiconductor tipo p).

(Santiago, "Energías Renovables: Conceptos y Aplicaciones", Junio 2003)

2.2.5 Efectos Fotovoltaicos en la Unión P-N.

Con los fundamentos explicados anteriormente es posible explicar de una manera clara el funcionamiento de la célula fotovoltaica.

Al incidir los rayos solares sobre la superficie del semiconductor, el correspondiente efecto de la luz con sus respectivos fotones, que tienen una energía similar a la de los electrones de valencia, permite que se rompan los enlaces por lo tanto aparecen los pares electrón-hueco; los electrones liberados tenderán a recombinarse rápidamente con los huecos dejados produciendo un aumento de temperatura e impidiendo el flujo de corriente eléctrica.

Para que exista la corriente eléctrica deben orientarse los electrones en una dirección y los huecos en dirección opuesta, esto se consigue creando un campo eléctrico que los oriente. Al utilizar los materiales tipo p y n, en la unión los electrones libres de la zona n contigua a la zona p se desplazan para ocupar los huecos de ésta, formándose lo que se conoce como zona de empobrecimiento, en la que los huecos de la zona p se han llenado con los electrones libres de la zona n.

En la zona de empobrecimiento se crea un campo eléctrico dirigido de n a p, con el polo positivo en la zona n y el polo negativo en la zona p que origina una diferencia de potencial llamada potencial de contacto.

Esto hace que los electrones puedan moverse de la región p a la n pero no en sentido contrario (al contrario que ocurre con los huecos). Al formarse el campo eléctrico, mediante la unión p-n que forma la celda fotovoltaica, cuando la energía solar incida sobre ella los electrones libres se dirigirán de la zona p hacia la zona n y los huecos de la zona n hacia la zona p.

Aunque estas cargas opuestas se atraen mutuamente, la mayoría de ellas solamente se pueden recombinar pasando a través de un circuito fuera del material debido a la barrera de energía potencial interna.

Por lo tanto si se hace un circuito externo se puede producir una corriente eléctrica a partir de las celdas iluminadas, puesto que los electrones libres tienen que pasar a través del circuito para recombinarse con los agujeros positivos, como se aprecia en la Figura 13.

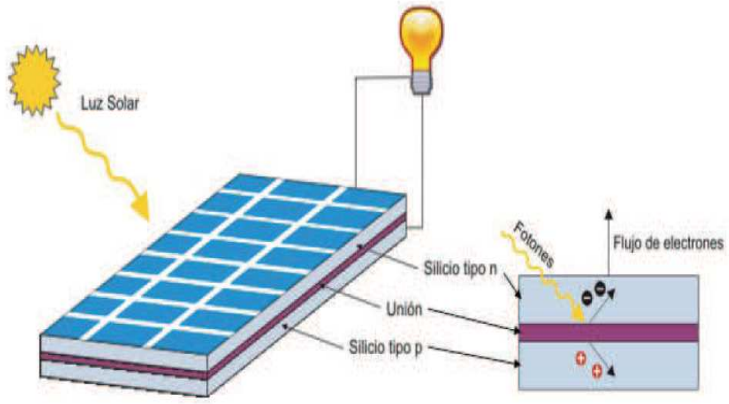


Figura 14. Efecto fotovoltaico en una célula solar.

(Santiago, "Energías Renovables: Conceptos y Aplicaciones", Junio 2003)

2.2.6 Circuito Equivalente de la Celda Solar.

La celda solar real puede ser representada por el siguiente circuito eléctrico equivalente:

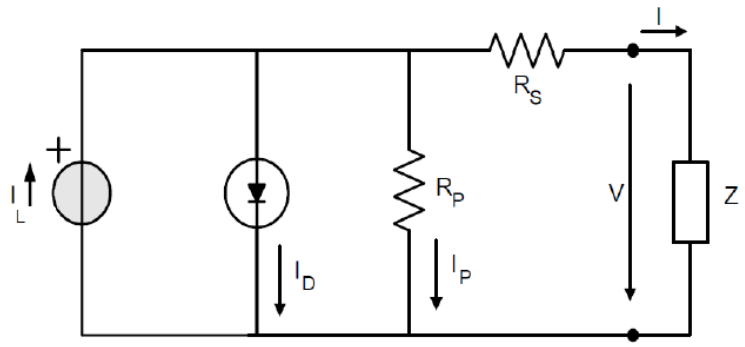


Figura 15. Circuito eléctrico equivalente de la celda solar.

(Santiago, Energías Renovables: Conceptos y Aplicaciones, Junio 2003)

La expresión exponencial simplificada propuesta por Gow y Manning, describe la relación entre la tensión (*V*) y la corriente (*I*) proporcionada por un módulo:

$$I = n_p * [I_L - I_s \times \left[e^{\frac{q \times \left(\frac{V}{n_S} + \frac{I \times R_S}{n_p} \right)}{A \times K \times T}} - 1 \right] - \frac{\frac{V}{n_S} + \frac{I \times R_S}{n_p}}{R_p} \quad (2.20)$$

Donde np y ns indican el número de celdas solares conectadas en paralelo y en serie; Rp y Rs las resistencias intrínsecas paralelo y serie asociadas a la celda, K es la constante de Boltzman (1,3806x10-23 J/K) y q es la carga del electrón (1,6022x10-19 C).

El factor A determina la desviación de las características de una unión p-n ideal e Is es la corriente inversa de saturación, que presenta una dependencia con la temperatura del panel. I_L representa la corriente (foto corriente) generada por la radiación solar. Dicha corriente exhibe una relación sensiblemente lineal respecto de la radiación y la temperatura. I_S es la corriente de saturación con voltaje externo.

La ecuación (considerando la dependencia de sus parámetros con la temperatura y la radiación), proporciona las denominadas curvas I-V teóricas de

un panel fotovoltaico, y el producto de ambas magnitudes la potencia suministrada.

Una forma más simplificada de representar la expresión anterior para una celda solar es la siguiente (Castro, 2004):

$$I = I_L - I_D - \frac{(v - I \times Rs)}{R_P} \tag{2.21}$$

2.2.7 Curva Corriente-Voltaje de la Celda Solar

El funcionamiento de una celda solar se puede representar por una curva de corriente-voltaje (curva IV), como la mostrada en la figura 15.

Cuando la celda no está conectada se tiene un voltaje en circuito abierto Voc, y cuando la celda está en cortocircuito la corriente es Isc. Para un incremento en el voltaje desde 0 hasta Voc la corriente es casi constante hasta un voltaje máximo Vmax y de allí desciende rápidamente.

Como $P = V \times I$, también se puede graficar la curva potencia-voltaje (curva PV), donde se muestra la potencia que entrega el panel en cada estado de carga. El punto Pmax se conoce también como punto de máxima potencia (Maximum Power Point o sus siglas MPP).

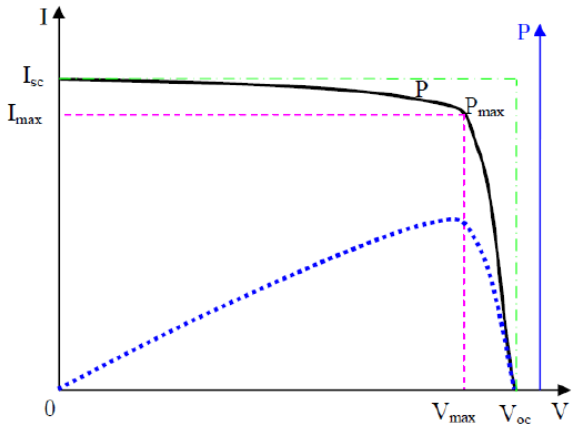


Figura 16. Curvas Corriente-Voltaje y Potencia-Voltaje de la celda solar.

(Santiago, "Energías Renovables: Conceptos y Aplicaciones", Junio 2003)

2.2.7.1 Corriente de Cortocircuito (Icc o Isc)

Es la intensidad máxima de corriente que se puede obtener de un panel bajo unas determinadas condiciones (generalmente normalizadas). Correspondería a la medida, mediante un amperímetro (de resistencia prácticamente despreciable), de la corriente entre bornes del panel, sin ninguna otra resistencia adicional; esto es, provocando un cortocircuito. Al no existir resistencia alguna al paso de la corriente, la caída de potencial es cero.

2.2.7.2 Voltaje de Circuito Abierto (Vca o Voc)

Es el voltaje máximo que se podría medir con un voltímetro sin permitir que pase corriente alguna entre los bornes de un panel; es decir, en condiciones de circuito abierto (resistencia entre bornes infinita). Al no haber corriente circulante la potencia entregada es cero.

2.2.7.3 Potencia Máxima (Pmax)

Bajo condiciones determinadas, la intensidad (I) tendrá un cierto valor comprendido entre 0 e Icc, correspondiéndole un voltaje V que tomará un valor entre 0 y Vca. Dado que la potencia es el producto del voltaje y la intensidad, ésta será máxima únicamente para un cierto par de valores (I, V). Se dice que un panel trabaja en condiciones de potencia máxima, cuando la resistencia del circuito externo es tal que determina unos valores de I y V, tales que su producto sea máximo.

2.2.8 Eficiencia de la Celda Solar

Es el cociente entre la potencia producida por el panel y la potencia de la radiación incidente sobre el mismo. La eficiencia se puede determinar para una celda o para el módulo fotovoltaico con las ecuaciones siguientes:

$$\eta_c = \frac{P_M}{G \times A_C \times N_C} \tag{2.22}$$

$$\eta_M = \frac{P_M}{G \times A_M} \tag{2.23}$$

Donde:

$\boldsymbol{\eta_c}$= Eficiencia de una celda de un panel fotovoltaico.

$\boldsymbol{P_M}$ = Potencia nominal del panel fotovoltaico en Vatios pico [Wp].

G = Radiación solar en W/ m2.

$\boldsymbol{A_C}$ = Área de la celda en m2.

$\boldsymbol{N_C}$ = Número de celdas en el panel.

$\boldsymbol{\eta_M}$ = Eficiencia del panel fotovoltaico.

$\boldsymbol{A_M}$ = Área total del módulo en m2.

La eficiencia es el parámetro más empleado para comparar el desempeño entre las celdas y paneles solares. La eficiencia se mide bajo condiciones de 25ºC de temperatura y masa de aire (AM) igual a 1,5. Para aplicaciones espaciales se miden bajo condiciones de masa de aire igual a 0.

2.2.9 Factor de Llenado (Fill Factor)

Es la relación entre el área del rectángulo $Voc \times Isc$ y el área del rectángulo $Vmax \times Imax$, determina la calidad de una celda solar. También se lo llama factor de cuadratura.

$$FF = \frac{Imax \times Vmax}{Isc \times Voc} \tag{2.24}$$

2.2.10 Características de Polarización Inversa.

Ante determinadas condiciones una celda solar puede trabajar en la zona de polarización inversa. Una celda solar puede generar alrededor de 1 voltio cuando está polarizada directamente, pero el voltaje de polarización inversa puede ir tan alto como 20 voltios o más y puede disipar mucha más potencia de lo que produce, generando pérdidas significativas, por lo cual es necesario colocar protecciones adecuadas para este tipo de eventos.

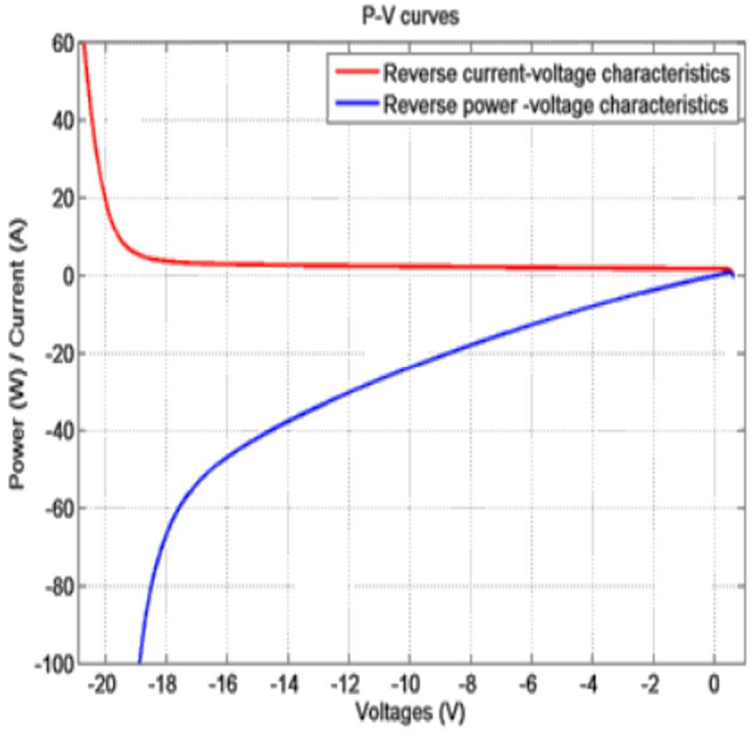


Figura 17. Característica inversa de una celda solar.

(Prasad Koirala, Binod, Henze, Norbert)

2.3 INSTALACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA

Las instalaciones fotovoltaicas se dividen en tres grandes categorías:

- Instalaciones particulares autónomas.

- Instalaciones particulares conectadas a la red eléctrica

- Centrales solares fotovoltaicas.

En la primera la instalación está totalmente aislada de la red y generalmente de poca potencia; consta de:

- Campo de colectores

- Baterías

- Regulador del estado de carga y descarga de las baterías.

- Circuito de consumo de corriente continua.

- Inversor

- Circuito de corriente alterna.

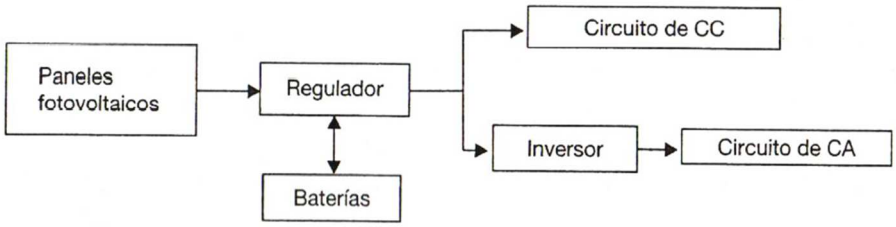


Figura 18. Esquema de instalación particular autónoma

Dentro del segundo grupo las instalaciones son de alguna entidad pensadas para atender la demanda propia y vender los excedentes a la red eléctrica. Con la característica de no tener consumo de corriente continua o tenerlo muy pequeño.

Consta de:

- Inversor

- Equipo de conexión a la red eléctrica.

- La red funciona como un acumulador de grandes dimensiones.

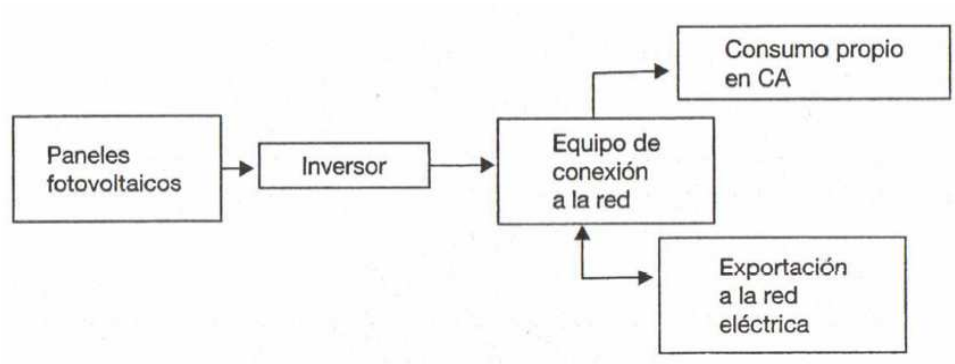


Figura 19. Esquema un sistema interconectado con la red

(Luís, Pág. 168)

2.3.1 Conexión de Celdas Solares.

Un panel fotovoltaico está formado por la conexión de varias celdas solares en serie o paralelo. Cada una de estas celdas solares tiene un voltaje promedio de 0,5V, y generalmente se las conecta en serie hasta alcanzar valores estandarizados (6V, 12V, 24V, 36V o 48V).

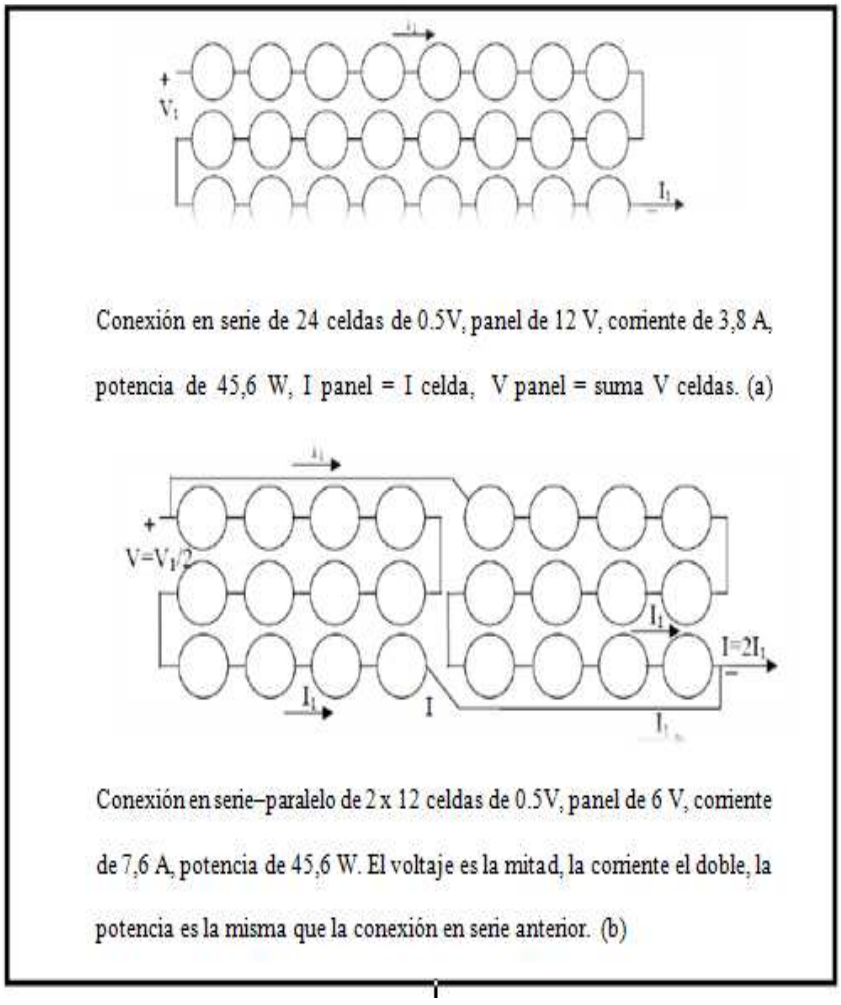


Figura 20. Conexión de celdas solares en un panel fotovoltaico.

(Santiago, "Energías Renovables: Conceptos y Aplicaciones", Junio 2003)

Una conexión en serie de celdas o paneles solares permite incrementar el voltaje, considerando que cada uno debe producir la misma cantidad de corriente.

Una conexión en paralelo de celdas o paneles solares permite obtener corrientes mayores, siempre tomando en cuenta que cada uno de ellos debe producir el mismo voltaje.

La curva característica I-V de un grupo de celdas solares idéntica e muestra a continuación:

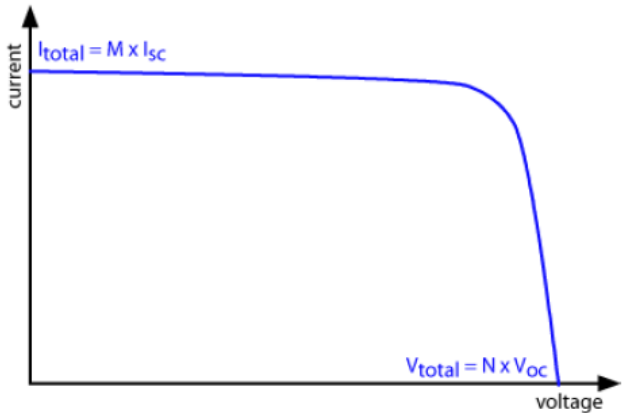


Figura 21. Curva I-V para N celdas conectadas en serie y M celdas conectadas en paralelo.

(http://www.pveducation.org/pvcdrom/modules/module-circuit-design)

Si una celda se daña, o si no incide luz por efecto de una sombra, o si está cubierta, las demás celdas están activas se produce un voltaje negativo en los terminales de la celda afectada, lo que se conoce como corriente de fuga o avalancha que puede destruir la celda. Para evitar esto se utiliza diodos puente (diodo bypass) para juegos de algunas celdas y para permitir un paso alternativo de la corriente.

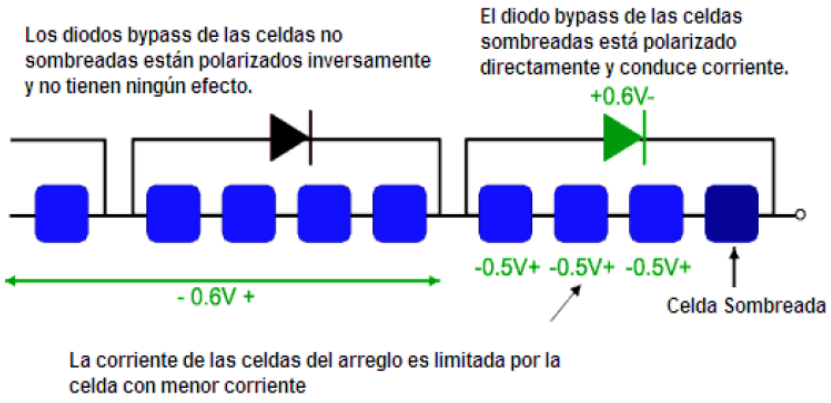


Figura 22. Diodos bypass colocados en arreglos de celdas solares dentro de un módulo fotovoltaico y su funcionamiento.

(http://www.pveducation.org/pvcdrom/modules/bypass-diodes)

2.3.2 Pérdidas en el Punto de Máxima Potencia por Desacoplamiento

Las pérdidas por desacoplamiento son causadas por la conexión de celdas solares o módulos que no tienen propiedades idénticas o que experimentan diferentes condiciones la una de la otra. Este tipo de pérdidas son un serio problema, ya que bajo las peores condiciones de funcionamiento, la salida de todo el módulo fotovoltaico se determina por la celda con la salida más baja. Las principales razones son desacoplamientos, estrés medioambiental y problemas de sombras.

2.3.3 Pérdidas Estáticas por Desacoplamiento.

Este tipo de desacoplamiento se debe a la tolerancia de los fabricantes y al efecto de la edad del módulo, sin embargo no representan una pérdida significativa, ya que pueden ser reducidas drásticamente por medio de un apropiado conexionado serie-paralelo y una preselección de los módulos.

2.3.4 Pérdidas Dinámicas por Desacoplamiento

Las pérdidas dinámicas por desacoplamiento ocurren cuando los módulos operan lejos de su punto de máxima potencia (MPP). Los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo o en serie no pueden operar en su punto de máxima potencia individual, porque la tensión (en caso de conexión en paralelo) y a la corriente (en el caso de conexión en serie) se los fuerza a ser iguales en todos los módulos de la secuencia.

Los arreglos fotovoltaicos solares son susceptibles de tener grandes cantidades de pérdidas de energía, debido a sombreados parciales. Los sombreados parciales se producen por barreras de luz como árboles, chimeneas, techos, líneas de poder, escombros, polvo y desechos de aves. Además los desacoplamientos también pueden ocurrir si los módulos fotovoltaicos son instalados en diferentes orientaciones o inclinación.

Cuando parte del panel esta sombreado, las celdas sombreadas producirán menos corriente que las celdas no sombreadas. Como todas las celdas están en serie, la misma cantidad de corriente debe circular por cada celda. Las celdas no sombreadas forzarán a las celdas sombreadas que pasen más corriente que su nueva corriente de corto circuito. La celda sombreada opera en la zona de polarización inversa para acoplarse a esta condición y causa una pérdida de potencia en el sistema. El producto de la corriente y el voltaje negativo da la potencia disipada por las celdas sombreadas. Esta potencia se disipa como calor y por esta razón, causa “puntos calientes”.

2.3.4.1 Sin Diodo Bypass

La curva I-V de los módulos fotovoltaicos se afecta en gran medida cuando las celdas solares son irradiadas a diferentes niveles y la energía entregada por el

módulo disminuye drásticamente sin la utilización de diodos bypass. En la figura 22, se muestra el efecto de tener una celda sombreada a distintos niveles en módulos sin diodos bypass. Se observa como la celda solar sombreada disminuye significativamente el camino de corriente en el módulo.

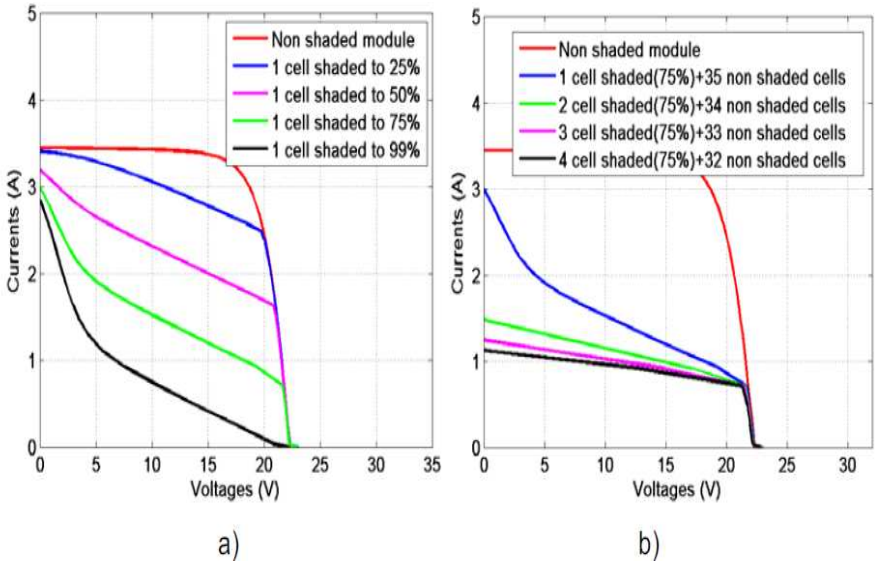


Figura 23. Efecto en las curvas I-V sin usar diodo bypass: de una celda con distintos niveles de sombreado; b) de diferente número de celdas con sombreado constante.

(Prasad Koirala, Binod, Sahan, Benjamin; Henze, Norbert)

El sombreado parcial es muy peligroso para los módulos solares, como se ve una sola celda sombreada en el módulo utilizado, puede reducir la mayoría de la potencia de salida drásticamente. Las celdas sombreadas actúan como carga, disipando potencia sobre sí misma, lo que podrían conducir a condiciones de puntos calientes y finalmente dañar las demás celdas.

La pérdida de potencia por un sombreado parcial no es proporcional al área sombreada en el módulo como se suponía en el pasado. Como se ve en figura 22,

con el incremento en el número de celdas sombreadas, el efecto en la característica I-V es casi constante.

2.3.4.2 Con Diodo Bypass

Para prevenir que las celdas sombreadas disminuyan el camino de la corriente en la serie y degrade el desempeño de otras celdas, los diodos bypass se colocan en anti paralelo (polarización inversa) a un pequeño grupo de celdas conectadas en serie (normalmente 18 o 24 celdas). El diodo bypass afecta a la celda solar solamente en polarización inversa como se muestra en la figura 2.25, el diodo limita el voltaje inverso de la celda sombreada

a -0.7 voltios aproximadamente.

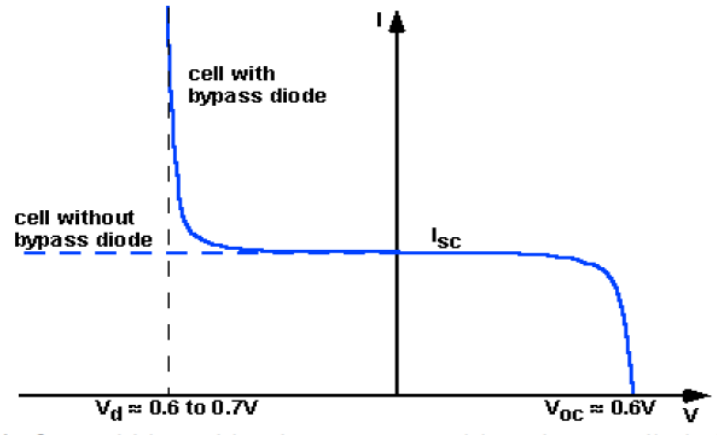


Figura 24. Curva I-V combinada para una celda solar con diodo bypass.

(http://www.pveducation.org/pvcdrom/modules/bypass-diodes)

Los diodos bypass permiten a la corriente pasar por las celdas sombreadas y así reducir las pérdidas de potencia en el módulo. Cuando el módulo recibe alguna sombra, el diodo bypass se polariza directamente y empieza a conducir corriente.

Toda corriente mayor que la nueva corriente de corto circuito de las celdas sombreadas es desviada por el diodo, así se reduce drásticamente la cantidad de calentamiento en el área sombreada. Para aplicaciones muy sofisticadas (ejemplo: aplicaciones espaciales), el diodo bypass se usan en cada celda. Sin embargo en la práctica esto se evita debido al alto costo.

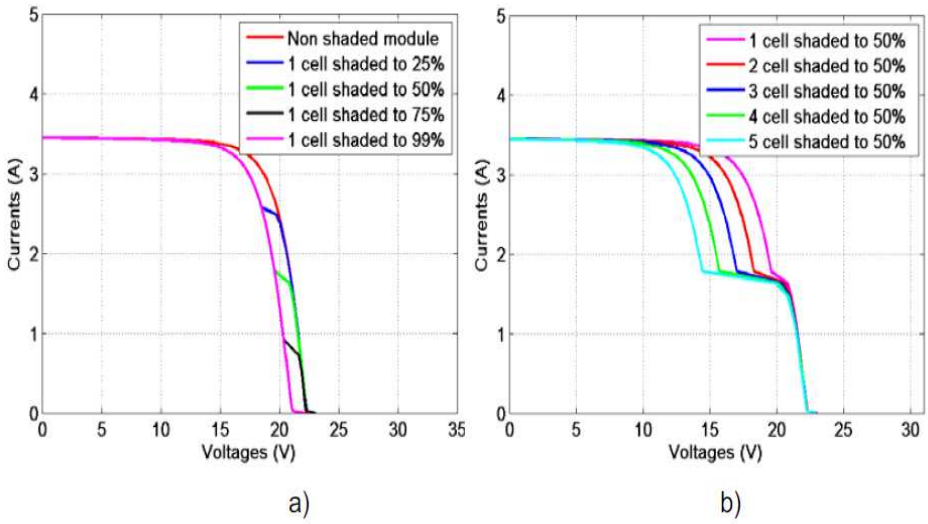


Figura 25. Efecto en las curvas I-V con diodo bypass: a) de una celda con distintos niveles de sombreado; b) de diferente número de celdas con sombreado constante.

(Prasad Koirala, Binod, Sahan, Benjamin; Henze, Norbert)

2.3.4.3 Sombreado Homogéneo

Cuando todos los módulos en el arreglo no reciben la misma cantidad de radiación, el efecto puede ser definido como sombreado homogéneo. Este fenómeno puede ocurrir cuando diferentes módulos conectados en serie tienen distinto ángulo de inclinación por ejemplo aplicaciones fotovoltaicas integradas en edificios. En

estas condiciones los diodos bypass podrían conducir, pues los módulos en la fila tienen distinta corriente. Además, la potencia y eficiencia del arreglo será reducida.

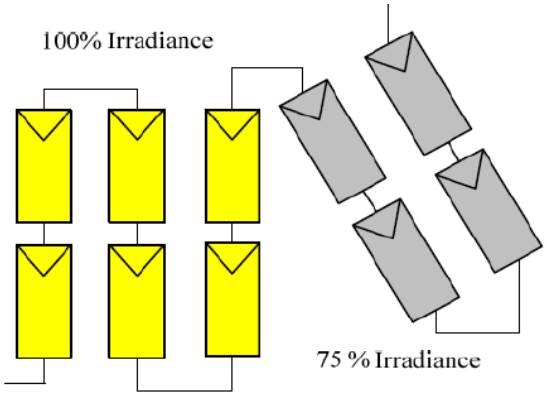


Figura 26. Sombreado homogéneo (diferente ángulo de inclinación).

(Prasad Koirala, Binod, Sahan, Benjamin; Henze, Norbert)

Los efectos del sombreado homogéneo se muestran en la figura 26, el punto de máxima potencia de la fila sombreada es más bajo, debido a esto existe una pérdida en la curva resultante.

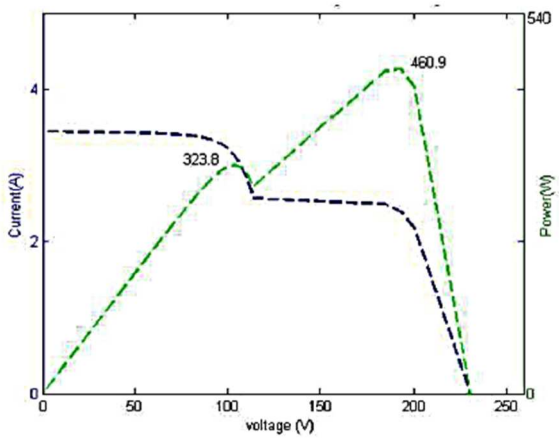


Figura 27. Efecto del sombreado homogéneo en la característica de un arreglo fotovoltaico.

(Prasad Koirala, Binod, Sahan, Benjamin; Henze, Norbert)

2.3.4.4 Sombreado Parcial.

Los diodos bypass pueden reducir el desempeño del sistema, degradándose cuando el sombreado parcial ocurre. En este caso el uso de diodos incrementa la producción de potencia de los arreglos fotovoltaicos pero introduce múltiples máximos locales en su característica potencia versus voltaje como se ve en la figura 27, lo que puede confundir el algoritmo de búsqueda de punto de máxima potencia (MPPT en inglés Maximum Power Point Tracking), lo cual podría llevar a bajos desempeños.

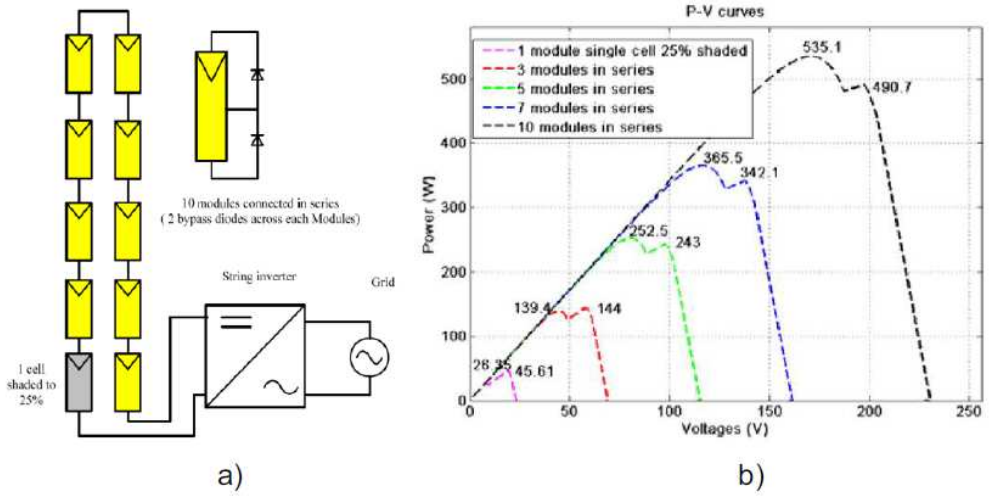


Figura 28. a) Conexión en serie de 10 módulos; b) Efecto del sombreado parcial.

(Prasad Koirala, Binod, Sahan, Benjamin; Henze, Norbert)

2.3.4.5 Optimizadores de Potencia

En los sistemas optimizadores de potencia (también conocidos como sistemas distribuidos para seguimiento del punto de máxima potencia), el circuito electrónico de potencia se coloca para cada módulo de manera que entrada y salida de voltaje para cada módulo sea independiente y el voltaje de punto de máxima potencia pueda ser seteado individualmente para cada módulo.

Consisten en conversores DC-DC y así la unidad de seguimiento de punto de máxima potencia se asegura que la corriente de salida del módulo es igual a la del arreglo y todo el sistema es operado en el punto de máxima potencia. La figura 28 muestra el arreglo en cascada de varios seguidores de punto de máxima potencia, los cuales a su vez están conectados a la red mediante un inversor convencional. Los seguidores de máxima potencia pueden también trabajar en paralelo en un bus DC común.

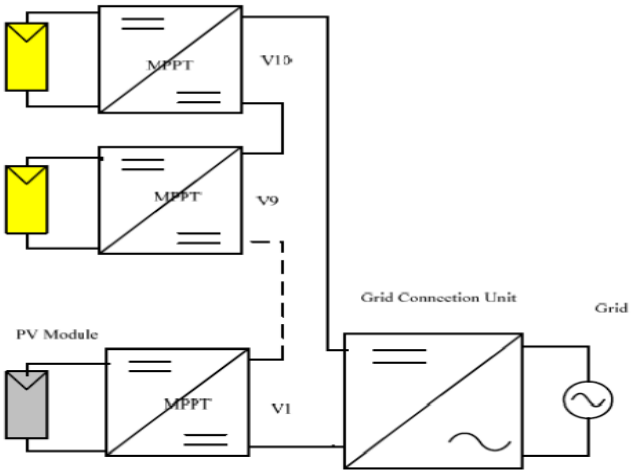


Figura 29. Unidades distribuidas para seguimiento del punto de máxima potencia.

(Prasad Koirala, Binod, Sahan, Benjamin; Henze, Norbert)

2.4 CARACTERIZACIÓN DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

La caracterización de módulos fotovoltaicos es importante tanto para la investigación, como para el diseño y control de calidad de una instalación.

El funcionamiento básico de un caracterizador de celdas solares consiste en hacer que el módulo fotovoltaico, pase por todos los estados posibles de carga y en un tiempo relativamente corto (en caso de no poseer condiciones de radiación y

temperatura controladas) para evitar cambios significativos en las condiciones externas a las que se encuentra sometido al momento de la caracterización.

A fin de obtener una curva V-I bien definida, se deben medir el voltaje y la corriente del módulo fotovoltaico, empezando desde el estado de mínimo voltaje y máxima corriente (corto circuito), pasando por varios estados de carga hasta alcanzar el estado de máximo voltaje y mínima corriente (circuito abierto).

2.4.1 Métodos para Caracterizar Módulos Fotovoltaicos

Para conseguir este fin se puede emplear varios métodos, entre los cuales se tiene:

- Método de carga capacitiva
- Método de carga resistiva
- Método de carga electrónica

2.4.1.1 Método de Carga Capacitiva

Debido a que el comportamiento del módulo fotovoltaico es similar a una fuente de corriente continua, se puede conectar una carga capacitiva en paralelo al módulo, ya que en el proceso de carga le permite pasar por todos los estados, comenzando por la corriente de corto circuito, pasando por el punto de máxima potencia, hasta llegar al circuito abierto donde la corriente es cero.

Según la capacitancia usada se puede variar el tiempo de medida, de forma que las condiciones meteorológicas que rodean el módulo fotovoltaico no cambien sus valores (temperatura y radiación).

Ya en el proceso de carga es necesario tomar medidas de voltaje y corriente para poder determinar la curva característica del módulo fotovoltaico.

La forma básica de prueba para este método se muestra en la figura 29:

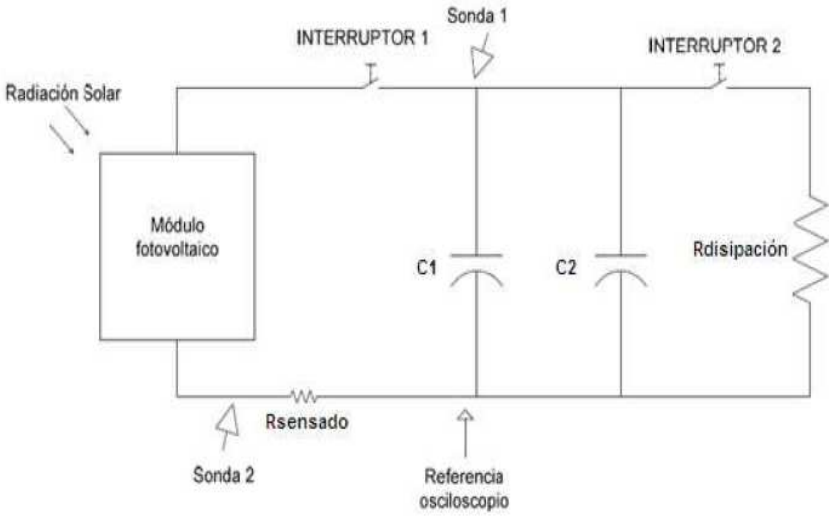


Figura 30. Forma de conexión para el método de carga capacitiva.

(Ferichola)

En este método se puede calcular la capacitancia a utilizar mediante la fórmula:

$$\boldsymbol{C = \frac{Ic \times t}{V}} \qquad (2.25)$$

En donde:

V = Tensión del módulo fotovoltaico en circuito abierto.

Ic = Corriente de carga.

t = Tiempo de carga del condensador.

C = Capacitancia.

Una vez finalizado el ensayo, para descargar los condensadores y evitar posibles cortocircuitos o chispas peligrosas, se procede a la descarga de los mismos a través de una resistencia de potencia. Cuando el proceso de descarga termina se puede proceder a utilizar el módulo de nuevo.

2.4.1.2 Método de Carga Resistiva

El método de carga resistiva es bastante sencillo y se muestra en la figura 2.32, consiste en conectar en paralelo con el módulo fotovoltaico, un potenciómetro de potencia y de un valor alto de resistencia, y proceder a variar dicho potenciómetro desde el máximo valor de resistencia donde aparece el voltaje de circuito abierto, hasta que la resistencia sea 0 donde aparece la corriente de corto circuito.

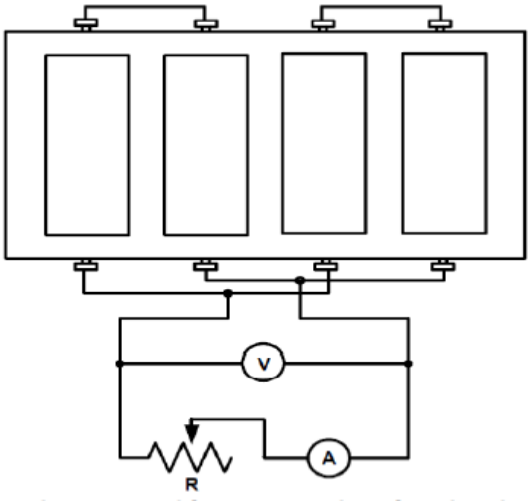


Figura 31. Forma de conexión para el método de carga resistiva.

(Mota, Vilarinho, Cláudio , Margato, & Rodriguez)

De la misma manera es necesario tomar las medidas de tensión y corriente durante la variación del potenciómetro, para formar la curva característica del módulo fotovoltaico.

2.4.1.3 Método de Carga Electrónica

Este método consiste en la utilización de un conversor DC/DC como emulador de una resistencia variable.

Los convertidores DC/DC tienen muchas aplicaciones, donde se requiere obtener una tensión media de salida que puede ser mayor o menor que la aplicada a

su entrada, gobernando los tiempos en que el interruptor principal del convertidor conduce o no conduce (técnica PWM), generalmente a frecuencia constante. A la relación entre el intervalo de tiempo en el que el interruptor está cerrado (Ton) y el periodo de conmutación (T), se le denomina ciclo de trabajo (D). Tanto en el modo de funcionamiento con conducción continua (CCM, Continuous Conduction Mode), como en el modo de conducción discontinuo (DCM, Discontinuous Conduction Mode), las tres topologías básicas pueden ser asemejadas a un transformador de corriente continua, donde la relación de transformación puede ser controlada electrónicamente variando el ciclo de trabajo del convertidor.

La figura 31 muestra el diagrama de un panel solar conectado a un convertidor DC/DC, donde la resistencia reflejada a la entrada del convertidor viene representada por Ri (R es la resistencia de carga).

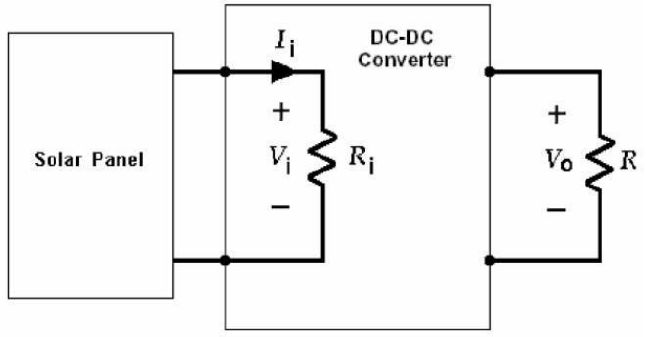


Figura 32. Conexión Panel Solar – Conversor DC/DC.

(Andújar Márquez, Enrique Gómez, Durán Aranda, & Martínez Bohórquez, 2004)

Suponiendo convertidores sin pérdidas, la relación entre la resistencia de entrada y la carga conectada a los convertidores se muestra en la Tabla 4, tanto para conducción continua como para conducción discontinua.

Tabla 4. Valores de R_i para las configuraciones principales de conversores DC/DC.

CONVERSOR	K crítico	R_i (CCM)	R_i (DCM)
Reductor	$1 - D$	$\frac{R}{D^2}$	$\frac{R}{4} \times (1 + \sqrt{1 + \frac{4 \times K}{D^2}})^2$
Elevador	$D \times (1 - D)^2$	$R \times (1 - D)^2$	$\frac{4 \times R}{(1 + \sqrt{1 + \frac{4 \times D^2}{K}})^2}$
Reductor-Elevador	$(1 - D)^2$	$\frac{R \times (1 - D)^2}{D^2}$	$\frac{K \times R}{D^2}$
Con $\boldsymbol{K} = \frac{\boldsymbol{2 \times L}}{\boldsymbol{R \times T}}$ el modo de conducción discontinuo ocurre para $\boldsymbol{K} < Kcrítico$			

(Andújar Márquez, Enrique Gómez, Durán Aranda, & Martínez Bohórquez, 2004)

A continuación se muestran los tres convertidores básicos que proporcionan las diferentes relaciones de conversión dadas en la Tabla 4, junto con una representación gráfica de la resistencia de entrada reflejada en función del ciclo de trabajo δ para conducción continua.

2.4.1.3.1 Resistencia de Entrada en un Conversor DC/DC Reductor

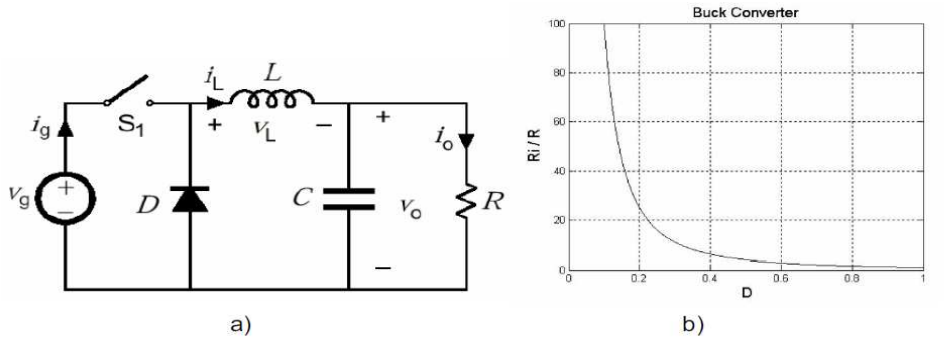


Figura 33. a) Conversor Reductor, b) Resistencia de entrada vs. δ en conducción continua.

(Andújar Márquez, Enrique Gómez, Durán Aranda, & Martínez Bohórquez, 2004)

Un conversor reductor presenta una incapacidad para reflejar a su entrada impedancias menores que la de carga, y que por tanto no se alcanzan valores próximos a la corriente de cortocircuito del panel.

2.4.1.3.2 Resistencia de Entrada en un conversor DC/DC Elevador

Un conversor elevador es incapaz de reflejar a su entrada impedancias mayores que la de carga, y que por tanto no se alcanzan valores próximos a la tensión de circuito abierto del panel.

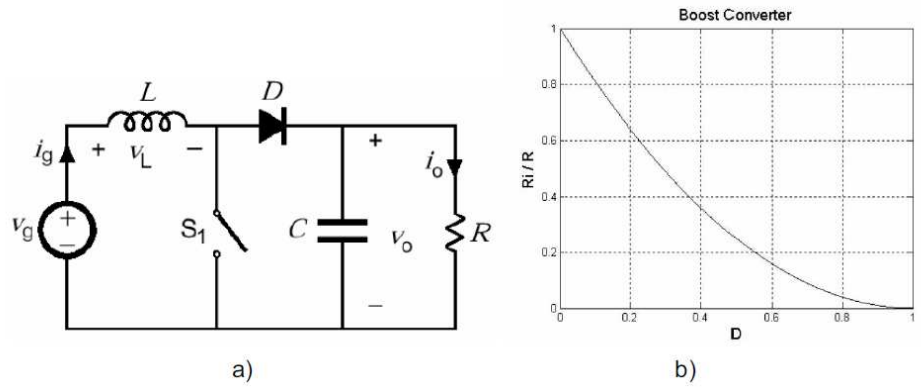


Figura 34. a) Conversor Elevador, b) Resistencia de entrada vs δ en conducción continúa.

(Andújar Márquez, Enrique Gómez, Durán Aranda, & Martínez Bohórquez, 2004)

2.4.1.3.3 Resistencia de Entrada en un conversor DC/DC Reductor - Elevador

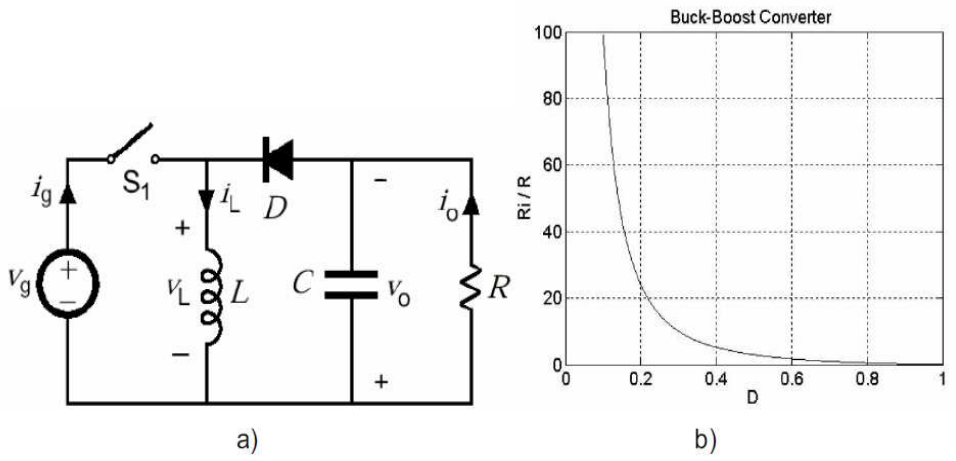


Figura 35. a) Conversor Reductor-Elevador, b) Resistencia de entrada vs. δ en conducción continua.

(Andújar Márquez, Enrique Gómez, Durán Aranda, & Martínez Bohórquez, 2004)

Las topologías reductora-elevadoras Zeta, Cuk y Sepic proporcionan la misma resistencia de entrada mostrada en la Tabla 2.4, lo cual implica que estas estructuras son capaces de caracterizar toda la curva I-V de un módulo en conducción continua, desde la tensión a circuito abierto hasta la corriente de cortocircuito.

2.5 COMPONENTES DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO.

Los sistemas fotovoltaicos constan de elementos variados y de acuerdo al tipo de requerimiento adquirirán los costos individualmente. Este tipo de energía está siendo destinada a lugares aislados y de difícil acceso e instalados luego de un análisis de costo; además de sus características como el hecho de no tener partes móviles haciéndolo práctico para corto mantenimiento, así del hecho de tener una larga vida de funcionamiento aproximada a unos 20 años para análisis.

- Células Fotovoltaicas (cada una entrega entre 2 – 5 W); la unión de células se conocen como módulos y estos entregan entre 100 a 250 W. Y la unión de varios módulos es conocida como arreglo.
- Panel Solar Fotovoltaico.
- Estructura soporte y de acuerdo al tipo de instalación constara con cimentación.
- Reguladores.
- Baterías
- Inversores
- Instrumentos de medida y control
- Cables
- Puesta a tierra
- Cerca de seguridad en lugares que lo requieran.

Los elementos de los sistemas fotovoltaicos presentan variadas características que se describen a continuación:

2.5.1. Células fotovoltaicas

El efecto fotovoltaico se presenta en los líquidos, gases y sólidos, obteniendo la mayor eficiencia en los sólidos. La mayoría de células fotovoltaicas se construyen de silicio existiendo tres tipos y con diferentes eficiencias:

- Monocristalino: 17% de eficiencia con una garantía de servicio de 25 años.

- Policristalino: 15% de eficiencia con una garantía de servicio de 20 años.

- Amorfo: 5 - 10% de eficiencia con una garantía de servicio de 10 años.

Además se trabaja con la mezcla de distintos tipos de material como:

- CdTe (Cadmio Teluro) – 7% con temperatura de trabajo de 46ºC

- ClS (Cloro Azufre) – 7,5% con temperatura de trabajo de 47ºC

2.5.2. Panel solar fotovoltaico

Los paneles solares existentes están formados de pequeñas células solares elementales que se agrupan para formar paneles de superficie comprendida entre los 800 cm^2, siendo generalmente formadas por células de unión p-n de silicio; para reducir las pérdidas por flexión se recubre la cara superior con una película anti-reflectante y se adosa una parrilla metálica en la cara superior y una película metálica en la cara inferior, para recoger la electricidad generada y establecer el contacto con el circuito exterior.

2.5.3. Baterías

Estas son indispensables para almacenar la energía durante el día y utilizarla en la noche. Algunas características son las siguientes:

- La energía del módulo varía en función de la intensidad de la radiación.
- Además éstas sirven para absorber las variaciones de potencia.
- Sirven para amortiguar la fuerza de generación eléctrica y acumular energía para horas de baja o ninguna radiación.
- Cuando se utiliza sistemas de baterías el dimensionamiento dependerá del tamaño del arreglo, costo, temperatura, operación, tasa de descarga y variaciones estacionales diarias.
- Con baterías de Ni Cd se debe considerar su costo y una temperatura de operación de 40ºC.
- El exceso de carga libera hidrógeno y se debe tener cuidado con esto.
- El costo aproximado es de $250 KW – h.

En cuanto al estado de la batería se tiene que:

- ***Totalmente cargada*** densidad de 1,25 – y un voltaje de 2,1 V.

- ***Totalmente descargada*** densidad de 1,125 – y un voltaje de 1,95 V.

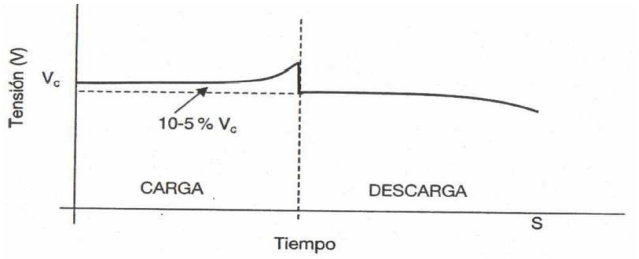


Figura 36. Evolución de la tensión en bornes de una batería a lo largo de un proceso de carga y descarga.

(Jutglar, pág. 171)

Se puede ver como al acercarse al 100% de la carga nominal, la tensión aumenta bruscamente y si no se interrumpe la corriente se produce una sobrecarga con electrolisis del electrolito.

Cuando la descarga desciende por debajo de un cierto nivel, que depende del tipo de batería, la tensión disminuye rápidamente, y si no se interrumpe la corriente, se conoce el fenómeno conocido como sulfatación y disminuye su capacidad de recarga.

2.5.4. Reguladores

- Estos sirven para controlar la sobrecarga.
- Son sistemas electrónicos que van a limitar la salida de la fuerza, evitar sobrecarga ya que se recalientan las baterías y mantener la relación de potencia lo más alta posible.

- Los más evolucionados incluyen un sistema de control que gobierna la carga de las baterías, procurando que el punto de trabajo del sistema, en función de la temperatura e intensidad de la radiación incidente, se sitúe cerca de la línea de potencia máxima de los paneles.

2.5.5. Instrumentos

El tipo y número de éstos dependerá de la finalidad del sistema, pudiendo tener medidores de voltaje, corriente, de energía, entre otros; todo lo posible en cuanto a la facilidad de mantenimiento y el costo de éstos.

2.5.6. Seguridad

Se debe tener en cuenta las siguientes condiciones de seguridad en la instalación de éste sistema de energía:

- Líneas a tierra o puesta a tierra.
- Fusibles
- Cubierta opaca para que no generen energía.
- Cerca
- Pararrayos
- Tener cuidado con ácido de baterías.

2.5.7. Inversor

- Sirve para transformar la corriente de continua que entrega el panel a alterna.
- Éste demanda un consumo de energía de 10 – 15% (100- 150 W adicionales para hacer la conversión)

2.5.8. Instalación, operación y mantenimiento

- La preinstalación se debe dar en el lugar en que contemos con facilidades totales.
- Se debe transportar lo más integrado posible.
- Es recomendable hacer una limpieza del terreno adecuándolo para que no haya problemas en la recepción de la radiación.
- Se debe dar los ambientes adecuados para el correcto funcionamiento de baterías, instrumentos, inversores y otros.
- Tener ductos y postes en las instalaciones que lo requieran.
- Estos sistemas no demandan una supervisión constante, y si se las hace en lugares alejados se recomienda visitas de mantenimiento inicial con periodos de 4 semanas.
- El mantenimiento se reduce a limpieza de conectores y cables, revisión de instrumentos y limpieza de baterías.

2.5.9. Aplicaciones

Uno de los factores principales que dificultan la instalación de sistemas fotovoltaicos es el elevado costo de la instalación. Pero según estudios de previsión de mercado, se espera un abaratamiento sustancial de las instalaciones, debido a una reducción en los costos de fabricación de los colectores fotovoltaicos.

Pudiendo así definir aplicaciones importantes como:

- Iluminación
- Bombeo - Riego
- Centros médicos
- Señalización
- Cerca eléctrica
- Protección catódica.

2.6 ALGORITMO MPPT

Una célula, módulo o array fotovoltaico (generador fotovoltaico en adelante) que funcione bajo condiciones uniformes de radiación y temperatura presenta una característica I-V y P-V como la mostrada en la figura 36. Como puede observarse existe un único punto denominado MPP (maximum power point), en el cual el generador fotovoltaico proporciona la potencia máxima posible para esas condiciones ambientales y, por tanto, funciona con el rendimiento máximo.

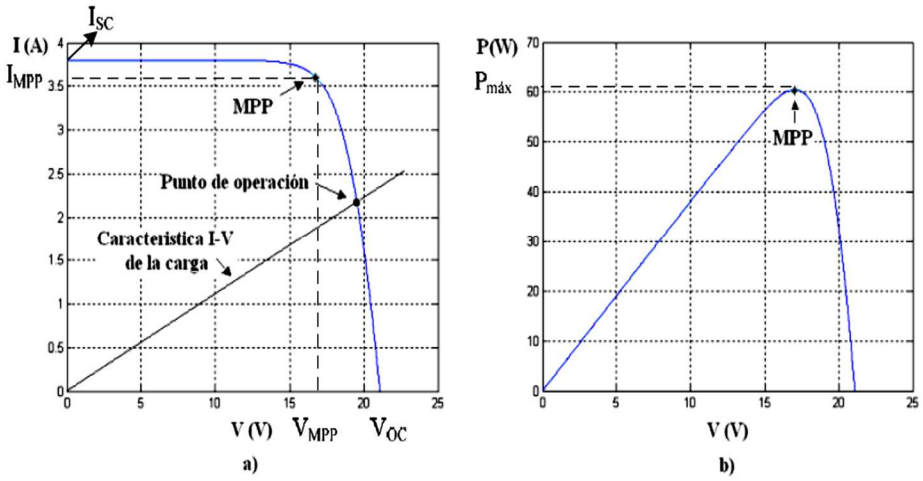


Figura 37. (a) Característica I-V de un panel comercial modelo BPSX60 para una temperatura y radiación dadas. (b) Característica P-V para las mismas condiciones.

(Abd El-Shafy A.N., 2003)

Cuando se conecta directamente una carga a un generador fotovoltaico (acoplamiento directo), el punto de operación viene definido por la intersección de sus características I-V, tal y como se muestra en la figura 2.38 (a). En general, este punto de operación no coincide con el MPPT. Así, en sistemas con acoplamiento

directo el array debe ser sobredimensionado para asegurar la demanda de potencia sobre la carga. Obviamente esto redunda en un encarecimiento del sistema.

Para solucionar este problema se inserta entre el generador fotovoltaico y la carga un convertidor CC/CC provisto de un algoritmo para el ajuste automático de su ciclo de trabajo δ, dando lugar a lo que se conoce como sistema MPPT (Maximun Power Point Tracker). Así, el MPPT controla la tensión o corriente (a través del δ del convertidor) del generador fotovoltaico con independencia de la carga, tratando de situarlo en el MPP.

No obstante lo anterior, la ubicación del MPP en la curva I-V no es conocida a priori. Este punto ha de ser localizado, bien sea a través de cálculos matemáticos sobre un modelo o utilizando algún algoritmo de búsqueda. Esto adquiere aún mayor complejidad si se tiene en cuenta el hecho de que el MPP presenta dependencias no lineales con la temperatura y radiación (ver figura 37). Esto es, está variando de forma prácticamente continua durante todo el periodo de funcionamiento del generador fotovoltaico.

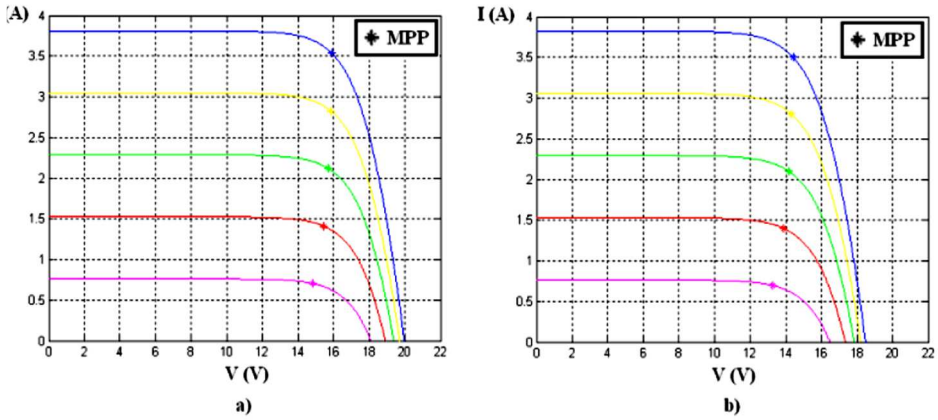


Figura 38. (a) Característica I-V de un generador fotovoltaico típico a 40ºC y diferentes niveles de radiación. (b) Característica I-V del mismo generador a 60ºC y diferentes niveles de radiación.

(Al-Atrash et al, 2005)

En la figura 2.39 (a) se muestra una familia de curvas I-V para distintos niveles de radiación a temperatura constante. En la figura 2.39 (b) se presenta la misma familia de curvas a una temperatura superior. Obsérvese el cambio en la tensión del MPP.

En la literatura se han propuesto y desarrollado diversos algoritmos MPPT. De entre ellos, el algoritmo Perturbación y Observación (P&O) es de lejos el más usado en sistemas MPPT comerciales. Sin embargo, no existe un consenso claro sobre cuál es el algoritmo más efectivo.

Esta falta de consenso se debe en parte a que la literatura especializada no contiene comparaciones de las eficiencias absolutas de dichos algoritmos funcionando todos con parámetros optimizados en el mismo hardware estándar.

2.6.1 Perturbación y Observación

El algoritmo P&O es el más utilizado en la práctica debido principalmente a su fácil implementación. A continuación se detallará su funcionamiento. Considérese la figura 2.32, en la cual se muestra una familia de curvas P-V de un generador fotovoltaico a diferentes niveles de radiación (G) y a temperatura constante. (Al-Atrash et al, 2005)

Supóngase que el generador fotovoltaico opera en el punto A, el cual está lejos del MPP. El sistema MPPT perturba la tensión de trabajo del generador un pequeño ΔV. A continuación es medido el cambio producido en la potencia ΔP. Si $\Delta P > 0$ el punto de operación se ha acercado al MPP, con lo cual la perturbación siguiente se producirá en la misma dirección que la anterior (mismo signo algebraico). Si por el contrario $\Delta P < 0$ el sistema se ha alejado del MPP y, consecuentemente, la perturbación siguiente se realizará en sentido contrario (signo

algebraico opuesto). En la figura 2.39 puede observarse el diagrama de flujo del algoritmo P&O.

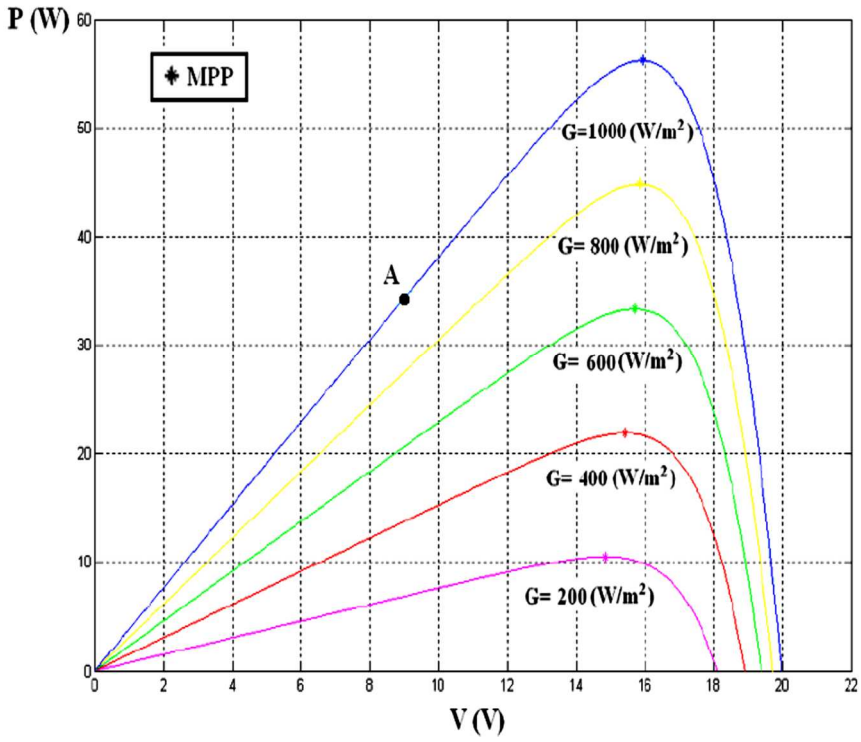


Figura 39. Característica P-V de un generador fotovoltaico para distintos niveles de radiación.

(Denizinger, 1995)

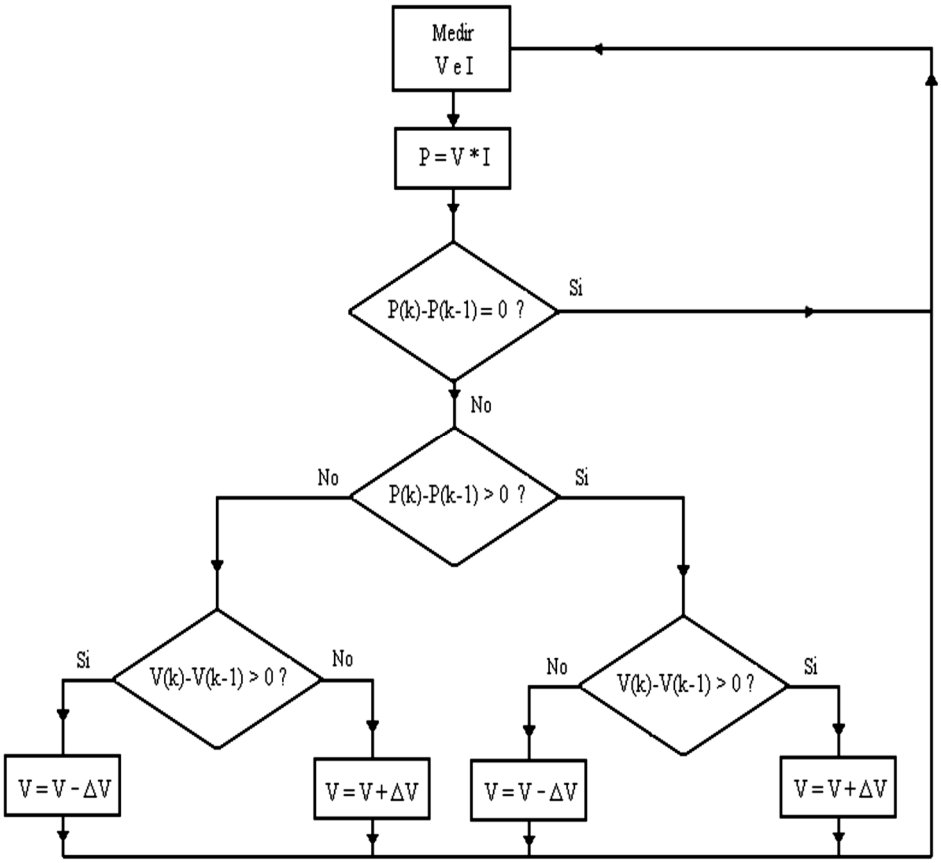


Figura 40. Diagrama de flujo del algoritmo Perturbación y Observación.

Como se ha mencionado con anterioridad, las ventajas de este algoritmo son su simplicidad y fácil implementación. Sin embargo, presenta algunas limitaciones que reducen su eficiencia de seguimiento. Cuando la cantidad de luz decrece considerablemente (G baja), la curva P-V se vuelve muy plana, tal y como se observa en la figura 31. Esto dificulta al MPPT la localización del MPP, ya que los cambios producidos en la potencia son pequeños con respecto a la perturbación en la tensión.

Otra desventaja del P&O es que no puede determinar cuándo ha alcanzado exactamente el MPP, de modo que permanece oscilando en torno a él, cambiando el signo de la perturbación para cada ΔP medido.

También se ha observado que este algoritmo puede exhibir un comportamiento errático bajo cambios rápidos en los niveles de radiación (Hussein et al, 1997).

En la figura 41 se muestra una ampliación perteneciente a una familia de curvas P-V en torno al MPP.

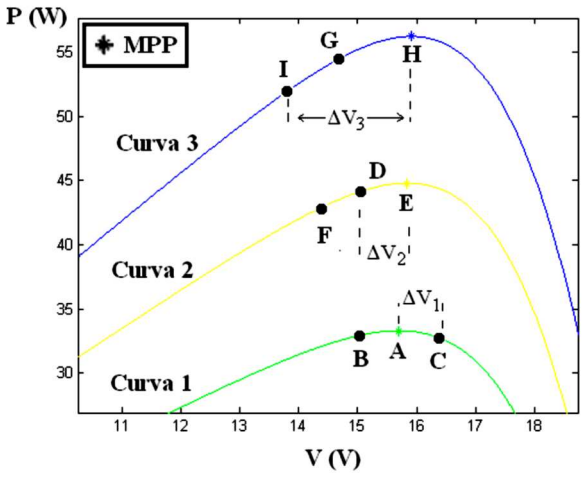


Figura 41. Ilustración del comportamiento errático del algoritmo P&O bajo cambios rápidos en la radiación.

(Hussein et al, 1997)

Considérese el caso en que la radiación es tal que genera la Curva 1 (figura 40). El MPPT está oscilando alrededor del MPP desde el punto B al A, al C y de nuevo al A para volver al B (en la práctica el punto A puede ser el MPP o uno muy próximo a él).

Asúmase que se produce un cambio repentino en la radiación, siendo la Curva 2 la nueva curva P-V del generador. Si durante este rápido incremento el MPPT estaba perturbando al sistema para llevarlo, procedente del C, desde el punto A al B en la Curva 1, el nuevo punto de llegada será el D en la Curva 2. Como se observa en la figura 40, se ha producido un ΔP positivo, por tanto el MPPT provocará otra

perturbación en la misma dirección, esto es, hacia el punto F. Si en este intervalo de operación la radiación solar continúa aumentando rápidamente, el punto de trabajo del generador fotovoltaico será desplazado hacia G en la Curva 3, en vez de a F en la 2. De nuevo el MPPT verá un aumento de la potencia y tenderá a llevar al generador a I, con lo cual se habrá alejado aún más del MPP situado ahora en H. Todo esto redunda en una disminución de la eficiencia de seguimiento de este algoritmo. Esta situación se da especialmente en días parcialmente nublados, donde el seguimiento del MPP se vuelve más difícil debido a los movimientos frecuentes del MPP.

Varias mejoras del algoritmo P&O han sido propuestas. (Elsin et al., Enrique et al. 2005, Femia et al., & Lopes, 2007)

Una de ellas consiste en la adición de un tiempo de espera si el sistema detecta una serie de signos alternos en la perturbación, indicando esto que se ha alcanzado el MPP. Así se reduce la oscilación sobre el MPP y se mejora la eficiencia del algoritmo bajo condiciones de radiación constante. Sin embargo esto vuelve al MPPT muy lento frente a cambios en las condiciones atmosféricas, haciendo más notable el comportamiento errático en días parcialmente nublados.

Otra modificación consiste en lo siguiente: dada una potencia del generador fotovoltaico P_1 medida a la tensión de operación V_1, se perturba al sistema y se mide la nueva potencia P_2 a la tensión V_2. De nuevo se retorna a V_1 y se mide la nueva potencia. De las dos medidas de potencia realizadas en V_1, el sistema es capaz de discernir si la radiación solar ha variado (e incluso estimar esta variación) y por tanto actuar en consecuencia. Estas modificaciones aumentan la complejidad del sistema MPPT, y en muchos casos ralentizan su funcionamiento.

CAPITULO III

3. DISEÑO MECÁNICO DEL EQUIPO PARA SEGUIMIENTO SOLAR AUTOMÁTICO

3.1 CONDICIONES INICIALES DE DISEÑO

El laboratorio de Energías Renovables cuenta con un sistema móvil solar fotovoltaico, el que presenta un funcionamiento netamente manual.

Previo a realizar el diseño mecánico de los componentes que intervienen para el desarrollo de este proyecto es necesario realizar una evaluación y determinar las condiciones iniciales en las cuales se encuentra el seguidor solar, para ello se ha procedido a fraccionar el sistema en las siguientes partes:

- Mesa de Soporte
- Estructura de sujeción de paneles
- Mecanismo de giro de los paneles solares.

A continuación se realiza la descripción detallada de cada una de las partes mencionadas anteriormente.

3.1.1 Mesa de Soporte

Como se puede apreciar en la Figura 42 la mesa de soporte cuenta con 2 estructuras laterales que permiten la guía de giro de los paneles.

Figura 42. Mesa de Soporte Condiciones Iniciales.

En la parte inferior de la mesa de soporte se encuentra una caja que se usa como cubierta para las baterías, tal como se muestra en la Figura 43.

Figura 43. Caja de baterías de Mesa de Soporte.

3.1.2 Estructura de sujeción de los Paneles Solares

La estructura de sujeción de los paneles solares está conformada por un marco de perfil en L de 5mm de espesor el cual permite el asentamiento de los paneles en dicha estructura, adicionalmente cuenta con refuerzos estructurales de tubo cuadrado de 3/4" de 3mm de espesor. Cuenta con un sistema de medición graduado el cual permite la visualización del ángulo de inclinación de los paneles, junto con unos tubos en arco de 1", tal como se aprecia en la figura 44 y 45 respectivamente

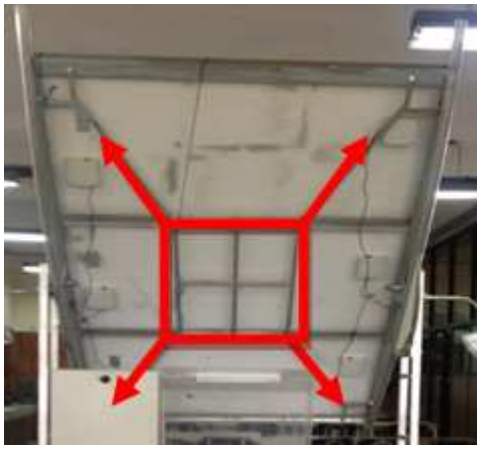


Figura 44. Estructura de Soporte de Paneles.

Figura 45. Sistema de Medición Graduado.

El sistema en conjunto cuenta con un solo grado de libertad que permite el giro de forma manual de los paneles con respecto al eje cenital.

3.1.3 Mecanismo de Giro de los Paneles Solares

El mecanismo que permite giro de los paneles solares está conformado por:

- Pasador.
- Agujeros soporte.
- Ranura graduada.
- Perno de ajuste.

En la Figura 46 se pueden observar los elementos de dicho mecanismo.

Figura 46. Mecanismo de Giro de los Paneles.

Para el posicionamiento y giro de la estructura con los paneles el mecanismo de graduación manual se consideran de 2 a 3 personas necesarias para realizar este movimiento ya que un individuo debe mover la estructura dentro del rango tomando en cuenta que todo la estructura de soporte junto con los paneles tiene un peso aproximado de 125 Kg, mientras que el otro individuo debe realizar los ajustes y aprietes necesarios en el mecanismo de graduación, que por recomendación de los autores no es posible moverlo menos de 15° para que el ajuste sea el correcto.

Hay que tomar en cuenta que este sistema no posee ningún elemento que evite el rozamiento de las placas metal con metal mientras se mueve la estructura, generado de esta forma un esfuerzo adicional que deben realizar las personas que mueven la estructura.

Una vez realizadas las pruebas de funcionamiento del seguidor solar se pudo determinar los problemas con los que cuenta dicho seguidor, ver Tabla 5.

Tabla 5 Descripción problemas seguidor solar.

Componente	Problema	Problema
Mesa soporte		La estructura actual no permite la incorporación de un segundo eje de giro.
		El cobertor del grupo de baterías presenta un desmontaje difícil.
Estructura de sujeción de paneles		El peso de toda la estructura es de aproximadamente 125 Kg.
		El indicador del nivel de inclinación de los paneles presenta un rango de error elevado ya que depende de la apreciación de los individuos que operen la máquina.
		Los refuerzos de la estructura no permiten un correcto asentamiento de los paneles solares.
Mecanismo de giro		Solo se permite el giro de los paneles con respecto al eje cenital.

El mecanismo que permite el giro de los paneles no contiene elementos que elimine la fricción de contacto metal-metal, lo que ocasiona que el movimiento de dichos paneles sea difícil de efectuarlo.

3.2 DISEÑO MECÁNICO

3.2.1 Estructura del seguidor Solar

La nueva estructura para el seguidor solar debe cumplir con la facilidad para poder instalar en ella los ejes de giro cenital y azimutal, el fácil acceso y posicionamiento de los motores que permitirán el giro de los paneles en los dos eje antes mencionados, un sistema sencillo para la transmisión de potencia del motor a los ejes y debe presentar un fácil acceso al grupo de baterías en caso que se requiera un cambio o inspección de las mismas. Para esto se analizará ciertas alternativas de diseños que cumplan con dichos requerimientos.

3.2.1.1 Alternativa 1

Se plantea como mecanismo de cuatro barras articuladas, manivela-oscilador, para los 2 grados de libertad del seguidor solar.

- Base de Soporte: Dentro de este mecanismo se propone una estructura en pirámide articulada colocada en los extremos para soporte del mecanismo y el soporte de los paneles, y en las bases de dicha estructura van colocadas 2 ruadas a cada lado, con el fin de que el equipo sea móvil.
- Mecanismo de 2° de libertad: Se plantea un mecanismo de cuatro barras articuladas, manivela-oscilador, para los 2 grados de libertad del seguidor

solar. Usando un mecanismo para la declinación y otro mecanismo similar para el eje polar

- Soporte para Paneles: Se considera también una estructura de rectangular para el soporte de los paneles que sirva como riel para facilitar el movimiento en declinación y dentro del eje polar de los paneles.

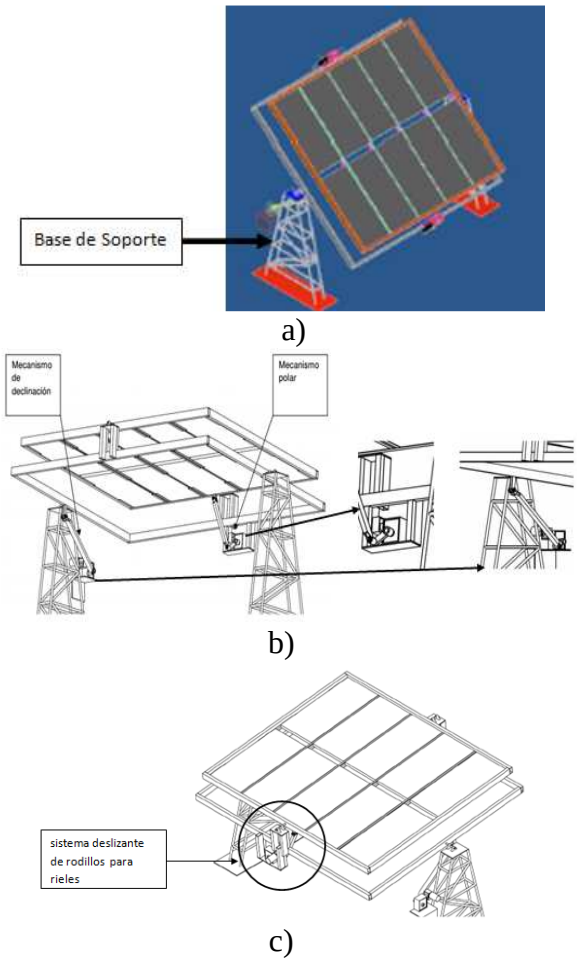


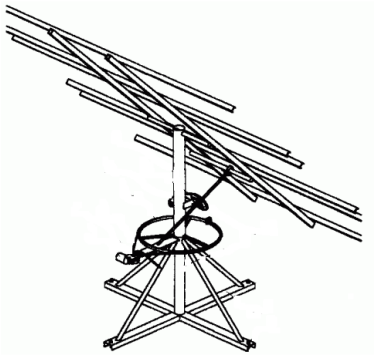
Figura 47. Alternativa 1 del seguidor solar. a) base b)mecanismo c)soporte

(Diseñode los mecanismos para un seguidor solar pseudo ecuatorial, 2012)

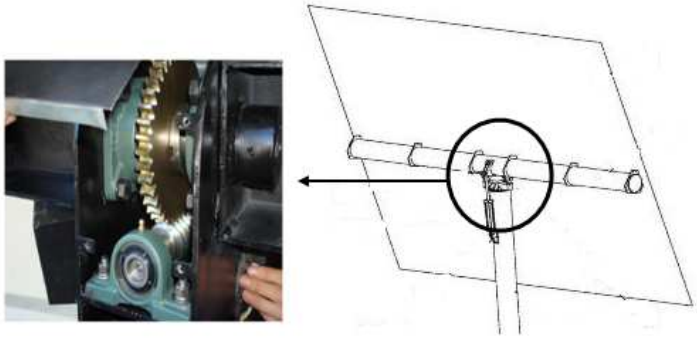
3.2.1.2 Alternativa 2

Se plantea una estructura metálica con rotación biaxial para el sistema de seguidor solar.

- Base de Soporte: Dentro de esta alternativa se propone una columna principal de soporte, bajo análisis por Esbeltez, con nervios diagonales de soporte para la columna. Toda esta estructura sobre una placa cuadrada conde se colocan 5 ruedas para la movilidad de la estructura.
- Mecanismo de 2° de libertad: Se plantea un mecanismo para el eje cenital con un sistema de polea como se incida en la figura, recalcando que este sistema de colocaría empotrado sobre la base de soporte. Para el segundo eje de giro un sistema de corona con tornillo sin fin.
- Soporte para Paneles: Se considera una estructura rectangular acorde a las dimensiones de los paneles solares con cavidad para cada panel, y como se aprecia en la figura en la mitad de esta estructura se acopla el eje el giro generado por la el sistema de corona con tornillo sin fin.



a)



b)

c)

Figura 48. Alternativa 2 del seguidor solar. a)base b)mecanismo c)soporte

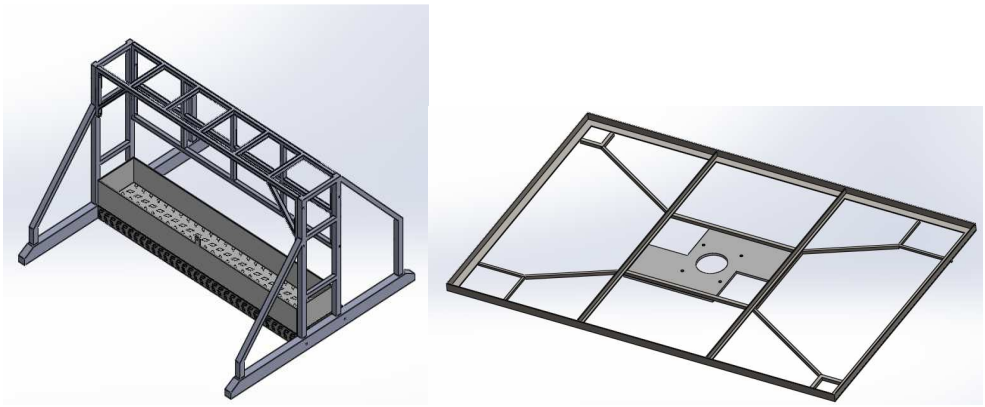
(Diseño mecánico de un seguidor para mover un generador solar de 600 W con lentes de Fresnel)

3.2.1.3 Alternativa 3

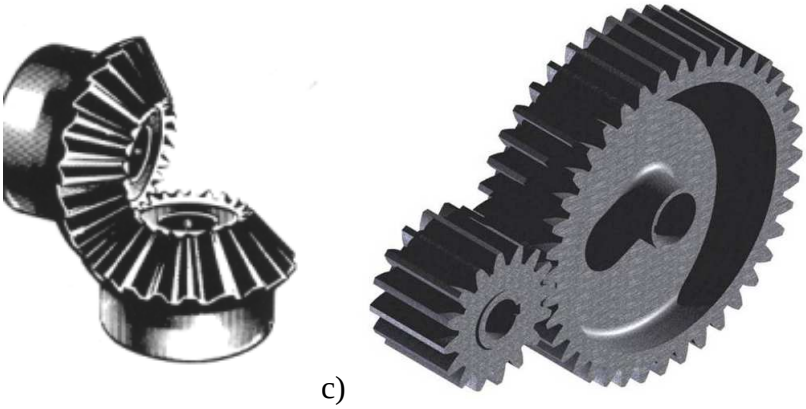
A partir de la estructura recibida se plantea una modificación y rediseño para el seguidor solar.

- Base de Soporte: Se propone conservar la mesa se soporte para usarla de base de soporte, modificando la base de soporte a una mesa, excluyendo los soportes laterales y cambiando las ruedas por otras acordes al peso que soportan.
- Mecanismo de 2° de libertad: Para el eje cenital se propone un sistema de transmisión de generado por un moto-reductor, mismo que genera el movimiento y este sea transmitido por un eje horizontal hacia un eje vertical por medio de la transmisión 1:1 de engranes cónicos.
- Para el eje acimutal se propone un sistema de transmisión generado por un motor DC, acoplado a una caja reductora diseñada para 1,7 rpm con un sistema de reducción: corona - tornillo sin fin, y a la salida de este sistema acoplado a un piñón - engrane con relación de transmisión 1:5.
- Soporte para Paneles: Se propone conservar la parrilla se soporte para los paneles solares realizando una modificación para que se permita el correcto

asentamiento de los paneles, y la colocación de una placa de 12 líneas en el centro para sujeción hacia el sistema de transmisión de movimiento.



a) b)



c)

Figura 49. Alternativa 3 del seguidor solar. a) base b) soporte c) mecanismo

3.2.1.4 Matriz de Decisión

Posterior a realizar los diseños de las alternativas propuestas para la mesa de soporte se realizará una matriz de decisión a fin de evaluar cuál de dichas alternativas es la más adecuada.

Los criterios de evaluación de cada alternativa serán los siguientes:

- **Facilidad de construcción.-** La alternativa propuesta debe presentar la mayor facilidad para su elaboración empleando los recursos disponibles para ello.
- **Limpieza y mantenimiento.-** La alternativa seleccionada debe contar con todas las facilidades para poder realizar la limpieza o mantenimiento de la estructura si incurrir en grandes inversiones de tiempo y dinero.
- **Facilidad de desplazamiento.-** Siendo este un equipo didáctico de laboratorio es indispensable que la estructura presente la mayor facilidad de desplazamiento desde su lugar de almacenamiento hasta el lugar de pruebas designado.
- **Costo.-** Este criterio es muy importante considerando que se cuenta con un presupuesto para la culminación del proyecto, la propuesta de diseño no deberá sobrepasar el porcentaje asignado a esta parte del proyecto.

Tabla 6. Matriz de decisión

	FACILIDAD DE CONSTRUCCIÓN		**LIMPIEZA Y MANTENIMIENTO**		**FACILIDAD DE DESPLAZAMIENTO**		**COSTO**		**TOTAL**
	8		4		10		8		
Alternativa 1	1	**8**	3	**12**	2	**20**	1	**8**	48
Alternativa 2	1	**8**	3	**12**	1	**10**	1	**8**	38
Alternativa 3	3	**24**	3	**12**	3	**30**	3	**24**	80

3.2.1.5 Selección de Materiales

Se debe considerar el material a usar tomando en cuenta que se necesitan masas para el maquinado de los engranes cónicos y rectos y a su vez ejes de transmisión que serán torneados, para llegar a las dimensiones del diseño. Adicional

se necesitan placas para la base de la mesa y soportes laterales. Para todos estos elementos se usa como material el acero, seleccionando el número de AISI que se necesita en cada sección.

El acero es una aleación de hierro con una pequeña proporción de carbono, que comunica aquellas propiedades especiales tal como dureza y elasticidad. Son productos ferrosos cuyo tanto por ciento de carbono está comprendido entre 0.05% y 1.7%, el acero endurece por el temple y una vez templado, tiene la propiedad de que si se calienta de nuevo y se enfría lentamente, disminuye su dureza. La proporción de carbono influye sobre las características del metal. Mientras posea más proporción de carbono mayor será su dureza pero menor su elasticidad.

Número AISI-SAE	% C	% Mn	% Si	% Ni	% Cr	Otros
1020	0.18–0.23	0.30–0.60				
1040	0.37–0.44	0.60–0.90				
1060	0.55–0.65	0.60–0.90				
1080	0.75–0.88	0.60–0.90				
1095	0.90–1.03	0.30–0.50				
1140	0.37–0.44	0.70–1.00				0.08–0.13% S
4140	0.38–0.43	0.75–1.00	0.15–0.30		0.80–1.10	0.15–0.25% Mo
4340	0.38–0.43	0.60–0.80	0.15–0.30	1.65–2.00	0.70–0.90	0.20–0.30% Mo
4620	0.17–0.22	0.45–0.65	0.15–0.30	1.65–2.00		0.20–0.30% Mo
52100	0.98–1.10	0.25–0.45	0.15–0.30		1.30–1.60	
8620	0.18–0.23	0.70–0.90	0.15–0.30	0.40–0.70	0.40–0.60	0.15–0.25% V
9260	0.56–0.64	0.75–1.00	1.80–2.20			

Figura 50. Composición de Aceros AISI - SAE Seleccionados

(Askeland D R. Phulé P, 2003)

En la tabla 3.9 se aprecia que el acero ASIS 1020 posee una porcentaje de 18 a 23 % de Carbono lo que indica que es un acero bajo en carbono. Este acero tiene un rango de maquinabilidad del 76% y este tipo de acero se utiliza en la fabricación de piezas estructurales de mediana resistencia.

Propiedades Mecánicas Típicas:

Resistencia a la Tracción psi T	Límite Elástico psi	Elongación en 2%	Reducción de área %	Dureza Brinell*
64000	54000	15	40	126

Dureza: 120 - 150 HB.

(http://ferraceros.com.co/Productos/Carbono1020.htm)

A continuación se realizan simulaciones para determinar la deformación de las piezas acordes al material seleccionado con las formas que se necesita para el diseño, considerando las propiedades mecánicas del material.

Se determina que en los diferentes casos el factor de seguridad es >1 lo que indica que el material va a soportar los esfuerzos incidentes y no va a fallar teniendo una vida útil prolongada.

3.2.1.6 Diseño CAD de las Estructuras del Seguidor Solar.

Una vez determinada la propuesta de diseño mediante la matriz de decisión se proceder a realizar un diseño CAD detallado.

A continuación se realizará una descripción de cada una de las partes constituyentes de la estructura del seguidor solar.

- Mesa de soporte.

Básicamente la estructura de la mesa de soporte se mantiene al modelo original con la diferencia de que esta cuenta con una plancha de 12 mm de espesor de acero AISI 1020 en la cual se colocará el moto-reductor, la transmisión de potencia y la

estructura de soporte para los giros tanto en para el eje cenital y azimutal y el caja de ubicación del grupo de baterías.

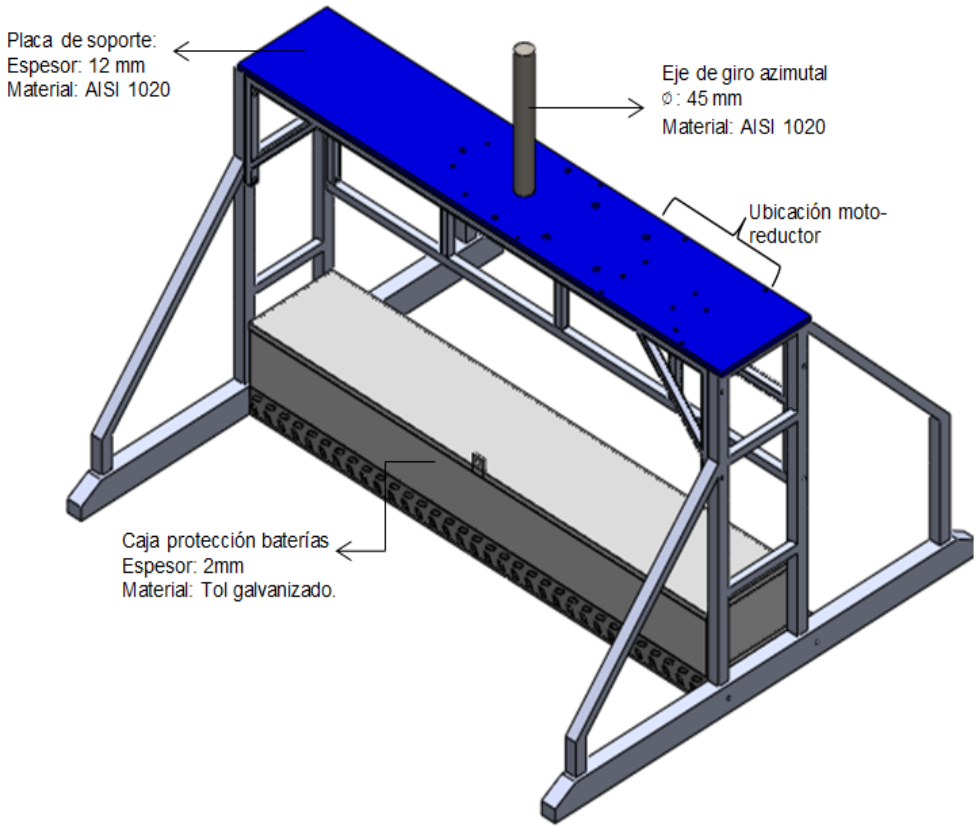


Figura 51. Mesa de soporte del seguidor solar.

- Estructura de sujeción de paneles solares

A fin de garantizar un correcto asentamiento y sujeción de los paneles solares a esta estructura se ha modificado la original cambiando los refuerzos de la misma para que no interfieran con las partes posteriores de cada panel, este cambio se realizó considerando guardar la misma resistencia que ofrecía el modelo original.

Esta estructura está conformada por perfiles en L de 5X5 cm y 5 mm de espesor para el asentamiento de los paneles y tubo cuadrado de 3x3 cm para reforzar la

estructura, adicionalmente cuenta con una placa de refuerzo y sujeción hacia el eje de giro, esta placa es de acero AISI 1020 de 12 mm de espesor.

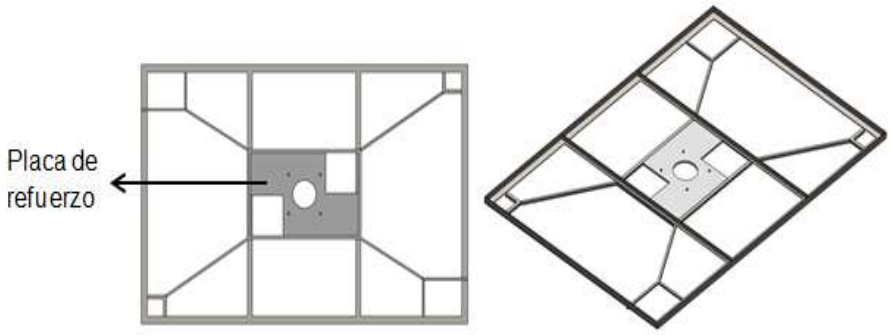


Figura 52. Estructura de sujeción de los paneles solares.

- Mecanismos de giro

Para poder transmitir el giro alrededor del eje azimutal y eje cenital se elaborará las siguientes piezas todas ellas en acero AISI 1020.

- Cañón del eje azimutal

  Este elemento permitirá colocar en él los rodamientos que facilitarán el giro del eje, además cuenta con tres soportes los cuales evitarán que el eje se flexionado por el peso de la estructura de sujeción, los paneles solares y el moto-reductor para el giro cenita.

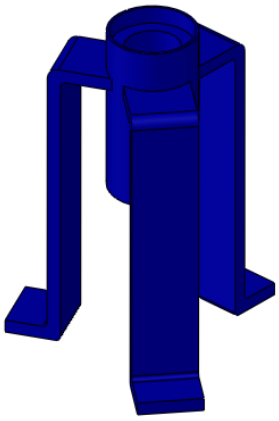


Figura 53. Cañón de giro del eje azimutal.

- Cañón del eje cenital

  De igual manera que el cañón azimutal este permitirá la colocación de rodamientos para eliminar la fricción y facilitar el giro de los paneles en dicho eje, además este permitirá la unión del toda la estructura de los paneles con el eje para el giro azimutal.

Figura 54. Cañón de giro del eje cenital.

- Pedestales de asentamiento del soporte de paneles

  Los pedestales permitirán la unión entre el eje de giro cenital y la estructura de los paneles.

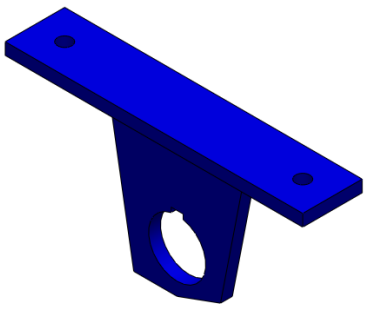


Figura 55. Pedestal de soporte de paneles.

- Soporte motor de giro eje cenital.

  Para la colocación del motor para el giro en el eje cenital se empleará una estructura tipo L la cual se acoplará en el cañón de horizontal, en la Figura 56, se muestra dicha estructura.

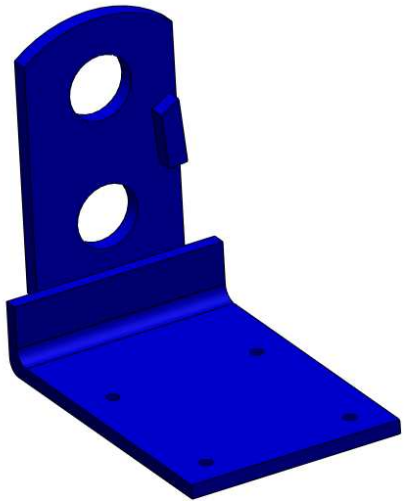


Figura 56. Soporto motor cenital.

- Transmisión de potencia mecánica azimutal

Para permitir el transferir el torque de giro desde el motor a al eje de giro azimutal se emplearán engranajes cónicos rectos, esto debido a que se desea transferir la potencia mecánica de una eje horizontal a uno vertical

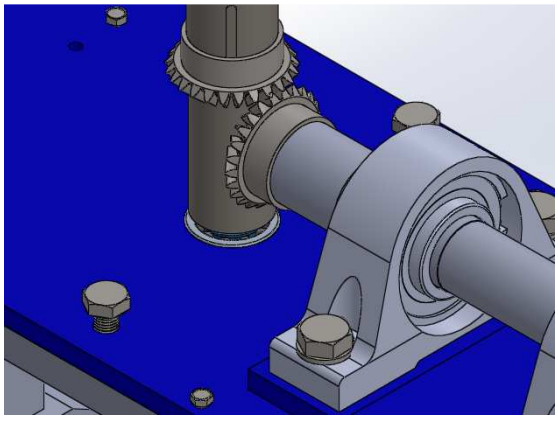


Figura 57. Sistema de engranes eje azimutal.

- Transmisión de potencia mecánica cenital

Para la transferencia de potencia al eje de giro cenital se empleará un arreglo de engrane y piñón rectos.

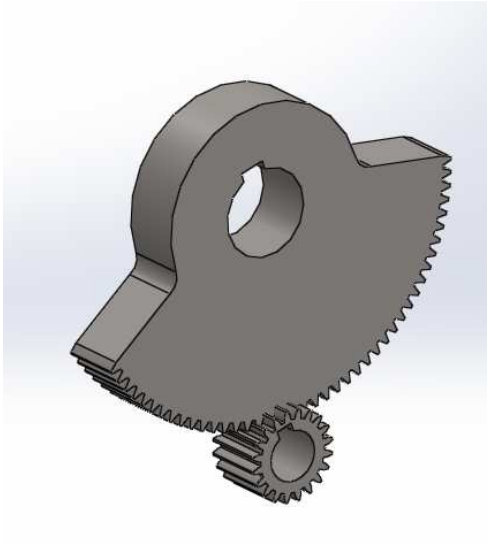


Figura 58. Sistema de engranes eje cenital.

3.2.1.7 Diseño CAE del Seguidor Solar.

A fin de poder saber si los diseños propuestos cumplirán a satisfacción su función se empleará la validación CAE usando para ello el software de diseño mecánico SolidWorks. Las simulaciones que se realizarán estarán enfocadas a un análisis estático de las estructuras del seguidor y verificar si su forma y composición podrán soportar todas las cargas a las que estarán sometidas.

- Mesa se soporte

Los datos empleados para la simulación CAE de este elemento son:

- Material: Tubo cuadrado 30x30 mm, Plancha de acero AISI1020
- Espesor: 2mm, 12mm
- Carga: 1300 kgf

En la Figura 59 se muestran los datos una vez realizada la simulación.

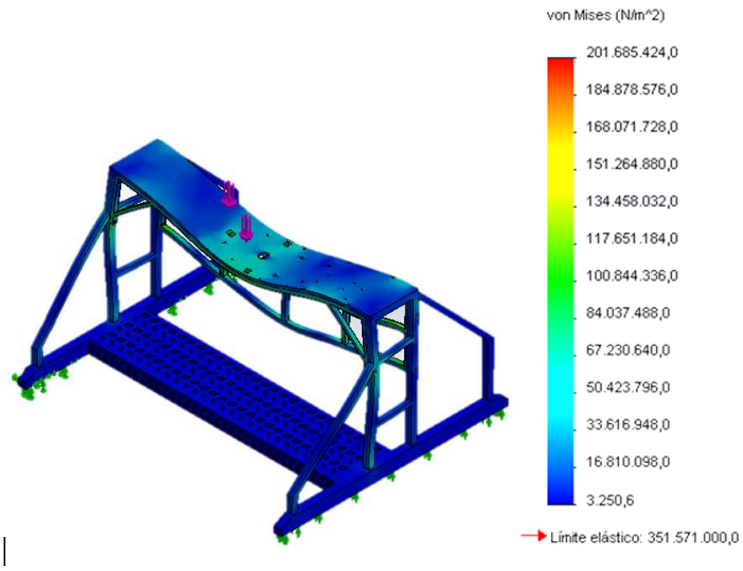


Figura 59. Simulación mesa de soporte.

Como se puede apreciar en la Figura 3.18 el valor máximo de presión es de $201685424\ \frac{N}{m^2}$ y el límite elástico del material es de $351571000\frac{N}{m^2}$ con estos valores se obtiene el índice de carga donde

$$i = \frac{\sigma max}{\sigma} \qquad (3.1)$$

Donde:

i: Índice de carga

σmax: Esfuerzo máximo

σ: Esfuerzo permisible

Sy: Límite elástico del material $351571000\ \frac{N}{m^2}$

$$\sigma max < \sigma$$

$$\sigma = 0.66 \cdot Sy$$

$$\sigma = 232036860$$

$$i = \frac{201685242}{232036860}$$

$$i = 0{,}86$$

$$i < 1$$

Como se puede apreciar el índice de carga es menor a uno con lo que se puede concluir que el diseño y los materiales empleados soportarán las cargas a las que estarán sometidas.

De igual manera en la Figura 60 se muestra la simulación con datos de factor de seguridad, donde se puede observar que el menor valor es de 1,74 una factor de diseño aceptable.

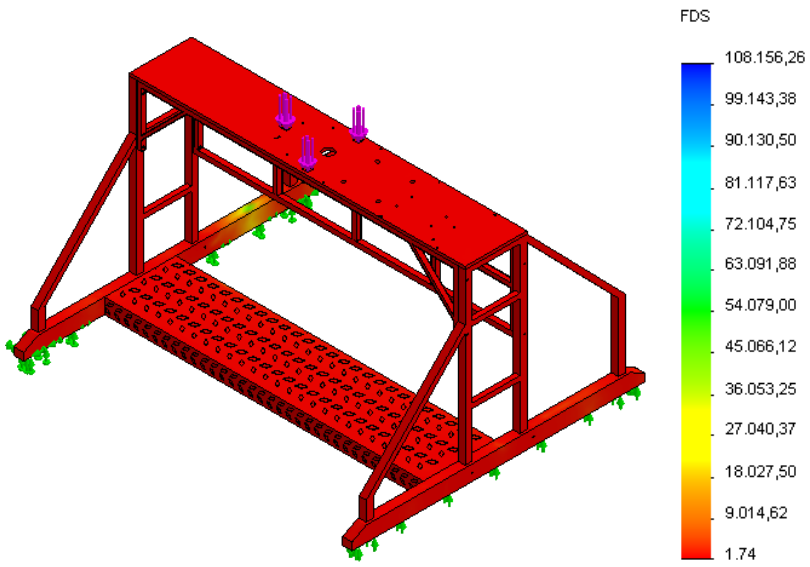


Figura 60. Simulación FDS mesa de soporte.

- Estructura de sujeción de paneles solares

Los datos empleados para la simulación CAE de este elemento son:

- Material: Tubo cuadrado, Plancha de acero AISI1020, Perfil L
- Dimensiones: 30x30x2mm, 12mm, 50x50x3mm
- Cargas: 112.7 Kgf por cada panel.

Como se puede observar en la Figura 61 realizada la simulación y obtenidos los gráficos del factor de seguridad toda la estructura se encuentra con un valor de 4 en FDS, con lo que se puede concluir que la estructura soportará sin problemas a los 3 paneles solares.

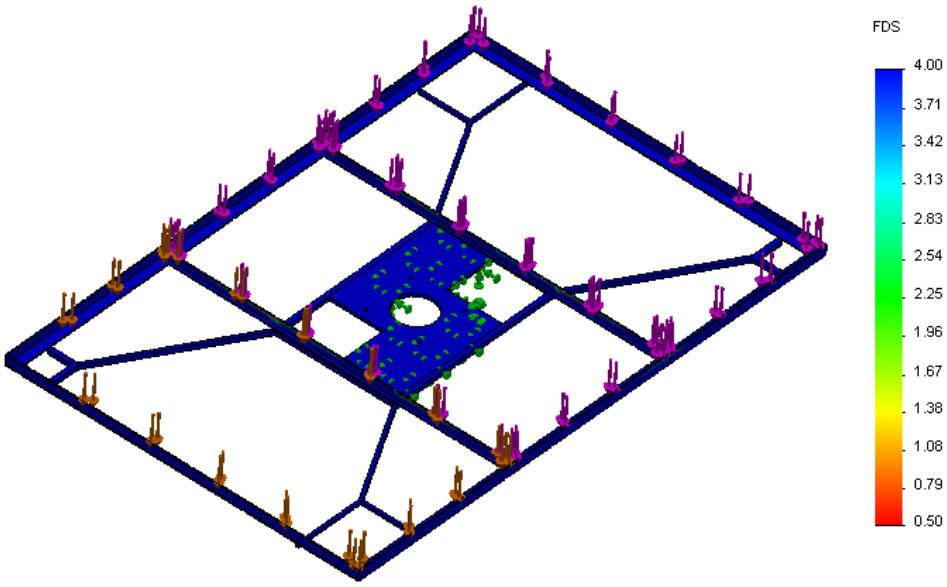


Figura 61. Simulación FDS estructura paneles.

- Cañón del eje azimutal.

Para la simulación CAE de este elemento los datos son:

- Material: Cilindro Acero, Platinas de acero aleado fundido
- Espesor: 5 mm, 3mm
- Cargas: 1225 Kgf.

En la Figura 62 se muestra el resultado de la simulación para esfuerzos en el cañón azimutal, con lo que se procederá a realizar la interpretación de resultados.

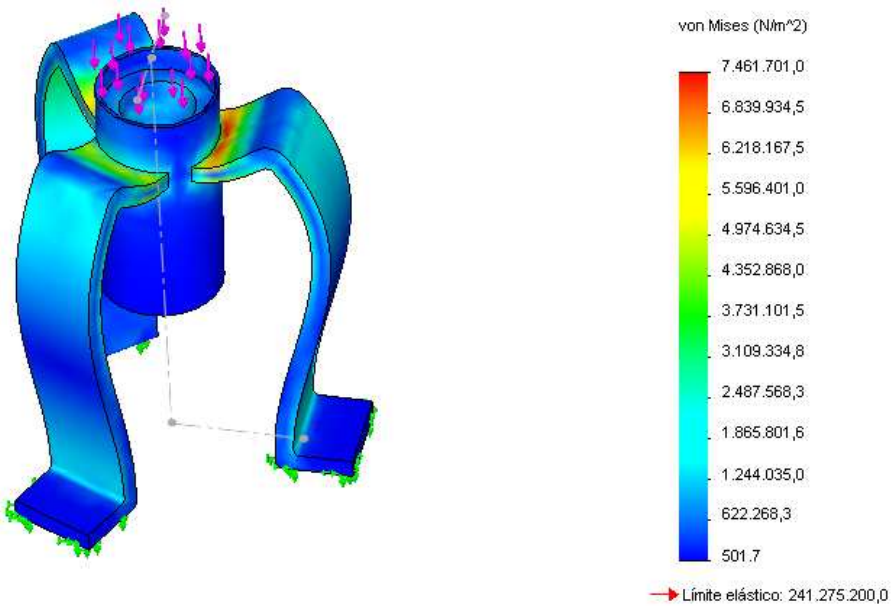


Figura 62. Simulación cañón del eje azimutal.

Una vez obtenidos los datos de la simulación donde se puede observar que el esfuerzo máximo es de 7.461 MPa y el límite elástico es de 241.035 MPa se procede a realizar la interpretación de resultados como se muestra a continuación:

$$i = \frac{\sigma max}{\sigma}\ , \quad \sigma max < \sigma$$

$$\sigma = 0.66 \cdot Sy$$

Donde:

i: Índice de carga

σmax: Esfuerzo máximo

σ: Esfuerzo permisible

Sy: Límite elástico del material $241275200\ \frac{N}{m^2}$

$$\sigma = 159241632$$

$$i = \frac{7461701}{159241632}$$

$$i = 0{,}047$$

$$Se\ cumple\ que\ i < 1$$

Como se puede observar el valor del índice de carga es mucho menor a 1 se concluye que el diseño cumple a satisfacción los esfuerzos a los que va a estar sometido.

- Pedestales de soporte.

En la simulación CAE de este elemento se usarán los siguientes datos:

- Material: Acero AISI 1020
- Espesor: 5 mm
- Cargas: 612 Kgf.

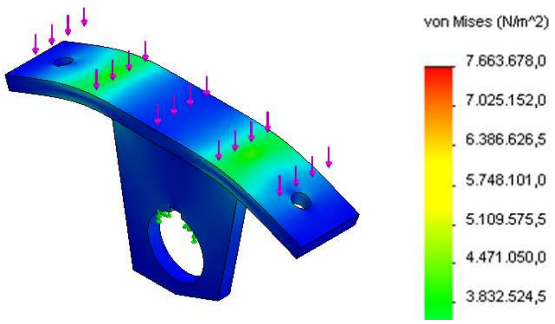


Figura 63. Simulación pedestal de soporte.

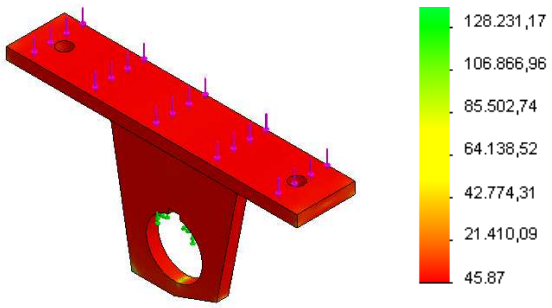


Figura 64. Simulación FDS pedestal de soporte.

Obtenidos los resultados de la simulación en la Figura 63 se realiza la interpretación de resultados teniendo como datos que el esfuerzo máximo es de 7.66MPa y el límite elástico es de 351MPa

$$i = \frac{\sigma max}{\sigma} \ , \quad \sigma max < \sigma$$

$$\sigma = 0.66 \cdot Sy$$

Donde:

i: Índice de carga

σmax: Esfuerzo máximo

σ: Esfuerzo permisible

Sy: Límite elástico del material $351571000 \ \frac{N}{m^2}$

$$i = \frac{7663678}{232036860}$$

$$i = 0{,}033$$

$$Se \ cumple \ que \ i < 1$$

Como se puede apreciar el valor del índice de carga es menor a 1, al igual que en la Figura 64 donde el mínimo valor del factor de seguridad es de 48 se concluye que este elemento soportará las cargas a las que será sometido.

- Soporte motor eje cenital.

Los datos para la simulación serán:

- Material: Acero AISI 1020
- Espesor: 12 mm
- Cargas: 100 Kgf.

En la Figura 65 se muestra los resultados de la simulación para este elemento.

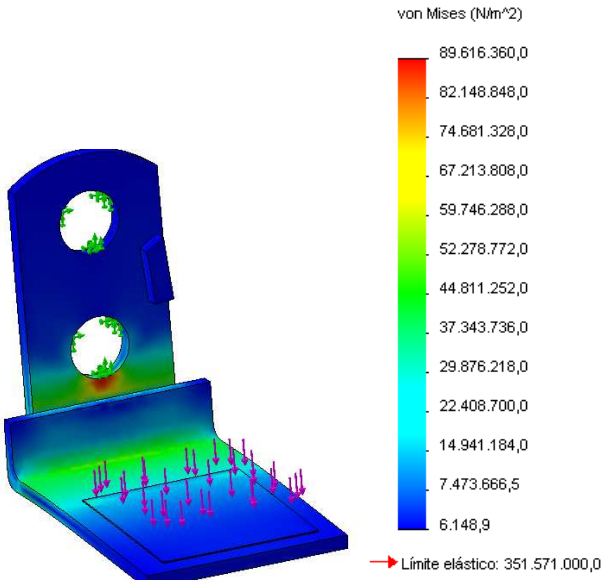


Figura 65. Simulación soporte motor cenital.

De igual manera se procede a realizar la interpretación de resultados con lo que se obtiene:

$$i = \frac{\sigma max}{\sigma}\ ,\quad \sigma max < \sigma$$

$$\sigma = 0.66 \cdot Sy$$

Donde:

i: Índice de carga

σmax: Esfuerzo máximo

σ: Esfuerzo permisible

Sy: Límite elástico del material $351571000\ \frac{N}{m^2}$

$$\sigma = 232036860$$

$$i = \frac{86616360}{232036860}$$

$$i = 0{,}37$$

$$Se\ cumple\ que\ i < 1$$

Una vez realizada la interpretación de resultados se concluye que el diseño soportará las cargas aplicadas.

3.2.1.8 Velocidades de los ejes del Seguidor

Previo a la selección del tipo de engranajes que se emplearán para la transferencia de potencia mecánica hay que determinar los intervalos de reposición y tiempos de funcionamiento para cada motor del seguidor.

Puesto que este es un equipo de laboratorio los tiempos de reposición para el eje azimutal será de 60 min y el del eje cenital de 45 min.

El tiempo de acción de cada motor será de 15 segundos para el eje azimutal y 5 segundos para el eje cenital.

Considerando que para el eje azimutal el rango de acción es de 360 ° y para el cenital de 100° y que estos tendrán un tiempo de trabajo de 12 horas se tiene:

Velocidad para el eje Azimutal:

$$\theta z = \frac{360*60}{12*60} = 30 \qquad \omega z = \frac{\theta z}{15} = 0.33\ (rpm) \tag{3.2}$$

Velocidad para el eje Cenital:

$$\theta c = \frac{360*45}{12*60} = 30 \qquad \omega c = \frac{\theta c}{5} = 0.208\ (rpm) \tag{3.3}$$

3.2.1.9 Selección de Motores

Para poder hacer girar los ejes se emplearán motores de corriente continua con reducciones ya que estos permitirán el cambio del sentido de giro para cada eje. A continuación se realizarán los cálculos para determinar los parámetros para cada motor.

- Eje azimutal

Se considera un análisis estático para el diseño de los ejes ya que la velocidad de giro es de 0.33 rpm aproximados tanto para el eje azimutal como para el eje cenital, y este valor es < 10 rpm.

Para determinar el par máximo que tendrá que dar el motor para poder hacer girar los paneles se determinará con el par que genera la fuerza del viento, en la posición más crítica de la estructura.

Teniendo así:

Se calcula el área donde se aplicará la fuerza del viento, siendo b= 2m y h= 1.35m

$$A = b * h = 2.7(m^2) \tag{3.4}$$

Dónde:

A: área donde se aplicará la fuerza del viento

b, h: dimensiones del sector donde se aplicará la fuerza.

Como consideración de diseño se empleará que la velocidad del viento es de 20m/s sobre los 3000 m de altura.

$$Vf = 20\ (m/s)$$

La densidad del aire es de:

$$\rho = 1.00720\ (Kg/m^3)$$

El caudal de aire en las palcas será de:

$$Q = A * Vf = 54\ (m^3/s) \tag{3.5}$$

Con lo que la fuerza del viento estará definida por :

$$Fviento = \rho * Q * Vf = 1.088\ x10^3\ (N) \tag{3.6}$$

Con lo que el momento para el eje azimutal es de:

$$Mz = Fviento * \cos(40) * \frac{b}{2} = 833.1\ (N * m) \tag{3.7}$$

Por tanto la potencia que se necesitará para mover el eje será de:

$$Pz = Mz * \omega z = 29.081(W) \tag{3.8}$$

Teniendo en cuenta que por la ley de conservación de energía, se conserva y solo se transforma, y considerando que la eficiencia asumida del motor a un valor de 0.75 por las pérdidas en las uniones y rodamientos por la fricción, que a continuación del capítulo se detallan descomponiendo las reacciones en X, Y y Z de los rodamientos. Se puede calcular la potencia requerida en el para hacer girar los paneles respecto al eje azimutal.

$$\eta = \frac{potencia\ de\ salida}{potencia\ de\ entrada} = 0.75$$

Potencia asumida para motores DC

(Ferdiland P. Beer, E. Russell, William E. , 2005)

$$Pzm = \frac{Pz}{\eta} = 38.78\ (W) \tag{3.9}$$

Los motores son de reusados de reciclaje, para el eje cenital usamos un motor de 90v DC pero lo alimentamos con un voltaje de 24v DC por lo que se multiplica por un factor de 18% a la velocidad ya que por la alimentación es más lento el motor.

Teniendo un wz = 6rpm, usando este último valor para los cálculos posteriores.

- Eje Cenital

Para el eje cenital el par máximo que el motor tendrá que dar es el que se genera cuando los paneles están en uno de sus topes máximos como se muestra en la Figura 66.

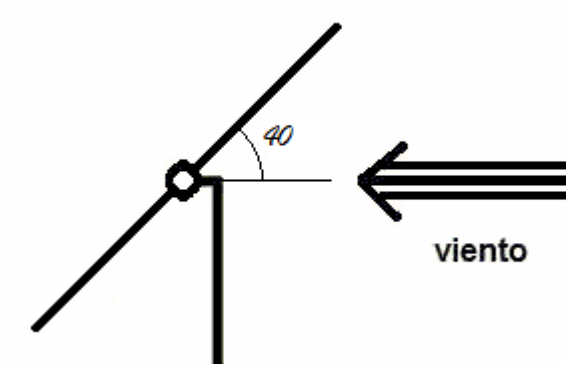


Figura 66. Posición par máximo

Donde la fuerza máxima será:

$$Fc = 115(Kg) * 9.8\left(\frac{m}{s^2}\right) = 1127\ (N)$$

$$dc = 85\ cm$$

Teniendo así que le momento para la carga en el eje cenital es de:

$$Mc = Fc * \cos(40) * dc = 1.468x10^3\ (N * m) \qquad (3.10)$$

Así la potencia máxima que se necesitara para este eje será de:

$$Pc = Mc * \varpi c = 32.019\ (W) \qquad (3.11)$$

De igual manera se asume una eficiencia del motor de 0.75 con lo que se obtiene que la potencia necesaria en el mismo debe ser

$$\eta = 0.75$$

$$Pcm = \frac{Pc}{\eta} = 42.693\ (W) \qquad (3.12)$$

Igualmente se trabaja con un motor de reciclaje de 24v DC.

3.2.1.10 Diseño de Engranes

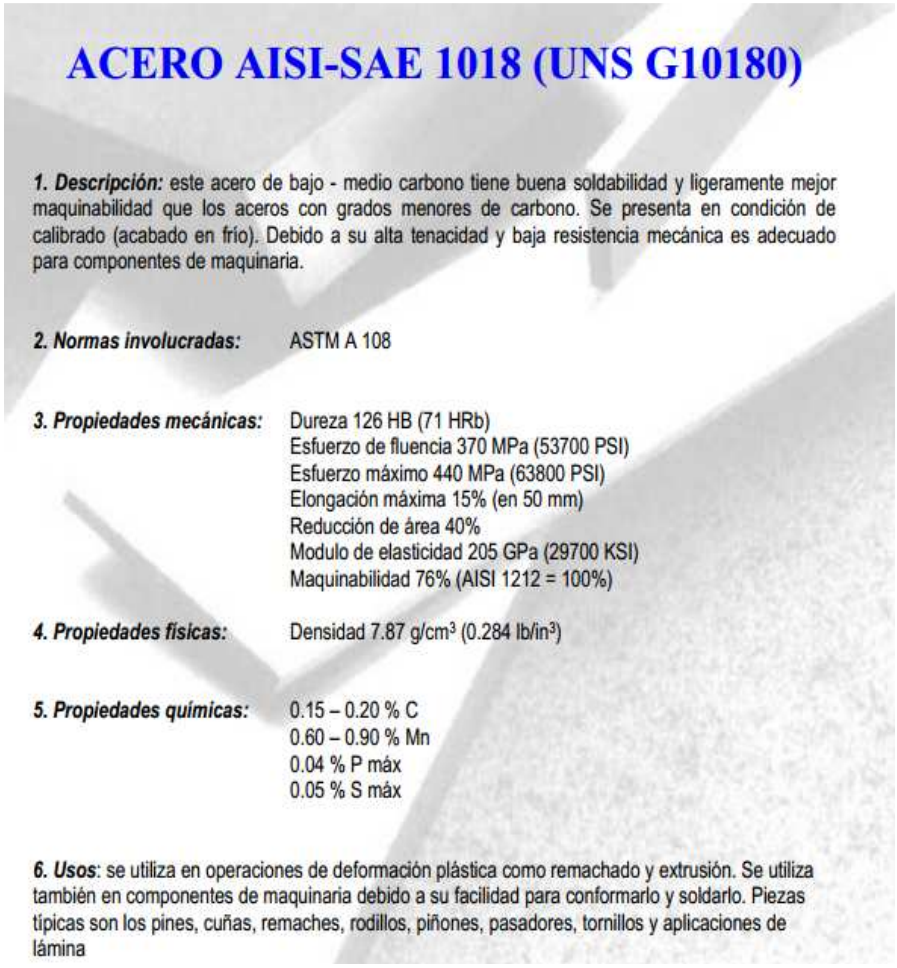
En esta sección de realizará los cálculos para los engranajes que permitirán la transferencia de potencia mecánica hacia cada eje de giro.

Para el eje azimutal se opta por diseñar engranes cónicos rectos con ejes perpendiculares e igual número de dientes.

Para el eje cenital se decide diseñar piñón - engrane rectos

- Tipo de Material:

Los materiales usados para engranajes rectos son los mismos que se usan para todos los demás tipos, es de consideración las cargas axiales y flexionantes generadas en los engranajes para la selección de los materiales. Por consiguiente en este diseño se utilizara un Acero AISI 1018 Estirado en Frio, donde se considera el grado de material=1. A continuación se muestran las propiedades características de este material referenciadas del catálogo de Sumitec.



ACERO AISI-SAE 1018 (UNS G10180)

1. Descripción: este acero de bajo - medio carbono tiene buena soldabilidad y ligeramente mejor maquinabilidad que los aceros con grados menores de carbono. Se presenta en condición de calibrado (acabado en frío). Debido a su alta tenacidad y baja resistencia mecánica es adecuado para componentes de maquinaria.

2. Normas involucradas: ASTM A 108

3. Propiedades mecánicas:
Dureza 126 HB (71 HRb)
Esfuerzo de fluencia 370 MPa (53700 PSI)
Esfuerzo máximo 440 MPa (63800 PSI)
Elongación máxima 15% (en 50 mm)
Reducción de área 40%
Modulo de elasticidad 205 GPa (29700 KSI)
Maquinabilidad 76% (AISI 1212 = 100%)

4. Propiedades físicas: Densidad 7.87 g/cm^3 (0.284 lb/in^3)

5. Propiedades químicas:
0.15 – 0.20 % C
0.60 – 0.90 % Mn
0.04 % P máx
0.05 % S máx

6. Usos: se utiliza en operaciones de deformación plástica como remachado y extrusión. Se utiliza también en componentes de maquinaria debido a su facilidad para conformarlo y soldarlo. Piezas típicas son los pines, cuñas, remaches, rodillos, piñones, pasadores, tornillos y aplicaciones de lámina

Figura 67. Características Físicas Acero AISI 1018

(SUMITEC)

- Engranajes eje Azimutal

En el eje azimutal se emplearán engranajes cónicos rectos ya que estos permiten la transferencia de potencia entre ejes perpendiculares.

Determinación del Número de Dientes:

Se tiene un motor DC y a este se acopla una caja reductora de 12:1, por la relación obtenemos a la salida 150 rpm, de donde se necesita reducir a 6 rpm que es la velocidad calculada para el eje azimutal.

$$\#\ de\ Dientes = \frac{rpm\ de\ moto{-}reductor}{rpm\ requeridas} \quad (3.13)$$

(A. L. Casillas , 2003)

$$\#\ de\ Dientes = 25$$

Debido a que la velocidad del moto-reductor es con la que tiene que girar los paneles se procede a emplear una relación de transmisión en los engranajes de 1, es decir tanto piñón como rueda tendrán el mismo número de dientes y por ende los mismos datos de diámetro primitivo inferior y exterior.

Tabla 7 Datos Engrane Cónico Recto

Módulo M	4,5
Número de dientes Z	25
Angulo Primitivo	45°
Paso P	14,14
Diámetro Primitivo Dp	112,5
Diámetro Exterior De	118,86

Una vez determinados estos parámetros se procede a realizar los cálculos para determinar el esfuerzo a flexión, superficiales y el factor de seguridad tanto para el engrane como para el piñón.

Como primer paso de determina la torsión en el piñón, la cual sería la misma en el engranaje, todos los cálculos se realizan en medidas del sistema Inglés.

$$Tp = \frac{P}{\varpi p} = 535.283\ \ (lbf * in) \quad (3.14)$$

$$dp = np * Modulo = 4.41\ (in) \quad (3.15)$$

Donde:

Tp: torque en el piñón

ωp: velocidad angular del piñón

dp: diámetro de paso

P: Potencia del motor

np: número de dientes del piñón

A continuación se determina los ángulos de paso.

$$\alpha p = 90 - \alpha g = 45 \tag{3.16}$$

$$\alpha p = tg^{-1}\left(\frac{ng}{np}\right) = 45 \tag{3.17}$$

Posteriormente se procede a calcular el cono de Paso L

$$L = \frac{dp}{2\sin(\alpha p)} = 3.132\ (in) \tag{3.18}$$

Utilizando el cono de paso L se determina el ancho de cara adecuado.

$$F = \frac{L}{3} = 1.044\ (in) \tag{3.19}$$

Una vez hecho eso se procede a obtener los valores del factor de flexión J para el engrane y piñón de la Figura 68, por tener el mismo número de dientes sus valores serán los mismos tanto para el piñón como para el engranaje.

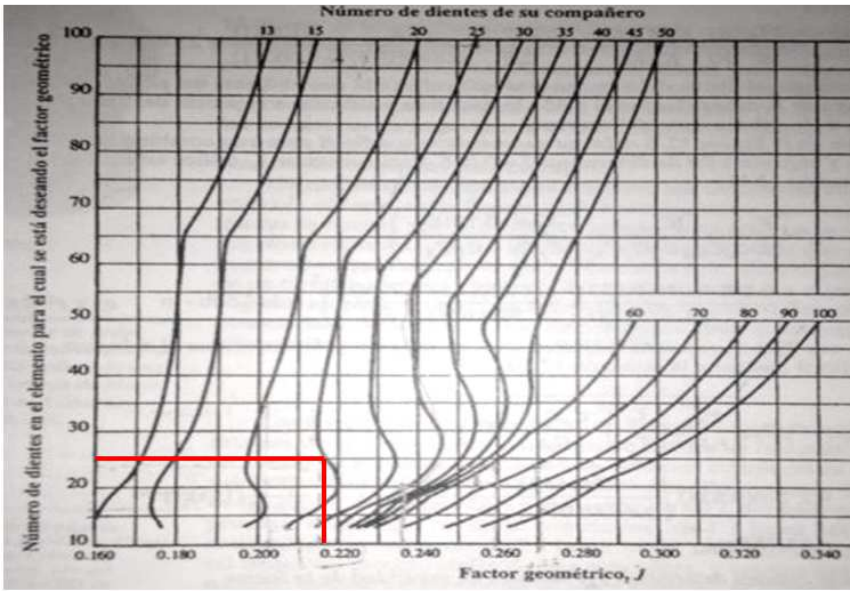


Figura 68. Curvas del factor de flexión

(Norton, 1999, pág. 790)

Jg = 0.218
Jp = 0,218

Posteriormente se determina el valor del esfuerzo a flexión mediante (3.19).

$$\sigma b = \frac{2Tp*Ka*Km*Ks*pd}{dp*F*J*Kv*Kx} \quad (3.20)$$

Donde:

Tp: Torque del piñón

Ka: Factor de aplicación de carga

Km: Factor de distribución de carga

Ks: Factor de tamaño

Pd: Paso diametral

Dp: Diámetro de paso

F: Ancho de cara

J: Factor de flexión

Kv: Factor dinámico

Kx: Factor para engranes cónicos

Para ello es necesario determinar los valores de las constantes que se han detallado

- Factor de aplicación de carga Ka.- Este valor es de 1 según la tabla de la Tabla 8.

Tabla 8. Factor de aplicación de carga

FACTORES DE APLICACIÓN DE CARGA Ka			
Máquina Impulsada	Máquina impulsadora		
	Uniforme	Impacto moderado	Impacto severo
Uniforme (motor eléctrico, turbina)	1,00	0,13	1,75 o superior
Impacto ligero (motor multicilindro)	1,25	1,50	2,00 o superior
Impacto medio (motor de un solo cilindro)	1,50	1,75	2,25 o superior

(Norton, 1999, pág. 741)

- Factor de distribución de carga Km.- Km es igual a 1.6 debido a que el ancho de cara F es menor a 2 in.

Factores de distribución de carga Km		
Ancho de cara		Km
In	mm	
<2	50	1.6
6	150	1.7
9	250	1.8
>= 20	500	2.0

(Norton, 1999, pág. 740)

- Factor de tamaño Ks.- Este factor es de valor es de 1 ya que no se ha definido normas para este valor.
- Factor dinámico Kv.- Es 1 como se puede apreciar en la Figura 3.28 tomando como referencia su velocidad de línea de paso

$$Vt = dp * \frac{\varpi p}{2} = 3.86\ (ft/min) \qquad (3.21)$$

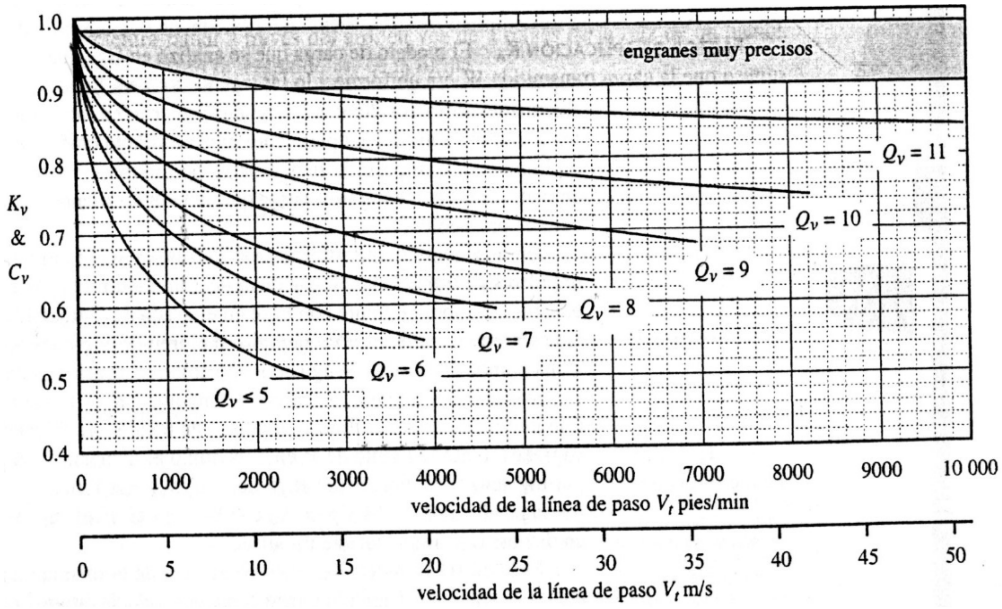


Figura 69. Gráfico del factor dinámico (Kv) vs. Velocidad lineal (Vt)

(Norton, 1999, pág. 739)

- Factor Kx.- Este valor es de 1 para engranajes cónicos rectos.

Definidos estos valores el resultado del esfuerzo a flexión es de:

$$\sigma b = \frac{2Tp * Ka * Km * Ks * pd}{dp * F * J * Kv * Kx} = 17.6\ (Ksi)$$

A continuación se procede a calcular el par de torsión de diseño del piñón T_D (3.21).

$$TD = \left(\frac{F*I*Cv}{2*Cs*Cmd*Cf*Ca*Cxc}\right)\left(\frac{S´fc*dp*0.774*CH}{Cp*Cb*CT*CR}\right)^2 \qquad (3.22)$$

Donde:

TD: Par de torsión de diseño

I: Factor geométrico superficial

Cv: Factor Dinámico

Cs: Factor de material

Cmd: Factor de montaje

Cf: Factor de acabado superficial

Ca: Factor de aplicación de carga

Cxc: Factor de abombamiento

S´fc: Resistencia a la fatiga superficial

dp: diámetro primitivo

CH: Factor de dureza

Cp: Factor de elasticidad

Cb: Coeficiente de ajuste de esfuerzos

CT: Factor de temperatura

CR: Factor de confiabilidad

Como se puede observar para calcular T_D es necesario definir los valores de los factores involucrados, los cuales se detalla a continuación.

- Factor dinámico Cv.- Al igual que el valor de Kv se determina mediante la Figura 3.28 y su valor es 1.
- Factor geométrico superficial I.- Este valor se lo determina mediante la Figura 70 y su valor es de 0,075.

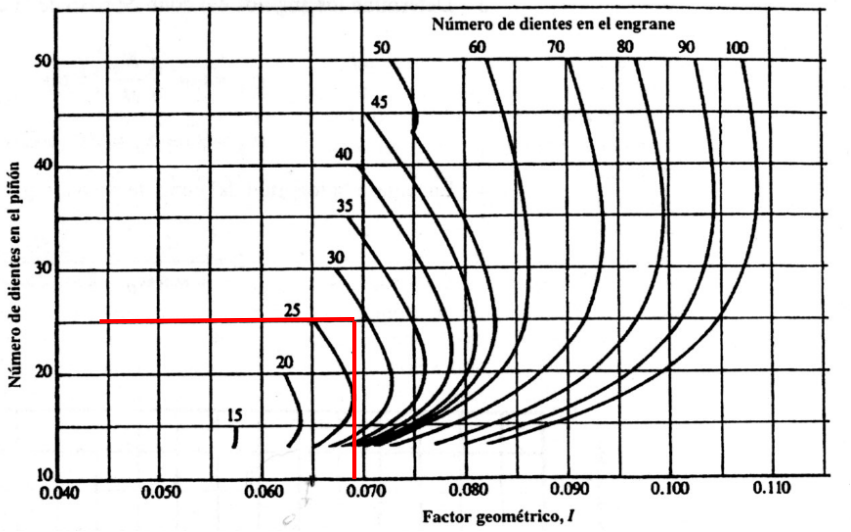


Figura 70. Factor geométrico superficial.

(Norton, 1999, pág. 791)

- Factor del material Cs.- Este valor es igual al de Ks por tanto es 1.

(Norton, 1999, pág. 744)

- Factor de montaje Cmd. (Norton, 1999, pág. 789). El factor de montaje es asumido a 1,5 ya que varía entre 1,2 y 1,8.
- Factor de terminado superficial C_F.- Este valor es de 1 debido a que se empleó un método convencional de fabricación.
- Factor de aplicación de carga Ca.- El factor de carga es el mismo que el de Ka por tanto es 1.
- Factor de abombamiento Cxc.- Este factor de 1 por tener dientes sin abombamiento.
- Coeficiente elástico Cp.- Este coeficiente es determinado mediante la Figura 71 para piñón y engrane de acero.

Coeficiente elástico AGMA C_P en unidades de $[psi]^{0.5}$ ($[MPa]^{0.5}$)*

Material del piñón	E_P psi (MPa)	Material del engrane					
		Acero	Hierro maleable	Hierro nodular	Hierro fundido	Bronce al aluminio	Bronce al estaño
Acero	30E6 (2E5)	2 300 (191)	2 180 (181)	2 160 (179)	2 100 (174)	1 950 (162)	1 900 (158)
Hierro maleable	25E6 (1.7E5)	2 180 (181)	2 090 (174)	2 070 (172)	2 020 (168)	1 900 (158)	1 850 (154)
Hierro nodular	24E6 (1.7E5)	2 160 (179)	2 070 (172)	2 050 (170)	2 000 (166)	1 880 (156)	1 830 (152)
Hierro fundido	22E6 (1.5E5)	2 100 (174)	2 020 (168)	2 000 (166)	1 960 (163)	1 850 (154)	1 800 (149)
Bronce al aluminio	17.5E6 (1.2E5)	1 950 (162)	1 900 (158)	1 880 (156)	1 850 (154)	1 750 (145)	1 700 (141)
Bonce al estaño	16E6 (1.1E5)	1 900 (158)	1 850 (154)	1 830 (152)	1 800 (149)	1 700 (141)	1 650 (137)

Figura 71. Coeficiente AGMA Cp.

(Norton, 1999, pág. 745)

- Constante de ajuste de esfuerzos Cb.- Este valor es definido por AGMA con el valor de 0,634. (Norton, 1999, pág. 781)
- Factor de temperatura C_T- K_T.- C_T le corresponde el valor de 1 debido a que la temperatura de trabajo es menor a 250 F.
- Factor de confiabilidad C_R- K_R.- Este valor es de 1 ya que se asume una confiabilidad del 99%.

- Resistencia a la fatiga superficial S´fc.- La resistencia a la fatiga superficial se determina mediante la Figura 72 y el valor es de 95000 psi.

Resistencias S_{fc}' a la fatiga superficial AGMA para una selección de materiales de engranes*

Material	Clase AGMA	Designación del material	Tratamiento térmico	Dureza superficial mínima	Resistencia a la fatiga por flexión	
					psi x 10^3	MPa
Acero	A1-A5		Endurecido en la masa	≤ 180 HB	85-95	590-660
			Endurecido en la masa	240 HB	105-115	720-790
			Endurecido en la masa	300 HB	120-135	830-930
			Endurecido en la masa	360 HB	145-160	1000-1100
			Endurecido en la masa	400 HB	155-170	1100-1200
			Endurecido con llama o por inducción	50 HRC	170-190	1200-1300
			Endurecido con llama o por inducción	54 HRC	175-195	1200-1300

Figura 72. Resistencia a la fatiga superficial AGMA.

(Norton, 1999, pág. 756)

- Factor de dureza C_H.- Este valor es de 1 ya que piñón y engrane estarán hechos del mismo materia por consiguiente misma dureza.

Una vez definidos todos estos factores se calcula el par de torsión de diseño del piñón (3.11).

$$TD = \left(\frac{F * I * Cv}{2 * Cs * Cmd * Cf * Ca * Cxc}\right)\left(\frac{S'fc * dp * 0.774 * CH}{Cp * Cb * CT * CR}\right)^2 = 223.2\ lbf * in$$

Posterior a esto se procede a determinar el valor del esfuerzo superficial (3.23)

$$\sigma c = \sqrt{\left(\frac{Tp}{TD}\right)^Z \frac{TD*Ca*Cmd*Cs*Cf*Cxc}{F*I*dp^2*Cv}} \qquad (3.23)$$

Puesto que Tp es mayor a TD el valor de z de la ecuación anterior es 1, con lo que se tiene que el esfuerzo superficial es de:

$$\sigma c = \sqrt{\left(\frac{Tp}{TD}\right)^Z \frac{TD*Ca*Cmd*Cs*Cf*Cxc}{F*I*dp^2*Cv}} = 46.73\ Ksi$$

Una vez determinados los valores del esfuerzo a flexión y superficial se procede a calcular los factores de seguridad de fatiga por fricción y de fatiga superficial.

Factor de seguridad de fatiga por fricción.

Previo a determinar este factor de seguridad es necesario determinar el valor corregido de la resistencia a la fatiga por fricción, (3.24)

$$Sfb = \frac{KL * s'fc}{KT * KR} \tag{3.24}$$

(Norton, 1999, pág. 757)

El valor de la resistencia a la fatiga por fricción sin corregir (S´fb) es de:

fb= 33000 psi este valor se obtuvo mediante la Figura 73.

TABLA 11-20 Resistencias a la fatiga por fricción S_{fb}' de AGMA para una selección de materiales de engrane*

Material	Clase AGMA	Designación del material	Tratamiento térmico	Dureza superficial mínima	Resistencia a la fatiga por flexión	
					psi x 10^3	MPa
Acero	A1-A5		Endurecido en la masa	≤ 180 HB	25-33	170-230
			Endurecido en la masa	240 HB	31-41	210-280
			Endurecido en la masa	300 HB	36-47	250-325
			Endurecido en la masa	360 HB	40-52	280-360
			Endurecido en la masa	400 HB	42-56	290-390
			Endurecido con llama o por inducción	Patrón de tipo A 50-54 HRC	45-55	310-380
			Endurecido con llama o por inducción	Patrón de tipo B	22	150
			Carburizado y cementado	55-64HRC	55-75	380-520
		AISI 4140	Nitrurizado	84.6 15N	34-45	230-310
		AISI 4340	Nitrurizado	83.5 15N	36-47	250-325
		Nitralloy 135M	Nitrurizado	90.0 15N	38-48	260-330
		Nitralloy N	Nitrurizado	90.0 15N	40-50	280-345
		Cromo al 2.5%	Nitrurizado	87.5-90.0 15N	55-65	380-450

Figura 73. Resistencia a la fatiga por fricción AGMA.

(Norton, 1999, pág. 752)

El factor de vida (3.24)

$$KL = 1.3558 * N^{-0.0178} \tag{3.25}$$

Donde

N= 1.5E6 ciclos

Reemplazando los valores de KL, KT y KR el factor corregido de resistencia a la fatiga por ficción es de:

$$Sfb = \frac{KL * s´fc}{KT * KR} = 3.474x10^4\ Ksi$$

El factor de seguridad se calcula (3-25).

$$Nbp = \frac{Sfb}{\sigma d} = 3.6 \quad (3.26)$$

Como se puede observar en (3.25) el factor de seguridad tiene un valor de 2 el cual está dentro de los parámetros aceptables.

Factor de seguridad a la fatiga superficial.

De igual manera que el anterior factor de seguridad es necesario determinar el valor corregido del factor de resistencia a la fatiga superficial S´fc, valor determinado mediante la Figura 3.31, (3.27).

$$Sfb = \frac{CL*CH*s´fc}{CT*CR} \quad (3.27)$$

Para CL el cálculo se lo realizará (3.28).

$$CL = 1.4488 * N^{-0.023} = 1.045 \quad (3.28)$$

Entonces el valor corregido de la resistencia a la fatiga superficial será:

$$Sfb = \frac{CL*CH*s´fc}{CT*CR} = 9.924x10^4\ Ksi$$

Por tanto el factor de seguridad es de:

$$Nbc = \frac{Sfc}{\sigma c} = 2.9$$

Este valor de factor de seguridad se encuentra dentro de los parámetros deseados, por tanto se puede decir que los engrane cónicos cumplirán a satisfacción su trabajo.

- Eje Cenital

Se tiene un motor DC que gira a 100 rpm adicional a este se acopla una caja reductora que a la salida tiene 1.7rpm, de donde se necesita reducir a 0.208 rpm aproximando para necesidad de cálculo a 0.33 rpm que es la velocidad calculada para el eje cenital.

Se tiene que la relación de transmisión es de:

$$mg = \frac{velocidad\ inducida}{velocidad\ requerida} \tag{3.29}$$

$$mg = \frac{1.7}{0.3} = 5$$

Para una relación de transmisión obtenida podemos fácilmente determinar que el piñón y el engrane pueden ser de 20 y 100 dientes respectivamente.

Determinación del factor de forma de Lewis.

De acuerdo al número de dientes del piñón y de la rueda se puede determinar con ayuda de la siguiente tabla el factor de forma de Lewis.

El factor de Lewis (Y) es un parámetro que sirve para la manufactura del engrane y depende de los parámetros s y h, cómo se muestra en la figura 74 que en la mayoría de los casos resulta muy difícil de medir. Por ello, es frecuente calcular el

factor de Lewis (Y) a partir de expresiones más simples que proporcionen valores bastante aproximados, o mediante tablas como la que se muestra a continuación:

Tabla 9 El factor de Lewis

Número de Dientes del Piñón	Y	Número de Dientes del Engrane	Y
20	0.322	100	0,447

(http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn151.html)

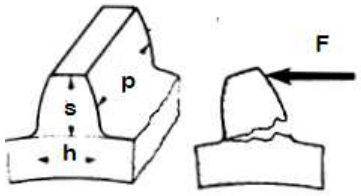


Figura 74. Dimensiones internas del diente

(A. L. Casillas , 2003)

Determinación de los valores de cálculo del piñón:

Tabla 10 Datos de piñón

Módulo M	2
Número de Dientes Z	20
Diámetro Primitivo Dp	40
Diámetro Exterior De	44
Diámetro Interno Di	35,33
Paso P	6,28
Distancia entre Ejes A	120
Espacio entre Dientes c	3,14
Espesor del Diente e	3,14
Altura total del Diente h	4,33
Altura de la Cabeza del Diente L	2
Radio del pie del Diente R	0,6

Por cuestiones de diseño en el engrane solo se maquinan 40 dientes que son suficientes para realizar la transmisión necesaria, puesto que el movimiento del eje cenital es de 100 grados.

Tabla 11 Datos del Engrane

Módulo M	2
Número de Dientes Z	100 maquinados 40
Diámetro Primitivo Dp	200
Diámetro Exterior De	204
Diámetro Interno Di	195
Paso P	6,28
Distancia entre Ejes A	120
Espacio entre Dientes c	3,14
Espesor del Diente e	3,14
Altura total del Diente h	4,33
Altura de la Cabeza del Diente L	2
Radio del pie del Diente R	0,6

Una vez determinados estos parámetros se procede a realizar los cálculos para determinar el esfuerzo a flexión, superficiales y el factor de seguridad tanto para el engrane como para el piñón, y se muestran los resultados en la siguiente tabla.

Tabla 12 Resultado de cálculos de engranes rectos.

Símbolo	Descripción	Formula	Valor
Wt	Carga transmitida	$Wt = 2\frac{Tp}{dp1}$	610.97 Lbf
dp1	Diámetro primitivo piñón	$dp1 = np \cdot Modulo$	2 in
dp2	Diámetro primitivo engrane	$dp2 = ng \cdot Modulo$	9,8 in
pd1	Paso diametral piñón	$pd1 = \frac{np}{dp1}$	10,16 1/in
pd2	Paso diametral engrane	$pd2 = \frac{ng}{dp2}$	10,16 1/in
αg	Ángulo de presión	N/A	20°
Fp	Ancho de cara	$Fp = \frac{16}{pd1}$	1,6 in
Jp	Factor de flexión piñón	N/A	0,24
Jg	Factor de flexión engrane	N/A	0,29
σbp	Esfuerzo a la flexión piñón	$\sigma bp = \frac{(Wt \cdot ka \cdot kmks \cdot kb \cdot pd1)}{Fp \cdot Jp \cdot kv}$	26.28ksi
σbg	Esfuerzo a la flexión engrane	$\sigma bg = \frac{(Wt \cdot ka \cdot kmks \cdot kb \cdot pd2)}{Fg \cdot Jg \cdot kv}$	21.75ksi
Sfb	Resistencia a la fatiga por fricción	$Sfb = \frac{KL \cdot S'fb}{KT \cdot KR}$	36.58ksi
Nbp	Factor de seguridad por fricción piñón	$Nbp = \frac{Sfb}{\sigma bp}$	1,4
Nbg	Factor de seguridad por fricción engrane	$Nbg = \frac{Sfb}{\sigma bg}$	1,7
σcp	Esfuerzo superficial piñón	$\sigma cp = Cp\sqrt{\frac{Wt \cdot Ca \cdot Cm \cdot Cs \cdot Cf}{Fp \cdot I \cdot dp1 \cdot Cv}}$	121.8 ksi
σcg	Esfuerzo superficial engrane	$\sigma cg = Cp\sqrt{\frac{Wt \cdot Ca \cdot Cm \cdot Cs \cdot Cf}{Fp \cdot I \cdot dp2 \cdot Cv}}$	54.47 ksi
Sfc	Resistencia a la fatiga superficial	$Sfc = \frac{(CL \cdot CH \cdot S'fc)}{CT \cdot CR}$	106 ksi
Ncp	Factor de seguridad a fatiga superficial piñón	$Nbcp = \left(\frac{Sfc}{\sigma cp}\right)^2$	0,76
Ncg	Factor de seguridad a fatiga superficial engrane	$Nbcg = \left(\frac{Sfc}{\sigma cg}\right)^2$	3,8

Ya que los cálculos para determinar los factores de seguridad para engranes rectos y cónicos son similares solo se mostrará los valores correspondientes en la Tabla 12, para mayor información consultar la memoria técnica Anexo de memoria técnica.

3.2.1.11 Diseño Caja Reductora de Velocidad

La caja reductora del eje cenital cumplirá la función de evitar el oscilamiento de los paneles solares.

El diseño se concentrará en que el tornillo sea auto bloqueante, con lo que se tiene que:

Distancia asumida entre centros 4 in

$$C = 4\ (in)$$

$$d = \frac{C^{0.875}}{2.2} = 1.529\ (in)$$

Diámetro adecuado para la rueda helicoidal

$$dg = 2 * C - d = 6.47\ (in)$$

Cálculo del avance

$$Nw = 1\ dientes\ tornillos \sin fin$$

$$Ng = 60\ dientes\ engrane$$

$$L = \pi * dg * \left(\frac{Nw}{Ng}\right) = 0.339\ (in)$$

Mediante el ángulo de avance se determina si el tornillo sin fín será auto bloqueante como se desea

$$\lambda = tg^{-1}\left(\frac{L}{\pi * d}\right) = 4.035° \qquad (3.30)$$

El ancho recomendado de cara será

$$Fmax = 0.67 * d = 1.024\ (in)$$

El factor de material Cs será 1000 debido a q C es menor a 8

$$Cs = 1000$$

Ahora se determina el factor de corrección de razón Cm

$$mG = \frac{Ng}{Nw} = 60$$

Donde:

mG: relación entre número de dientes sinfín y engrane.

$$Cm = 0.0107 * \sqrt{-mG^2 + 56 * mG + 5245} = 0.757$$

La velocidad tangencial será:

$$Vt = \frac{\pi * 100(rpm) * d}{12 * \cos(\lambda)} = 21.01\ ft/min$$

$$Cv = 0.652^{-0.0011*Vt} = 0.644$$

La carga tangencial admisible es:

$$Wtg = CS * Cm * Cv * dg^{0.8} * Fmax = 2223\ lbf$$

Para mayor información revisar la memoria técnica en Anexo A8.

3.2.1.12 Diseño de Flechas

En esta sección se realizará el diseño de las flechas que permitirán la transferencia de potencia hacia los engranes y por consecuente el giro correspondiente a los paneles solares.

Se realizarán los cálculos para 4 flechas, dos en cada eje.

A continuación se realizará la descripción del proceso matemático empleado para realizar los cálculos de diseño de la flecha principal para el giro con respecto al eje azimutal.

Debido a que este proceso es similar en las 3 flechas restantes los resultados de estas se mostrarán en una tabla.

- Flecha principal eje azimutal.

Como primer paso de determina las medidas de cada sección de la flecha como se muestra en la Figura 75.

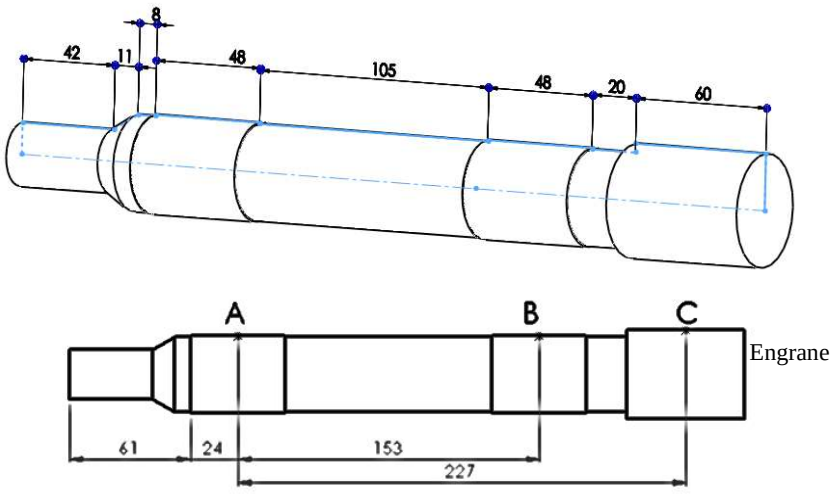


Figura 75. Flecha principal eje azimutal.

Ahora se realiza el diagrama de cuerpo libre en el cual se presentan todas las fuerzas actuantes sobre la flecha.

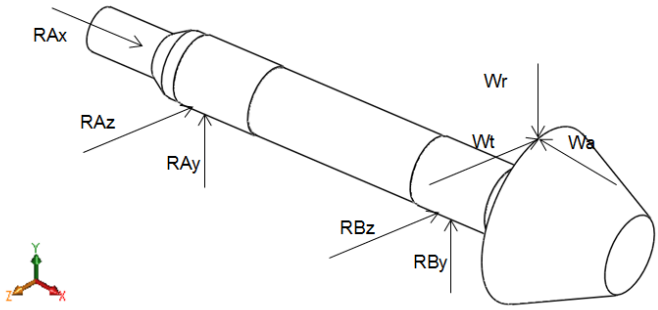


Figura 76. Diagrama de cuerpo libre.

Se procede a realizar la sumatoria de fuerzas tanto para el eje X, Y y Z y la sumatoria de momentos respectos al punto A.

Plano X-Y

$$\Sigma Fx = 0$$

$$RAx = Wa = 99.62\ (kN)$$

Donde:

RAx: Reacción en el eje X en el apoyo A

Wa: Fuerza axial

$$\Sigma MAx\text{-}y = 0$$

$$RBy = \frac{Wr * 227(mm) - Wa * \frac{62.5}{2}(mm)}{153(mm)} = 127.5\ (kN)$$

Donde:

Rby: Reacción en el eje Y en el apoyo B

Wr: Carga radial

Wa:Carga axial

$$\Sigma Fy = 0$$

$$RAy = Wr - RBy = -27.83\ (kN)$$

Plano X-Z

$$\Sigma MAx\text{-}z = 0$$

$$RBz = \frac{Wt * 227\ (mm)}{153\ (mm)} = 574.3(kN)$$

Donde:

Rbz: Reacción en el eje Z en el apoyo B

Wt: Carga Tangencial

$$\Sigma Fz = 0$$

$$RAz = Wt - RBz = -87.2\ kN$$

Obtenidos los valores de las reacciones en los puntos de apoyo A y B se procede a realizar las gráficas para las fuerzas cortantes y momentos flectores que actúan en la flecha, para ello se empleará el software MDsolids 3.5.

En las Figuras 77 y 78 se muestran los diagramas de los momentos flectores y fuerzas cortantes para el plano X-Y y X-Z.

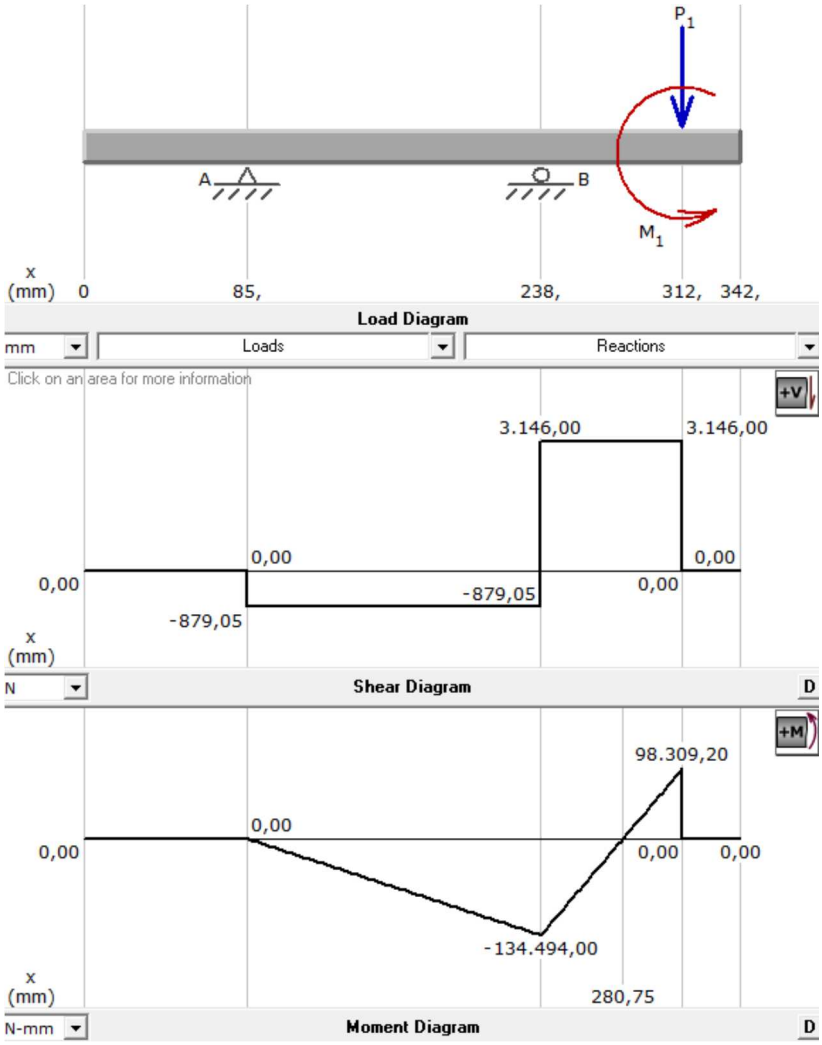


Figura 77. Diagramas de Fuerza Cortante y Momento Flector plano X-Y.

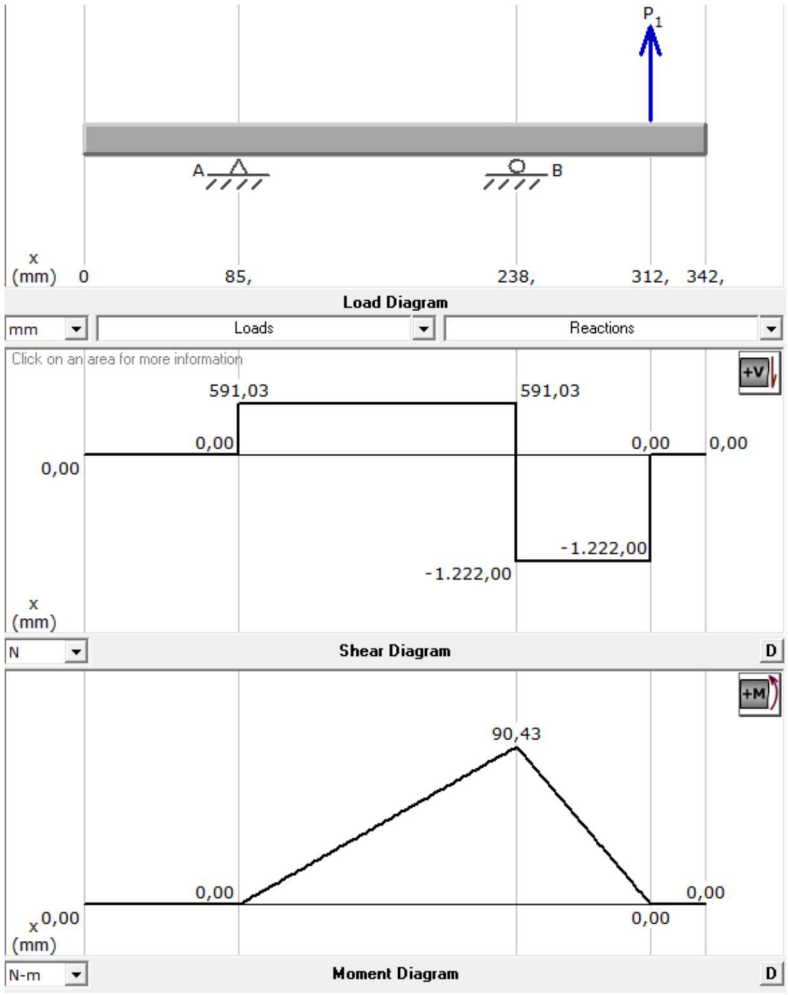


Figura 78. Diagramas de Fuerza Cortante y Momento Flector plano X-Z.

De las Figuras 3.36 y 3.37 se obtiene los valores máximos del esfuerzo cortante y momento flector en el engrane los cuales son:

- Plano X-Y

$$Vmax_1 = 3146\ (N)$$

$$Mmax_1 = 98.31\ (N * m)$$

- Plano x-z

$$Vmax_2 = 1222\ (N)$$

$$Mmax_1 = 0\ (N * m)$$

A continuación se procede a realizar el en la zona crítica, como se observa en los diagramas la zona más crítica es el punto C donde se encuentra el engrane, en Figura 79 se muestra las zonas donde se producirán los mayores esfuerzos.

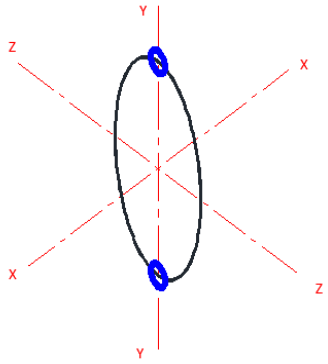


Figura 79. Diagrama zona crítica de esfuerzos.

En este punto crítico se hallará de la sumatoria vectorial de las fuerzas cortantes y momentos flectores

$$Mt = \sqrt{Mmax_1{}^2 + Mmax_2{}^2} = 98.313146\ (N * m) \qquad (3.31)$$

$$Vt = \sqrt{Vmax_1{}^2 + Vmax_2{}^2} = 3.375\ (kN) \qquad (3.32)$$

Calculados el momento flector y la fuerza cortante total se procede a determinar los valores de los esfuerzos actuantes en los puntos críticos descritos en la Figura 3.38.

Donde:

El esfuerzo cortante es cero debido a que el análisis se lo realiza en los extremos de la flecha y el esfuerzo flector está definido por (3.33).

$$V = 0$$

$$\sigma b = \frac{32 * Mt}{\pi * d^3} = \frac{1.001 * 10^6 (MPa)}{d^3} \qquad (3.33)$$

$$\tau_T = \frac{16*Tmotor}{\pi*d^3} = \frac{1.945*10^6(MPa)}{d^3} \quad (3.34)$$

(Norton, 1999, pág. 569)

Con los valores de 3.33 y 3.34 se procede a calcular el esfuerzo equivalente mediante la fórmula de 3.35.

$$\sigma eq = \sqrt{\sigma b^2 + 4 * {\tau_T}^2} = \frac{4.1981*10^6(MPa)}{d^3} \quad (3.35)$$

(Norton, 1999, pág. 574)

Con el valor del esfuerzo equivalente, un factor de seguridad asumido de 4 y los valores del límite elástico a la tensión y resistencia máxima la tensión se procede a determinar el diámetro mínimo para la flecha.

Factor de seguridad FS= 4

Límite elástico Su= 469 MPa

Resistencia a la tensión Sy=393 MPa

$$\sigma eq = \frac{Sy}{FS}$$

$$\frac{4.1981 * 10^6(MPa)}{d^3} = \frac{393(MPa)}{4}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{4.1981*10^6(MPA)*4}{393\ (MPa)}} = 35\ mm \quad (3.36)$$

(Norton, 1999, pág. 573)

Como se puede observar en 3.36 el diámetro mínimo de diseño para la flecha principal del eje azimutal es de 35mm.

A continuación en la Tabla 13 se muestra los resultados de las flechas restantes.

Tabla 13 Resultados diseño de Flechas azimutal y cenital.

		Flecha secundaria eje azimutal	**Flecha primaria eje cenital**	**Flecha secundaria eje cenital**
Momentos flectores	Mmax1	289 Nm	38.44 Nm	24,26 Nm
	Mmax2	92,7 Nm	105,63 Nm	66,67 Nm
Fuerzas Cortantes	Vmax1	1842 N	1303N	1011N
	Vmax2	631 N	3581 N	2778 N
Momento flector total	M_T	303,7 Nm	112,41 Nm	70,94 Nm
Fuerza Cortante Total	V_T	1947 N	3811 N	2956 N
Esfuerzo a flexión	σ_b	$\frac{3.094 \cdot 10^6 MPa}{d^3}$	$\frac{1,145 \cdot 10^6 MPa}{d^3}$	$\frac{7.227 \cdot 10^5 MPa}{d^3}$
Esfuerzo a torsión	τ_t	$\frac{1.945 \times 10^6 MPa}{d^3}$	$\frac{3.648 \times 10^5 MPa}{d^3}$	$\frac{1.769 \times 10^6 MPa}{d^3}$
Esfuerzo Eq.	σ_{eq}	$\frac{4.97 \cdot 10^6}{d^3} MPa$	$\frac{1.358 \cdot 10^6}{d^3} MPa$	$\frac{3.611 \cdot 10^6}{d^3} MPa$
Diámetro calculado	d	37 mm	24 mm	33 mm

Para mayor información revisar las memorias técnicas

3.2.1.13 Selección de Rodamientos

Una vez dimensionados los engranes y ejes se procede a realizar la selección por catálogo de rodamientos como se detalla en la Tabla 14.

Tabla 14 Tabla de selección de rodamientos.

Eje	Dimensiones (mm)			Denominación	Cantidad	Ubicación
	d	D	B			
20	20	47	14	1204TV	1	Base eje vertical
45	45	75	20	32009XA	1	Tope eje vertical
45	45	75	16	6009.	2	Eje horizontal
40	40	80	18	6208	2	Caja reductora

(FAG Catálogo)

Figura 80. Renderizado del Equipo de Seguidor Solar Automático

El proceso de construcción de cada pieza están realizados bajo la norma de INEN y su conjunto correspondiente se encuentra en el Anexo B.

CAPITULO IV

4. DISEÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO - ELECTRÓNICO

El presente capítulo se enfoca, como primero en los conversores DC/DC, es fundamental conocer sobre el diseño de convertidores que estamos utilizando para obtener los resultados esperados.

El diseño del software de supervisión: las partes constitutivas, los elementos empleados, tipos de comunicación, las técnicas de control utilizadas, la interfaz gráfica que recibe los datos del sistema de caracterización, que nos permite visualizar las curvas obtenidas y realizar un almacenamiento, a fin de establecer una comparación entre las mismas y definir los efectos que las diferentes condiciones ambientales causan sobre el comportamiento de un panel solar.

4.1 CONVERSOR DC/DC

4.1.1 Conversor SEPIC

El convertidor SEPIC (Single-ended primary inductance converter), mostrado en la figura 81, al igual que los convertidores Reductor-Elevador y Cúk permite obtener una tensión de salida mayor o menor que la tensión de entrada, pero sin invertir la tensión de salida respecto de la entrada.

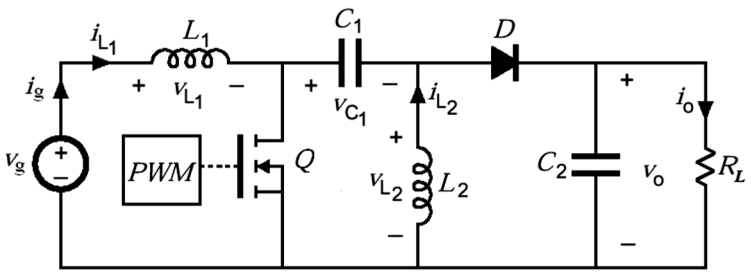


Figura 81 Convertidor SEPIC

(Erickson R. W., 2001) , (Massachusetts, 2001.)

El conversor SEPIC se ha hecho muy popular en los últimos años en sistemas alimentados por baterías, ya que se debe disminuir o incrementar el voltaje dependiendo la variación del nivel de carga en la batería.

En la figura 82 se visualiza el circuito cuando el interruptor de potencia Q_1 se activa en el periodo t = 0. El inductor L_1 se carga desde la fuente de entrada (E) durante el tiempo Ton. El inductor L_2 toma la energía del capacitor C_1, mientras que el capacitor C_2 es encargado de entregar la energía a la carga.

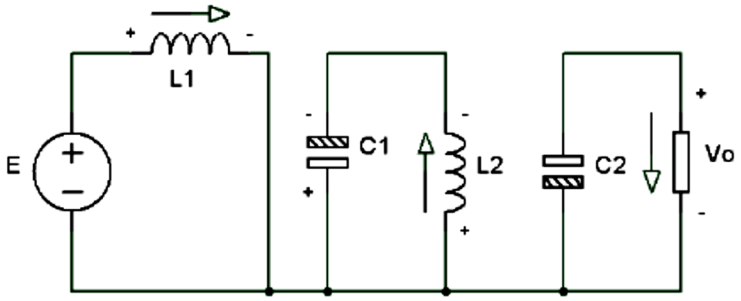


Figura 82 Circuito SEPIC en Ton

(Muhammad, 1995)

En el instante de tiempo Toff, el interruptor de potencia Q_1 se desconecta en t = t_1, el inductor L_1 carga el capacitor C_1 y también proporciona corriente a la carga,

se puede visualizar en la figura 83. El inductor L_2 entrega la energía almacenada a la carga durante este tiempo.

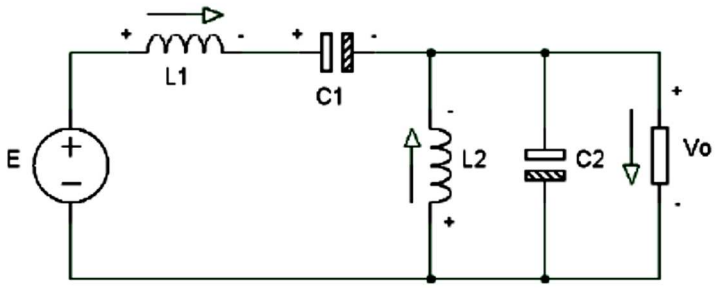


Figura 83 Circuito SEPIC en Toff

(Muhammad, 1995)

Una ventaja del convertidor SEPIC es la posibilidad de presentar una topología aislada mediante el uso de un transformador, ya que se puede reemplazar L_2 por una inductancia magnetizante asociada con el transformador de aislamiento, esta configuración se muestra a continuación en la figura 84.

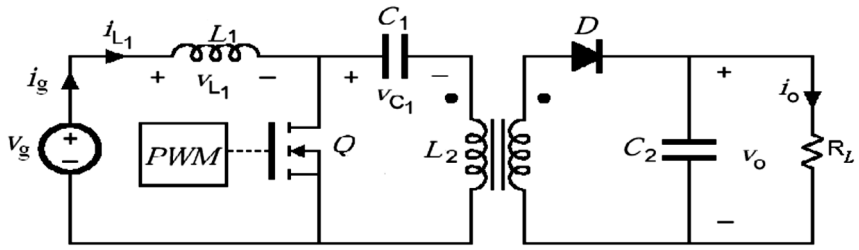


Figura 84 Topología SEPIC Aislada

(Muhammad, 1995)

4.1.2 Acoplamiento del Panel con el Convertidor SEPIC

El punto de máxima potencia en el panel fotovoltaico se representa por un comportamiento eléctrico dual, es decir, funciona como una fuente de corriente o voltaje. Para que el panel se pueda utilizar como una fuente de voltaje es necesario conectar entre sus terminales a la salida un capacitor de valor adecuado, esto

garantizará que el panel fotovoltaico trabaje como una fuente generadora de voltaje dc que alimenta al convertidor SEPIC, este capacitor reduce de manera considerable las variaciones de voltaje de salida del panel.

En la figura 85 se muestra el acoplamiento a través del capacitor entre el panel fotovoltaico y el convertidor SEPIC.

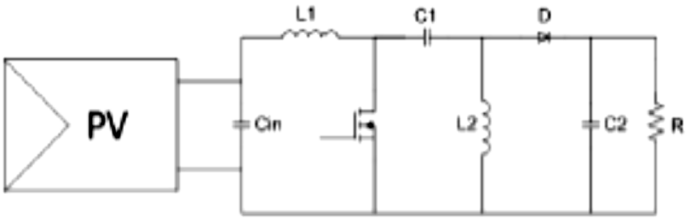


Figura 85 Convertidor SEPIC conectado con el panel fotovoltaico.

(A. Hren, June 2005)

La energía potencial que se almacena en el capacitor C_{in}, se convierte en energía cinética a través del inductor L_1. Tomando en cuenta todas las variaciones de energía en la corriente son producidas por el capacitor conectado en paralelo C_{in}, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{2}C_{in}({V^2}_{max} - {V^2}_{min}) = \frac{1}{2}L({I^2}_{max} - {I^2}_{min}) \qquad (4.1)$$

Donde:

C_{in} = Capacitor conectado en paralelo con el panel.

V_{max} = Variación máxima de voltaje en la entrada del convertidor SEPIC.

V_{min} = Variación mínima de voltaje en la entrada del convertidor SEPIC.

L = Inductor (L_1) del convertidor SEPIC.

I_{max} = Variación máxima de corriente en la entrada del convertidor SEPIC.

I_{min} = Variación mínima de corriente en la entrada del convertidor SEPIC.

En términos de la corriente nominal, voltaje nominal y de sus variaciones se puede obtener la siguiente ecuación a partir de (4.1). La cual queda de la siguiente manera:

$$C_{in} = \frac{L*I_{nom}*\Delta I}{V_{nom}*\Delta V} \tag{4.2}$$

Donde:

V_{nom} = Voltaje nominal en la entrada del convertidor SEPIC.

ΔV = Variación de voltaje en la entrada del convertidor SEPIC.

I_{nom} = Corriente nominal en la entrada del convertidor SEPIC.

Sustituyendo los valores en (4.2) se obtiene el valor del capacitor:

$$C_{in} = \frac{1mH * 5.74A * 0.5A}{17.4V * 1.2V} = 137\mu F$$

4.1.3 Modelado del Convertidor SEPIC

Se obtiene el modelo matemático en forma promedio del convertidor DC-DC tipo SEPIC, haciendo un análisis del mismo en estado estable, esto con la finalidad de obtener las ecuaciones características del convertidor y de esa manera poder calcular los valores necesarios de inductancia y capacitancia para poder asegurar que el convertidor trabaje en el modo de conducción continua (mcc).

4.1.3.1 Modelo Promedio del convertidor SEPIC

En la figura 86 se tiene el circuito eléctrico del convertidor SEPIC dibujado de una manera simple, representando la función del Mosfet como un interruptor de uso general de un polo con dos posiciones, esto nos servirá para analizar el circuito.

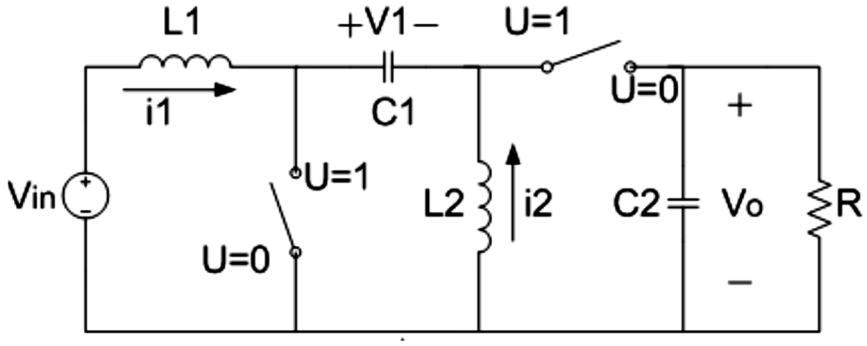


Figura 86 Diagrama de funcionamiento del conversor SEPIC.

(León, Junio 2010)

Si tomamos en cuenta el estado en que U = 1 se puede obtener un circuito equivalente que se muestra en la figura 87.

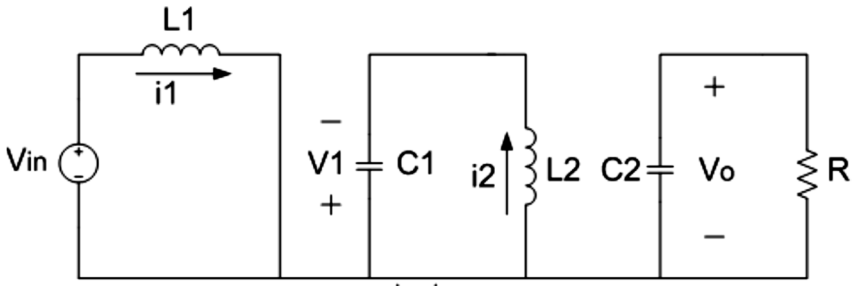


Figura 87 Circuito equivalente cuando U=1.

(León, Junio 2010)

Aplicando las leyes de Kirchhoff (LVK) al circuito de la figura 4.7, se obtienen las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = v_{in} \tag{4.3}$$

$$L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = v_1 \tag{4.4}$$

Aplicando la ley de corrientes de Kirchhoff (LCK) al mismo circuito, se obtiene las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$C_1 \frac{dv_1}{dt} = -i_{L2} \tag{4.5}$$

$$C_2 \frac{dv_o}{dt} = -\frac{v_o}{R} \tag{4.6}$$

Ahora, tenemos el estado cuando U = 0 en el circuito de la figura 4.6. Analizando el circuito de la figura 88 mediante la LVK y LCK obtenemos las siguientes ecuaciones diferenciales:

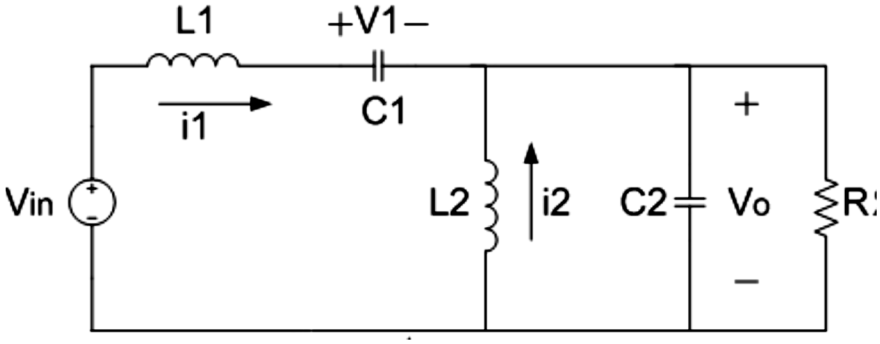


Figura 88 Circuito equivalente cuando U = 0.

(León, Junio 2010)

$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = v_{in} - v_1 - v_o \tag{4.7}$$

$$L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = -v_o \tag{4.8}$$

$$C_1 \frac{dv_1}{dt} = i_{L1} \tag{4.9}$$

$$C_2 \frac{dv_o}{dt} = -\frac{v_o}{R} + (i_{L1} + i_{L2}) \tag{4.10}$$

En consecuencia el modelo matemático que describe el comportamiento dinámico del convertidor SEPIC, está dado de la siguiente manera:

$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = v_{in} - (1-u)(v1 - v_o) \tag{4.11}$$

$$L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = uv_1 - (1-u)v_o \tag{4.12}$$

$$C_1 \frac{dv_1}{dt} = -ui_{L2} + (1-u)i_{L1} \tag{4.13}$$

$$C_2 \frac{dv_o}{dt} = -\frac{v_o}{R} + (1-u)(i_{L1} + i_{L2}) \tag{4.14}$$

Donde $u \in \{0,1\}$ representa la entrada de control del convertidor, la misma que pertenece al conjunto discreto. De (4.11) a (4.14) representan el modelo matemático del convertidor en su forma discontinua en el tiempo, si consideramos un valor promedio en la entrada de control en los periodos de conmutación del interruptor, se obtiene que la entrada del control promedio $u_{av} \in [0,1]$, lo que da las siguientes ecuaciones diferenciales del modelo promedio que describe el comportamiento dinámico del convertidor SEPIC:

$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = v_{in} - (1-u_{av})(v1 - v_o) \tag{4.15}$$

$$L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = u_{av}v_1 - (1-u_{av})v_o \tag{4.16}$$

$$C_1 \frac{dv_1}{dt} = -u_{av}i_{L2} + (1-u_{av})i_{L1} \tag{4.17}$$

$$C_2 \frac{dv_o}{dt} = -\frac{v_o}{R} + (1-u_{av})(i_{L1} + i_{L2}) \tag{4.18}$$

4.1.3.2 Análisis en Estado Estable del Convertidor SEPIC

Para la obtención de las ecuaciones características en estado estable, se debe asumir que en todos los componentes del convertidor no existen pérdidas. A la salida del convertidor tenemos un DC que se lo denota como $v_o(t)$, esta salida está compuesta por un voltaje deseado. Se debe considerar que el voltaje de rizo a la salida es muy pequeño comparado con el voltaje de salida esto debido a la conmutación del mosfet.

Por lo tanto se asume que el voltaje de rizo a la salida es despreciable, con lo que se tiene que $v_o(t) = v_o$.

El análisis se basará en la operación del convertidor SEPIC en estado estable, es decir, las corrientes y voltajes del convertidor tienden a alcanzar sus valores en estado estable. Las suposiciones para realizar el análisis en estado estable se pueden resumir de la siguiente forma:

1. Dado que se asume que no existen pérdidas en los componentes del convertidor, la potencia promedio de entrada P_{in} y la potencia promedio de salida P_o son iguales.

$$P_{in} = P_o \tag{4.19}$$

2. Se asume que en estado estable, la corriente en el inductor y el voltaje en el capacitor son periódicos en un ciclo de conmutación.

$$i_L(t_o) = i_L(t_o + T) \tag{4.20}$$

$$v_c(t_o) = v_c(t_o + T) \tag{4.21}$$

donde t_o es el tiempo inicial de conmutación y T es el periodo de conmutación.

3. Ya que son considerados como ideales los capacitores e inductores, la corriente promedio en el capacitor y el voltaje promedio en el inductor son cero.

$$V_L = \frac{1}{T}\int_{t_o}^{T+t_o} v_L(t)dT = 0 \tag{4.22}$$

$$I_c = \frac{1}{T}\int_{t_o}^{T+t_o} i_c(t)dT = 0 \tag{4.23}$$

En (4.22) y (4.23) se observa que el total de energía almacenada en el inductor y en el capacitor en un ciclo completo es igual a cero, con $t_o = 0$. Por otra parte, D el ciclo de trabajo se define de la siguiente manera:

$$D = \frac{T_{encendido}}{T} \tag{4.24}$$

El transistor de potencia Mosfet está en estado de encendido por un periodo de tiempo DT y después este se apaga en el tiempo restante del periodo de conmutación (1-D) T. Los modos de operación del convertidor dependen si el transistor se encuentra en estado encendido o apagado, primero se considera el modo de operación 1, que es cuando el interruptor se encuentra en estado de encendido (u = 1) como se muestra en la figura 87.

Ahora integrando la ecuación (4.3) de t = 0 a t con $I_{L1}(0)$ como condición inicial, se obtiene:

$$i_{L1}(t) = \frac{v_{in}}{L_1}t + I_{L1}(0) \tag{4.25}$$

Como habíamos analizado, el voltaje promedio en el inductor en un ciclo de conmutación en estado estable es igual a cero con lo que tenemos la siguiente relación:

$$v_1 = v_{in} \tag{4.26}$$

Sustituyendo (4.26.) en (4.4.) e integrando de t = 0 a t con $I_{L2}(0)$como condición inicial, se obtiene:

$$i_{L2}(t) = \frac{v_{in}}{L_2} t + I_{L2}(0) \quad (4.27)$$

Las ecuaciones (4.26.) y (4.27.) nos indica que la corriente en los inductores L_1 y L_2 se cargan linealmente con una pendiente positiva de $(\frac{v_{in}}{L_1})$ y $(\frac{v_{in}}{L_2})$ respectivamente, donde $I_{L1}(0)$ e $I_{L2}(0)$ es el valor inicial de la corriente en el inductor en t = 0 cuando el interruptor se encuentra en estado encendido.

El segundo modo de operación se establece cuando el interruptor cambia de estado a apagado (u = 0) en t = DT, el circuito eléctrico equivalente se muestra en la figura 4.8. Sustituyendo (4.26) en (4.7) e integrando después de t = DT a t con la condición inicial $I_{L1}(DT)$ se obtiene:

$$i_{L1}(t) = -\frac{v_o}{L_1}(t - DT) + I_{L1}(DT) \quad (4.28)$$

Integrando (4.8) de t = DT a t con condición inicial $I_{L2}(DT)$se obtiene:

$$i_{L2}(t) = -\frac{v_o}{L_2}(t - DT) + I_{L2}(DT) \quad (4.29)$$

Las ecuaciones (4.28.) y (4.29.) nos indica que la corriente en los inductores L_1y L_2 comienzan a descargarse en t = DT con una pendiente de $(-\frac{v_o}{L_1})$ y $(-\frac{v_o}{L_2})$ respectivamente, donde $I_{L1}(DT)$ e $I_{L2}(DT)$ es el valor inicial de la corriente del inductor cuando el interruptor se encuentra en estado de apagado.

Cuando el convertidor está operando en estado estable se tiene que:

$$I_L(0) = I_L(T)$$

Ahora, evaluando (4.25.) y (4.26.) en t = DT y (4.28.) y (4.29.) en t = T, se obtienen las siguientes ecuaciones que describen el comportamiento de las corrientes I_{L1}e I_{L2} en estado estable.

$$I_{L1}(DT) = \frac{v_{in}}{L_1}(DT) + I_{L1}(0) \quad (4.30)$$

$$I_{L2}(DT) = \frac{v_{in}}{L_2}(DT) + I_{L2}(0) \quad (4.31)$$

$$I_{L1}(0) = -\frac{v_o}{L_1}(1-D)T + I_{L1}(DT) \tag{4.32}$$

$$I_{L2}(0) = -\frac{v_o}{L_2}(1-D)T + I_{L2}(DT) \tag{4.33}$$

Donde $I_L(0) = I_{Lmin}$ e $I_L(DT) = I_{Lmax}$ que son los valores de la corriente en el inductor en los instantes de tiempo en que el interruptor se encuentra en estado de encendido y pagado en un periodo de tiempo.

Sustituimos (4.30.) en (4.32), se deriva la siguiente relación de voltaje del convertidor eléctrico, el que se define de la siguiente forma:

$$I_{L1}(0) = -\frac{v_o}{L_1}(1-D)T + \frac{v_{in}}{L_1}DT + I_{L1}(0)$$

$$= -v_o(1-D) + v_{in}D$$

$$\frac{v_o}{v_{in}} = \frac{D}{1-D} \tag{4.34}$$

Donde D $\epsilon[0,1]$.

El valor promedio de la corriente de entrada del convertidor eléctrico se calcula de la siguiente manera:

$$I_{in} = \frac{I_{L1max}+I_{L1min}}{2} \tag{4.35}$$

Considerando la suposición de que las potencia promedio de entrada y de salida son iguales, se tiene:

$$P_{in} = P_o$$

$$v_{in}I_{in} = v_oI_o$$

$$I_{in} = \frac{v_oI_o}{v_{in}} = \frac{{v_o}^2}{v_{in}*R} \tag{4.36}$$

Para el cálculo de la corriente máxima en el inductor L_1 (I_{L1max}), se tiene que despejar de (4.35) y luego sustituir I_{in} e I_{L1min} por (4.36.) y (4.32.) respectivamente, con lo cual se tiene:

$$I_{L1max} = \frac{2{v_o}^2}{v_{in}R} + \frac{v_o}{L_1}(1-D)T - I_{L1max}$$

$$= \frac{{v_o}^2}{v_{in}R} + \frac{v_o}{2L_1}(1-D)T$$

Despejando $v_o$de (4.34.) y sustituyendo se tiene:

$$= \frac{D^2 v_{in}}{R(1-D)^2} + \frac{Dv_{in}}{2L_1}T$$

$$= Dv_{in}(\frac{D}{R(1-D)^2} + \frac{T}{2L_1}) \quad (4.37)$$

De igual manera se calcula el valor de I_{L1min}, la que queda de siguiente forma:

$$I_{L1min} = \frac{2{v_o}^2}{v_{in}R} - \frac{v_o}{L_1}(1-D)T - I_{L1min}$$

$$= \frac{{v_o}^2}{v_{in}R} - \frac{v_o}{2L_1}(1-D)T$$

$$= \frac{D^2 v_{in}}{R(1-D)^2} - \frac{Dv_{in}}{2L_1}T$$

$$= Dv_{in}(\frac{D}{R(1-D)^2} - \frac{T}{2L_1}) \quad (4.38)$$

A partir de (4.37) y (4.38) se puede calcular la corriente de rizo en el inductor L_1, la cual queda de la siguiente forma:

$$\Delta I_{L1} = I_{L1max} - I_{L1min}$$

$$= Dv_{in}(\frac{D}{R(1-D)^2} + \frac{T}{2L_1}) - Dv_{in}(\frac{D}{R(1-D)^2} - \frac{T}{2L_1})$$

$$= \frac{Dv_{in}}{L_1 f} \quad (4.39)$$

El valor promedio de la corriente de salida del conversor queda determinada por la siguiente ecuación:

$$I_o = \frac{I_{L2max} + I_{L2min}}{2} = \frac{v_o}{R} \quad (4.40)$$

El valor de las corrientes máximas y mínima en el inductor L_2 del convertidor, se obtienen de manera similar a las de L_1 y quedan de la siguiente forma:

$$I_{L2max} = \frac{2v_o}{R} + \frac{v_o}{L_2}(1-D)T - I_{L2max}$$

$$= \frac{v_o}{R} + \frac{v_o}{2L_2}(1-D)T$$

$$= \frac{Dv_{in}}{R(1-D)} + \frac{Dv_{in}}{2L_2}T$$

$$= Dv_{in}(\frac{1}{R(1-D)^2} + \frac{T}{2L_2}) \quad (4.41)$$

Y para I_{L2min} se tiene:

$$I_{L2min} = \frac{2v_o}{R} - \frac{v_o}{L_2}(1-D)T - I_{L2min}$$

$$= \frac{v_o}{R} - \frac{v_o}{2L_2}(1-D)T$$

$$= \frac{Dv_{in}}{R(1-D)} - \frac{Dv_{in}}{2L_2}T$$

$$= Dv_{in}(\frac{1}{R(1-D)^2} - \frac{T}{2L_2}) \quad (4.42)$$

La corriente de rizo en el inductor L_2 del convertidor, se obtienen de manera similar a las de L_1 y quedan de la siguiente forma:

$$\Delta I_{L2} = I_{L2max} - I_{L2min}$$

$$= Dv_{in}(\frac{1}{R(1-D)} + \frac{T}{2L_2}) - Dv_{in}(\frac{1}{R(1-D)} - \frac{T}{2L_2})$$

$$= \frac{Dv_{in}}{L_2 f} \quad (4.43)$$

El valor crítico de las inductancias L_1 y L_2 del convertidor permiten que trabajen o no en modo de conducción continua (mcc). Para conseguir esto debemos mantener el convertidor operando en el modo de conducción continua, teniendo un valor mínimo de inductancia de L_1 y L_2, donde $I_{L1min} = I_{L2min} = 0$ y se resuelve para encontrar los valores críticos de inductancias L_1 y L_2.

Para L_1 crítica se tiene:

$$Dv_{in}(\frac{D}{R(1-D)^2}-\frac{T}{2L_1})=0$$

$$L_{1crit}=\frac{TR(1-D)^2}{2D} \tag{4.44}$$

Y para L_2 crítica se tiene:

$$Dv_{in}(\frac{1}{R(1-D)}-\frac{T}{2L_2})=0$$

$$L_{2crit}=\frac{TR(1-D)}{2} \tag{4.45}$$

El cálculo del voltaje de rizo de salida en el capacitor C_2, se asume que la corriente que sale a la carga es completamente dc y que la corriente en la misma es igual a la corriente en el capacitor en el intervalo cerrado de $0 \leq t < DT$:

$$i_c=-I_o \tag{4.46}$$

Mientras que en el intervalo de $DT \leq T < T$ la corriente a través del capacitor está dada por la expresión:

$$i_c=i_L-I_o \tag{4.47}$$

Las formas de onda de la corriente y el voltaje en el capacitor C_2 se muestran en la figura 89, tomando de la gráfica de la corriente en el capacitor obtenemos la expresión que describe a $i_c(t)$, la cual está dada por:

$$i_c(t)=\frac{I_{Lmin}-I_{Lmax}}{(T-DT)}(t-DT)+I_c(DT)$$

$$=-\frac{\Delta I_L}{(1-D)T}(t-DT)+I_c(DT), \quad 0 \leq t < DT$$

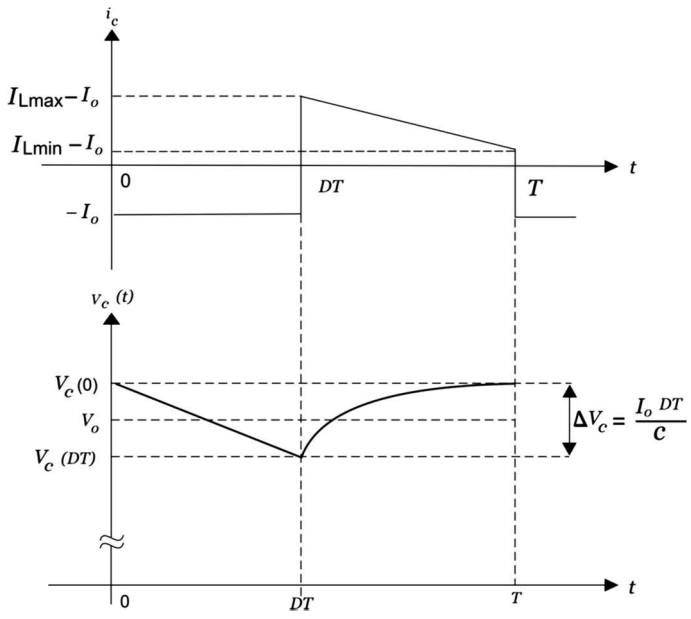


Figura 89 Formas de onda de corriente y voltaje en el capacitor C_2, con $I_{Lmin} > I_o$.

(Darla, Septiembre 2007)

Como I_c (DT) es el valor inicial de $i_c(t)$ en t = DT entonces, (4.47) se evalúa en t = DT y se obtiene lo siguiente:

$$I_c(DT) = I_L(DT) - I_o$$

$$= I_{Lmax} - \frac{I_{Lmax}+I_{Lmin}}{2}$$

$$= \frac{I_{Lmax}+I_{Lmin}}{2}$$

$$= \frac{\Delta I_L}{2}$$

Ahora la expresión matemática para $i_c(t)$ queda de la siguiente forma:

$$i_c(t) = -\frac{\Delta I_L}{(1-D)T}(t - DT) + \frac{\Delta I_L}{2}, \qquad DT \leq t < T \tag{4.48}$$

El voltaje en el capacitor para $0 \leq t < DT$ está dado por la siguiente ecuación:

$$v_c(t) = \frac{1}{C}\int_0^{DT} -I_o dt + V_c(0)$$

$$= -\frac{I_o}{C}t + V_c(0) \tag{4.49}$$

Para $DT \leq t < T$ el voltaje en el capacitor esta dado por:

$$v_c(t) = \frac{1}{C}[\int_{DT}^{T} \frac{-\Delta I_L}{(1-D)T}(t - DT) + \frac{\Delta I_L}{2}]dt + V_c(DT)$$

$$= \frac{-\Delta I_L}{2C(1-D)T}(t - DT)^2 + \frac{\Delta I_L}{2C}(t - DT) + V_c(DT) \tag{4.50}$$

donde $V_C(0)\ y\ V_C(DT)$ es el voltaje inicial del capacitor en t = 0 y t = DT respectivamente.

Debido a que el voltaje promedio en el capacitor es el voltaje de salida v_o y con ayuda de la gráfica de voltaje del capacitor de la figura 4.9, se puede obtener el valor para $V_C(0)$ y para $V_C(DT)$, los cuales son:

$$v_c(0) = v_o + \frac{I_o DT}{2C} \tag{4.51}$$

$$v_c(DT) = v_o - \frac{I_o DT}{2C} \tag{4.52}$$

En la gráfica de voltaje en el capacitor se puede observar que $\Delta V_c = \frac{I_o DT}{C}$, entonces la variación en el voltaje de salida está dado por:

$$\Delta v_o = \Delta V_c = \frac{I_o DT}{C} = \frac{v_o DT}{RC} \tag{4.53}$$

Por lo tanto, el voltaje de rizo de salida queda se la siguiente forma:

$$\frac{\Delta v_o}{v_o} = \frac{DT}{RC} = \frac{D}{RCf} \tag{4.54}$$

4.1.2 Convertidor Boost

El convertidor tipo Boost es un circuito elevador de tensión, que usa las características del inductor y el capacitor como elementos almacenadores de energía para elevar la corriente proveniente de la fuente de alimentación y usarla para

inyectarla al condensador, produciendo así niveles de voltaje mayores en la carga que los de la fuente. El interruptor en el esquema (figura 90), consiste de dos elementos: un elemento de conmutación rápida como un transistor BJT, un Mosfet (M1) o el más comúnmente usado el IGBT y el otro, un diodo (Dm) con un tiempo de recuperación mucho menor que el periodo de la señal de control; la función de éste último, es impedir que la corriente de descarga del condensador se devuelva, ya que se desea que cuando la fuente se desconecta del condensador y de la resistencia de carga para almacenar energía en la bobina, se suministre corriente a la carga mediante la descarga del condensador.

Cuando el transistor está en conducción, la inductancia almacena energía para luego suministrarla simultáneamente a la carga y al condensador a otro nivel de voltaje en los intervalos en los que el transistor esté en corte.

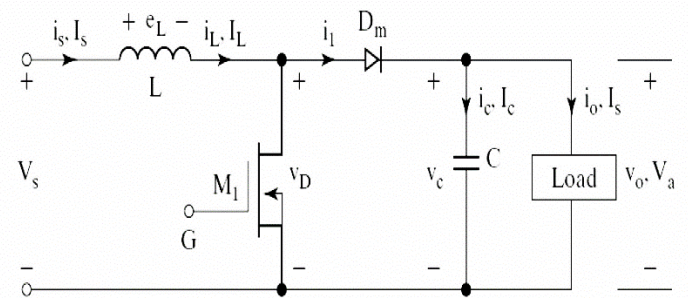


Figura 90 Conversor DC/DC Boost (Elevador)

(http://protorit.blogspot.com/2013/01/power-electronic-converters-boost-regulators.html)

4.1.2.1 Enfoque del Sistema

En la tabla 4.1 se muestran los aspectos más importantes del sistema usado para modelar el pulsador elevador, los parámetros y variables que se presentan en el sistema son:

Entrada. Se toma la señal u que define el tiempo de conducción del transistor y determina el voltaje de salida. En estado estable la relación entre el tiempo de conducción. Salida. Es la señal de voltaje con la que se desea alimentar la carga y corresponde al voltaje en el condensador (v), en régimen permanente este voltaje está dado por:

$$V = \frac{E}{1-D} \tag{4.55}$$

Perturbaciones. Los parámetros que pueden afectar en mayor medida el funcionamiento del circuito y por consiguiente el voltaje de salida, son la fuente de alimentación (E) y la resistencia de carga (R), puede que componentes del sistema real produzcan perturbaciones en menor grado, como el transistor y el diodo, ya que dependiendo de las características de funcionamiento de estos elementos, efectos como la temperatura afecten su funcionamiento.

Tabla 15 Parámetros más importantes del elevador de voltaje Boost.

Parámetros	Modelo
Entradas	Señal de control
Salidas	Tensión
Perturbaciones	Cambios en la fuente de alimentación Cambios en la resistencia de carga
Subsistemas	Control Interruptor Circuito de potencia Carga
Sistemas análogos	Circuitos con autotransformadores Circuitos con fuentes dependientes
Clasificación	El sistema es continuo y determinístico El sistema es dinámico y tiene un modelo matemático no lineal

(Hard D., 2001)

Subsistemas. La señal de entrada al sistema requiere de un módulo capaz de modificar el ancho de pulso, este es el primer subsistema que consiste de un generador de rampa y un comparador de voltaje, donde una entrada de referencia estable el punto donde se produce el flanco descendente de la señal y por consiguiente es capaz de modificar el ciclo de trabajo.

El segundo subsistema consiste en transistor y el diodo, que en la figura 91 se representa como interruptor, el transistor es directamente el elemento controlado, no obstante el diodo aunque es un elemento no controlado, cumple también la función de interruptor, ya que se abre cuando el transistor está en conducción, obligando de esta forma a que el condensador se descargue solamente en la carga. Otro subsistema

corresponde al circuito de potencia, cuyos elementos son la bobina, el condensador, estos elementos poseen una resistencia interna, la de mayor influencia es la correspondiente a la inductancia. El último subsistema consiste en la carga y es el elemento externo que se desea alimentar con el voltaje regulado proveniente del convertidor, la notación de la carga en los esquemas y las ecuaciones es R.

Figura 91 Diagrama de relaciones entre los subsistemas

4.1.2.2 Relaciones Causa Efecto las Variables de Estado y la Entrada

El diagrama causal que relaciona la corriente en la inductancia, el voltaje de salida y el ancho de pulso de la señal de control representada por el ciclo de trabajo, se muestra mediante un diagrama de flujo, donde el circuito de control que actúa sobre el interruptor, genera un ancho de pulso que afecta directamente el voltaje en la carga, por otra parte, el ciclo útil afecta directamente a la corriente y al voltaje por lo que todas las relaciones en el diagrama son directas. Es necesario tener en cuenta para analizar correctamente estas relaciones, que el ciclo útil toma valores entre 0 y 1.

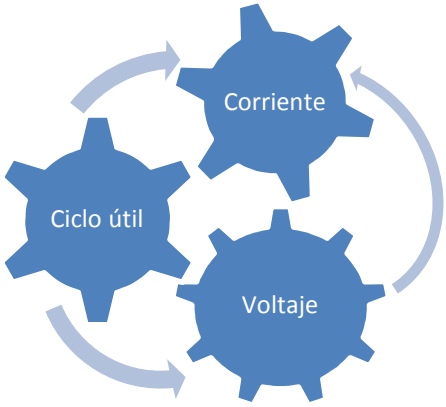


Figura 92 Diagrama causal del pulsador elevador Boost.

4.1.2.3 Modelo Matemático del Convertidor

Considerando el convertidor Boost de la figura 93, donde su voltaje y corriente de salida promediados son Vo e Io, respectivamente y la corriente en el inductor es I_L.

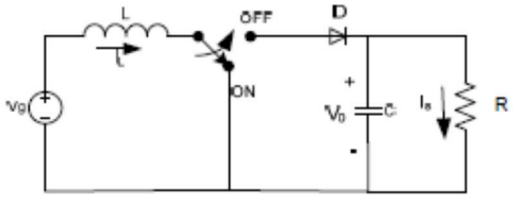


Figura 93 Conversor Boost (Elevador)

(Lenny Andrés Hernández Fonseca, Diego Ricardo Gómez León, Oscar Mauricio Hernández Gómez, 31 Agosto 2011)

El conversor tiene dos estados de funcionamiento, como se observa en la figura 94, de acuerdo a la posición del conmutador: El estado I, conmutador en posición ON, el inductor L se carga con la tensión V_g y en el estado II, el conmutador en OFF, en inductor se carga con la tensión $V_g - V_o$.

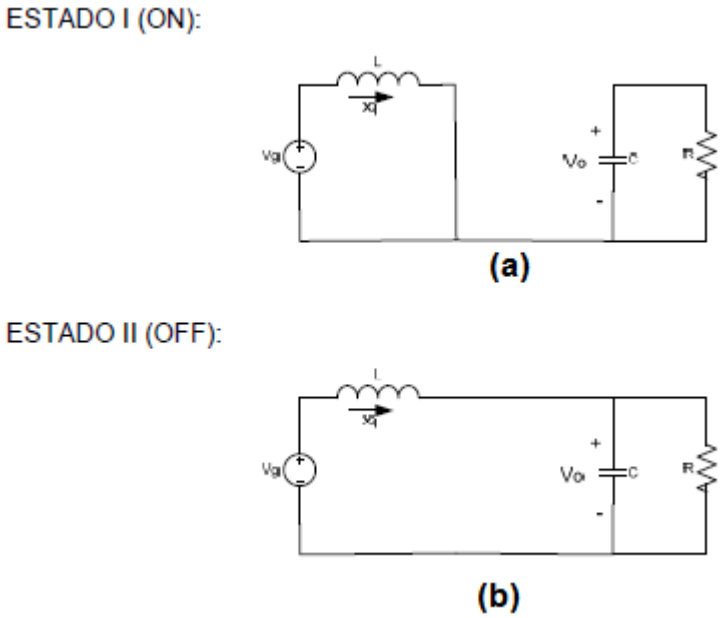


Figura 94. Conversor Boost: (a) En estado ON. (b) En estado OFF

(Lenny Andrés Hernández Fonseca, Diego Ricardo Gómez León, Oscar Mauricio Hernández Gómez, 31 Agosto 2011)

El voltaje medio en el inductor es:

$$\int_0^{Ts} V_L dt = \int_0^{DTs} V_g dt + \int_{DTs}^{Ts} (V_g - V_o) dt \tag{4.56}$$

Si el voltaje medio en el inductor es igual a cero, se obtiene:

$$\int_0^{Ts} V_L dt = V_g DTs - (V_o - V_g)(1 - D)Ts = 0 \tag{4.57}$$

Resolviendo y factorando:

$$V_g - V_o(1 - D) = 0 \tag{4.58}$$

Despejando el voltaje de salida V_o:

$$V_o = \frac{V_g}{1-D} \tag{4.59}$$

Suponiendo que la corriente en el inductor aumenta en forma lineal, de I_1 hasta I_2en el tiempo DTs como se indica en la figura 95, se tiene que:

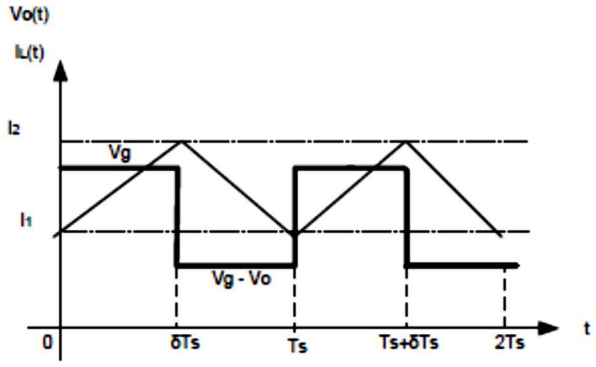


Figura 95 Corriente en el Inductor

(Lenny Andrés Hernández Fonseca, Diego Ricardo Gómez León, Oscar Mauricio Hernández Gómez, 31 Agosto 2011)

$$V_L = V_g = L\frac{di}{dt} = L\frac{I_2 - I_1}{DTs} = L\frac{\Delta I}{DTs} \tag{4.60}$$

Es decir,

$$DTs = L\frac{\Delta I}{V_g} \tag{4.61}$$

La corriente por el inductor baja de forma lineal desde I_2 hasta I_1en el tiempo (1-D)Ts, se tiene:

$$V_L = V_g = L\frac{di}{dt} = -L\frac{I_2 - I_1}{(1-D)Ts} = -L\frac{\Delta I}{(1-D)Ts} \tag{4.62}$$

Es decir:

$$(1-D)Ts = -L\frac{\Delta I}{V_g - V_o} \tag{4.63}$$

Donde $\Delta I = I_2 - I_1$ se le conoce con el nombre de rizado de corriente en el inductor L. De las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$\Delta I = \frac{V_g}{L}DTs = -\frac{V_g - V_o}{L}(1-D)Ts \tag{4.64}$$

La potencia de entrada en el conversor debe ser igual a la potencia de salida, si se asume que el conversor no tiene pérdidas:

$$V_g * I_L = V_o * I_o \tag{4.65}$$

$$V_g * I_L = \frac{V_g}{1-D} * I_o \tag{4.66}$$

$$I_L = \frac{I_o}{1-D} \tag{4.67}$$

En el capacitor se observa que cuando el interruptor está cerrado (posición OFF), éste suministra corriente de carga durante el tiempo DTs. La corriente promedio en el capacitor (Ic) durante este período de tiempo es Ic=Io y el rizado de voltaje en el capacitor es:

$$\Delta Vc = Vc - Vc|_{t=0} = \frac{1}{C}\int_0^{DTs} I_c dt = \frac{1}{C}\int_0^{DTs} I_o dt = \frac{IoDTs}{C} \tag{4.68}$$

$$DTs = \frac{V_g - V_o}{fsV_o} \tag{4.69}$$

Sustituyendo (4.69) en (4.68)

$$\Delta Vc = \frac{Io(V_g - V_o)}{CfsV_o} \tag{4.70}$$

Despejando D de (4.59) y sustituyendo en (4.70)

$$\Delta Vc = \frac{IoD}{Cfs} \tag{4.71}$$

Si en régimen de funcionamiento estacionario se aumenta la carga R, disminuirá la corriente promedio en el inductor, permaneciendo constante el rizado de la corriente y el voltaje de salida, con lo cual llegará el momento en que $I_L = 0$ durante algún instante del intervalo Ts. A esta condición, se le conoce como Modo de Conducción Discontinua (MCD). Otra situación en la que se puede presentar el MCD, es cuando baja el valor de la inductancia, dado que las pendientes de la señal de corriente aumenta, o en aquellos casos en los que el valor de la frecuencia se disminuye, puesto que aumentan los tiempos en los que la corriente sube o baja.

4.1.2.3.1 Consideraciones de Diseño

Los valores de los elementos usados en el circuito para desarrollar las simulaciones y los compensadores, se eligen con el circuito operando en régimen permanente. Las ecuaciones que definen los valores de L y C están definidas por

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \qquad C > \frac{D}{fR(riso)} \tag{4.72}$$

Los parámetros de entrada necesarios para los cálculos son la frecuencia de operación (f) y la resistencia que representa la carga (R); el valor del ciclo de trabajo (D) se determina con el valor de la fuente de alimentación disponible (E) y el voltaje deseado en la carga (V).

La resistencia interna de la bobina está representad por (r), y se tiene en cuenta por ser un elemento que siempre está presente en este tipo de circuitos que desvía el punto de operación debido a las pérdidas de energía que produce.

4.2 DISEÑO DE LOS ELEMENTOS DE LOS CONVERTIDORES DC/DC

El regulador de carga solar tiene las siguientes especificaciones:

Tabla 16 Especificaciones del controlador de carga

Voltaje nominal del sistema	12V
Voltaje máximo de alimentación solar	17.4V
Potencia de alimentación solar nominal	100W
Corriente de cortocircuito	6.54A
Voltaje de circuito abierto	21.6V
Corriente de máxima potencia	5.74A
Voltaje de batería	12V
Capacidad de batería	11Ah
Consumo del controlador	500mA – 1A

(Ficha técnica del panel fotovoltaico Isofotón y Ficha técnica de las baterías CS3 Battery.)

4.2.1 Diseño de los elementos del convertidor electrónico de potencia tipo SEPIC

El convertidor SEPIC (reductor - elevador) puede transformar un voltaje de entrada Vin en un voltaje de salida Vo, ya sea mayor, menor o igual al voltaje de entrada Vin. Esto se logra mediante la conmutación del transistor MOSFET a través de una señal PWM que controla el ciclo de trabajo del transistor, lo que permite generar los distintos rangos del voltaje de salida del convertidor.

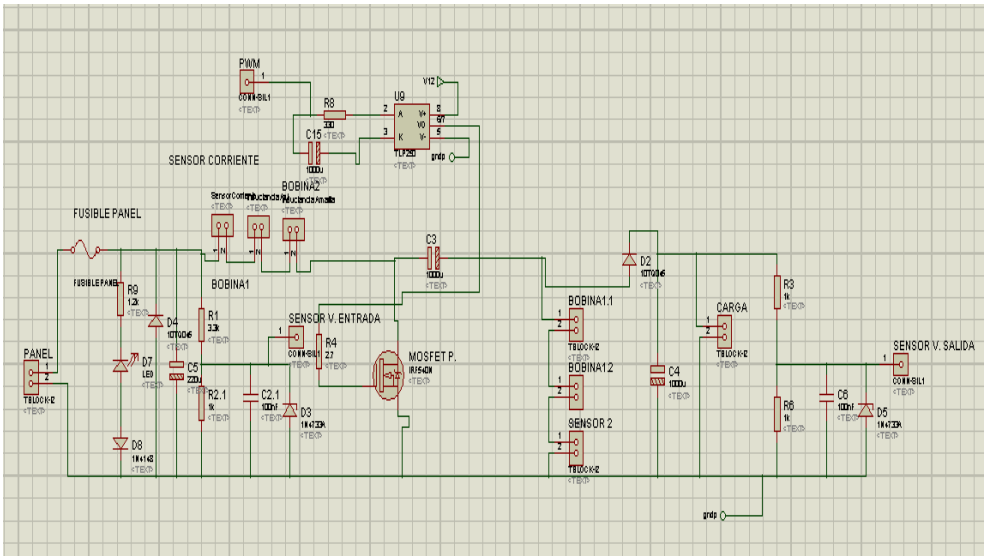


Figura 96 Diseño del convertidor SEPIC.

4.2.1.1 Diseño de los inductores del convertidor

Mediante el análisis del sistema realizado anteriormente, se puede calcular el valor mínimo de los inductores L_1 y L_2, así como también se puede calcular el valor mínimo de las corrientes de rizo en ambos inductores.

Debemos asegurar que el convertidor esté siempre trabajando en el modo de conducción continua (mcc), para eso se debe calcular el valor mínimo o crítico para los dos inductores, la expresión para calcular L_1 está dado por (4.44.)

Tomando en consideración en este caso la resistencia a la salida viene dada por el inversor de voltaje, tenemos que el autoconsumo de corriente es <75mA y el rango de tensión de entrada es de 10 – 16V esto da

$$Req = \frac{V}{i} = \frac{10V}{75mA} = 133\Omega$$

De (4.44) se obtiene el valor mínimo de la inductancia L_1 del convertidor:

$$L_{1crit.} = \frac{(133\Omega)(1-0.5)^2}{2(0.5)(73kHz)} = 455\mu H$$

Ahora para calcular el valor crítico de la inductancia L_2 del convertidor, se utiliza (4.45) y se obtiene el valor crítico de L_2 lo que queda:

$$L_{2crit} = \frac{(133\Omega)(1-0.5)}{2(73kHz)} = 455\mu H$$

A partir de estos valores críticos de las inductancias L_1 y L_2 se calcula el valor mínimo de la corriente de rizo mediante (4.39) y (4.43) las cuales son:

$$\Delta I_{L1} = \frac{Dv_{in}}{L_1 f} = \frac{(0.5)(17.4V)}{(455\mu H)(73kHz)} = 0.26A$$

Mientras que para ΔI_{L2}se tiene:

$$\Delta I_{L2} = \frac{Dv_{in}}{L_2 f} = \frac{(0.5)(17.4V)}{(455\mu H)(73kHz)} = 0.26A$$

Como se puede apreciar se tiene un valor de rizo considerable de 260mA, como se desea tener una corriente de rizo más pequeña se elige un valor de inductancia más grande para L_1 como:

$L_1 = 1mH$

Debido a esto el valor de la corriente de rizo en ambos inductores es la siguiente:

$$\Delta I_{L1} = \frac{(0.5)(17.4V)}{(1mH)(73Khz)} = 0.119A$$

Los inductores se construyeron en un núcleo de ferrita, con cable Litz, el diseño de construcción se explicará más adelante.

4.2.1.2 Diseño de los Capacitores del Convertidor

Los capacitores de convertidor C_1 y C_2 se deben elegir de acuerdo a la corriente I_{Crms} que deben soportar en relación con la potencia de salida. El voltaje nominal para el capacitor C1 debe ser mayor que el voltaje máximo de entrada, los capacitores electrolíticos funcionan bien para todas las aplicaciones donde el valor del capacitor necesario para satisfacer la corriente rms. Podría usarse un capacitor cerámico, pero un valor bajo de capacitancia para C_1 provocaría cambios en el voltaje del capacitor debido a que la corriente es grande.

Tomando en cuenta estas consideraciones se elige un valor de rizo pequeño de v_1 con lo cual el voltaje de rizo es $\Delta Vc_1 = 0.0174V$, y con base en el análisis en estado estable se tiene que el voltaje de rizo en el capacitor C_1 está dado por:

$$\Delta V_{C1} = \frac{DTv_{in}}{RC_1} = \frac{Dv_{in}}{RC_1 f}$$

Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación anterior se tiene:

$$C_1 = \frac{(0.5)(17.4V)}{(133\Omega)(0.0174V)(73kHz)} = 51.4\mu F$$

Puesto que no existe un valor comercial para 51.4µF y como se requiere un rizo pequeño se utiliza un capacitor de 100µF.

Dado que el voltaje de salida del convertidor funcionará como fuente de alimentación para el conversor de voltaje, se requiere que el voltaje contenga el menor rizo posible, por tanto se elige un capacitor de valor grande C2 = 1000µF y nuevamente del análisis en estado estable se calcula el valor del voltaje de rizo:

$$\Delta V_{C2} = \frac{D v_o}{R C_2 f}$$

Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación anterior se tiene:

$$\Delta V_{C2} = \frac{(0.5)(24V)}{(133\Omega)(73kHz)(1000\mu F)} = 0.00123V$$

4.2.1.3 Diseño del Semiconductor del Convertidor

Lo más importante a la hora de seleccionar el semiconductor de potencia de conmutación es la reducción de pérdidas que pueda tener a la hora de conmutar y en las dimensiones de corriente que pueda manejar. Se ha elegido el transistor MOSFET (IRFB52N15D) que posee una baja resistencia de encendido $R_{DS(on)}$. El valor aproximado es 0.032Ω y adicional conduce una corriente de 60A.

Adicionalmente, debido a que el MOSFET necesita un voltaje positivo en su compuerta VGS > 0 para ser conmutado en encendido, se tiene que el voltaje del MOSFET de su compuerta a tierra tiene que ser más grande que el voltaje de entrada (v_{in}), para que el MOSFET entre en estado de conducción. Para esto, se utiliza un dispositivo llamado impulsor de compuerta, donde mediante este dispositivo se consigue un voltaje mayor al voltaje de alimentación, el cual se utiliza para activar la compuerta del MOSFET, además este dispositivo realiza disparos de subida y bajada en tiempos muy cortos en la conmutación del MOSFET. Esto por supuesto reduce las pérdidas de conmutación en el transistor.

Por otra parte, el diodo utilizado en convertidor SEPIC es un diodo ultra rápido (HFA15TB60), el cual ofrece bajas pérdidas en la conmutación debido a que tiene un bajo voltaje de umbral en su polarización y un tiempo de recuperación bastante rápido en voltajes inversos.

4.2.2 Diseño de los elementos del Convertidor Electrónico de Potencia tipo BOOST

El convertidor tipo BOOST es también conocido como el convertidor elevador, debido a que la tensión a la salida obtenida del mismo es mayor a la tensión de entrada. La distribución de los elementos presentes en esta topología se muestra en la siguiente figura

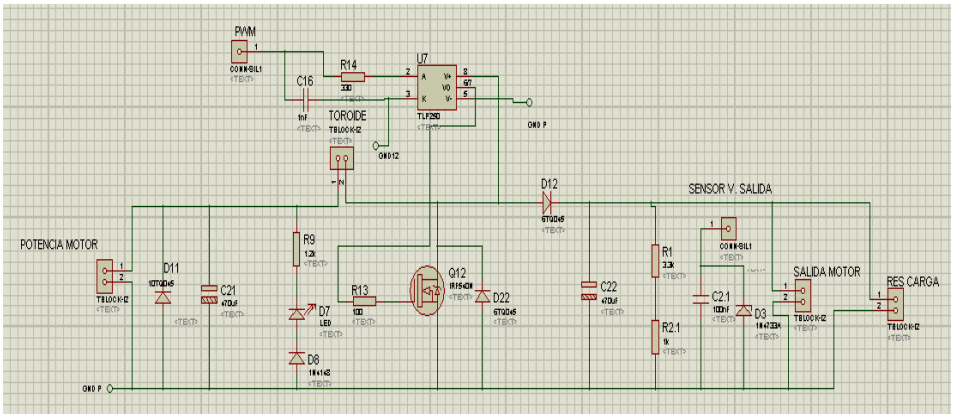


Figura 97 Diseño del convertidor BOOST (Elevador).

4.2.2.1 Diseño de los Inductores del Convertidor

Así primeramente se calculará el valor de ciclo útil que se requiere para cumplir con el voltaje de salida deseado.

$$D = \frac{Vo - Vin}{Vo} = \frac{24 - 12}{24} = 0.5$$

Ahora calculamos el valor del inductor mínimo que debe tener la fuente para garantizar el funcionamiento continuo.

La relación que nos indica que valor de inductancia mínima se debe tener está dado por la fórmula siguiente:

$$L = \frac{V_{in}D}{F_s \Delta I} = \frac{(12V)(0.5)}{(73kHz)(200mA)} = 410\mu H$$

A partir del valor crítico de la inductancia L se calcula el valor mínimo de la corriente de rizo mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta I = \frac{V_{in} * D}{L * f} = \frac{12V * 0.5}{410\mu H * 73kHz} = 0.2\ A$$

El rizo es de 200mA, por eso se decidió aumentar el valor de inductancia a 500µH para reducir este rizo.

4.2.2.2 Diseño de los Capacitores del Convertidor

Por regla de diseño la razón entre el rizado del voltaje de salida y el valor de este voltaje no debe exceder el 5% del valor del voltaje de salida, esto es,

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{0.1}{24} = 4.167 * 10^{-3}$$

El valor de rizo de 0.1 satisface la relación del 5%, ahora teniendo en cuenta el valor del rizado se calcula el valor del capacitor mínimo para cumplir con los requerimientos de salida.

$$C = \frac{I_{omax} * D}{f * \Delta V_o} = \frac{3A * 0.5}{73kHz * 0.1} = 205\mu F$$

Para estas condiciones se escoge un capacitor de 470µF que cumple de manera holgada el requerimiento de diseño, además se debe considerar para un mínimo de 50V, pues ese es el voltaje que estaría dando la fuente con un ciclo de trabajo de 0.5.

4.2.2.3 Diseño de los Semiconductores del Convertidor

Para esta fuente se ha escogido utilizar la tecnología MOSFET de canal N, con un voltaje mínimo (breakdown drain-to-source) de $V_{(BR)}$ DSS=24V, y una corriente de drenado de ID=2A. Se ha elegido el transistor MOSFET (IRFB52N15D) que posee una baja resistencia de encendido $R_{DS(on)}$. El valor aproximado es 0.032Ω y adicional conduce una corriente de 60A.

Por otra parte, el diodo utilizado en convertidor BOOST es un diodo recticador ultra rápido (HFA15TB60), el cual ofrece bajas pérdidas en la conmutación debido a que tiene un bajo voltaje de umbral en su polarización y un tiempo de recuperación bastante rápido en voltajes inversos.

4.3 SELECCIÓN DE LOS SENSORES

4.3.1 Sistema de Medición de Tensión

El siguiente esquemático es parte del diseño de la figura 98 y muestra los elementos utilizados para el sistema de medición de voltaje:

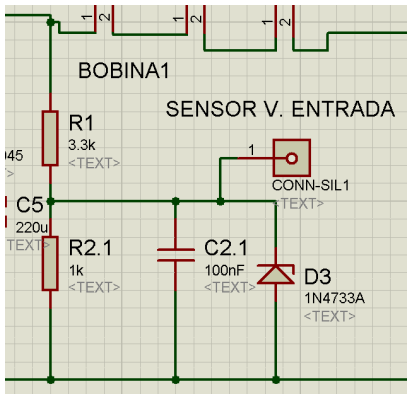


Figura 98 Circuito esquemático del sistema de medición de voltaje.

Para la medición del voltaje en los terminales del panel fotovoltaico, se utiliza un divisor de tensión, el cual consta de dos resistencias que van conectadas directamente a los terminales del panel fotovoltaico para obtener un voltaje proporcional que es entendido por el microcontrolador.

La salida del divisor de tensión se conecta al conversor análogo digital de un microcontrolador ATMEGA1284P, al cual se configura para que trabaje con la referencia interna de 5V, esto para evitar errores debido a referencia de voltaje.

4.3.1.1 Diseño del Divisor de Tensión

Para el diseño de este divisor de voltaje, hay que considerar principalmente que éste debe consumir una corriente muy pequeña, de manera que no disminuya el flujo de corriente del módulo fotovoltaico. Además el divisor de voltaje debe

entregar en su salida un valor máximo de 5V, que es el valor de la referencia interna del conversor A/D.

Dadas las condiciones establecidas y considerando que el sistema debe estar diseñado para paneles que entreguen un voltaje de circuito abierto de aproximadamente 21V en su salida, se establece 21.5V como valor máximo de medida del sensor. También, debido a la condición de corriente los valores de R1 y R2.1 deben ser altos. Entonces para el divisor de tensión de la figura 98:

$$V_{salida} = \frac{R_2}{R_1+R_2} * V_{panel} \tag{4.73}$$

Se debe tener una salida máxima de 5V cuando el panel entregue como máximo 25V, con lo que se tiene:

$$5V = \frac{R_2}{R_1 + R_2} * 21.5V$$

Simplificando:

$$\frac{5}{21.5} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

De donde se tiene que:

$$R_1 = \frac{16.5V}{5} * R_2$$

De donde definimos el valor de $R_2 = 1k\Omega$ lo que nos da $R_1 = 3.3K\Omega$.

Ahora calculamos la corriente máxima que circulará a través del divisor de voltaje:

$$I_{max} = \frac{21.5V}{3.3K\Omega + 1K\Omega} = 5mA$$

Con este dato podemos calcular la potencia de cada resistencia así:

$$P_R = (I_{max})^2 * R$$

Lo que nos da:

$$R_1 = 3.3K\Omega \qquad P_R = 0.0825W$$

$$R_2 = 1K\Omega \qquad P_R = 0.025W$$

Adicional colocamos un capacitor que nos sirve como un filtro para los ruidos y un diodo zener 1N4733 que limita la salida de voltaje máxima en 5.1V.

4.3.2 Sistema de Medición de Corriente

La medición de corriente para un sistema de caracterización es uno de los factores más importantes a tener en cuenta, ya que de sus valores dependen las curvas características del panel solar. Debido a que el proyecto contempla la caracterización de un módulo fotovoltaico de 100W y que el voltaje promedio en el punto de máxima potencia para un panel solar es de 17,5V a condiciones estándar de prueba (STC), se deduce que la corriente máxima que se espera obtener es de alrededor de 6A, sin embargo se pueden presentar radiaciones mayores especialmente a medio día, que generen corrientes un poco mayores a 6A.

4.3.2.1 Selección de Sensor de Corriente

Se decide el uso de un sensor de efecto Hall, este trabaja mediante un campo magnético que fluye en dirección vertical al sensor, y ante la circulación de corriente crea un voltaje de salida, la principal ventaja del uso de este tipo de sensor es que no tiene influencia en el camino de la corriente, ya que no es necesario colocar ningún elemento resistivo, pues la medición es de tipo magnética.

Se escoge el sensor de corriente de efecto Hall ACS715 que es acondicionado para medir corrientes altas.

4.3.2.1.1 Sensor de Corriente Hall ACS715

Este sensor se utiliza para medir corrientes altas, es un integrado de montaje superficial, que se lo encuentra comercialmente en forma de placa (figura 4.19), es

un sensor de efecto Hall que brinda medición precisa de corriente para señales continuas.

El ACS715 da una salida de voltaje que varía linealmente con la corriente sensada.

Sus características principales son:

•Capacidad de escoger el ancho de banda mediante el filtro.

•Tiempo de subida de la salida de 5us.

•Ancho de banda de 80KHz.

•1,5% de error en la salida a 25ºC.

•Resistencia interna de conductor de 1,2mΩ.

•Voltaje de alimentación de 5Vcc.

•Sensibilidad de 133 mV/A.

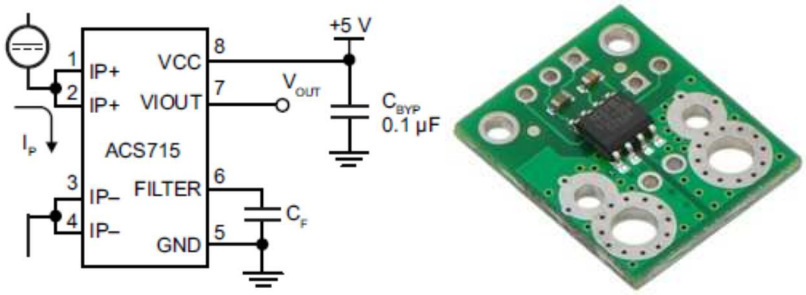


Figura 99 Diagrama del sensor ACS715

(http://www.robotshop.com/ca/fr/capteur-courant-30a-acs715-pololu.html)

4.3.2.1.2 Diseño del Sistema de Medición de Corriente

Para el acondicionamiento de los sensores de corriente es necesario el uso de un dispositivo amplificador, con ganancia variable, para ajustar el voltaje que

entregan dichos elementos, y que el microcontrolador tenga la mayor sensibilidad en la medición de las corrientes que se asignan para cada sensor. (Figura 4.20)

Se elige el amplificador de instrumentación AD620 (figura 4.21), el cual mediante la utilización de una sola resistencia externa puede tener ganancias desde 1 hasta 1000, y entre sus características más importantes se tiene:

•Amplio rango de voltaje de alimentación (2,3V hasta 18V)

•Excelente desempeño en el uso con corriente continua.

•Bajo nivel de ruido.

•Ancho de banda de 120KHz.

•Tiempo de establecimiento de 15ms

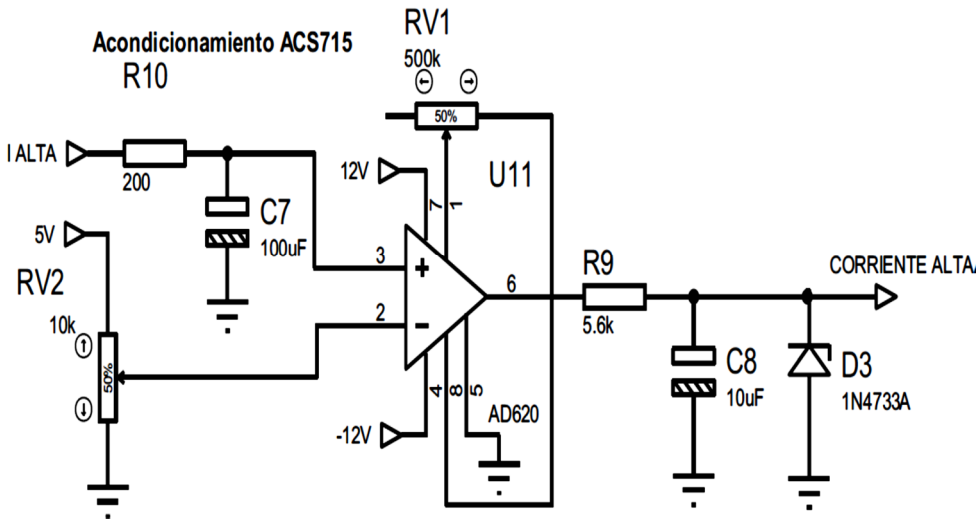


Figura 100 Circuito esquemático del acondicionamiento del sensor de corriente.

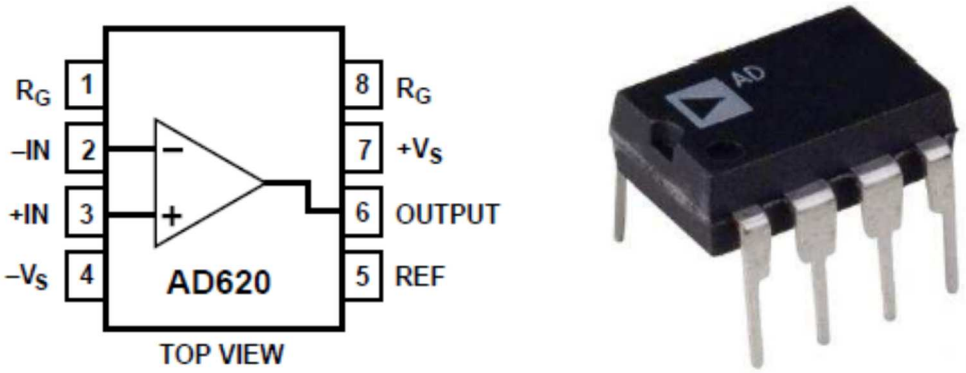


Figura 101 Esquemático del integrado AD620.

(http://www.analog.com/en/specialty-amplifiers/instrumentation-mplifiers/ad620/products/product.html)

Debido a la configuración interna del AD620, la ganancia requerida se puede obtener mediante una resistencia calculada con la siguiente fórmula:

$$R_G = \frac{49.4K\Omega}{G-1}$$

4.3.2.1.3 Acondicionamiento del sensor ACS715

Para este acondicionamiento se toman las mismas pautas que en el ACS712, por lo tanto:

- Voltaje de salida (Vout)= 2,56V
- Sensibilidad ACS715 = 133mV/A
- Corriente máxima a medir (Imax) = 13A

El voltaje de salida del sensor (Vs) será:

$$V_s = 133mV/A * 13A$$

$$V_s = 1.73V$$

La ganancia (G) que debe tener el integrado AD620 será:

$$G = \frac{5V}{1.73V} = 2.89$$

Basándonos en la ecuación de R_G podemos encontrar la resistencia para la ganancia requerida:

$$R_G = \frac{49.4k\Omega}{1.73 - 1} = 67.6k\Omega$$

Se escogió un potenciómetro de precisión de 100kΩ para posibles calibraciones. También se necesita colocar un potenciómetro en la entrada negativa del AD620, el cual sirve para establecer en 0V la salida del amplificador cuando no existe corriente, ya que el ACS715 presenta un offset de voltaje que también es amplificado.

Para tener una señal más limpia y sin ruido de alta frecuencia se colocan dos filtros pasa bajos en el acondicionamiento de este sensor, uno a la entrada y otro en la salida del AD620, los filtros son diseñados para frecuencias de corte cercanas a 10Hz para eliminar cualquier ruido que pudiera presentarse.

4.3.3 Acondicionamiento de la Señal PWM del Microcontrolador

Para llevar a cabo el control lineal del MOSFET, es necesario el diseño de un conversor digital análogo (D/A), para tener una señal de voltaje constante proporcional a la señal PWM que sale del microcontrolador, esto se logra con un filtro pasabajos, finalmente para aislar al pin microcontrolador completamente del MOSFET y aumentar el voltaje de disparo se necesita la utilización de un optoacoplador.

Se ha optado la utilización del integrado TLP250 debido a que el PWM que genera el microcontrolador es de 73KHz y este integrado tiene las características que se explican a continuación:

El TLP250 (figura 102) es un fotoacoplador, que está especializado en el disparo de MOSFETS (Gate Driver), posee un fotodetector de alta velocidad que le

permite trabajar a altas frecuencias. No tiene necesidad de una resistencia de pull-up en su salida a diferencia de los optoacopladores regulares.

- Voltaje de alimentación: 4.5V-20V
- Velocidad de funcionamiento: 2.5MBd garantizados
- Voltaje de aislamiento: 2500Vrms
- Máxima temperatura de óptimo funcionamiento: 85ºC

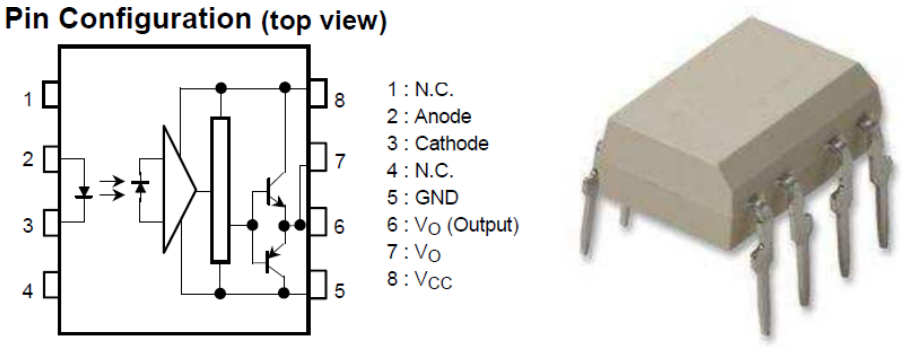


Figura 102 Diagrama del integrado TLP250

(http://www.syntax.com.tw/products/products_c.php?itemid=4359)

Para el ingreso de los pulsos hacia el TLP2200 se necesita dimensionar la resistencia para el emisor, se especifica que el led debe tener una corriente de 10mA, por lo cual:

$$R_{led} = \frac{5V}{10mA} = 500\Omega$$

Se escoge una resistencia de 330Ω.

4.3.4 Construcción de los Inductores

Los inductores para aplicaciones en conversores estáticos, y en otras aplicaciones como radiofrecuencia, no se pueden conseguir fácilmente en el mercado, y si se lo hace se lo debe importar y además su costo es elevado.

La construcción de un inductor no es compleja, y al realizar su diseño se tiene libertad para adaptar y cambiar el valor de la inductancia, si las condiciones del circuito de aplicación lo ameritan.

Se ha optado por la construcción de inductores con núcleos toroidales, por su rápido diseño. La característica principal de los toroides es la de proveer un circuito magnético cerrado que tiende a confinar a su interior el flujo magnético, lo cual facilita su blindaje.

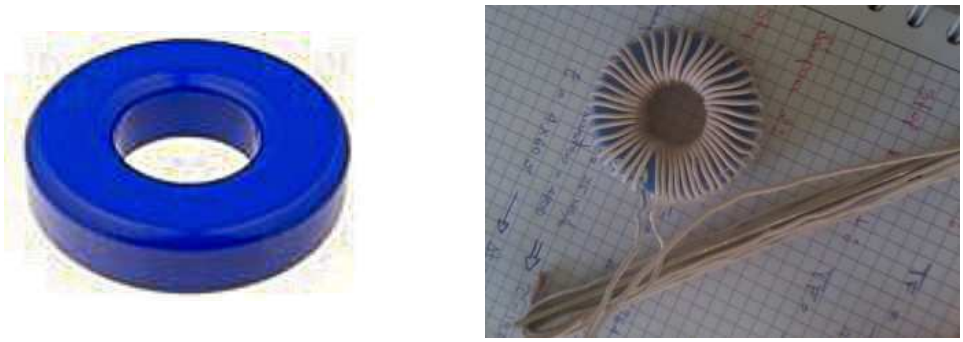


Figura 103 Inductor con núcleo toroidal.

Los fabricantes del material magnético del núcleo toroidal proveen un dato que simplifica los cálculos llamado factor de inductancia (AL).

El valor de AL surge de la ecuación general de la inductancia para un toroide, acomodada para que los cálculos sean más fáciles de realizar manualmente.

El material magnético del núcleo toroidal puede ser de Hierro Pulverizado son designados por “T” o de Ferrita son designados por “FT. Los materiales de

Ferrita están basados en Níquel-Zinc y Manganeso-Zinc. Los de Hierro Pulverizado están basados en Hierros Carbonizados y hierros Reducidos de Hidrógeno. Para identificar a los núcleos toroidales usa la letra que identifica al material, seguido de dos o tres números, que indican el diámetro exterior (OD) del núcleo en centésimas de pulgada, y otras cifras que indican el tipo de mezcla empleado para su fabricación. T-YY-XX o FT-YY-XX.

Para la construcción de las bobinas se utilizarán toroides de Ferrita, debido a que tienen una mayor gama de aplicaciones, mayor factor de calidad (Q) y mayor permeabilidad relativa (u), que los toroides de Hierro Pulverizado, y lo más importante hay algunos tipos de mezcla de materiales, de toroides de Ferrita que tienen aplicaciones en convertidores de potencia y están hechos para trabajar a altas frecuencias, como la de 100KHz que se usa para el sistema.

Se ha escogido un núcleo toroidal de ferrita, modelo Arnold MS-226060-2, el que tiene un diámetro externo de 57.15mm y la permeabilidad nominal 60µ que nos indica que trabaja en un rango de frecuencia desde los 2KHz hasta los 100Khz.

Se requiere fabricar inductores de 500µH, los que permitan una circulación de corriente máxima de 7A.

Para esto debemos analizar que calibre de alambre de cobre se requiere para elaborar los toroides, para eso nos basamos en la norma AWG (American Wire Gauge), se determinó que para la corriente que se va a manejar se requiere un alambre AWG #14 el que soporta la corriente que va atravesar el toroide.

Según las especificaciones del toroide podemos observar que con un alambre AWG #14 se debe dar un número máximo de 39 vueltas en el toroide.

Para el cálculo del número de vueltas que se requiere para fabricar nuestro inductor, se tiene la siguiente ecuación

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}}\ vueltas$$

Donde

A_L = factor de inductancia en mH por 1000 vueltas

N = números de vueltas

L = valor del inductor en nanohenrios.

Reemplazando los valores obtenidos de la hoja de datos, nos da:

$$N = \sqrt{\frac{500000nH}{138nH/N^2}} = 60\ vueltas$$

Analizando debemos dar 60 vueltas de alambre para obtener los 500µH, pero según el fabricante máximo podemos dar 39 vueltas lo que indica que se debe realizar al menos 2 toroides para poder obtener la inductancia requerida.

Se optado por una mejor opción que ha sido la incorporación de alambre tipo Litz.

4.3.4.1 Alambre Litz

Los cables conductores de cobre cumplen la función de conducir la corriente eléctrica, pueden estar formados por una filástica (conjunto formado por varios alambres reunidos en hélice en el mismo sentido), o por varias, con lo que obtenemos la cuerda (varias filásticas reunidas en sentido contrario), el diámetro del hilo nos dará la flexibilidad del conductor.

Las trenzas de cobre son conductores eléctricos entrelazados, que permiten una gran flexibilidad en las condiciones eléctricas.

Los materiales utilizados son:

- Cobre: cobre rojo, cobre libre de oxígeno, cobre estañado, cobre plateado, cobre esmaltado.
- Hierro: hierro galvanizado.
- Aleaciones: aleaciones para cables de compensación o extensión de termopares.
- Otros metales bajo pedido.

La sección teórica, se entiende por la suma de las secciones de los hilos que forman el conductor, no confundir con la sección nominal, ni con la aparente.

Se fabrica secciones desde 0,062 mm2 hasta 1.000 mm2, partiendo desde hilos de 0,04 mm de diámetro, 0,05, 0,07, 0,10, etc.

Las dimensiones están dadas a título orientativo, en las trenzas, las secciones teóricas es la mitad de la aparente.

Para un rendimiento óptimo, las construcciones Litz cubiertos en esta sección se hacen con aislamiento individual hebras. Imán aislamientos cinta de alambre comunes tales como: polivinil formal[1], de poliuretano, de poliuretano / nylon; poliéster soldar, soldar poliéster / nylon, poliéster / poliamida, y poliamida son normalmente utilizado.

El aislamiento exterior y el aislamiento de la conductores de los componentes, en algunos estilos, pueden ser porciones trenzas o de nylon, algodón, fibra de vidrio o de cerámica. Polyester, el calor de poliéster sellado, poliamida y PTFE cinta se envuelve junto con extrusiones de la mayoría de los termoplásticos.

---

[1] Polivinil formal. El grupo R es un H. Se aplica en esmaltado de cables, adhesivos. Principales polímeros comerciales By María Cinta Vincent Vela, Silvia Álvarez Blanco, José Luis Zaragozá Carbonell

También están disponibles como aislamiento exterior si las aplicaciones dictar los requisitos especiales de corte de corriente o protección del medio ambiente.

Típicamente, el ingeniero de diseño que requiere el uso de Litz conoce la frecuencia de funcionamiento y corriente rms requerida para la aplicación. Dado que el principal beneficio de un Litz conductor es la reducción de pérdidas de C.A., la primera consideración en cualquier diseño Litz es la operación frecuencia.

La frecuencia de operación no sólo influye la construcción Litz real, pero también se utiliza para determinar el calibre del cable individual. Radios de resistencia de corriente alterna a corriente directa la resistencia de un alambre redondo sólido aislado (H) en términos de un valor (X) se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17 El valor de X para el alambre de cobre se determina por la siguiente fórmula.

X	**0**	**0.5**	**0.6**	**0.7**	**0.8**	**0.9**	**1.0**
H	1.0000	1.0003	1.0007	1.0012	1.0021	1.0034	1.005

(www.newenglandwire.com, 2005)

$$X = 0.271 D_M \sqrt{F_{MHZ}}$$

Donde:

D_M = Diámetro del alambre en mm

F_{MHZ} = Frecuencia en Megahertz

Algunas aplicaciones:

Aparellajes eléctricos (disyuntores, seccionadores, contactores, pararrayos, centros de transformación, etc.); puestas a tierra; protección de equipos eléctricos; uniones entre barras de distribución y máquinas vibratorias; juntas de dilatación entre

juegos de barras; equipamientos para puestos de soldadura; trenzas antiparasitarias; electrólisis; puestas a masa; cables para escobillas; cables para tiristores, relais y condensadores; trenzas para bobinas móviles de altavoz; cables para hornos de inducción; cables para alimentación de electroimanes; cables para medición de temperaturas (cables de extensión o compensación); cables para bobinas de alta frecuencia (hilos de LlTZ).

Nosotros tuvimos la posibilidad de importar cable Litz con las siguientes características hilo de litz de 100-0,10-1-1 (cien hilos de hilo esmaltado de diámetro 0,10, recubierto el cable con dos capas de poliéster) el diámetro final es de 1,40 mm el cable y la sección de 0,78 mm2, se investigó incansablemente para poder encontrar una norma que nos indique como desarrollar un toroide con este tipo de cable pero no se obtuvo mayor resultado, al ser un cable multihilo, este no puede ser comparado con un número de alambre AWG, con lo cual simplemente se optó por bobinar el toroide en su totalidad y determinar el valor de inductancia que este presentaba.

4.3.4.2 Cálculo del Valor del Inductor Toroidal Litz

Una vez bobinado el toroide, procedimos a realizar un circuito RL que nos permita determinar el valor de inductancia de nuestro toroide.

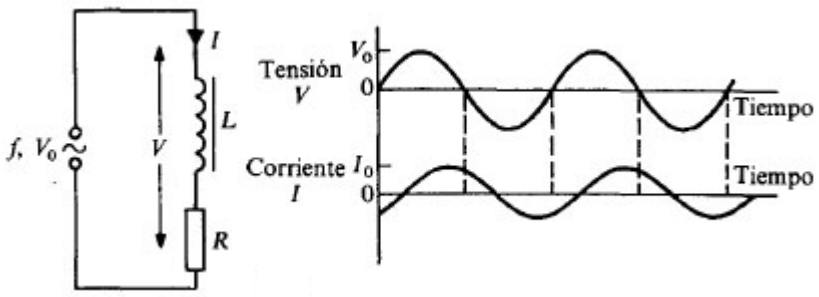


Figura 104 Configuración RL (Resistencia Bobina).

(http://www.sapiensman.com/electrotecnia/corriente_alterna.htm)

Debemos considerar que la bobina tiene una resistencia propia, por lo cual es un caso más real si se considera una bobina en serie con una resistencia (figura 4.23). En este caso el retraso es menor de 90°, dependiendo del factor L/R, y la amplitud la corriente es:

$$I_o \approx \frac{V_o}{\sqrt{R^2+(2\pi fL)^2}} = \frac{V_o}{\sqrt{R^2+{X_L}^2}} \tag{4.74}$$

Ahora nosotros queremos determinar el valor de la inductancia con lo cual hacemos un divisor de voltaje con respecto a la resistencia:

$$I_R = V_R/R \tag{4.75}$$

Reemplazando (4.63) en (4.64) tenemos

$$V_R = \frac{R*V_o}{\sqrt{R^2+(2\pi fL)^2}} \tag{4.76}$$

Despejando el inductor:

$$L = \sqrt{\frac{R^2}{(2\pi f)^2}\left(\frac{{Vo}^2}{{V_R}^2} - 1\right)} \tag{4.77}$$

Ahora tomando los datos entregados del circuito tenemos

Vr = 2.39V
R = 1000kΩ
Vo = 2.45V
f = 73KHz
Reemplazando en (4.66) tenemos:

$$L = \sqrt{\frac{1000^2}{(2\pi(73000Hz))^2}\left(\frac{2.45^2}{2.39V^2} - 1\right)} = 491.584\mu H$$

Lo que nos indica que tenemos un toroide con las características que requerimos.

4.4 ELEMENTOS DE CONTROL

Para implementar el programa de control, que permite el funcionamiento del sistema de caracterización se escoge el microcontrolador ATMEGA1284P de la familia ATMEL, de manera específica por poseer 2 puertos de comunicación serial, ya que es necesario recibir datos desde el sistema de seguimiento solar y tener comunicación constante con la interfaz gráfica. También cuenta con la memoria suficiente para abarcar dicho programa de control.

Las funciones desarrolladas por el microcontrolador se muestran en el siguiente diagrama de bloques:

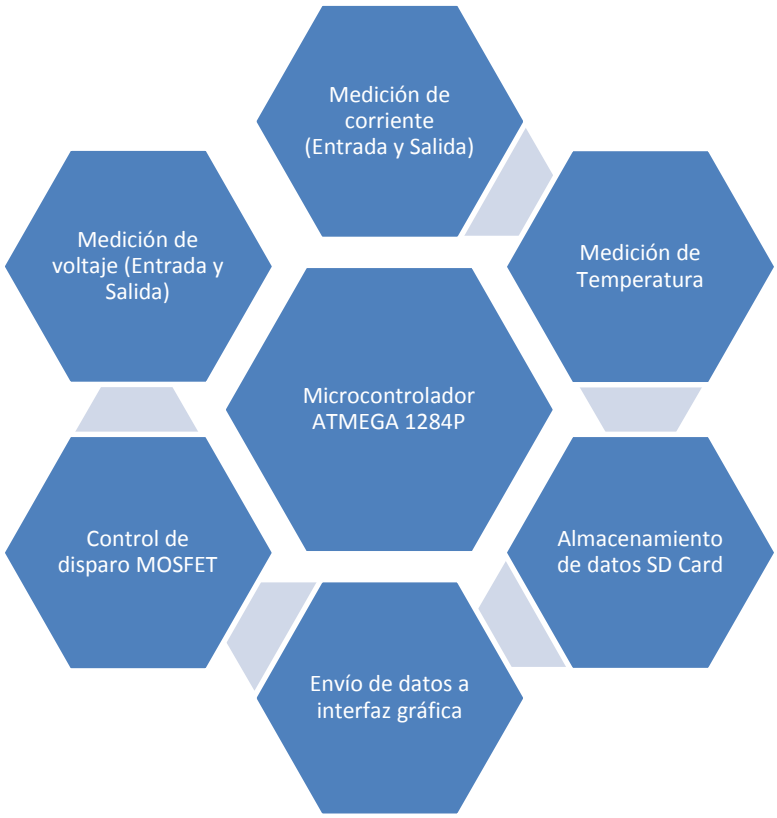


Figura 105 Funciones ejecutadas por el microcontrolador ATMEGA 1284P.

4.4.1 Microcontrolador ATMEGA128AP

El ATMEGA1284P es un microcontrolador CMOS de 8 bits de baja potencia, basada en la arquitectura RISC mejorada de AVR. Permite la ejecución de poderosas instrucciones en un ciclo de reloj, permitiendo a un sistema optimizar el consumo de energía con una alta velocidad de procesamiento.

Entre las características principales se enumera:

- Arquitectura RISC avanzada
- Segmento de memoria no volátil de alta duración.
- 128Kbytes de memoria flash
- Voltajes de operación de 2.7V a 5.5V
- 1 TIMER de 16 bits y 2 TIMER de 8 bits
- 8 canales de conversores D/A de 10 bits
- 2 puertos de comunicación serial
- 6 canales para PWM

El ATMEGA1284P es un microcontrolador CMOS de 8 bits de baja potencia, basada en la arquitectura RISC mejorada de AVR. Permite la ejecución de poderosas instrucciones en un ciclo de reloj, permitiendo a un sistema optimizar el consumo de energía con una alta velocidad de procesamiento.

Entre las características principales se enumera:

- Arquitectura RISC avanzada
- Segmento de memoria no volátil de alta duración.
- 128Kbytes de memoria flash
- Voltajes de operación de 2.7V a 5.5V
- 1 TIMER de 16 bits y 2 TIMER de 8 bits
- 8 canales de conversores D/A de 10 bits

- 2 puertos de comunicación serial
- 6 canales para PWM

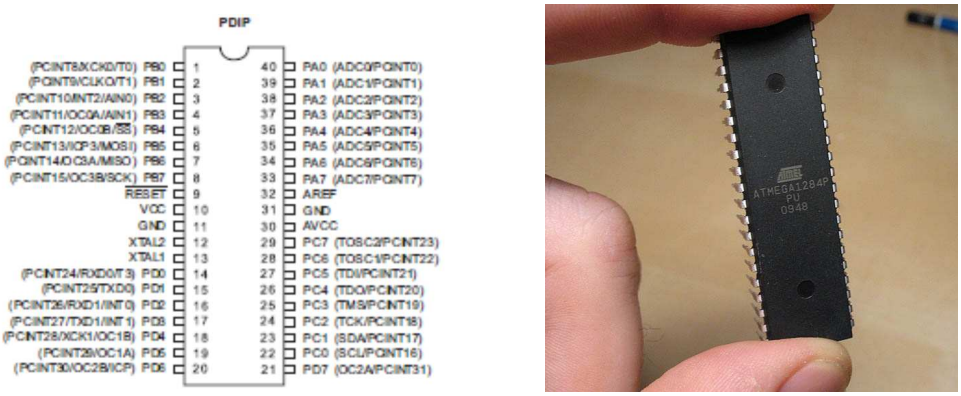


Figura 106 Diagrama del integrado ATMEGA1284P.

(http://uzebox.org/forums/viewtopic.php?f=4&t=641&start=10)

4.4.1.1 Distribución de los Recursos del Microcontrolador ATMEGA1284P.

El siguiente esquemático es parte de la figura 107 y muestra los pines del microcontrolador utilizados para el sistema de caracterización:

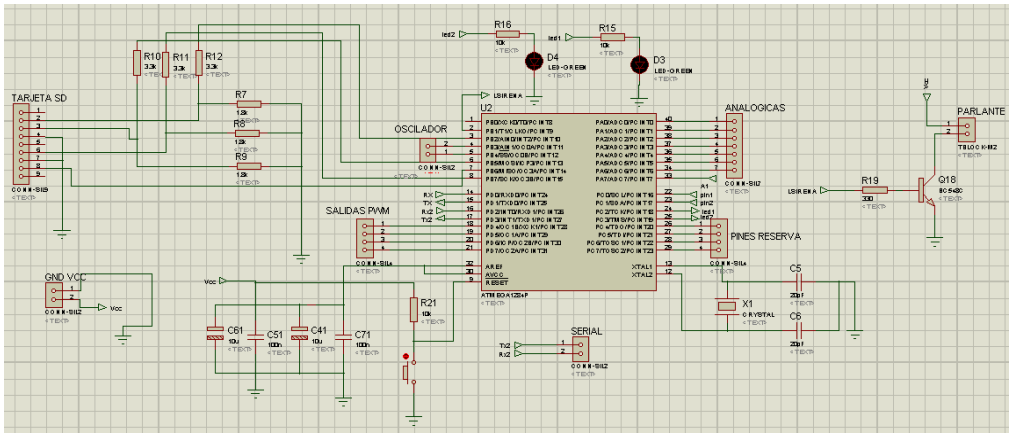


Figura 107 Circuito esquemático del microcontrolador ATMEGA 1284P

A continuación se detalla la función de cada pin del microcontrolador ATMEGA1284P utilizado en el sistema de caracterización:

Tabla 18 Funciones de los pines del microcontrolador ATMEGA 1284P

Pin	Descripción	Función
2	PB1	Activar la sirena de alarma
3	PB2	Activa el Enable de la Sd card
6	PB5 (MOSI)	Pin de la tarjeta Sd card
7	PB6 (MISO)	Pin de la tarjeta Sd card
8	PB7 (SCK)	Pin de la tarjeta Sd card
9	RESET	Reinicializar el programa del microcontrolador
10	VCC	Alimentación del microcontrolador
11	GND	Alimentación del microcontrolador
12	XTAL2	Cristal de 20MHz
13	XTAL1	Cristal de 20MHz
14	PD0 (PCINT24/RXD0)	Recepción de datos desde el ATMEGA1284P.
15	PD1 (PCINT25/TXD0)	Envío de datos hacia el ATMEGA1284P.
19	PD5 (PCINT29/OC1A)	Generación del PWM para control del MOSFET.
24	PC2 (TCK/PCINT18)	Led indicador.
25	PC3 (TMS/PCINT19)	Led indicador.
33	PA7 (ADC7/PCINT7)	Medición de la temperatura ambiente.
36	PA4 (ADC4/PCINT4)	Medición del voltaje en la batería
37	PA3 (ADC3/PCINT3)	Medición de la corriente de salida
38	PA2 (ADC2/PCINT2)	Medición de la corriente de entrada
39	PA1 (ADC1/PCINT1)	Medición del voltaje de salida
40	PA0 (ADC0/PCINT0)	Medición del voltaje de entrada

(Hoja de Datos Atmega 1284P)

4.5 SISTEMAS DE COMUNICACIÓN

El sistema de caracterización cuyo núcleo principal lo constituye el microcontrolador ATMEGA1284P, posee comunicación con otro microcontrolador que es el cerebro del sistema de visualización de las curvas características.

Para realizar la transferencia de datos entre el microcontrolador y el microcontrolador principal se opta por la comunicación serial asíncrona basado en el estándar RS-232. A continuación se detallan ciertas características de este tipo de comunicación.

4.5.1 Comunicación Serial Asíncrona

La comunicación realizada con el puerto serial es una comunicación asíncrona.

Para la sincronización de una comunicación se precisa siempre de un bit adicional a través del cual el emisor y el receptor intercambian la señal del pulso. Pero en la transmisión serial a través de un cable de dos líneas, esto no es posible, ya que ambas están ocupadas por los datos y la tierra. Por este motivo se intercalan antes y después de los datos de información de estado según el protocolo RS-232. Esta información es determinada por el emisor y el receptor al estructurar la conexión mediante la correspondiente programación de sus puertos seriales.

Esta información puede ser la siguiente:

- Bit de inicio.- cuando el receptor detecta el bit de inicio sabe que la transmisión ha comenzado y es a partir de entonces que debe leer la transmisión y entonces debe leer las señales de la línea a distancias concretas de tiempo, en función de la velocidad determinada.

- Bit de parada.- indica la finalización de la transmisión de una palabra de datos. El protocolo de transmisión de datos permite 1, 1.5 y 2 bits de parada.
- Bit de paridad.- con este bit se pueden descubrir errores en la transmisión.

Se puede dar paridad par o impar. En la paridad par, por ejemplo, la palabra de datos a transmitir se completa con el bit de paridad de manera que el número de bits 1 enviados es par.

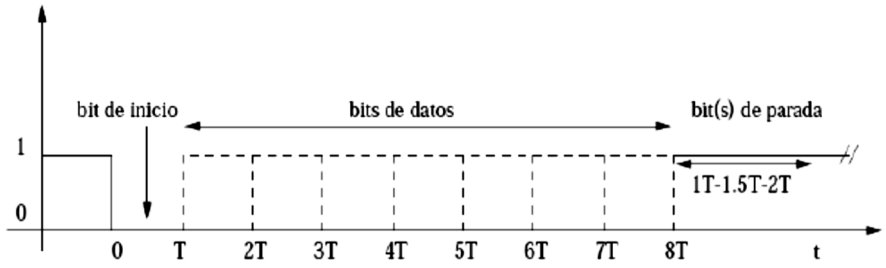


Figura 108 Formato de un carácter en la transmisión asíncrona en serie

(http://www-gris.det.uvigo.es/wiki/pub/Main/PracticasFT/puerto-serie.pdf)

Ante la gran variedad de equipos, sistemas y protocolos que existen surge la necesidad de un acuerdo que permita a los equipos de varios fabricantes comunicarse entre sí.

La EIA (Electronics Industry Association) elaboró la norma RS-232, la cual define la interface mecánica, los pines, las señales y los protocolos que debe cumplir la comunicación serial.

Todas las normas RS-232 cumplen con los siguientes niveles de voltaje:

- Un “1” lógico es un voltaje comprendido entre –5v y –15v en el transmisor y entre -3v y –25v en el receptor.

- Un “0” lógico es un voltaje comprendido entre +5v y +15 v en el trasmisor y entre +3v y +25 v en el receptor.

Este protocolo normalmente utiliza un conector tipo DB-25 de 25 pines, aunque es normal encontrar la versión de 9 pines DB-9, más barato e incluso más extendido para cierto tipo de periféricos (como el ratón serie del PC). En cualquier caso, los PCs no suelen emplear más de 9 pines en el conector DB-25. Las señales con las que trabaja este puerto serial son digitales, de +12V (0 lógico) y -12V (1 lógico), para la entrada y salida de datos, y a la inversa en las señales de control. El estado de reposo en la entrada y salida de datos es -12V. Dependiendo de la velocidad de transmisión empleada, es posible tener cables de hasta 15 metros.

Las más importantes se observan en la siguiente tabla:

Tabla 19 Distribución de Pines del conector DB9.

#	Pin	E/S	Función	Conector DB9
1			Tierra de Chasis	
2	RXD	E	Recibir datos	
3	TXD	S	Transmitir datos	
4	DTR	S	Terminal de datos Listo	
5	GND		Tierra de señal	
6	DSR	E	Equipo de Datos listo	
7	RTS	S	Solicitud de envío	
8	CTS	E	Libre para envío	**Figura 2. 24:** conectores DB9 hembra y macho respectivamente. [29]
9	RI	S	Timbre telefónico	

(http://interface.centraltreasure.com/rs485.html)

Las señales TXD, DTR y RTS son de salida, mientras que RXD, DSR, CTS son de entrada. La tierra de referencia para todas las señales es SG (Tierra de Señal). Finalmente, existen otras señales como RI (Timbre Telefónico).

La velocidad a la que se envían datos en forma serial a través de una línea de comunicación, se denomina velocidad en baudios. La velocidad de baudios es expresada en unidades de bits por segundo. Una conexión RS-232 con velocidad de 1200 baudios tiene la capacidad de enviar 1200 bits de datos en 1 segundo.

El RS-232 puede transmitir los datos en grupos de 5, 6, 7 u 8 bits, a unas velocidades determinadas (normalmente, 9600 bits por segundo o más). Después de la transmisión de los datos, le sigue un bit opcional de paridad (indica si el número de bits transmitidos es par o impar, para detectar fallos), y después 1 o 2 bits de Stop. Normalmente, el protocolo utilizado es 8N1 (que significa, 8 bits de datos, sin paridad y con 1 bit de Stop).

Una vez que ha comenzado la transmisión de un dato, los bits tienen que llegar uno detrás de otro a una velocidad constante y en determinados instantes de tiempo, por eso se dice que el RS-232 es asíncrono. Los pines que portan los datos son RXD y TXD. Las demás se encargan de otros trabajos: DTR indica que el ordenador esta encendido, DSR que el aparato conectado a dicho puerto está encendido, RTS que el ordenador puede recibir datos (porque no está ocupado), CTS que el aparato conectado puede recibir datos, y DCD detecta que existe una comunicación, presencia de datos.

4.5.2 Comunicación con el microcontrolador ATMEGA1284P

Para la comunicación entre microcontroladores se opta por la comunicación serial asíncrona, configurada a 115200 baudios, 8 bits de datos, 1 bit de parada, sin paridad.

Esta comunicación se la realiza mediante una subrutina de interrupción por recepción de dato serial (URXC0), a través del primer puerto de comunicaciones del

microcontrolador ATMEGA1284P, en la que se recibe un paquete datos provenientes del microcontrolador ATMEGA1284P, el cual contiene los valores de voltaje de entrada, voltaje de salida, corriente de entrada, corriente de salida y temperatura.

4.6 SENSOR DE TEMPERATURA

Para el diseño del sensor de temperatura se utilizó como elemento principal un transductor de temperatura LM35, su circuito de polarización y su respectivo acondicionamiento de señal.

El transductor de temperatura de precisión LM35 entrega una salida de voltaje linealmente proporcional a la temperatura en grados centígrados.

4.6.1 Características del Sensor LM35

- Factor de escala 10.0mV / °C lineales
- Precisión ±0.5°C a +25°C
- Rango -55°C a 150°C
- Voltaje de alimentación de 4 a 30Vcc
- Corriente de fuga 60(A (0.08°C de calor propio)

En la Figura 109 se puede apreciar la distribución de pines del transductor de temperatura.

Figura 109 Sensor de temperatura LM35.

(Hoja de datos del LM35)

4.7 Almacenamiento de datos en la Tarjeta SD Card

Los datos obtenidos tanto de voltaje, de corriente, de temperatura, nos permiten obtener las curvas características de funcionamiento del panel solar y de las baterías, estos se presentan gráficamente en nuestra interfaz gráfica, pero adicional necesitan ser almacenadas para poder ser estudiados estos valores obtenidos, por eso se ha optado por incorporar una tarjeta SD card que trabaja como un sistema de almacenamiento de datos.

4.7.1.1 Tarjeta SD (Secure Digital)

Las Tarjetas SD o memorias SD son tarjetas de memoria flash. Estas tarjetas tienen unas dimensiones de 32 mm x 24 mm x 2.1mm. Su delgado y compacto diseño promueve la facilidad de manejo y flexibilidad para moverse entre los diferentes dispositivos multimedia.

Figura 110 Tarjeta de memoria SD

(http://www.compuson.com/memorias-usb-flash-sd/)

Las memorias SD funcionan a diversas velocidades según la aplicación para las que son requeridas. Algunas cámaras fotográficas digitales requieren tarjetas de alta velocidad para poder grabar vídeo con fluidez o para capturar múltiples fotografías en una sucesión rápida.

Este tipo de memorias se han popularizado por los medios digitales, como son: cámaras, filmadoras, dispositivos multimedia, reproductores de MP3, PDA que poseen la ranura para memorias SD, inclusive existe variantes de memorias SD, como las memorias mini SD y la micro SD que son muy utilizadas en teléfonos móviles.

4.7.2 Conexiones y Señales

El protocolo de acceso para una tarjeta SD es el SPI este protocolo es muy común, se puede implementar mediante cualquier controlador (ordenador personal, microcontrolador) que disponga de un canal SPI.

Figura 111 Tarjeta SD y la numeración de pines.

(http://www.tolaemon.com/docs/mmcard.htm)

4.7.2.1 Bus SPI

SPI es un bus de tres líneas sobre el cual se transmiten paquetes de información de 8 bits. Cada una de estas tres líneas porta la información entre los diferentes dispositivos conectados al bus. Cada dispositivo conectado al bus puede actuar como transmisor y receptor al mismo tiempo, por lo que este tipo de comunicación serial es full dúplex.

Dos de estas líneas trasfieren los datos (una en cada dirección) y la tercer línea es la del reloj. Algunos dispositivos solo pueden ser transmisores y otros solo receptores, generalmente un dispositivo que tramite datos también puede recibir.

Todas las líneas del bus transmiten la información sobre una sola dirección.

- La señal sobre la línea de reloj (SCLK) es generada por el maestro y sincroniza la transferencia de datos.
- La línea MOSI (Master Out Slave In) transporta los datos del maestro hacia el esclavo.
- La línea MISO (Master In Slave Out) transporta los datos del esclavo hacia el maestro.

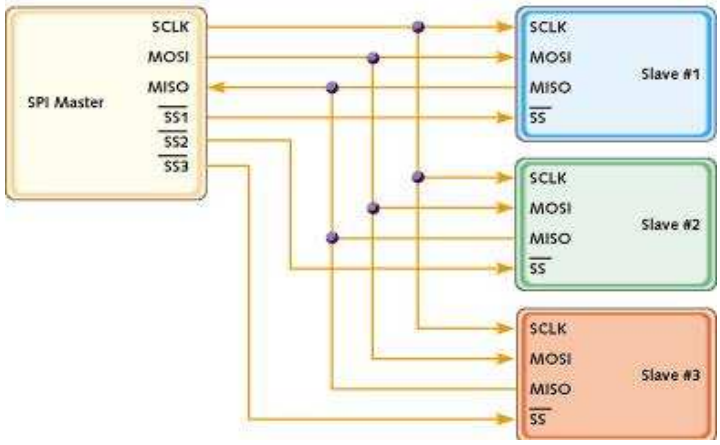


Figura 112 Transmisión SPI, modelo Master-Slave.

(http://www.ni.com/white-paper/9119/en/)

Cada esclavo es seleccionado por un nivel lógico bajo (‘0’L) a través de la línea (CS = Chip Select o SS Slave Select). Los datos sobre este bus pueden ser transmitidos a una razón de casi cero bits /segundo hasta 1 Mbits/ segundo. Los datos son transferidos en bloques de 8 bits, en donde el bit más significativo (MSB) se transmite primero.

En la lectura, el controlador envía el comando de petición de lectura a la tarjeta y esta le envía la respuesta de confirmación seguida del bloque de datos con la información contenida a partir de la dirección solicitada.

En la escritura el proceso es parecido, el controlador indica a la tarjeta mediante el comando de escritura que quiere escribir información en una determinada dirección, esta le responde indicando que esta lista y a continuación el controlador envía el bloque de datos a escribir. Las operaciones que no requieren intercambio de datos funcionan de igual forma pero sin usar bloques de datos.

4.8 Programa de Control

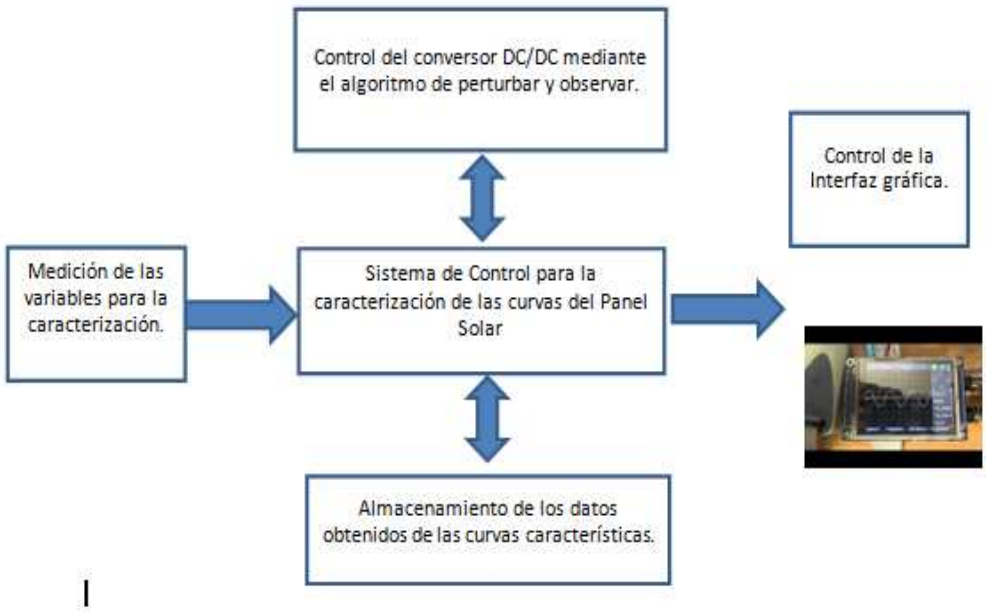


Figura 113 Esquema de Control

El programa de control es el encargado de capturar, almacenar y procesar los datos obtenidos del panel solar, que serán representados en formas de curvas por el sistema de interfaz gráfica y almacenada en una tarjeta SD.

4.8.1 Método de Control

El objetivo principal del sistema es la obtención de las curvas características, lo primero que hacemos es enviar una señal fija de pwm al sistema de conversión DC/DC para que este se pueda activar y estabilizar, procedemos a capturar los datos que son tomados por nuestros sensores de corriente y voltaje, estos datos son previamente filtrados utilizando una muestra de datos de la que sacamos un dato promedio, en general hacemos este proceso varias veces para tener un conjunto de datos promedio, después eliminamos los datos que tengan una diferencia superior al 5% y obtenemos un dato real, utilizamos este método ya que nuestro sistema fotovoltaico tiene una variación muy lenta, adicional nuestra adquisición de datos es muy rápida y todo este proceso se lo realiza en un tiempo estimado de 1s, donde no tendremos problema alguno en visualizar exactamente lo que ocurre en nuestro sistema.

Una vez obtenido los datos tanto de voltaje como de corriente, en la entrada y salida de nuestro sistema, estos son enviados al control de la interfaz gráfica, donde son procesados para ser presentados en la pantalla en forma de curvas, estas curvas son el reflejo de lo que sucede a la entrada del sistema donde tenemos el panel fotovoltaico y a la salida donde tenemos nuestra carga. A su vez los datos que son enviados, también será almacenados en un histórico en nuestra tarjeta Sd, no se almacenarán los datos a cada instante de tiempo, ya que sería innecesario hacer esto ya que el sistema no varía tan repentinamente, considerando que la temperatura en el panel demora en disminuir y la captación de luz solar de igual manera.

Estos datos permiten analizar el comportamiento del panel fotovoltaico, del consumo y de las baterías, ya que el sistema completo realiza esa función específica de capturar energía y de almacenarla. Las curvas son presentadas en función del

tiempo, ya que es lo que nos interesa conocer, como se comporta nuestra fuente de energía en un día normal.

4.8.1.1 Programa para el Controlador

Para este proyecto al programa para el microcontrolador de este proyecto se lo llamará firmware. El firmware es el bloque de instrucciones de programa, o software programado, para propósitos específicos, grabado en la memoria flash del microcontrolador, y que contiene la información, configuración y el sistema básico que permite controlar los circuitos electrónicos del prototipo.

Se ha optado por el entorno BASCOM-AVR para desarrollar el sistema de supervisión de las curvas características. El programa BASCOM-AVR, desarrollado por la empresa MCS Electronics, permite la edición de programas en lenguaje BASIC, realiza la compilación para obtener código de máquina para microcontroladores Atmel-AVR, posibilita la depuración de los programas, dispone de funciones de simulación, dispone de librerías que simplifican el manejo de los recursos del microcontrolador y permite enviar el código generado al microcontrolador del sistema Integrado.

4.8.1.2 Descripción del Programa Principal

El diagrama de flujo del programa principal se muestra en la figura 114 donde se resume la estructura en que está desarrollado el programa de supervisión de las curvas características.

Según el diagrama del Programa Principal se tiene los siguientes procesos:

1. Antes de la Subrutina de Monitoreo de Parámetros del Sistema se configuran los recursos del microcontrolador utilizados, lo que incluye la configuración de los pines de los periféricos como entradas / salidas; la declaración de las variables y subrutinas usadas; la configuración del TIMER1, del conversor A/D; declaración y habilitación de las interrupciones utilizadas; y la inicialización de las variables.
2. Se digitaliza las señales monitoreadas de voltaje y corriente del panel FV, así como del voltaje en el lado de la batería, mediante los canales del conversor A/D que dispone el microcontrolador ATMEGA 1284P. Pero para la buena adquisición de las señales monitoreadas se implementa un filtro digital para eliminar el ruido en las señales. El filtrado se logra promediando un conjunto de muestras tomadas. El muestreo se realiza en cuestión de milisegundos.

3. Se envía los datos de manera ordenada, para eso primero procedemos a enviar un dato referencial, que nos indica que vamos a mandar el dato de voltaje o de corriente, este dato tipo carnada permite al controlador de la interfaz gráfica procesar adecuadamente los datos y en correcto orden, seguido de la carnada va el dato real y siguiente el valor de “enter” (carrie), que permite al sistema saber que es el fin de los datos.

4. Aplicamos el control del sistema basados en el algoritmo MPPT, se muestra el proceso en el diagrama de flujo (figura 4.34), el control se realiza mediante el aumento o disminución del ciclo de trabajo (δ) de la señal de PWM generada, esta varía dependiendo los parámetros que se obtienen del sensamiento de las variables de la corriente y voltaje, que nos entregarán los valores de potencia que nos entrega nuestra fuente renovable.

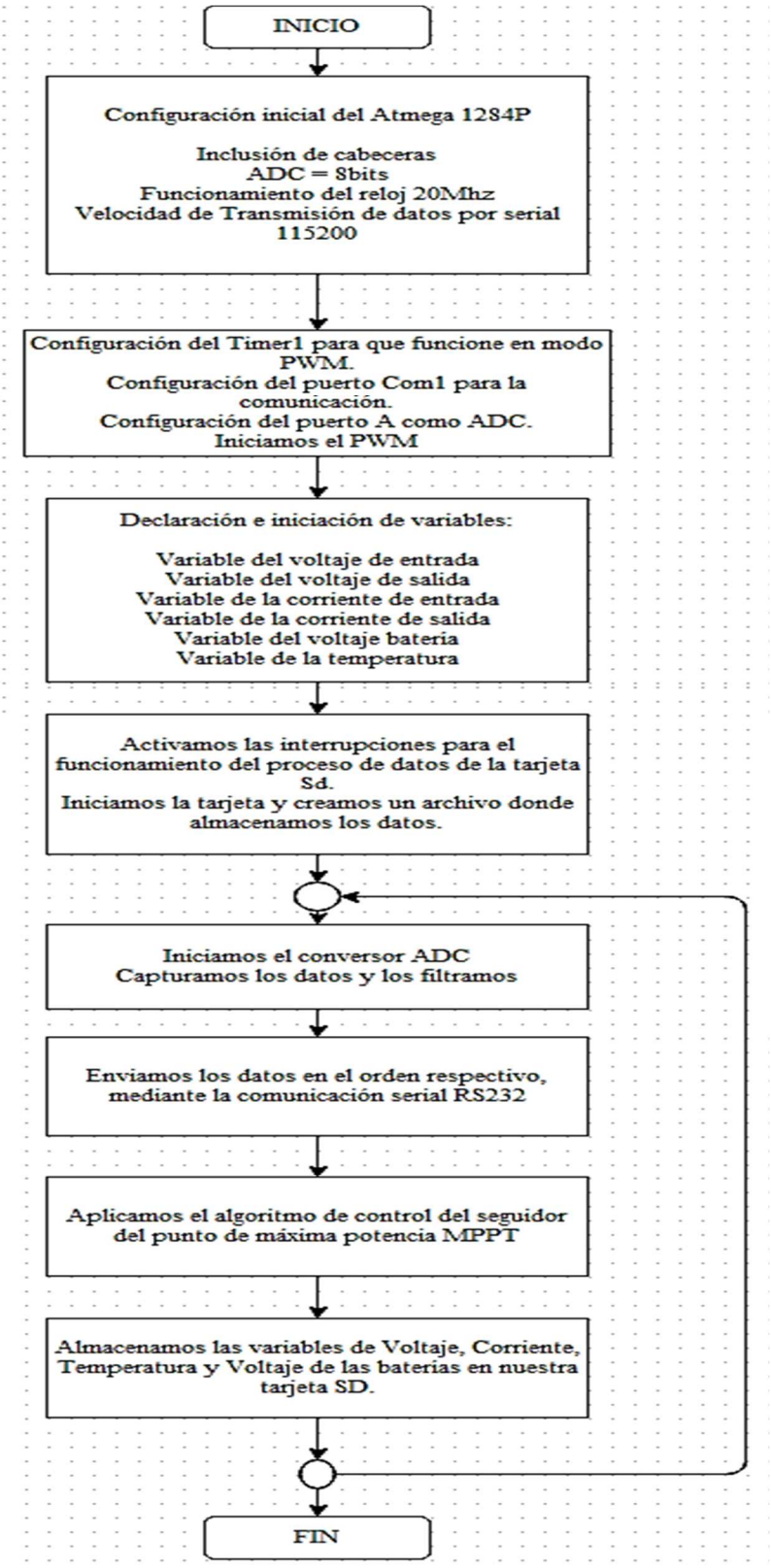


Figura 114 Diagrama de flujo del sistema de monitorización y control del panel fotovoltaico.

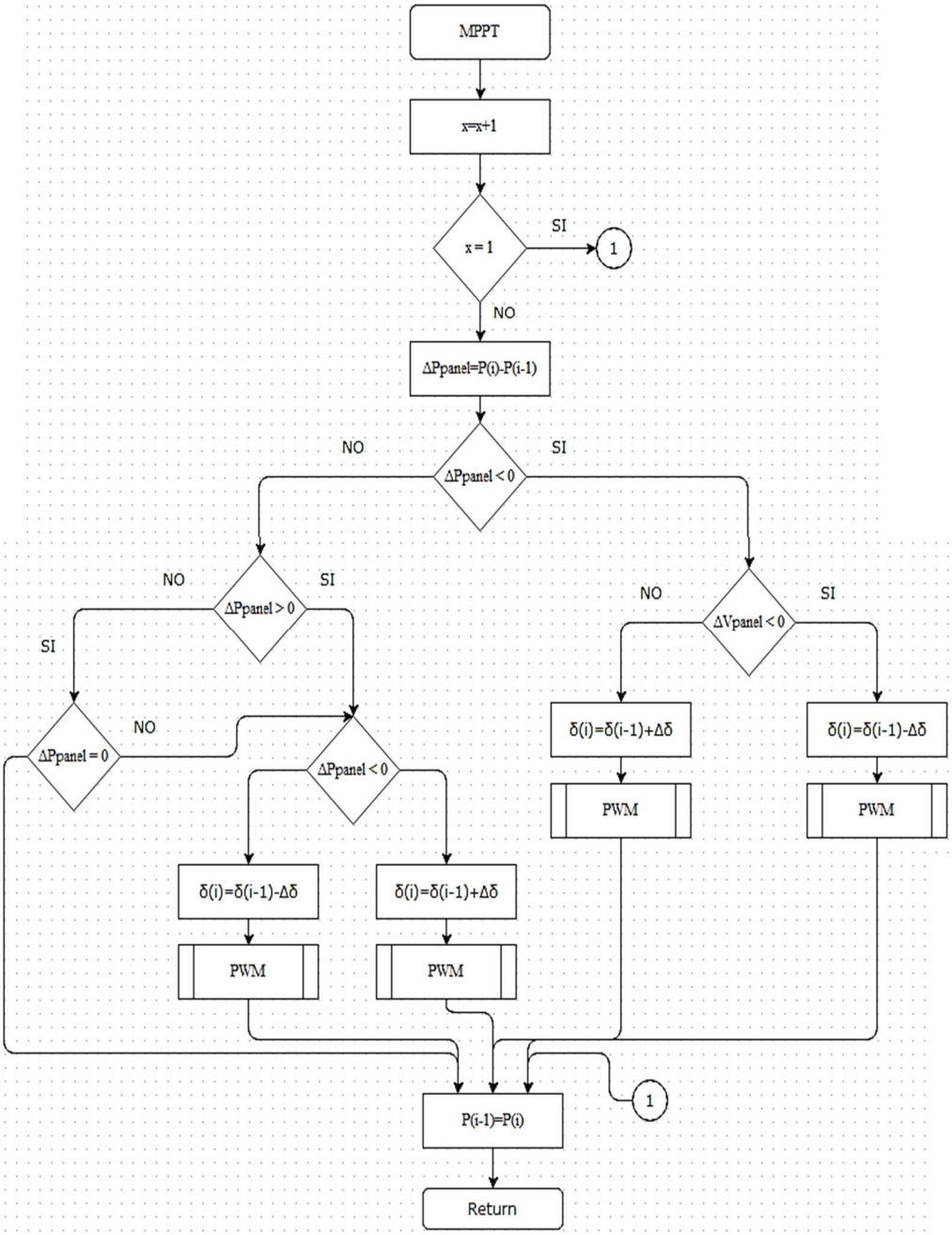


Figura 115 Esquema del algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia MPPT.

4.9 Sistema de visualización de las Curvas Características

El sistema que comanda la visualización de las curvas características, está controlado por un microcontrolador AVR 1284P, el que se encarga de capturar los datos pertenecientes al sistema del panel solar, estos son procesados y presentados en una pantalla TFT de 3.2”, la que tiene un pequeño menú de opciones en donde se elige que proceso se requiere visualizar. La estructura general del sistema se resume en el siguiente diagrama de bloques:

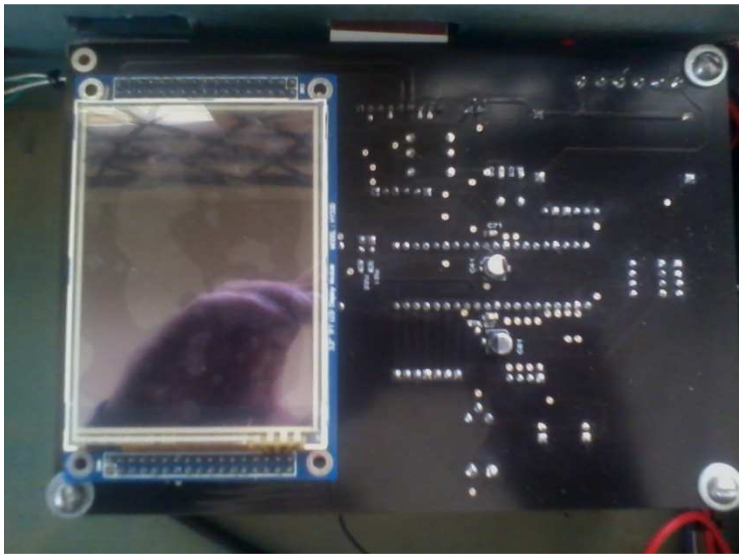


Figura 116 Interfaz gráfica con pantalla TFT HY32D.

4.9.1 Pantalla TFT HY32D

La placa del LCD no tiene muchos secretos, a parte del propio display de cristal líquido, distinguimos un diminuto integrado asociado al mismo y una serie de contactos sin soldar denominados CNB que son una continuación de los contactos, pin a pin del conector de entrada CNA que une esta placa a la principal.

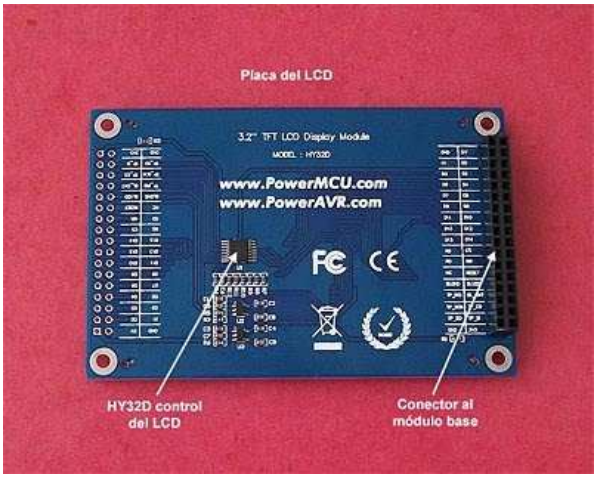


Figura 117 TFT HY32D

La pantalla en cuestión es una LCD-TFT HY32D de 3,2", con una resolución de 320 x 240 pixels, capaz de representar 262.144 colores y con sensibilidad táctil por el procedimiento resistivo. El chip de control es el SSD1289, de Solomon Systech, que integra el circuito convertidor de potencia DC-DC, el driver de entrada y salida y la memoria RAM de 172 KBytes.

A la vez, en el reverso de la placa dispone de un integrado TSC2046 encargado de procesar la señal de la pantalla sensible a la presión. La pantalla puede representar textos, cifras y gráficos creados a partir del programa interno del microcontrolador, con la ventaja de que son interactivos y puedan manejarse los programas con un simple punzón de su parte táctil. Para esta placa existe además un

entorno gráfico denominado uCos-II, de la empresa Micrium, que crea una apariencia semejante al primer Windows, con un teclado virtual y ventanas desplazables que poseen botones y cuadros de selección.

4.10 Sistema de Seguimiento Solar

Uno de los objetivos del proyecto fue la construcción de un seguidor solar, para esto se debe implementar un sistema que permita unificar la parte mecánica con el sistema de control electrónico. Se optó por el diseño de un sistema automático y manual. La estructura general del sistema se resume en el siguiente diagrama de bloques:

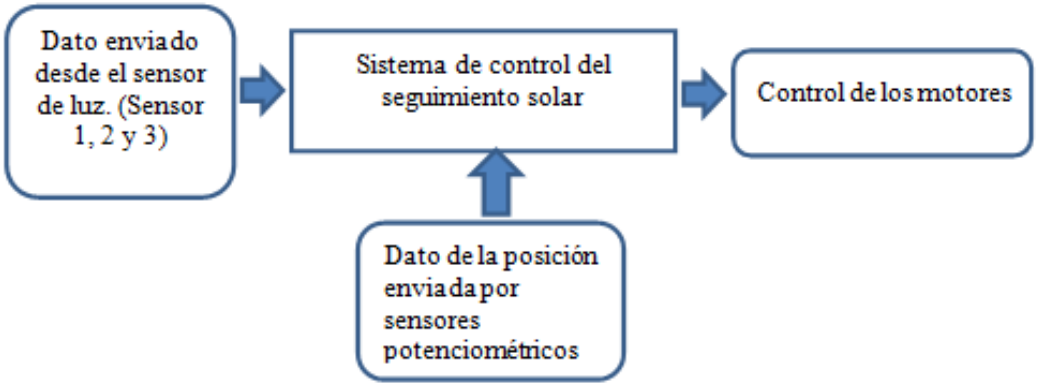


Figura 118 Esquema del sistema de seguimiento solar.

4.10.1 Sensores de Luz Ambiental

Sensores ópticos de luz a voltaje infrarrojos, cada combinación de un fotodiodo y un amplificador de transimpedancia (resistencia de realimentación = 16MΩ, 8 MΩ, y 2,8 MΩ, respectivamente) en un IC monolítico único. Voltaje de salida es directamente proporcional a la intensidad de la luz (irradiación) sobre el fotodiodo.

Estos dispositivos han mejorado la estabilidad del amplificador offset de voltaje y bajo consumo de energía y se suministran en un paquete de plástico, 3 derivaciones con un filtro de corte de luz visible integral y objetivo.

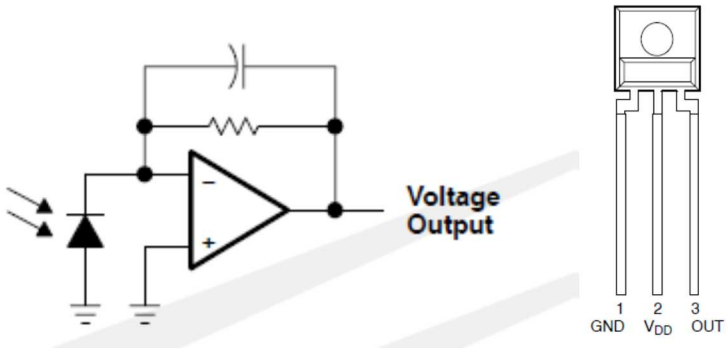


Figura 119 Sensor de luz ambiental TSL261R

(Hoja de datos Sensor TSL261R)

Entre sus características están:

Voltaje de referencia = 5V

Corriente de salida = 10mA

Temperatura de operación = -25°C a 85°C

El sistema está incorporado en la estructura, se han incorporado 3 sensores los cuales están ubicados de tal manera que forman un triángulo de señal, esto se realiza para monitorear en estos puntos la variación de radiación solar, estas variaciones son procesadas mediante un sistema de control que corrige esta variación haciendo que la estructura se mueva en la dirección en donde la diferencia está presente, esto se realiza para corregir la posición de la estructura manteniéndola de manera perpendicular al sol en el transcurso del día.

Se dispone de un sistema de seguimiento manual que es controlador por un joystick (figura 119), este envía una señal al control para que la estructura se pueda

mover en el sentido que se le indica, cuando se deja de mover el joystick la estructura se detiene, esto servirá para tener un posicionamiento establecido por el usuario, como la selección se la realiza mediante un interruptor, cuando se retira el sistema manual retorna al sistema automático, es decir el sistema buscará la posición más adecuada para encontrarse perpendicular al sol.

Figura 120 Sistema de control manual joystick.

(http://es.dhgate.com/product/keyes-fr4-ky-023-joystick-breakout-module/162254702.html)

4.10.1.1 Sistema de Filtración de Luz

Como podemos observar la respuesta a la irradiancia del sensor de luz está desarrollado con λ (longitud de onda) de 940nm, para eso debemos tomar en consideración que la unidad de medida de la luz (lumen) tiene un valor de conversión a 555nm, basándonos en la tabla 26.

Para entender el funcionamiento de un filtro, tenemos que entender básicamente que es la luz y cómo se comporta desde un punto de vista meramente físico. Existen varias definiciones y teorías de definición de luz. La teoría clásica dice que la luz es una “clase” de energía electromagnética de una determinada longitud de onda.

Las ondas se clasifican por su longitud de onda. A las distintas ondas se les agrupa en la figura 121 conocido como espectro electromagnético.

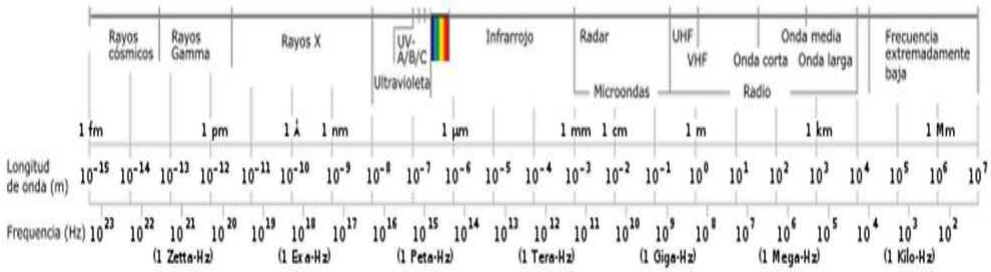


Figura 121 Espectro Electromagnético

(Jaume, Cuarta Edición)

Desde los rayos cósmicos con ultra altas longitudes de onda, pasando por Rayos Gamma, Rayos X, ondas de Radio hasta las ondas de frecuencia extremadamente baja, nos golpean a diario. El espectro de longitudes de onda que va desde los 380nanometro (nm) hasta los 750nm es la porción del espectro electromagnético que se conoce como “espectro visible del campo electromagnético” o más comúnmente llamado como luz visible.

El flujo radiante es una medida de la potencia radiométrica. Flujo, expresada en vatios, es una medida de la tasa de flujo de energía, en julios por segundo. Dado que la energía del fotón es inversamente proporcional a la longitud de onda, los fotones ultravioletas son más poderosas que visible o infrarroja. El flujo luminoso es una medida de la potencia de la luz visible. Flujo fotópica, expresado en lúmenes, se pondera para que coincida con la capacidad de respuesta del ojo humano, que es más sensible a amarillo-verde. Flujo escotópica se pondera a la sensibilidad del ojo humano en el estado adaptado a la oscuridad.

Tabla 20 Flujo radiante

λ (nm)	Photopic Luminous Efficiency	Photopic lm/W Convertion	Scotopic Luminous Efficiency	Scotopic lm/W Conversion
380	0.000039	0.027	0.000589	1.001
390	0.000120	0.082	0.002209	3.755
400	0.000396	0.270	0.009290	15.793
410	0.001210	0.826	0.034840	59.228
420	0.040000	2.732	0.096600	164.220
430	0.011600	7.923	0.199800	339.660
440	0.023000	15.709	0.328100	557.770
450	0.038000	25.954	0.455000	773.500
460	0.060000	40.980	0.567000	963.900
470	0.090980	62.139	0.676000	1149.200
480	0.139020	94.951	0.793000	1348.100
490	0.208020	142.078	0.904000	1536.800
500	0.323000	220.609	0.982000	1669.400
507	0.444310	303.464	1.000000	1700.000
510	0.503000	343.549	0.997000	1694.900
520	0.710000	484.930	0.935000	1589.500
530	0.862000	588.746	0.811000	1378.700
540	0.954000	651.582	0.650000	1105.000
550	0.994950	679.551	0.481000	817.700
555	1.000000	683.000	0.402000	683.000
560	0.995000	679.585	0.328800	558.960

(http://www.intl-lighttech.com/support/measurement-geometries-chapter-7-light-measurement-tutorial)

Tabla 21 Flujo Radiante Continuación

λ (nm)	Photopic Luminous Efficiency	Photopic lm/W Convertion	Scotopic Luminous Efficiency	Scotopic lm/W Conversion
570	0.952000	650.216	0.207600	352.920
580	0.870000	594.210	0.121200	206.040
590	0.757000	517.031	0.065500	111.350
600	0.631000	430.973	0.033150	56.355
610	0.503000	343.549	0.015930	27.081
620	0.381000	260.223	0.007370	12.529
630	0.265000	180.995	0.003335	5.670
640	0.175000	119.525	0.001497	2.545
650	0.107000	73.081	0.000677	1.151
660	0.061000	41.663	0.000313	0.532
670	0.032000	21.856	0.000148	0.252

(http://www.intl-lighttech.com/support/measurement-geometries-chapter-7-light-measurement-tutorial)

Tomando en consideración este desfase que tenemos entre la luz visible y el sensor de luz, se aplicó un filtro de color verde que como podemos apreciar en la figura 122 permitiendo entrar en el rango de captación de la luz visible.

violeta	380–450 nm
azul	450–495 nm
verde	495–570 nm
amarillo	570–590 nm
anaranjado	590–620 nm
rojo	620–750 nm

Figura 122 Luz Visible.

(http://www.uwdreams.com/blog/?p=146)

4.10.2 Control de Motores

La parte de potencia del control de velocidad es la que va a manejar directamente la velocidad del motor y el sentido de giro, esta implementada utilizando un puente H, está diseñado utilizando transistores IRF540 NPN, transistores IRF4905 PNP y optoacopladores NPN que funcionan como interruptores de potencia.

Las señales de control provienen de las salidas izquierda y derecha del microntrolador que determinan que en los puntos IZQ y DER sea 1L o 0L , si la señal de control determina que el giro debe ser a la izquierda sea 5 v en el punto IZQ y 0v en el punto DER, esto provoca que el optoacoplador U1 entre en saturación y sature a su vez al transistor Q1 permitiendo que el terminal positivo de la fuente de 24 voltios quede aplicado a una de las terminales del motor de igual forma el optoacoplador U2 se satura y a la vez satura al transistor Q2 ocasionando que GND tierra se coloque en el otro terminal del motor haciendo que el motor gire en sentido antihorario, en estas condiciones, los optoacopladores U4, U3, Q4, y Q3 se encuentran en corte. Se debe señalar que en el punto IZQ los 5 voltios no llegan de manera constante sino que es comandada por el microcontrolador y cuya incidencia en el circuito de potencia es que al motor no lleguen los 24 v de manera permanente.

Cuando escogemos que el motor gire en el sentido contrario el tren de pulsos se establece en el punto DER y el punto IZQ permanece en 0. En estas condiciones los optoacopladores del puente H invierten sus condiciones: U1, Q1, U2, y Q2 estén en corte mientras U4, U3, Q4, y Q3 estén en saturación, provocando que los 24 voltios alimenten al motor en forma invertida con lo que el motor girará en el otro sentido.

Es importante señalar que cuando el control proveniente del microcontrolador está apagado los puntos IZQ Y DER se ponen en cero permanentemente lo que provoca que todos los transistores del puente H estén en corte por lo que el motor no recibe alimentación y no se mueve.

El programa implementado en el microcontrolador genera estas señales garantizando también que no suceda el caso que en los puntos IZQ y DER sean alimentados con 5 voltios que pondrían a todos los optoacopladores en saturación al mismo tiempo provocando cortocircuito en la fuente de alimentación. (Figura 123).

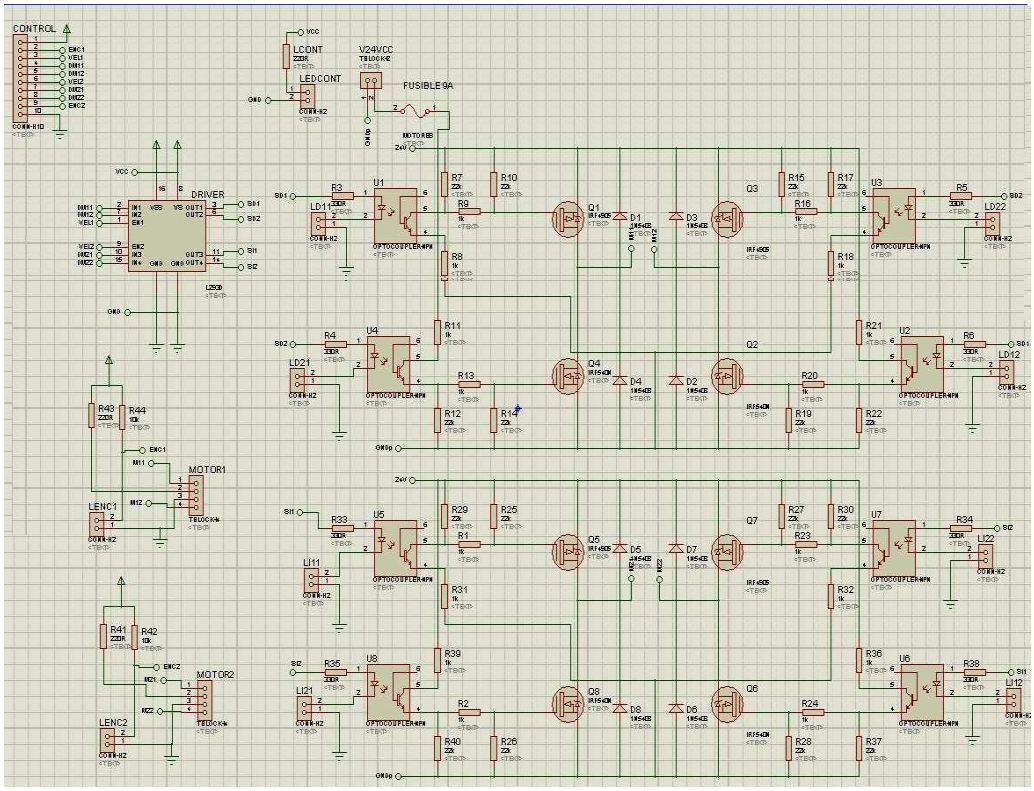


Figura 123. Esquema del puente H

CAPITULO V

5. PRUEBAS Y RESULTADOS

El presente capítulo se presenta las respuestas obtenidas, de las curvas de funcionamiento de los paneles solares, tanto con el seguidor solar como en un estado fijo. Adicional se analiza el comportamiento de la cantidad de sol presente en el lugar de las pruebas, mediante el uso de un medidor de cantidad de irradiancia solar (luxómetro).

Figura 124 Toma de datos en panel con seguidor y estático

5.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO

5.1.1 Pruebas con el panel fotovoltaico fijo

Antes de efectuar las pruebas con el sistema de seguimiento automático, se procedió a tomar datos con el sistema estático, lo que nos sirve para simular la ubicación de un panel en el tejado de una vivienda. Estos datos nos sirve para determina la diferencia que existe entre un sistema convencional y un sistema con seguimiento solar.

Figura 125 Panel fotovoltaico en posición estática

En la figura 125 se puede apreciar que el panel solar que tiene una inclinación aproximada de 15 grados en dirección Sur-Norte, simulando que se encuentra fija en una estructura. Algunos fabricantes recomiendan que se debe encontrar el punto de producción adecuada en el invierno, con lo que se logrará una generación óptima el resto del año. El ángulo de inclinación es medido entre el panel solar y el plano horizontal. Cada latitud presenta un ángulo de inclinación óptimo. Los paneles deben colocarse en posición horizontal únicamente en zonas cercanas al ecuador.

A continuación se muestra una tabla con ángulos de inclinación recomendados:

Tabla 22 Ángulos de inclinación para sistemas fijos.

Latitud del lugar (en grados)	Angulo de inclinación fijo
0° a 15°	15°
15° a 25°	La misma latitud
25° a 30°	Latitud más 5 °
30° a 35°	Latitud más 10 °
35° a 40°	Latitud más 15 °
40° o más	Latitud más 20 °

(http://antusol.webcindario.com/instalacion.html)

La medición se efectúo en el laboratorio de energías renovables, como se puede observar en la figura 124 el lugar en donde se desarrolla las pruebas es un patio que está rodeado por el edificio del laboratorio, adicional el día amaneció nublado por lo que se tomó datos a partir de las 9am. Los valores de voltaje (V) y corriente (C) del panel fotovoltaico y de iluminancia (lux) del sector en donde se realizaron las pruebas, las mediciones son tomadas en intervalo de 15 min, con el fin de determinar las variaciones alrededor de un día.

En la tabla 22 se indican los valores de las medidas realizadas, las mismas que se obtuvieron con un multímetro marca Fluke y luxómetro LM-120, figura 126.

Figura 126 Toma de datos con multímetro y luxómetro.

Tabla 23. Voltajes y Corrientes generados por el panel fotovoltaico e Iluminancia (luxes) e Irradiancia W/m^2 (a 555nm).

Hora	Corriente (C)	Voltaje (V)	Potencia (W)	Luxes (lx)	Irradiancia W/m^2 (a 555nm)
9:00 AM	0.78	13.56	10.57	10300	15.03
9:15 AM	0.95	14.78	14.08	15000	21.90
9:30 AM	1.27	16.32	20.82	18200	26.57
9:45 AM	1.87	16.30	30.51	80100	116.94
10:00 AM	1.96	17.06	33.47	82900	121.03
10:15 AM	1.92	16.18	31.19	73900	107.89
10:30 AM	1.91	16.58	31.66	76300	111.39
10:45 AM	1.89	16.42	31.08	72500	105.85
11:00 AM	1.89	16.43	31.13	87500	127.75
11:15 AM	1.89	16.42	31.13	95500	139.43
11:30 AM	1.97	17.00	33.50	99300	144.97
11:45 AM	1.59	13.72	21.81	75300	109.93
12:00 PM	1.80	15.02	27.03	83000	121.18
12:15 PM	1.60	13.90	22.24	41600	60.73
12:30 PM	1.63	14.16	23.17	26600	38.83
12:45 PM	1.98	17.40	34.45	118000	172.28
1:00 PM	1.92	16.71	32.16	115000	167.90
1:15 PM	1.89	16.50	31.31	113000	164.98
1:30 PM	1.89	16.44	31.17	105500	154.03
1:45 PM	1.89	16.44	31.07	103600	151.25
2:00 PM	1.89	16.45	31.12	103000	150.38
2:15 PM	1.88	16.36	30.85	114900	167.75
2:30 PM	1.87	16.35	30.63	102500	149.65
2:45 PM	1.08	14.23	15.411	26900	39.27
3:00 PM	1.07	15.08	16.13	20200	29.49
3:15 PM	0.72	14.09	10.22	13020	19.01
3:30 PM	1.91	16.61	31.74	96100	140.30
3:45 PM	1.18	10.31	12.20	25000	36.50
4:00 PM	0.84	7.58	6.389	14400	21.02
4:15 PM	0.77	6.99	5.43	13910	20.30
4:30 PM	0.68	6.15	4.23	13200	19.27
4:45 PM	0.54	4.84	2.65	9360	13.66
5:00 PM	0.30	2.76	0.84	4490	6.55

En la figura 127 se indica gráficamente las variaciones de voltaje que se presentan a medida que se presenta cambios en la incidencia de radiación de luz

solar, provocada por fenómenos naturales como son nubes, cambios de temperatura, rotación de la tierra.

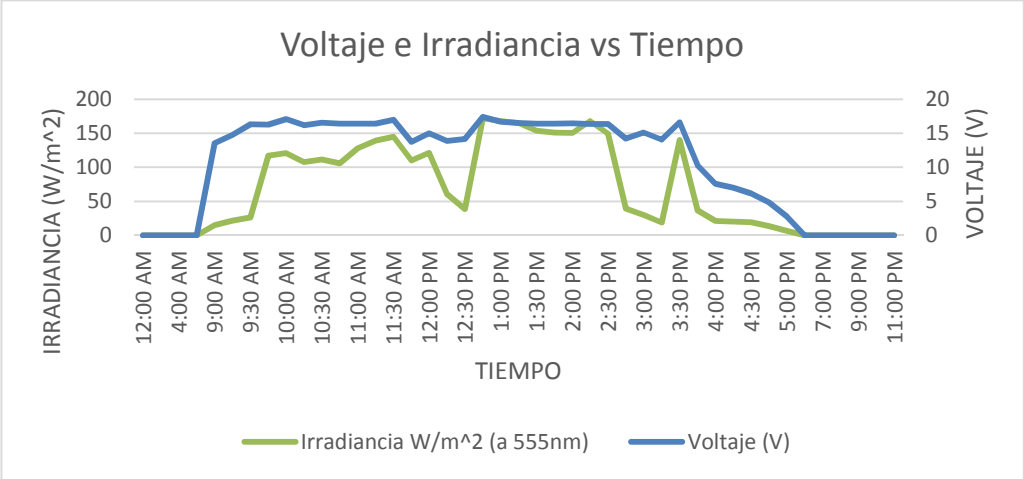


Figura 127 Voltaje e Irradiancia en función del tiempo.

En la figura 128 se muestra las curvas correspondientes a la corriente máxima que puede generar el panel, se puede mencionar que la variación de corriente se presenta más estable debido a la elevada carga que se ocupó para desarrollar las pruebas.

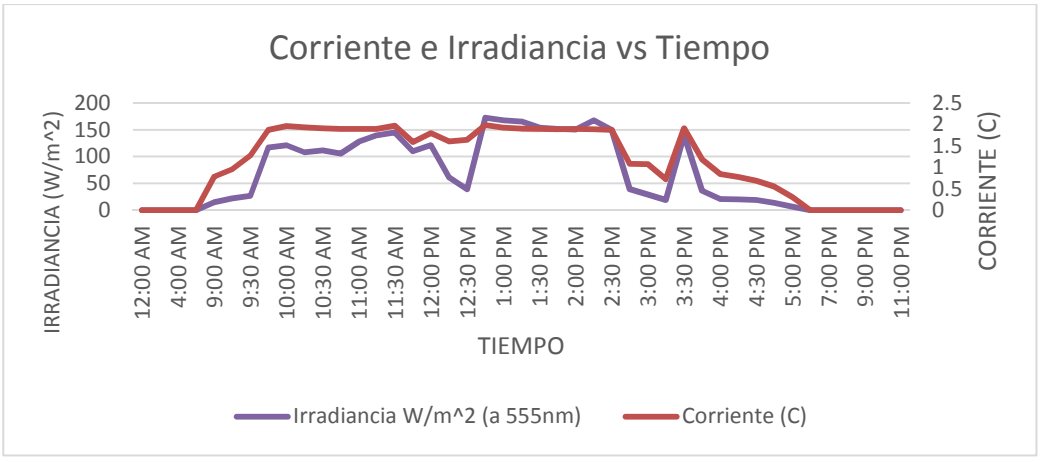


Figura 128 Corriente e Irradiancia en función el tiempo.

No obstante se observa que igualmente como sucede en el voltaje, las variaciones son influenciadas directamente por la caída de radiación solar, esto se

determina claramente porque el panel fotovoltaico es una fuente variable de energía, que depende fundamentalmente del sol.

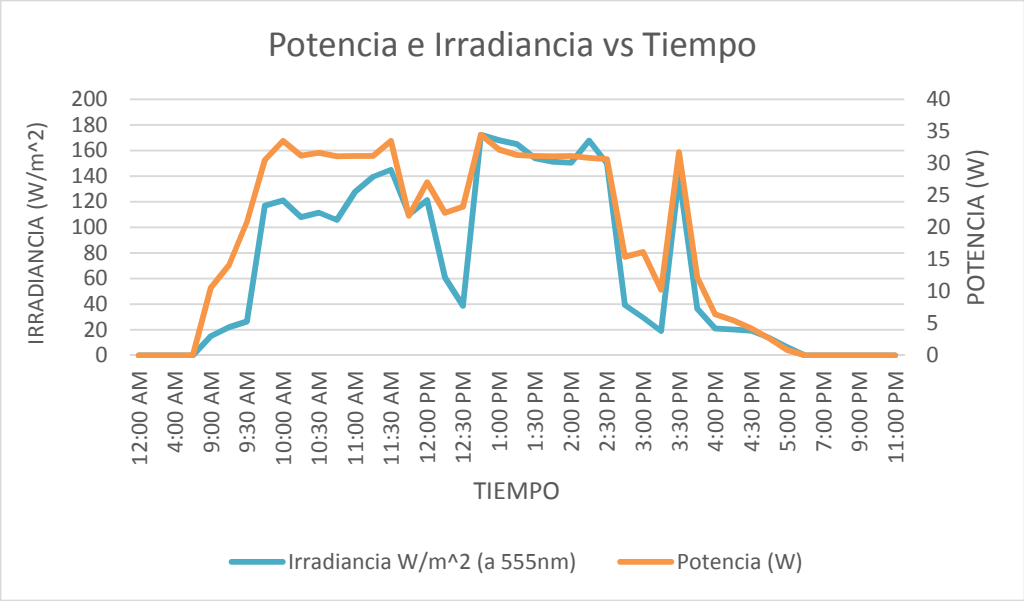


Figura 129 Potencia e Irradiancia en función del tiempo.

La figura 129 permite observar la cantidad de potencia producida por el sistema fotovoltaico, como podemos observar a pesar de tener una baja cantidad de luz solar en algunos momentos del día, el panel fotovoltaico continúa entregando energía, la misma que es demandada por la carga del sistema.

5.1.2 Pruebas con el equipo de seguimiento

Con la finalidad de comprobar el correcto funcionamiento del equipo de seguimiento solar, es necesario efectuar algunas pruebas del sistema completo, para lo cual utilizamos el equipo en modo manual, esto permite manipular los movimientos de la estructura en los 2 ejes. Adicional podemos observar las variaciones en los sensores de luz que se presentan al ubicar los paneles en diferentes direcciones.

5.1.3 Pruebas con Seguimiento Automático

Una vez determinado el correcto funcionamiento del sistema, se lo ubica en posición perpendicular al sol, ya que el sistema automático realiza un movimiento hacia el lugar donde se determina que existe mayor cantidad de luz, mediante el control ON/OFF que tiene como entrada la señal de los sensores de luz.

De igual manera que con el sistema en posición estática, se realiza la toma de datos con el sistema de seguimiento automático, estos datos son capturados por el equipo de supervisión en intervalos de 4,19s, generando un historial de 20 datos por archivo, los mismos que son almacenados en la tarjeta Sd Card.

Adicionalmente se muestran los datos de voltaje, corriente, potencia en tiempo real en la pantalla gráfica como se muestra en la figura 130, mientras tanto podemos visualizar las variaciones presentes en los sensores de luz, mediante la pantalla lcd 16x2 como se observa en la figura 131.

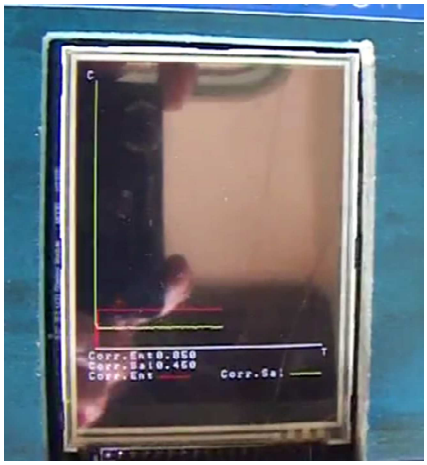


Figura 130 Sistema de Visualización.

Figura 131 Visualizador de Datos de los sensores de luz.

De los datos obtenidos por el sistema de supervisión, se ha realizado un promedio para poder obtener la variación en periodos de 15min, lo que sirve para poder compararlos con los datos obtenidos del sistema estático, se presentan los datos en la tabla 24.

La figura 132 muestra las curvas de voltaje e irradiancia en función del tiempo, lo que determina un crecimiento en cuanto a la producción de potencia, se puede observar claramente como el voltaje se mantiene estable a pesar de los cambios en el clima, que son reflejados por la curva de irradiancia.

La figura 133 muestra las curvas de corriente e irradiancia en función del tiempo, se puede apreciar que estás son similares a las curvas obtenidas en el voltaje, lo que permite demostrar que el sistema tiene un comportamiento más estable con el sistema de seguimiento solar que en una ubicación estática.

Tabla 24 Voltajes y Corrientes generados por el panel fotovoltaico e Iluminancia (luxes) e Irradiancia W/m^2 (a 555nm).

Hora	Corriente (C)	Voltaje (V)	Potencia (W)	Luxes (lx)	Irradiancia W/m^2 (a 555nm)
9:00 AM	0.98	11.69	11.53	10300	15.03
9:15 AM	0.97	11.59	11.30	15000	21.90
9:30 AM	0.92	11.06	10.41	18200	26.57
9:45 AM	2.24	18.74	42.15	80100	116.94
10:00 AM	2.25	18.05	40.73	82900	121.03
10:15 AM	2.25	17.68	39.86	73900	107.89
10:30 AM	2.17	17.08	37.20	76300	111.39
10:45 AM	2.15	17.58	37.91	72500	105.85
11:00 AM	2.14	17.57	37.64	87500	127.75
11:15 AM	2.13	17.50	37.36	95500	139.43
11:30 AM	2.10	17.32	36.54	99300	144.97
11:45 AM	1.93	16.44	32.08	75300	109.93
12:00 PM	1.66	15.02	25.30	83000	121.18
12:15 PM	2.06	16.28	34.23	41600	60.73
12:30 PM	1.97	15.68	31.79	26600	38.83
12:45 PM	2.16	16.90	37.00	118000	172.28
1:00 PM	2.11	16.62	35.81	115000	167.90
1:15 PM	2.30	17.62	40.77	113000	164.98
1:30 PM	2.25	17.23	38.81	105500	154.03
1:45 PM	2.22	17.01	37.97	103600	151.25
2:00 PM	2.24	17.07	38.35	103000	150.38
2:15 PM	2.27	17.23	39.21	114900	167.75
2:30 PM	2.29	17.33	39.73	102500	149.65
2:45 PM	1.54	12.70	21.00	26900	39.27
3:00 PM	1.72	13.80	24.68	20200	29.49
3:15 PM	1.35	11.67	16.75	13020	19.00
3:30 PM	2.23	16.97	39.37	96100	140.30
3:45 PM	1.79	13.95	25.27	25000	36.50
4:00 PM	1.57	12.69	20.44	14400	21.02
4:15 PM	1.28	11.07	14.27	13910	20.30
4:30 PM	1.22	10.76	13.17	13200	19.27
4:45 PM	1.03	10.37	10.79	9360	13.66
5:00 PM	0.83	10.15	8.43	4490	6.55

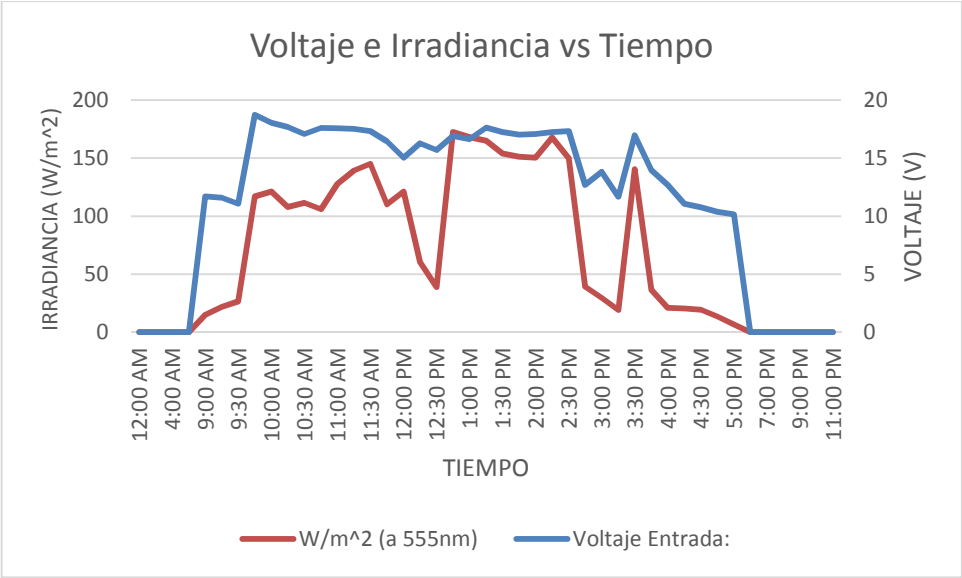


Figura 132 Voltaje e Irradiancia en función del tiempo.

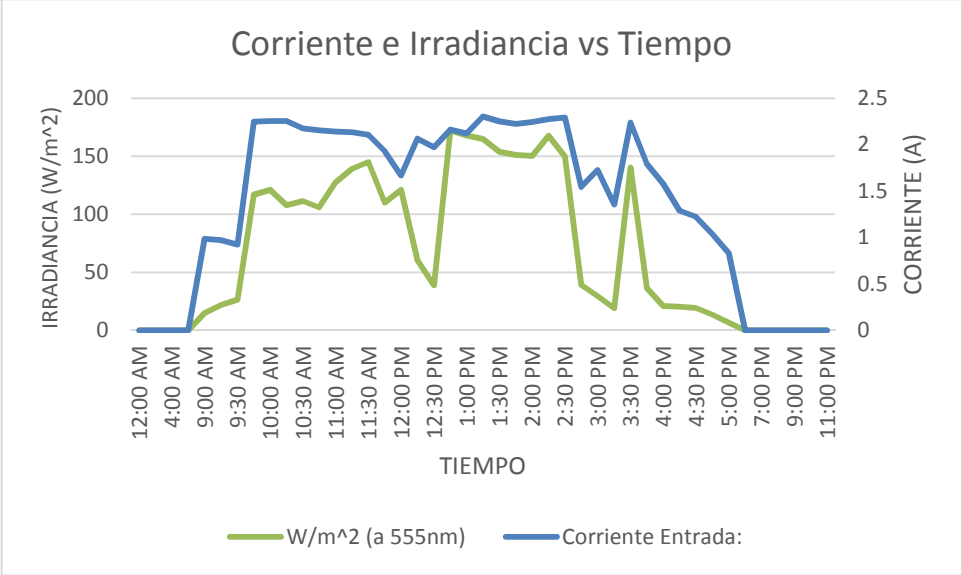


Figura 133 Corriente e Irradiancia en función del tiempo.

En la figura 134 se puede apreciar las curvas resultantes de la potencia e irradiancia en función del tiempo, se observa claramente que la potencia ha mejorado, en cuanto a la estabilidad producto del sistema de seguimiento automático, esto es una ventaja a la hora de tener un día con muchos cambios de clima, como particularmente sucede en Ecuador.

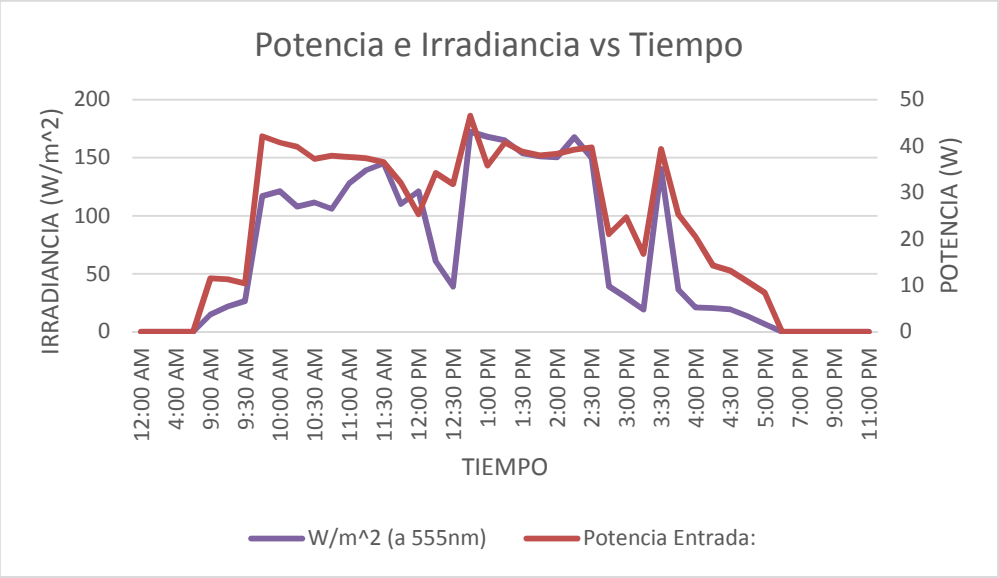


Figura 134 Potencia e Irradiancia en función del tiempo.

5.1.4 Análisis de Resultados

En la tabla 25 se tabula los resultados del sistema, en estado estático y con seguimiento automático, esto ayuda para comparar la ganancia energética entre los 2 sistemas, como se observa en el transcurso de todo el día se tiene una ganancia en el sistema con seguimiento solar, esto es básicamente, porque se cumple con el principio de mantener los paneles perpendiculares al sol, absorbiendo la mayor cantidad de energía.

Tabla 25 Potencia obtenida con el panel estático y con el seguidor solar

Hora	Sin seguidor solar	Con Seguidor Solar
9:00 AM	10.57	11.53
9:15 AM	14.08	11.30
9:30 AM	20.82	10.41
9:45 AM	30.51	42.15
10:00 AM	33.47	40.73
10:15 AM	31.19	39.86
10:30 AM	31.66	37.20
10:45 AM	31.08	37.91
11:00 AM	31.13	37.64
11:15 AM	31.13	37.36
11:30 AM	33.50	36.54
11:45 AM	21.81	32.08
12:00 PM	27.03	25.30
12:15 PM	22.24	34.23
12:30 PM	23.17	31.79
12:45 PM	34.45	37.00
1:00 PM	32.16	35.81
1:15 PM	31.31	40.77
1:30 PM	31.17	38.81
1:45 PM	31.07	37.97
2:00 PM	31.12	38.35
2:15 PM	30.85	39.21
2:30 PM	30.63	39.73
2:45 PM	15.41	21.00
3:00 PM	16.13	24.68
3:15 PM	10.22	16.75
3:30 PM	31.74	39.37
3:45 PM	12.20	25.27
4:00 PM	6.38	20.44
4:15 PM	5.43	14.27
4:30 PM	4.23	13.17
4:45 PM	2.65	10.79
5:00 PM	0.84	8.43

En la figura 135 se refleja los resultados de manera gráfica, constatando lo antes mencionado.

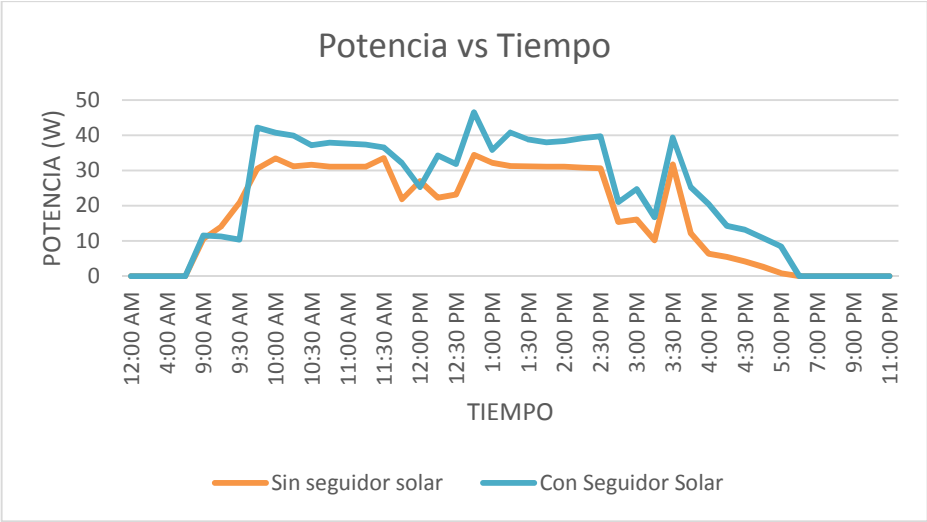


Figura 135 Potencia sin Seguidor Solar y con Seguimiento Solar en función del Tiempo.

En ambos casos se puede observar que la máxima potencia se entregó en el momento que existió mayor cantidad solar, en este caso fue a las 12:45pm donde marcó una irradiancia de 172.28 W/m^2 (a 555nm), otorgando una potencia en el sistema estático de 34.452W mientras que en el sistema con seguimiento solar nos entregó 46.546W.

Tabla 26 Datos promediados por horas y potencia adquirida en un día.

Hora	Sin seguidor solar	Con Seguidor Solar
9:00 AM	10.57	11.53
10:00 AM	24.72	26.15
11:00 AM	31.27	38.15
12:00 PM	31.71	39.99
1:00 PM	28.01	37.09
2:00 PM	31.17	38.98
3:00 PM	23.26	31.16
4:00 PM	15.14	25.46
5:00 PM	3.29	11.67
Total:	199.15	260.20

De la tabla 26 se observa que se ha obtenido una cantidad en el sistema sin seguimiento solar de 19.158Wh/día, mientras que en el sistema con seguimiento solar se obtuvo 260.206Wh/día colocando como carga un reóstato en el valor de 10Ω, que fue considerado para absorber la máxima cantidad de energía que nos proporciona nuestro panel solar.

CAPITULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- Para conseguir la máxima eficiencia en el sistema de seguimiento solar, está desarrollado el equipo de posicionamiento solar, que permite mediante un control ON-OFF tener el mejor posicionamiento de la estructura con respecto al sol, esto se puede reflejar claramente en las curvas de resultados.
- El mecanismo del Equipo para Seguimiento Solar Automático está diseñado con 2 grados de libertad, realizando movimientos tanto en el eje acimutal como en el eje cenital de forma simultánea pero a su vez de manera independiente ya que realizan el movimiento acorde a la señal de control dependiendo del posicionamiento solar, donde exista mayor cantidad de irradiancia solar, misma que es captada por los sensores.
- El diseño de la caja reductora genera el torque suficiente para romper la inercia en estático del peso de los paneles con la estructura de soporte que es de 115Kg, manteniéndole en la posición, dentro del rango donde se amerite.
- El conversor DC/DC permite al sistema extraer la máxima potencia adquirida del panel solar, su eficiencia está sobre él 75%, esto ayuda a estabilizar de mejor manera la potencia obtenida, sobre todo si se trabaja con varios paneles al mismo tiempo.
- El algoritmo de control MPPT “Perturba y Observa” implementado en el sistema, presenta un adecuado funcionamiento, permitiendo obtener una eficiencia superior al 75%, aunque no es un control muy rápido al momento de tener cambios demasiado bruscos en el clima.

- La incorporación del cable Litz, resultó fundamental en el proyecto, este elemento nos permitió realizar las bobinas con mayor facilidad y de menor tamaño, ya que se requería bobinas muy grandes por la corriente de 6A que entrega el panel en su máxima potencia, mejora la eficiencia del conversor DC-DC y permite controlar una mayor cantidad de energía.

6.2 RECOMENDACIONES

- Se debe tener mucho cuidado con la carga a la salida del sistema, una carga de muy baja, menor de 50Ω, demanda una mayor cantidad de energía, haciendo que el conversor DC-DC pierda su eficiencia.
- Se recomienda colocar un conversor DC-DC por cada panel que se desee incorporar en el sistema, ya que cuando se conecta 2 fuentes de diferente potencia, la tendencia es que la mayor equilibre entregando energía a la de menor, lo cual podría afectar a la larga a los paneles fotovoltaicos.
- Se recomienda no sobrecargar los motores, estos tienen una potencia máxima de 72W, esto se da básicamente cuando una persona u objeto obstruye el movimiento en uno de los ejes, esto producirá un pico alto de corriente que podría dañar el motor.
- El sistema de ventilación en el equipo electrónico es importante, por lo que se sugiere que el mismo permanezca de lo posible encendido cuando se utilice el mismo, ya que las altas temperaturas del ambiente y las generadas por los componentes electrónicos, disminuyen la eficiencia del sistema.
- El sistema de control utilizado para el seguimiento automático es un control ON-OFF, el mismo que no presta mayormente un beneficio al seguidor, por

lo que se recomienda diseñar un control mucho más robusto basado en un sistema Fuzzy por dar un ejemplo.

- El sistema de control del seguimiento del punto de máxima potencia MPPT mediante el método Perturbar y Observar no entregó un desempeño tan considerable, se recomendaría profundizar la investigación para mejorarlo con un sistema MPPT Fuzzy o Inteligente y analizar si es o no recomendable incorporarlo, ya que dispone del seguidor mecánico.
- Es necesario dar mantenimiento al mecanismo del Equipo para Seguimiento Solar Automático lubricando con grasa liviana los pintos de contacto del mecanismo, así como en los engranes cónicos y restos.
- Para los dos motores luego de cierto tiempo de trabajo es indispensable revisar el estado de los carboncillos, para que estos hagan un buen contacto y generen el movimiento deseado.
- La caja reductora del eje azimutal consta con doble mecanismo de tornillo sin-fin corona, con una corona de fibra, por la que siempre debe estar lubricada con grasa pesada.
- Es importante que el movimiento en los 2 ejes sea bajo el dominio de los motores y no por manipulación externa ya que el mecanismo se diseña bajo los requerimientos establecidos y no bajo fuerzas externas adicionales.

7. REFERENCIAS

Hoja de Datos Atmega 1284P. (s.f.).

A. Hren, P. S. (June 2005). *Full Order Dynamic Model of SEPIC Converter, Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics.*

Abd El-Shafy A.N., F. H.-Z. (2003). Evaluation of a proper controller performance for maximum-power point tracking of a stand-alone PV system. En *Solar Energy Mater. Solar Cells.*

Al-Atrash et al, D. H. (2005).

Andújar Márquez, J., Enrique Gómez, J., Durán Aranda, E., & Martínez Bohórquez, M. (2004). Sistema para la generación automática de curvas i-v, p-v y monitorización de módulos fotovoltaicos. Universidad de Huelva España.

Castro, R. M. (2004). *Energias Renováveis e Producao Descentralizada, Introducao a energía fotovoltaica.* Lisboa: Univeridad Técnica de Lisboa.

Darla, R. (Septiembre 2007). Development of Maximum Power Point Tracker for PV Panels Using SEPIC Converter. *29th International Telecomunication Energy Conference*.

Denizinger, W. (1995). Electrical power subsystem of globlastar. En P. o. Conference.

Diseño mecánico de un seguidor para mover un generador solar de 600 W con lentes de Fresnel. (s.f.). Cataluña.

Elsin et al., 1., Enrique et al. 2005, 2. 2., Femia et al., 2., & Lopes, L. y. (2007).

Erickson R. W., M. D. (2001). *Fundamentals of Power Electronics.* Second Edition.

FAG Catálogo. (s.f.).

Ferichola, J. F. (s.f.). Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo portatil. Madrid - España: Universidad Carlos III.

FESTO. (2009). *Sistemas de Aprendizaje* . Berlín: Festo Didactic GmbH & Co. KG.

Ficha técnica del panel fotovoltaico Isofotón y Ficha técnica de las baterías CS3 Battery. (s.f.).

Hard D. (2001). *Electrónica de potencia*. España: Pearson.

Hoja de datos del LM35. (s.f.).

Hoja de datos Sensor TSL261R. (s.f.).

http://antusol.webcindario.com/instalacion.html. (s.f.).

http://es.dhgate.com/product/keyes-fr4-ky-023-joystick-breakout-module/162254702.html. (s.f.).

http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Ecl%C3%ADptica-plano-lateral-ES.png. (s.f.).

http://interface.centraltreasure.com/rs485.html, C. (s.f.).

http://protorit.blogspot.com/2013/01/power-electronic-converters-boost-regulators.html. (s.f.).

http://roble.pntic.mec.es/. (s.f.).

http://uzebox.org/forums/viewtopic.php?f=4&t=641&start=10. (s.f.).

http://www.analog.com/en/specialty-amplifiers/instrumentation-mplifiers/ad620/products/product.html. (s.f.).

http://www.biomed.engsoc.org/node/36. (s.f.).

http://www.compuson.com/memorias-usb-flash-sd/. (s.f.).

http://www.dforcesolar.com/energia-solar/efecto-fotoelectrico/. (s.f.).

http://www.intl-lighttech.com/support/measurement-geometries-chapter-7-light-measurement-tutorial. (s.f.).

http://www.ni.com/white-paper/9119/en/. (s.f.).

http://www.pveducation.org/pvcdrom/introduction/solar-energy. (s.f.).

http://www.pveducation.org/pvcdrom/introduction/solar-energy. (s.f.).

http://www.pveducation.org/pvcdrom/modules/bypass-diodes. (s.f.).

http://www.pveducation.org/pvcdrom/modules/bypass-diodes. (s.f.).

http://www.pveducation.org/pvcdrom/modules/module-circuit-design. (s.f.).

http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/declination-angle. (s.f.).

http://www.robotshop.com/ca/fr/capteur-courant-30a-acs715-pololu.html. (s.f.).

http://www.sapiensman.com/electrotecnia/corriente_alterna.htm. (s.f.).

http://www.syntax.com.tw/products/products_c.php?itemid=4359. (s.f.).

http://www.tolaemon.com/docs/mmcard.htm. (s.f.).

http://www.ujaen.es/. (s.f.).

http://www.uwdreams.com/blog/?p=146. (s.f.).

http://www.wikilengua.org/. (s.f.).

http://www-gris.det.uvigo.es/wiki/pub/Main/PracticasFT/puerto-serie.pdf. (s.f.).

Hussein et al, K. e. (1997).

IDEAM. (2004). *Atlas solar*.

Jaume, R. I. (Cuarta Edición). *Curso de Energía Solar, C.T.E.*

Juan, G. (2012). Diseno de los mecanismos para un seguidor solar pseudo ecuatorial.

Jutglar, L. (s.f.). Energía Solar.

Lenny Andrés Hernández Fonseca, Diego Ricardo Gómez León, Oscar Mauricio Hernández Gómez. (31 Agosto 2011). *Rectificador monofásico con corrección del factor de potencia usando un convertidor Boost.* Colombia : Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

León, H. d. (Junio 2010). *Control de velocidad de un motor de cd a través de un arreglo en cascada SEPIC - Puente completo alimentado con un panel solar*. Oaxaca: Universidad Tecnológica de la Mixteca.

LLUÍS, J. (s.f.). En *Energía Solar* (pág. Pág. 171.).

Luís, J. (Pág. 168). Energía Solar.

Massachusetts. (2001.). *Kluwer Academic Publishers.* Capítulos 2, 5 y 6, .

Mota, N., Vilarinho, V., Cláudio , N., Margato, E., & Rodriguez, S. (s.f.). Validação experimental de modelos de células fotovoltaicas. Lisboa Portugal: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

Mott, R. (2006). *Diseño de elementos de máquinas* . México D.F: Pearson Education.

Muhammad, R. (1995). *Electrónica de Potencia. Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones.* México: Prentice Hall Hispanoamericana S. A. Segunda Edición.

Norton, R. (1999). En *DISEÑO DE MÁQUINAS* (pág. capítulo 12). México: Prentice Hall Hispanoamericana .

Prasad Koirala, Binod, Henze, Norbert. (s.f.). STUDY ON MPP.

Prasad Koirala, Binod, Sahan, Benjamin; Henze, Norbert. (s.f.). Study MPP Mismatch Losses in Photovoltaic Applications .

Santiago, S. M. (Junio 2003). *"Energías Renovables: Conceptos y Aplicaciones"*. Quito: WWF - Fundación Natura.

Santiago, S. M. (Junio 2003). Energías Renovables: Conceptos y Aplicaciones. Quito: WWF - Fundación Natura.

www.inamhi.gov.ec. (s.f.).

www.newenglandwire.com. (2005). *New England Wire Technologies*. Obtenido de Design, Litz: www.newenglandwire.com

8. ANEXOS

ANEXO A: TABLAS Y MAPAS DE IRRADIANCA SOLAR EN ECUADOR

ANEXO B: MEMORIA FOTOGRÁFICA DE CONSTRUCCIÓN MECÁNICA

ANEXO C: HOJAS DE DATOS DE ELEMENTOS

ELÉCTRICOS - ELECTRÓNICOS

ANEXO D: MANUAL DE USUARIO

ANEXO E: MEMORIA DE CÁLCULO

ANEXO F: PLANOS