

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA MECÁNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIEROS MECÁNICOS**

**TEMA:
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE RASTREO SOLAR
BIAXIAL PARA GENERACIÓN DE 600 W-h DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

**AUTORES:
AGILA DÍAZ JONATHAN FABRICIO
LANDÁZURI AYALA LAURO ALEXANDER**

**TUTOR:
ING. JAIME ROLANDO HEREDIA VELASTEGUÍ**

Quito, septiembre 2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros **Agila Díaz Jonathan Fabricio** y **Landázuri Ayala Lauro Alexander**, con documentos de identificación N° 1724182884 y N° 1723306930, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE RASTREO SOLAR BIAxIAL PARA GENERACIÓN DE 600 W-h DE ENERGÍA ELÉCTRICA, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que se hace la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, septiembre 2021.



.....
Agila Díaz Jonathan Fabricio

C.I.: 1724182884



.....
Landázuri Ayala Lauro Alexander

C.I.: 1723306930

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Trabajo de Titulación, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE RASTREO SOLAR BIAXIAL PARA GENERACIÓN DE 600 W-h DE ENERGÍA ELÉCTRICA, realizado por Agila Díaz Jonathan Fabricio con CI N° 1724182884 y Landázuri Ayala Lauro Alexander con CI N° 1723306930, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, septiembre del 2021



Ing. Jaime Rolando Heredia Velasteguí MsC.

C.I: 1721400768

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mi madre Mercedes, quien fue y sigue siendo mi mayor fuente de inspiración y de fortaleza en mi vida, gracias por apoyarme incondicionalmente con consejos, amor, sacrificio y confianza logrando que este sueño se hiciera realidad, también quiero agradecer a mi hermano Edwin por siempre creer en mí, incluso cuando yo dudaba de mis capacidades.

De igual manera dedico este trabajo a mis abuelos, a mis tíos, mis primos y amigos que siempre me apoyaron y me acompañaron en esta larga travesía, fueron la luz en mi vida que ilumino mi camino cuando todo era oscuridad, soy muy afortunado por tenerlos.

Y finalmente, dedico este trabajo a mi tía Eda que a pesar de que ya no está entre nosotros fue la persona que me impulsó a empezar en este larga camino, sus enseñanzas y valores siempre estarán arraigados en mi corazón.

Fabricio Agila

Toda mi dedicatoria de este trabajo va dirigida a toda mi familia, quien, con su apoyo excepcional, cariño y paciencia han logrado impulsarme a conseguir mis metas, realmente esta dedicatoria estaría vacía si no menciono a mis padres Lauro y Jessica, ellos con su rectitud y amor han logrado encaminarme en una vida buena y sobresaliente.

Además, dedico este trabajo a Amy y Cynthia, mis motivos para luchar día a día para ver su sonrisa y bienestar, a quienes forman parte importante de mi vida y daría todo por ellas, además agradezco a mi hermano Diego quien con sus ideas y apoyo me ayuda a crecer como profesional.

Quizás mis palabras faltan para agradecer a el número incontable de personas que me han apoyado con sus consejos y ayudas en el transcurso de mi carrera estudiantil, compañeros, amigos, profesionales y profesores, a todas esas personas muchas gracias.

Alexander Landázuri

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a la Universidad Politécnica Salesiana y en especial a la carrera de Ingeniería Mecánica y a todo su personal administrativo, docentes y autoridades por cumplir su misión de formarnos con los debidos valores institucionales de trascendencia, familiaridad, corresponsabilidad, solidaridad y honestidad.

Agradecemos también a nuestro tutor Ing. Jaime Heredia por su seguimiento y asesoramiento, quien además nos enseñó el valor e importancia de comprender conocimientos más allá de nuestra carrera y así crecer como profesionales y personas.

Le damos un agradecimiento en especial a Sebastián Gómez y a Talleres Trujillo quien nos colaboró prestando sus instalaciones, tiempo y conocimiento en el transcurso de la construcción del prototipo de seguimiento solar.

Fabricio Agila Díaz

Alexander Landázuri Ayala

ÍNDICE

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	I
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A.....	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XII
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XIII
RESUMEN.....	XIV
ABSTRACT	XV
INTRODUCCIÓN	XVI
ANTECEDENTES.....	XVII
1 CONCEPTOS PRINCIPALES Y GENERALIDADES.....	1
1.1 Antecedentes de investigación	1
1.2 Energía.....	3
1.2.1 Fuentes renovables y no renovables de energía	3
1.2.2 Energía solar.....	4
1.2.3 Tipos de energía solar	5
1.2.3.1 Energía solar activa	5
1.2.3.2 Energía solar pasiva.....	5
1.2.3.3 Energía solar térmica.....	6
1.2.3.4 Energía solar fotovoltaica.....	6
1.2.3.5 Comparación entre la energía solar activa y pasiva	7
1.2.4 Radiación solar.....	8
1.2.4.1 Irradiancia.....	8
1.3 Ejes de movimiento terrestre	8
1.3.1 Coordenadas ecuatoriales.....	9
1.4 Trayectoria solar.....	10

1.4.1	Zenit	10
1.4.2	Azimet.....	10
1.4.3	Incidencia	10
1.5	El Ecuador y la energía solar fotovoltaica.....	11
1.5.1	Atlas solar.....	11
1.5.2	Hora Solar Pico (HSP)	12
1.6	Sistemas de producción de energía solar fotovoltaica.....	13
1.6.1	Panel solar fotovoltaico.....	15
1.6.2	Banco de baterías	15
1.6.3	Controlador Solar	16
1.6.4	Inversor de Corriente.....	16
1.7	Mecanismo biaxial.....	17
1.7.1	Actuadores de movimiento	17
1.7.1.1	<i>Actuador lineal</i>	18
1.7.1.2	<i>Motorreductor</i>	19
1.8	Sistema de control	20
1.8.1	Sistema de control lazo abierto	21
1.8.2	Sistema de control lazo cerrado	22
1.9	Sistema de sensado	23
1.10	Políticas, normativas, permisos y regulaciones.....	23
1.11	Factibilidad técnica-operativa	25
2	OBTENCIÓN DE DATOS	26
2.1	Generación autosustentable de la instalación solar fotovoltaica.	26
2.2	Proceso para la generación de energía solar.....	27
2.3	Espectro electromagnético ley de Planck	28
2.4	Balance radiactivo entre el sol y la tierra	30
2.5	Producción de energía en paneles con seguimiento solar	32
2.6	Inclinación y disposición para paneles fijos y móviles.	36
2.7	Análisis de alternativas.....	38
2.7.1	Clasificación por el dispositivo que realiza el movimiento	38

2.7.1.1	<i>Seguidor activo</i>	38
2.7.1.2	<i>Seguidor Pasivo</i>	39
2.7.2	Clasificación por el tipo de sistema fotovoltaico	39
2.7.2.1	<i>Seguidores de sistemas fotovoltaicos concentrados</i>	39
2.7.2.2	<i>Seguidores de sistemas fotovoltaicos no concentrados</i>	39
2.7.3	Clasificación por grados de libertad.....	39
2.7.3.1	<i>Un solo eje horizontal o eje vertical</i>	39
2.7.3.2	<i>Un solo eje inclinado</i>	40
2.7.3.3	<i>Seguidores de dos ejes de inclinación</i>	40
2.7.3.4	<i>Seguidor Acimut-Altitud</i>	40
2.8	Diagrama del sistema fotovoltaico	42
3	DISEÑO MECÁNICO, ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO	43
3.1	Diseño mecánico	45
3.1.1	Grados de libertad	45
3.1.2	Diseño de la estructura de los paneles solares	47
3.1.3	Diseño del Mono poste.....	48
3.1.4	Diseño de ejes	49
3.1.4.1	<i>Diseño eje del motor</i>	50
3.1.4.2	<i>Diseño del acople del monoposte</i>	52
3.1.4.3	<i>Diseño del pasador</i>	53
3.1.5	Diseño del sistema de transmisión	55
3.1.5.1	<i>Radio de Giro</i>	56
3.1.6	Diseño del piñón y engranaje.....	58
3.1.6.1	<i>Torque total</i>	58
3.1.6.2	<i>Esfuerzo a flexión AGMA</i>	59
3.1.6.3	<i>Esfuerzo a la Picadura Superficial</i>	65
3.1.7	Base	70
3.1.8	Base motorreductor	70
3.1.9	Selección del rodamiento y chumacera.....	71
3.2	Diseño eléctrico	72
3.2.1	Actuadores.....	72
3.2.1.1	<i>Actuador Lineal</i>	72
3.2.1.2	<i>Motorreductor</i>	72

3.2.2	Protecciones sistema fotovoltaico	75
3.2.2.1	<i>Llave termomagnética</i>	75
3.2.2.2	<i>S.P.D. (surge protección device)</i>	76
3.2.3	Protección de actuadores.....	77
3.2.3.1	<i>Motorreductor</i>	77
3.2.3.2	<i>Actuador lineal</i>	77
3.3	Diseño electrónico.....	78
3.3.1	Sistema de sensado.....	78
3.3.1.1	<i>Acelerómetro</i>	78
3.3.1.2	<i>Reloj en tiempo real</i>	79
3.3.1.3	<i>Sensor LDR</i>	79
3.3.2	Controlador	81
3.3.3	Esquema electrónico de sensado.....	82
3.3.4	Lógica de programación.....	82
3.4	Análisis general del sistema de seguidor solar biaxial	87
4	RESULTADOS DEL PROYECTO.....	90
4.1	Construcción del seguidor solar biaxial.	90
4.2	Análisis comparativo de producción de energía de un sistema con seguidor solar biaxial y sin el sistema de seguidor solar biaxial.	91
4.3	Rentabilidad del proyecto.....	94
4.4	Cronograma de mantenimiento.	97
5	CONCLUSIONES	99
6	RECOMENDACIONES.....	100
7	LISTA DE REFERENCIAS	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Consumo energético a nivel mundial año 2019.....	4
Figura 2. Tipos de sistemas pasivos para climatización de edificios.....	6
Figura 3. Inclinação del plano eclíptico y el eje de rotación terrestre.	9
Figura 4. Latitud y longitud terrestre	9
Figura 5. Trayectoria aparente solar en función de un observador en la Tierra.	10
Figura 6. Irradiación Solar Global Horizontal (GHI) Anual.....	12
Figura 7. Carta solar para latitud y longitud en la instalación solar.....	12
Figura 8. Datos de irradiación en la instalación fotovoltaica.....	13
Figura 9. Sistema fotovoltaico de conexión híbrida	14
Figura 10. Actuador lineal Ultramotion en corte e identificación de piezas.....	18
Figura 11. Puente H control de movimiento de actuador lineal.....	19
Figura 12. Diagrama Simplificado de un sistema de control.....	21
Figura 13. Diagrama sistema de control lazo abierto.....	21
Figura 14. Diagrama sistema de control lazo cerrado [47].....	22
Figura 15. Consumos de la instalación residencial.....	26
Figura 16. Formación de Helio (He) y producción de energía en la superficie solar	27
Figura 17. Espectro electromagnético.....	29
Figura 18. Ángulo de incidencia de los rayos solares sobre una superficie.....	33
Figura 19. Irradiación en estación meteorológica El Bosque 09-2020.....	35
Figura 20. Ubicación geográfica de la instalación fotovoltaica.....	36
Figura 21. Simulación de la orientación del SFV estático.....	37
Figura 22. Orientación y disposición real de los paneles solares fijos por ubicación.	38
Figura 23. Tipos de seguidores solares de 2 ejes.	40
Figura 24. Esquema general del sistema de rastreo solar fotovoltaico.	42
Figura 25. Plano despiece y lista de materiales sistema de seguimiento solar	44

Figura 26. Movimientos requeridos para los paneles solares.	45
Figura 27. Diseño del sistema de seguidor solar biaxial.....	46
Figura 28. Diseño y materiales de la estructura de los paneles solares.	47
Figura 29. Diseño del mono poste.	48
Figura 30. Dimensiones del eje de salida del motor.	50
Figura 31. Diseño del eje del motor.....	51
Figura 32. Diseño del eje del monoposte.....	52
Figura 33. Diseño del pasador.....	53
Figura 34. Diagrama de fuerzas.	54
Figura 35. Diagrama de cortante y momento máximo.....	55
Figura 36. Dimensiones de la estructura con los paneles solares.	56
Figura 37. Factor geométrico J de engranajes rectos	60
Figura 38. Factor de vida KL.....	63
Figura 39. Resistencia a la fatiga por flexión publicada por la AGMA $S^{\prime}fb$	64
Figura 40. Resistencia a la fatiga superficial AGMA $S^{\prime}fc$	69
Figura 41. Diseño de la base del sistema.	70
Figura 42. Base del Motorreductor.	71
Figura 43. Circuito de control y potencia del sistema fotovoltaico biaxial	74
Figura 44. Monitoreo de precipitación y tormentas eléctricas 03-05-2021.....	76
Figura 45. Ejes de medición de un giroscopio digital MPU6050.	79
Figura 46. Modulo reloj de tiempo real RTC DS3231.	79
Figura 47. Diagrama placa programable Arduino Mega 2560	81
Figura 48. Esquema electrónico de sensores con el controlador.	82
Figura 49. Disposición de los sensores LDR para el seguimiento solar.	83
Figura 50. Esquema de sensado para cada condición de luminosidad.....	83
Figura 51. Capsula de reposo de los sensores.	85
Figura 52. Disposición del seguidor a lo largo de un día.....	86

Figura 53. Flujograma de operación del sistema electrónico.....	87
Figura 54. Diseño final del sistema fotovoltaico con seguidor solar biaxial.	89
Figura 55. Sistema de rastreo solar biaxial en operación durante el mediodía.	90
Figura 56. Producción energética del mes de mayo mediante el uso de un sistema fotovoltaico fijo.....	91
Figura 57. Producción energética de junio mediante el uso del seguidor biaxial.	92
Figura 58. Producción de energía del 28 de mayo y del 24 de junio.	92
Figura 59. Punto de equilibrio rentabilidad del sistema fotovoltaico fijo.....	96
Figura 60. Punto de equilibrio rentabilidad del sistema de seguidor solar biaxial. ..	97
Figura 61. Cronograma de mantenimiento para el seguidor biaxial.	98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Recomendaciones de inclinaciones de acuerdo a localización geográficas.	36
Tabla 2. Análisis de alternativas.	41
Tabla 3. Valores del radio de giro.	57
Tabla 4. Datos iniciales de diseño.	58
Tabla 5. Factor de sobrecarga K_O	61
Tabla 6. Factor de distribución de carga K_H	62
Tabla 7. Factor de confiabilidad K_R .	64
Tabla 8. Valores y resultados del esfuerzo a flexión AGMA.	65
Tabla 9. Coeficiente elástico Z_E de la AGMA en unidades de MPa	67
Tabla 10. Valores y resultado a la fatiga superficial AGMA.	69
Tabla 11. Especificaciones técnicas actuador lineal	72
Tabla 12. Especificaciones técnicas motorreductor.	73
Tabla 13. Especificaciones técnicas panel solar.	75
Tabla 14. Tipos de fotorresistencias en el mercado ecuatoriano.	80
Tabla 15. Costos instalación SFV fija.	94
Tabla 16. Costos instalación del sistema de seguidor biaxial.	95

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Ficha técnica modulo fotovoltaicos 330W.....	106
Anexo 2. Curva de potencia vs corriente-voltaje para valores de radiación.....	106
Anexo 3. Dimensiones principales motor eléctrico WEG W12.....	106
Anexo 4. Dimensiones principales caja de reducción FCN40.....	107
Anexo 5. Ficha técnica monitoreo DTU-W100.....	107
Anexo 6. Ficha técnica microinversor Hoymiles MI-1200	108
Anexo 7. Comunicación entre el monitoreo y el microinversor.....	108
Anexo 8. Plano general sistema de seguimiento solar.....	109
Anexo 9. Plano despiece y lista de materiales sistema de seguimiento solar.....	110
Anexo 10. Plano base estructura principal.....	111
Anexo 11. Plano base motorreductor.....	112
Anexo 12. Plano eje motriz de piñón motriz del piñón.....	113
Anexo 13. Plano engranaje conductor.....	114
Anexo 14. Plano placa de ajuste paneles.....	115
Anexo 15. Plano base paneles solares.....	116
Anexo 16. Plano eje pasador monoposte.....	117
Anexo 17. Plano monoposte.....	118
Anexo 18. Acople monoposte.....	119
Anexo 19. Plano engranaje conducido.....	120
Anexo 20. Programa incluido en el microcontrolador Arduino	121
Anexo 21. Disposición de los sensores LDR en capsula.....	124
Anexo 22. Sensor de radiación solar.....	124
Anexo 23. Sistema de seguimiento solar operando en un día despejado.....	124
Anexo 24. Esquema electro-mecánico para el seguido biaxial en sentido anti horario.	125
Anexo 25. Esquema electro-mecánico para el seguido biaxial en sentido horario..	125

RESUMEN

Las energías catalogadas como renovables se han convertido en una alternativa ambientalmente viable para generar energía, entre ellas destaca la energía solar, la cual es una fuente ilimitada. Actualmente, la cantidad de energía que recibe el planeta tierra es de aproximadamente de 4500 veces la cantidad energética que se consume en un día. Es por ello por lo que, el actual proyecto técnico plantea la búsqueda de un diseño para la construcción de un sistema de recolección solar usando paneles solares fotovoltaicos y un mecanismo dinámico de rastreo solar para el aumento de productividad energética para uso residencial, con el fin de compararlo con un sistema fijo analizando su rentabilidad y viabilidad técnica dentro del sector urbano residencial de Quito.

Como resultado del estudio se ha determinado que mediante el uso del seguidor solar se ha logrado obtener un aumento de producción de eficiencia energética del 43.6% con el sistema de rastreo solar en el mes de junio 2021 comparado con la instalación solar fija durante el mes de mayo de 2021. El análisis económico muestra que el punto de equilibrio para el sistema de rastreo solar se encuentra en 17 años y el del sistema fijo en 15,4 años después de su instalación. El costo del proyecto de rastreo solar es de 2140 USD equivalente a 55% más que la instalación fija de 1185 USD. Sin embargo, 20 años después de la instalación el usuario obtendrá mayor ganancia proveniente del sistema con rastreo solar que del sistema fijo, con una ganancia de 354,45 USD y de 353,86 USD respectivamente convirtiendo al proyecto en viable a largo plazo.

Palabras Clave: Recursos energéticos, fuente de energía renovable, energía solar, energía eléctrica, costes, producción, rentabilidad, retribución, residencia, ganancia.

ABSTRACT

The energies classified as renewable have become an environmentally viable alternative to generate energy, among them solar energy stands out, which is an inexhaustible source. Currently the amount of energy that planet earth receives is approximately 4,500 times the amount of energy consumed in a day. That is why the current technical project proposes the search for a design which will allow the construction of a solar collection system using photovoltaic solar panels and a dynamic solar tracking mechanism to increase energy productivity for residential use, in order to compare it with a fixed system analyzing its profitability and technical viability within the residential urban sector of Quito.

As a result of the study, it has been determined that through the use of the solar tracker, it has been possible to obtain an increase of 43.6% in energy efficiency production with the solar tracking system in the month of June in 2021 compared to the fixed solar installation during the month of May in 2021. The economic analysis shows that the breakeven point for the solar tracking system is in 17 years and the one on the fixed system in 15.4 years after its installation. The cost of the solar tracking project is \$ 2,140 USD equivalent to 55% more than the fixed installation which is \$ 1,185 USD. However, 20 years after installation, the user will obtain more profit from the solar tracking system than from the fixed system, with a profit of 354.45 USD and 353.86 USD respectively, making the project viable in the long term.

Keywords: Energy resources, renewable energy source, solar energy, electrical energy, costs, production, profitability, retribution, residence, profit.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las energías renovables se han convertido en una alternativa ambiental para generar electricidad, una de ellas es la energía solar, la cual es inagotable, no contaminante y se encuentra en todo el planeta, esta energía es obtenida mediante la radiación electromagnética radiada por el sol.

Una de las alternativas más utilizadas para aprovechar la energía solar son los paneles fotovoltaicos encargados de convertir la radiación en energía eléctrica, sin embargo, para una eficiente producción de electricidad por medio de paneles solares es necesario determinar el ángulo que inciden los rayos del sol sobre el panel solar, ya que, se obtiene una mayor eficiencia cuando los rayos del sol son perpendiculares al panel [1], debido a esto en los últimos años se han desarrollado sistemas de control de posicionamiento o seguidores solares que busquen el máximo punto de energía.

En 2017, según Hernández [2] es viable la instalación de un sistema fotovoltaico de celdas conectadas a la red eléctrica para abastecer el consumo eléctrico de un edificio, suministrando energía desde los paneles solares a la red eléctrica, para abastecer el consumo en alrededor del 70 %, siendo este su consumo máximo registrado equivalente a 1117 kW-h del cual el sistema suministra 781 KW-h para esto fue necesario la implementación de 3 paneles monocristalinos de 320 W.

Para Recalde y Prieto [3] realizan la instalación de paneles fotovoltaicos mono cristalinos usando un sistema de control dinámico Fuzzy-PID, este aumentó la eficiencia de recolección solar en un 19% comparado con un sistema fotovoltaico poli cristalino estacionario, esto se evidencia al tomar mediciones de carga en las baterías.

Por ello, este trabajo de titulación pretende demostrar en sus cuatro capítulos una solución viable comparativa, en relación con el beneficio-costos del proyecto para el uso dentro de una residencia. En el primer capítulo, se encuentran todos los precedentes de investigación solar, sistemas dinámicos y estructurales. El segundo capítulo, se demuestra el funcionamiento y prestaciones del sistema con el fin de producir la energía propuesta. El tercer capítulo profundiza en el diseño y la construcción del sistema fotovoltaico sobre la residencia. Finalmente, en el cuarto capítulo se demuestra la viabilidad del proyecto, se comprueban los resultados obtenidos del sistema, se compara energéticamente con otros sistemas y se analiza la rentabilidad del proyecto.

ANTECEDENTES

Uno de los principales problemas de este estudio es la escasa responsabilidad medioambiental del humano, principalmente el uso desmedido de recursos no renovables, que cada vez es más alto con un impacto medioambiental desmedido, como el excesivo uso de combustibles fósiles o el desecho de residuos de radioactivos producidos en centrales nucleares generando contaminantes para los recursos ambientales, entre los cuales destaca el recurso hídrico, suelo, aire ambiente y entre otros en menor medida. Además, un gran porcentaje de la población en países en vías de desarrollo no cuentan con energía eléctrica. Al intentar conectarlos a la red eléctrica es necesario demasiados recursos tanto económicos como físicos, tal como el tendido eléctrico, torres de conexión, etc. Por ello los costos no representarían ninguna ganancia para las empresas de generación eléctrica, en este punto los poblados lejanos se vuelven ajenos a este servicio básico imprescindible para el buen vivir.

Como problema adjunto al anterior, es la decreciente economía actual que ha desencadenado una serie de ideas para lograr mayor eficiencia con el menor costo posible. Entre ellos un costo alto para el sector industrial como para el sector residencial es el consumo de energía eléctrica, tanto en el alumbrado como en el uso de maquinaria. Es por ello que las energías renovables ayudar a los sectores ya mencionados, siendo esta una solución recomendable para reducir los índices de contaminación ambiental, costos de producción y costos residenciales.

Concluyendo con esta problemática, se pregunta lo siguiente: ¿El diseño y construcción de un sistema de rastreo solar bi-axial con objetivo de recolectar energía solar fotovoltaica podrá ayudar a reducir costos y será económicamente rentable fabricarlo para producción de energía eléctrica en el sector residencial?

Ante estas problemáticas las energías renovables se han convertido en una alternativa ambiental para generar energía eléctrica, una de ellas es la energía solar la cual es inagotable, no contaminante y se encuentra en todo el planeta, esta energía es obtenida mediante la radiación electromagnética emitida por el sol. El ser humano desde la antigüedad aprovechado los beneficios de esta energía utilizando diferentes tecnologías las cual con el pasar del tiempo han evolucionado, en la actualidad la energía solar puede ser aprovechada mediante células fotoeléctricas, colectores solares

y heliostatos, estos sistemas se encargan de transformar la energía solar en energía eléctrica o térmica [4]. Debido a las características ambientales que presenta esta energía, en los últimos años se han intensificado los estudios para aprovechar el máximo beneficio posible y tratar de mitigar uno de los grandes problemas de la humanidad que es la contaminación ambiental[5].

Una de las alternativas para aprovechar la energía solar es la implementación de paneles fotovoltaicos que son sistemas que convierten la radiación en energía eléctrica. Sin embargo, para una eficiente generación de electricidad es necesario a tomar en cuenta el ángulo de incidencia de los rayos del sol, ya que se obtiene una mayor eficiencia cuando los rayos del sol son perpendiculares al panel. Debido a esto en los últimos años se han desarrollado sistemas de posicionamiento o seguidores solares que buscan el máximo punto de energía, con el fin de obtener una mayor eficiencia [6].

Para satisfacer la pregunta planteada anteriormente se diseñará y se construirá un sistema de seguimiento solar biaxial, ya que se ha demostrado que mediante este sistema se puede obtener una mayor eficiencia de los paneles fotovoltaicos. Este proyecto busca solucionar una problemática que se ha visto en los últimos años que es la contaminación y trata de solucionarlo de manera económica y eficiente. El sistema será de uso residencial debido a esto el proyecto contará con un sistema conectado a la red eléctrica local, lo cual ayudará a obtener un ahorro económico por consumo de energía eléctrica.

Por ello el objetivo general busca diseñar y construir un sistema de rastreo solar biaxial para generación de 600 W-h de energía eléctrica. Además, ello se busca lo siguiente:

- a.** Estudiar la radiación generada en la ciudad de Quito y la posición óptima que deben tener los paneles solares fotovoltaicos para obtener la mayor eficiencia.
- b.** Evaluar diferentes mecanismos de recolección de energía solar mediante el uso de paneles fotovoltaicos y seleccionar un mecanismo eficiente y rentable.
- c.** Diseñar un mecanismo electro-mecánico biaxial para mejorar la eficiencia de los paneles solares fotovoltaicos.
- d.** Validar el funcionamiento y eficiencia del mecanismo electro-mecánico biaxial para la generación de energía eléctrica.
- e.** Analizar la rentabilidad del equipo y punto de equilibrio para uso residencial.

CAPITULO I

1 CONCEPTOS PRINCIPALES Y GENERALIDADES

Dentro del primer capítulo se definirán los conceptos principales y necesarios para entender la transferencia de energía solar hacia la tierra y sus aplicaciones. Se describe la utilización de energía solar fotovoltaica tanto a nivel global como en el Ecuador. Se expone los diferentes sistemas de producción solar fotovoltaica, en qué casos es conveniente cada sistema y una descripción de los componentes generales de los sistemas de generación fotovoltaica como de su mecanismo de seguimiento solar. Se definen las políticas, normativas y regulaciones necesarias para la instalación de los sistemas dentro de la República del Ecuador. Finalmente, se realiza un análisis técnico-operativo de la factibilidad del proyecto.

1.1 Antecedentes de investigación

Para M. Gradella y J. Gazoli [7] los primeros descubrimientos relacionados con la energía fotovoltaica fueron por parte de Henry Becquerel en 1839, quien al suministrar luz a un electrodo metálico con una solución química producía una diferencia de potencial. Un siglo después el científico de origen polaco Jan Czochralki desarrolló un método para fabricar cristales de silicio con el fin de ser usados como semiconductores para dispositivos electrónicos. En las décadas de 1970 a 1990 estos se desarrollaron como células fotovoltaicas con capacidad de generación de energía y eran usados principalmente en aplicaciones en la industria aeroespacial. Actualmente, se usan en aplicaciones terrestres de producción de energía eléctrica.

En el trabajo de Arrieta y Puello [8] se puede evidenciar el diseño y fabricación de un rastreador solar de doble eje para mejorar el rendimiento de paneles fotovoltaicos de un sistema de bombeo. El estudio realiza tres pruebas en días diferentes, obteniendo un aumento de 41 %, 44 % y 40 % de rendimiento diario para la bomba comparada con una instalación fija de paneles solares. Además, determinan que no es rentable la construcción del sistema solo para una unidad, pero aumenta la rentabilidad sin sacrificar un rendimiento notable cuando el sistema trabaja con un solo eje mediante control eléctrico y el otro eje de giro azimut sea controlado manualmente.

En su artículo científico Mpodi, Tjiparuro y Matsebe [9] buscan la manera de aumentar la captación de energía solar. La eficiencia es el principal problema en aplicaciones

solares y la forma más común de resolver este problema es mediante el seguimiento solar de doble eje en dos dimensiones. Para ello, se realiza una revisión literaria para determinar la eficiencia global en función de su ubicación obteniendo 33 % de aumento en su producción. Posteriormente, se construye un sistema activo de seguimiento solar y uno pasivo con el objetivo de compararlos concluyendo que el seguimiento activo basa su movimiento en la precisión consumiendo la energía generada logrando un 38 %. En términos de eficiencia, mientras que el sistema pasivo reduce su consumo en el movimiento y logrando llegar a una de 43 %.

En 2020 Al-Rousan, Ashidi y Khairunaz [10] proponen en su trabajo de investigación determinar la eficiencia de un rastreador solar de un eje y de doble eje implementando un sistema de control basados en una interfaz neuronal adaptativa de lógica difusa con el objetivo de aumentar el rendimiento, predecir la trayectoria solar minimizando el error y maximizando la producción de energía modificando ángulos de inclinación y orientación. Al lograr predicciones en tres escenarios, lluvioso, nublado y soleado se obtuvo que para el ángulo de altura se obtuvo 83.01 %, 98.04 % y 100 % de predicción y para el de rotación azimutal 58.82 %, 93.46 % y 100 % usando el sistema de red neuronal ANFIS.

La investigación de Zhang et al. [11] presenta una estructura basada en tiras bimetálicas con laminados bi-estables buscando optimización en seguidores solares con el uso de células solares orgánicas. Las composiciones de las tiras bimetálicas se componen de Ni₃₆/Mn₇₅Ni₁₅Cu₁₀, este compuesto permite la deformación de la célula solar en función de cantidad de temperatura y formando una superficie cóncava en dirección solar, concluyendo que este dispositivo reduce la complejidad de la estructura. Además, que a mayor espesor y temperatura las láminas poseen un comportamiento diferente.

Según Jamroen et al. [12] en su artículo desarrollan un sistema de doble eje de rastreo solar para paneles solares poli-cristalinos de 20 W de potencia y a la vez un sistema fijo de recolección solar con el mismo tipo de panel. Se logra obtener 44,89 % más de eficiencia promedio usando el sistema de rastreo en comparación al sistema fijo de placa plana, además realizan un análisis de costos que incluye 92\$ en la implementación de componentes extras en el sistema de rastreo. Esto da como

resultado que la rentabilidad del sistema se encuentra en 1130 días para un precio de 0.2\$ por cada kilovatio-hora y en 754 días para 0.3\$ por cada kilovatio-hora.

1.2 Energía

La energía es la capacidad para causar cambios realizando un esfuerzo, su unidad de medida es Julios (J), la ley de conservación de energía es una de las principales leyes de la naturaleza que expresan que la energía cambia de una forma a otra pero su capacidad o cantidad siempre permanecerá constante, por ende, la energía no se crea ni se destruye solo se transforma [13], [14]. Estas formas que puede adoptar la energía se han clasificado debido a la cantidad de disipación de energía útil al realizar el trabajo debido, ya sea, en energía de forma térmica, sonora, química, cinética y entre muchas de las formas que puede adoptar la energía, actualmente se clasifican en dos tipos. Las fuentes renovables en las cuales la energía del medio es prácticamente inagotable y las no renovables que actualmente solo pueden generar el trabajo una sola vez y el resto de energía se dispersa en el medio ambiente.

1.2.1 Fuentes renovables y no renovables de energía

Los recursos energéticos son fuentes de energía utilizados con el fin de producir calor, desplazar objetos y producir corriente eléctrica, potenciando la vida del ser humano. La tasa de consumo de energía para el hombre ha crecido de forma constante a través de la historia, empezando con necesidades básicas como el combustible para cocinar y conservar el calor, actualmente los humanos logran consumir alrededor de 110 veces más de energía comparado a sus primeros antecesores [15].

Una gran parte de los recursos energéticos utilizados actualmente se basa en la quema de combustibles fósiles para generación de energía eléctrica y térmica, pero esta combustión produce efectos dañinos al medio ambiente y a los seres vivos. Estos recursos son llamados fuentes no renovables de energía, debido a que no se renuevan con facilidad, ya que, es necesario de miles de años para su producción como es el petróleo, el carbón y el gas natural, estos tres tipos de combustibles representan el 85 % de los recursos energéticos, un 10 % en fuentes renovables y un 5 % en fuentes de origen nuclear como se visualiza en la figura 1 [16].

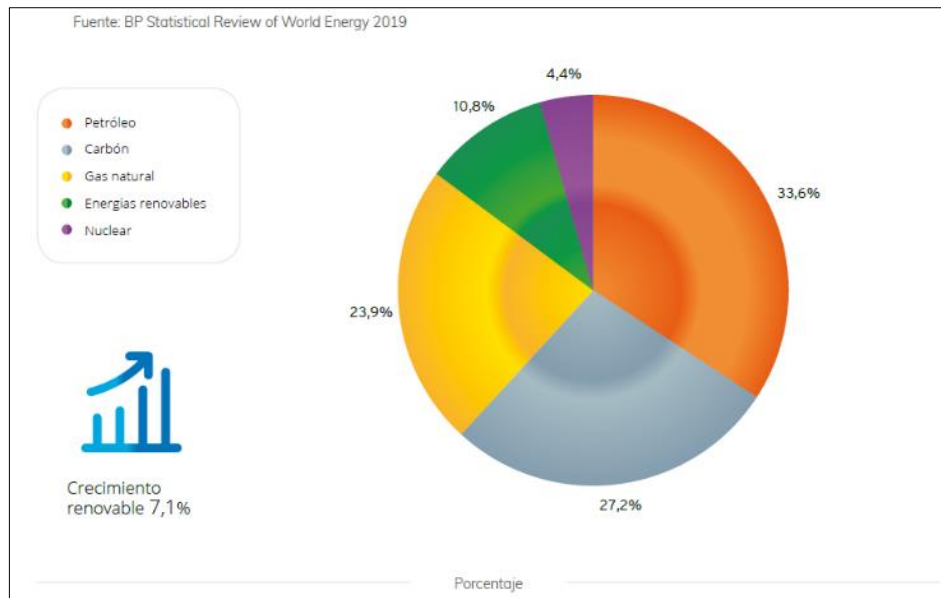


Figura 1. Consumo energético a nivel mundial año 2019 [16].

Las energías renovables también llamadas energías verdes, son llamadas así debido a que su tasa de recuperación es superior a la de extracción. Los principales recursos útiles para la subsistencia humana provienen del suelo y mar, de los cuales se encuentran los seres bióticos, los cuales proveen alimento y energía al ser humano y otras especies. Además del suelo provienen distintos recursos no renovables como el carbón, el petróleo y el gas natural. El principio de todos estos recursos se debe al sol, siendo ésta la principal fuente de energética del planeta y derivándose en recursos de flujo, viento y agua, la energía solar satisface los requerimientos actuales del hombre, este tipo de energía no se ha difundido debido a que su almacenamiento es costoso aparte de ser un tipo de energía no constante. También se ha clasificado como renovable a las fuentes geotérmicas debido al gran número de depósitos geotérmicos, pero pueden agotarse si la extracción de energía supera a la energía extraída [17].

1.2.2 Energía solar

La energía solar es irradiada y generada a través de la luz solar. Es el principal recurso de todo tipo de energía que se produce en la tierra. El sol libera hidrógeno continuamente mediante reacciones de fusión y libera grandes cantidades de energía térmica. La energía solar recibida en forma de radiaciones electromagnéticas que pueden transformarse directa o indirectamente en otra forma de energía como el calor y la electricidad. Es una tecnología que se puede usar en dos sistemas: sistemas solares térmicos y sistemas solares fotovoltaicos (PV).

En la Tierra la captación de la energía radiante proveniente del sol es a penas de unos mil millonésimos de la emitida por el sol, este flujo de energía se divide en luz visible, luz ultravioleta y luz infrarroja, 51 % es absorbida por la superficie terrestre, el 19% absorbida por los componentes atmosféricos y un 30% es reflejada por la superficie y gases del exterior [17].

1.2.3 Tipos de energía solar

Al considerar la energía solar como fuente principal de vida en el planeta y de la cual provienen las otras fuentes de energía, es necesario conocer los métodos actuales de transformación directa de energía solar en otros tipos de energías secundarias como la activa y pasiva.

1.2.3.1 Energía solar activa

El principio de la energía solar activa consiste en la integración de equipos eléctricos o mecánicos o una combinación de ellos, con el objetivo de aumentar la productividad o convertir la energía conseguida por la irradiación transformándola en energía útil, ya sea transformándola en electricidad o en energía mecánica, acumulándola para distribuirla y cubrir las demandas energéticas en el momento que se requiera. Estos equipos son bombas de agua, motores eléctricos, ventiladores, entre otros. Los seguidores de tipo solar se utilizan para aumentar la producción energética en paneles fotovoltaicos se encuentran orientados a la radiación solar. Las aplicaciones se clasifican en dos tipos, la energía solar térmica y energía solar fotovoltaica [18].

1.2.3.2 Energía solar pasiva

La energía solar activa en comparación con la energía solar pasiva realiza la captación de energía, pero sin utilizar sistemas mecánicos, usualmente son utilizados con el fin de entregar calefacción o refrigeración a un sistema aprovechando medios de origen natural como la convección, conducción y la radiación, por ello no es necesario utilizar energía adicional para funcionar, obteniendo cero emisiones de gases de efecto invernadero, cero costos de operación y mínimos costos de mantenimiento. Un ejemplo se encuentra en el diseño de construcciones domiciliarias orientando ventanas perpendiculares al sol, para aprovechar la radiación y aumentar el aislamiento térmico

de las construcciones, en función de los parámetros se obtendrá ganancia solar directa, indirecta y aislada como se observa en la figura 2 [19].

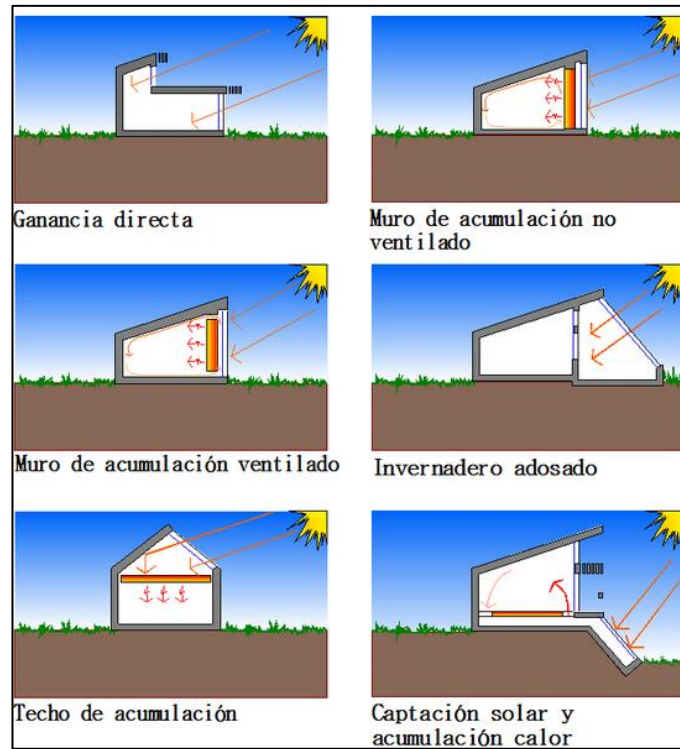


Figura 2. Tipos de sistemas pasivos para climatización de edificios [20].

1.2.3.3 Energía solar térmica

Este tipo de energía utiliza la capacidad calorífica que entrega el sol mediante la radiación solar con el objetivo de aumentar la temperatura de una masa, usualmente líquidos y gases con el aumento de su capacidad calorífica y entropía, para posteriormente usarlo en calefacción o agua sanitaria a nivel residencial y a nivel industrial. Además, es usado para producir vapor que usan las turbinas para generar electricidad.

1.2.3.4 Energía solar fotovoltaica

Mediante el efecto fotovoltaico es posible convertir la luz solar en electricidad usando células que recogen la energía que poseen los fotones. Las células son unidades transformadoras de energía que al estar unidas forman un panel solar fotovoltaico, el cual entrega mayor potencia y energía. Una diferencia entre los sistemas solares térmicos y los sistemas fotovoltaicos se encuentra en que estos últimos poseen la capacidad de recolectar directamente la luz solar y convertirla en corriente eléctrica,

en cambio para los sistemas solares térmicos es necesario un generador eléctrico y es necesario contar con turbinas que trabajen a altas velocidades y temperaturas para la generación de electricidad.

La energía captada por los sistemas fotovoltaicos es convertida en corriente para su recolección y procesamiento en dispositivos de control y convertidores, estos pueden almacenarse en baterías o utilizarse directamente en sistemas conectados a la red eléctrica, ya sea, industrial o domiciliaria. Así mismo, como la energía solar térmica, los sistemas fotovoltaicos son orientados por uno o dos motores eléctricos para aprovechar de la manera más eficiente el Sol.

Los sistemas fotovoltaicos usualmente son instalados en tejados y fachadas residenciales con el objetivo de evitar sombras y aumentar su rendimiento, de igual manera son instalados en planicies con poca vegetación para suministrar energía a plantas de generación eléctrica. Actualmente, la energía solar fotovoltaica crece continuamente en todo el mundo, ya que, es muy utilizada para la electrificación de sitios sin red eléctrica o a su vez para complementar dicha red a través de sistemas fotovoltaicos conectados a la red, que permiten generar electricidad en paralelo con la red eléctrica pública.

1.2.3.5 Comparación entre la energía solar activa y pasiva

La principal diferencia entre los sistemas solares pasivos y activos radica en que los sistemas pasivos aprovechan la energía de su entorno inmediato al igual que los activos, pero difieren al utilizar mecanismos o dispositivos alimentados con energía de esta u otra fuente como ventiladores, bombas y motores para optimizar su rendimiento. En el caso de la energía solar térmica activa, usa bombas y ventiladores para aumentar la transferencia y desplazamiento del fluido. Además, existen métodos híbridos que combinan varias tecnologías y sistemas, por ejemplo, un sistema térmico activo en el cual sus dispositivos y mecanismos como bombas y ventiladores son alimentados con paneles solares fotovoltaicos.

Respecto a los sistemas de recolección fotovoltaicos activos son usados en seguidores solares que son orientados perpendicularmente a los rayos del sol trabajando desde el amanecer hasta el atardecer. La optimización y recolección de la energía dependerá del objetivo en el que se requerirá la energía y es necesario aplicar la mejor estrategia.

1.2.4 Radiación solar

La fuente energética primordial en los procesos del planeta es el Sol, es la principal fuente del ecosistema. La energía solar es el resultado de la fusión nuclear generada en el núcleo del sol, donde convierte el hidrogeno en helio, en este proceso libera grandes cantidades de energía que salen hasta la superficie visible y ésta escapa en forma de rayos al exterior [21].

La transferencia de energía mediante ondas electromagnéticas es conocida como radiación y se realiza de forma directa desde el sol hacia el espacio en todas las direcciones. Las ondas no necesitan de un medio para transportarse, debido a esto llegan hasta la tierra desde el sol. La energía consumida por la humanidad en la actualidad es 10.000 veces menor que la que llega a la superficie terrestre [22].

1.2.4.1 Irradiancia

La irradiancia es una magnitud que describe la potencia incidente de energía radiante sobre una superficie, en otras palabras, es la cantidad promedio de energía que incide en una superficie por unidad de área y por unidad de tiempo, sus unidades están dadas en W/m^2 [23].

1.3 Ejes de movimiento terrestre

La Tierra detalla una órbita elíptica en su traslación alrededor del Sol y se demora unos 365 días en completar un ciclo. En la figura 3 se puede observar el giro de la tierra alrededor de su eje rotacional, este eje se mantiene constantemente inclinado a $23^{\circ} 27'$ con respecto al plano elíptico. Debido a estos fenómenos los rayos del sol llegan con un distinto ángulo a la superficie terrestre y dependerán de la época del año. Por ello se da lugar a las diferentes estaciones del año, provocando diversidad de climas [24].

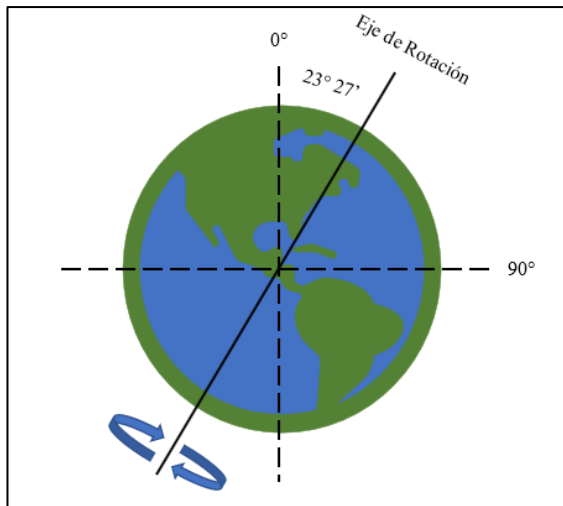


Figura 3. Inclinación del plano eclíptico y el eje de rotación terrestre. Elaborado por Agila & Landázuri.

1.3.1 Coordenadas ecuatoriales

Para localizar una ubicación terrestre se utiliza coordenadas globales, llamadas longitud y latitud, respectivo a su paralelo y meridiano. La latitud es medida por su elevación en grados en función la línea ecuatorial, a cada uno de los grados de latitud le corresponden un paralelo, por lo que existen 90° paralelos al Norte y 90° al Sur, por conveniencia, se toman valores positivos para el hemisferio norte y negativos para el sur. La longitud es el ángulo formado por el meridiano del lugar con el meridiano 0° de referencia que pasa por Greenwich, cada grado de longitud le corresponde un meridiano. Así pues, existen 180 meridianos al Este y 180 al Oeste [24].

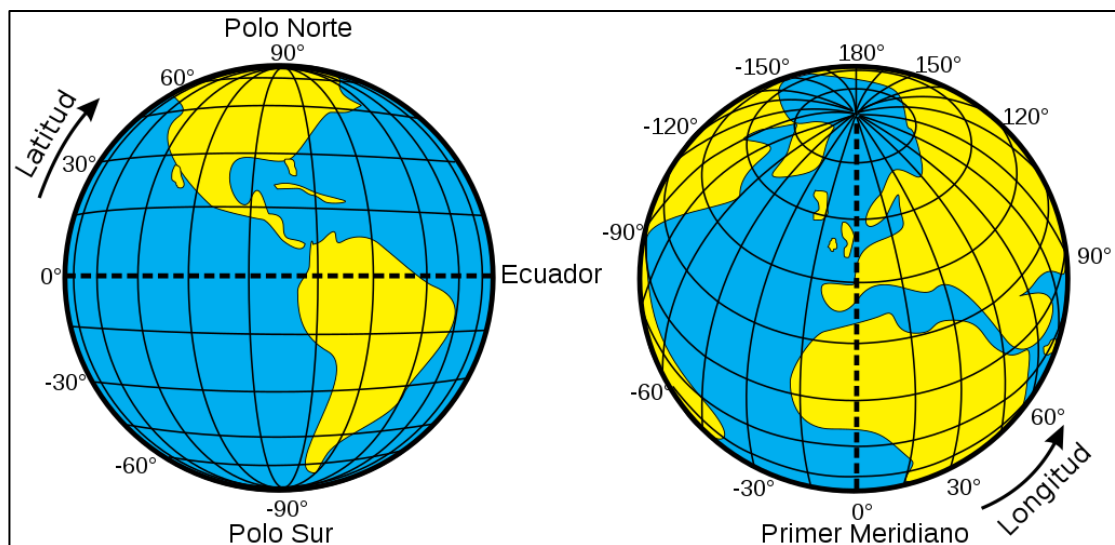


Figura 4. Latitud y longitud terrestre [25].

1.4 Trayectoria solar

Para un observador en la tierra los movimientos relativos del sol basan su trayectoria en 3 diferentes ejes y varían en función de la latitud y longitud del observador mostrado en la figura 5.

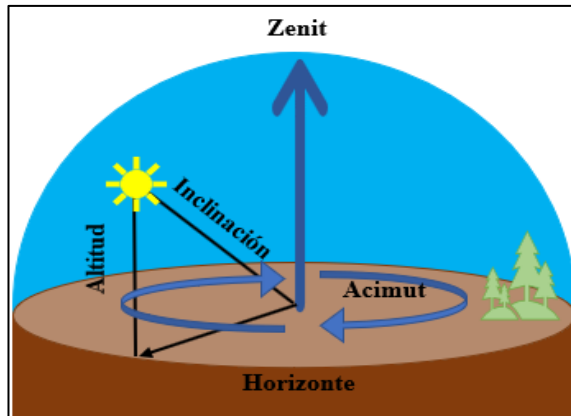


Figura 5. Trayectoria aparente solar en función de un observador en la Tierra. Elaborado por Agila & Landázuri.

1.4.1 Zenit

La orientación Zenith es el ángulo formado por el sol mirando hacia arriba desde el nivel del suelo, este ángulo varía a lo largo del día alcanzando su máxima elevación alrededor del mediodía. Sin embargo, esta elevación es diferente entre el solsticio de verano y el solsticio de invierno que representa los días más largos y cortos del año, el arco formado en el cielo por el movimiento de la tierra en función del sol representa las distintas estaciones del año.

1.4.2 Azimut

El azimut es el ángulo que se forma entre el Norte con cualquier cuerpo celeste, el cual es medido en el sentido de las agujas del reloj con el horizonte del observador, debido a ello es necesario tomar en cuenta la ubicación del espectador para conocer la posición del cuerpo celeste, generalmente el ángulo es requerido para la orientación correcta de los paneles solares ya que varía dependiendo con la latitud y la época del año.

1.4.3 Incidencia

Este ángulo depende de la posición de sol con realización a la superficie terrestre en una terminada época del año, este ángulo de incidencia puede variar debido a varios factores como: la orientación, latitud, ángulo horario, inclinación y declinación. Dependiendo de estos factores una superficie absorbente podrá captar energía solar durante el año.

1.5 El Ecuador y la energía solar fotovoltaica

1.5.1 Atlas solar

El Ecuador al estar localizado sobre la línea ecuatorial, presenta algunas ventajas para la utilización de la energía solar, además es un país caracterizado por presentar una topografía muy variada, con condiciones favorables que lo convierten en un país potencial para la producción de energías renovables. A pesar del gran potencial solar que tiene el país, la participación de la energía solar en la matriz energética representa solo el 0.15% del consumo eléctrico en el país.

En el año 2019 Vaca-Revelo y Ordoñez [26] realizaron el mapa solar del Ecuador, en el que utilizaron la base de datos de las estaciones meteorológicas del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y del Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), determinando que debido a la ubicación geográfica, el recurso solar es casi constante a lo largo del año, a pesar de esta ventaja la presencia del callejón interandino ayuda a reducir este potencial en ciertas regiones debido a la generación de múltiples microclimas. En este estudio la irradiación solar global horizontal (GHI) en el Ecuador varía desde 2.9 kWh/m² día hasta el 6.3 kWh/m² día [26]. Esto demuestra que los niveles de radiación en el Ecuador son lo suficientemente altos para la implementación de energías solares, térmicas y fotovoltaicas, por lo general las zonas de mayor altitud presentan mayores niveles de radiación, mientras que las regiones de transición a la costa y oriente presentan los menores niveles.

Cevallos-Sierra y Ramos-Martin [27] sugieren un valor de 3.8 kW/m² día como un valor viable para un proyecto fotovoltaico. La figura 6 representa el mapa de irradiación global horizontal anual de la cual provincias como Pichincha e Imbabura presentan valores de entre 4.5 kW/m² día hasta 5.7 kW/m² día, valores que superan significativamente al valor sugerido por estos autores, por lo que presentan un alto potencial solar además de presentar una parte de la industria y población del país.

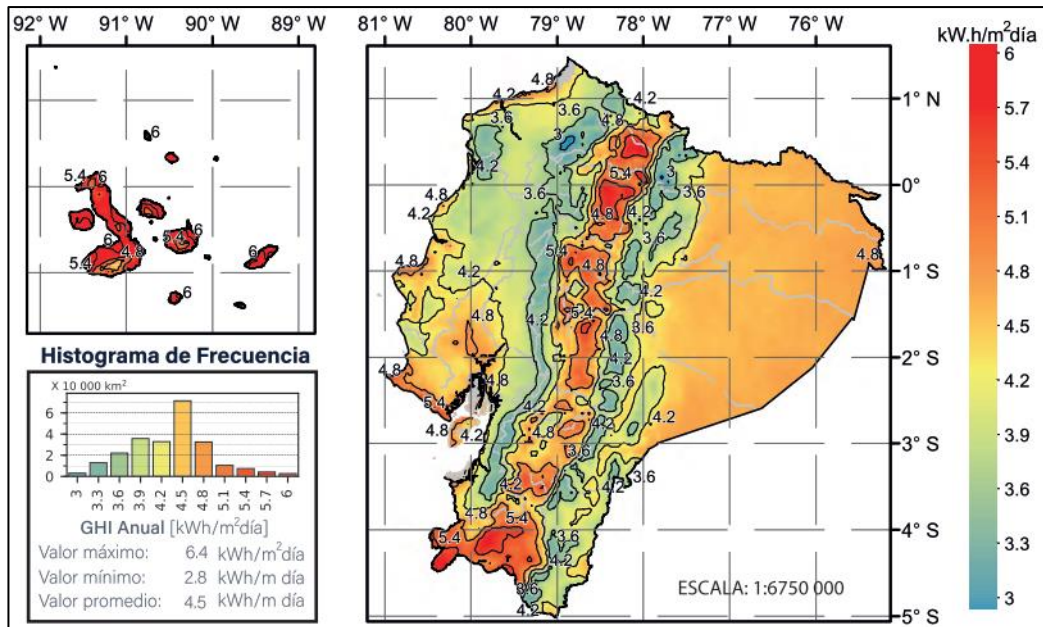


Figura 6. Irradiación Solar Global Horizontal (GHI) Anual [26].

1.5.2 Hora Solar Pico (HSP)

La hora solar pico corresponde al intervalo de horas que recibe energía de 1000W para una superficie de 1 m². Para la ubicación en la cual se va a realizar la instalación del proyecto el cual corresponde al norte del Distrito Metropolitano de Quito, en el sector San Isidro del Inca, en las calles Belladonas y Almendros. Para ello se procede a ingresar los datos de ubicación en un programa monitoreo solar en función de la ubicación en un en el cual está representado en el siguiente gráfico cartesiano de movimiento solar [28].

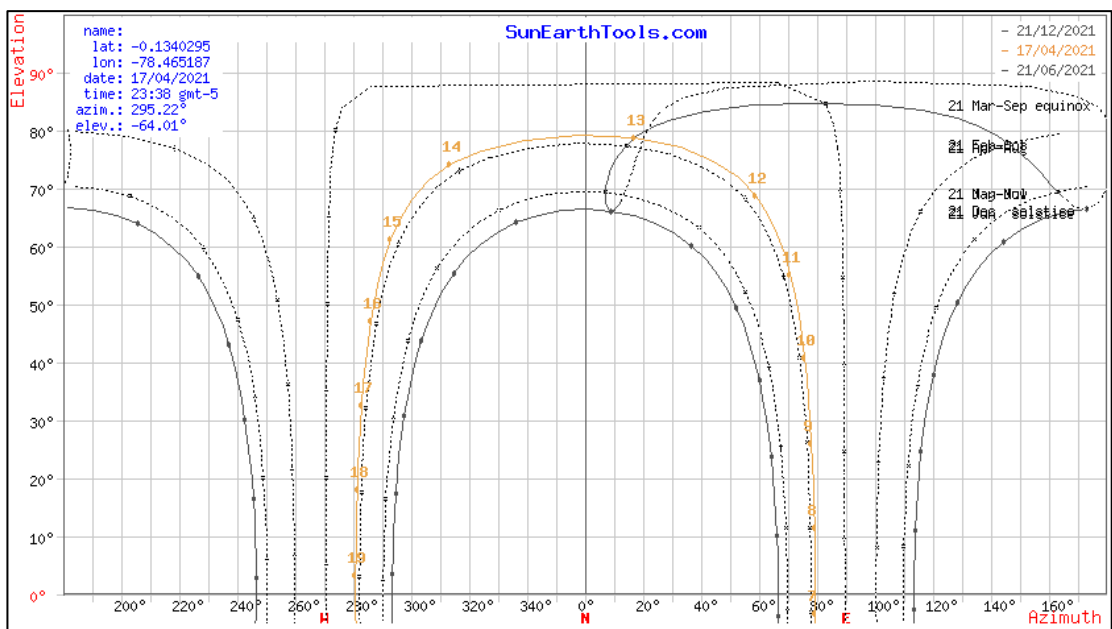


Figura 7. Carta solar para latitud y longitud en la instalación solar [29].

En la figura 7 se observa las curvas de movimiento solar en diferentes épocas del año. Tomando en consideración esta gráfica se puede deducir que desde el amanecer hasta el atardecer transcurre alrededor de 12 horas, desde las 7 horas a.m. hasta las 19 horas p.m., las primeras y últimas horas del día poseen menor cantidad de irradiación, por ello se opta por adquirir un pirómetro que mide la radiación del sol en un instante de tiempo realizando la prueba durante 3 días se obteniendo los siguientes resultados.

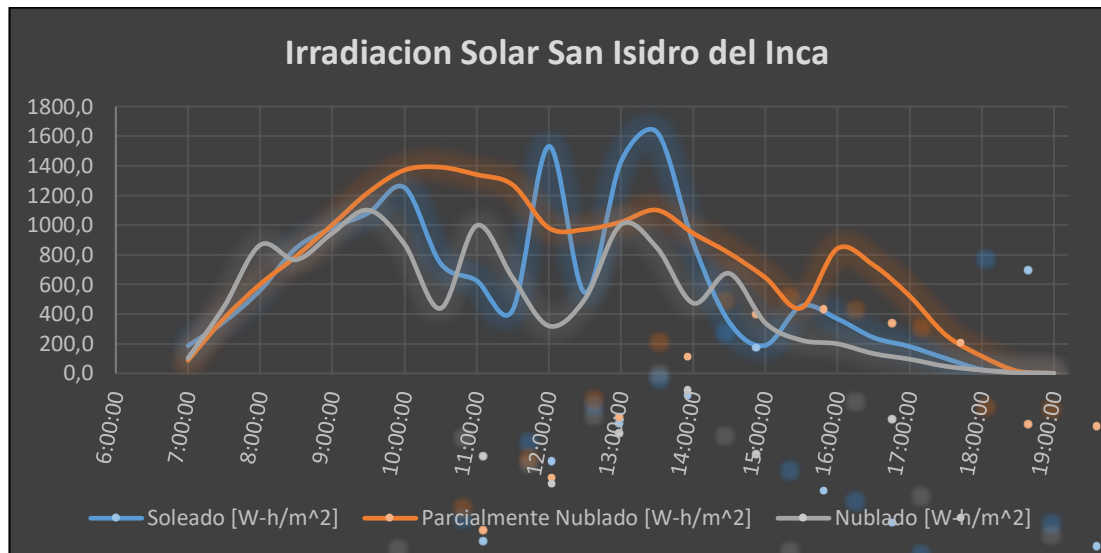


Figura 8. Datos de irradiación en la instalación fotovoltaica. Elaborado por Agila & Landázuri.

Mediante esta gráfica se puede conocer la cantidad de horas solares pico teniendo un promedio de 7 horas obteniendo un promedio de $7 \text{ kWh}/m^2$ durante el día.

1.6 Sistemas de producción de energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica empezó cuando el francés Alexandre Bequerel alrededor del año 1838 descubrió que se puede transformar la radiación solar en electricidad usando un semiconductor, ahora conocido como efecto fotovoltaico, después en 1877 el inglés William Adams y Richard Day lograron crear la primera célula fotovoltaica de selenio logrando una diferencia de potencial muy bajo, difícil de usar para alguna aplicación práctica. Pasado un siglo en el año 1953 Gerald Pearson logró patentar la primera célula fotovoltaica de silicio, desde ese entonces las células han ido aumentando su eficiencia hasta convertirse en un campo de aplicación muy amplio [30].

La energía entregada por los paneles fotovoltaicos formados de células fotovoltaicas es corriente continua medida en Vatios o Kilovatios dependiendo de las aplicaciones, el consumo fotovoltaico es una alternativa para la reducción de CO_2 (Dióxido de

Carbono), pero al existir pocas políticas de ayuda medio ambiental estos sistemas son implementados mediante empresas privadas. En la actualidad las aplicaciones en países desarrollados son diversas como suministro de energía en viviendas, alimentación de sistemas de riego, telecomunicaciones, alumbrado, entre otras.

Actualmente, existe tres tipos de conexiones para los sistemas fotovoltaicos con características y especificaciones diferentes, en base a los requerimientos, entre ellos se tiene los sistemas fotovoltaicos on grid también llamados conectados a la red eléctrica, tal como indica su nombre son sistemas los cuales entregan su energía hacia el suministro eléctrico de la empresa eléctrica. Esto se realiza mediante un inversor solar y un medidor bidireccional el cual determina la cantidad de [kW] consumidos en la instalación y la cantidad de [kW] entregados por el sistema fotovoltaico.

El sistema off grid, también llamado desconectado de red se encarga de suministrar energía a la instalación sin tener conexión con la red eléctrica local, para ello es necesario contar con un controlador solar, baterías recargables de gel y un inversor de corriente continua a alterna. Estos sistemas son mayormente usados en lugares que no disponen de acceso a la red eléctrica, además de usarlos para bombeo de agua, montañismo, pesca, entre otros.

Los sistemas híbridos son sistemas con ventajas de los sistemas anteriormente vistos, ya que, si las cargas dentro del sistema son mínimas o nulas el sistema producirá energía tanto como para la red eléctrica pública como para un banco de baterías que posteriormente entregará a las cargas que requieran. Así mismo cuando las cargas superen el consumo de la energía solar el inversor procede a conectarse a la red eléctrica o al uso del banco de baterías en caso de encontrarse cargadas.

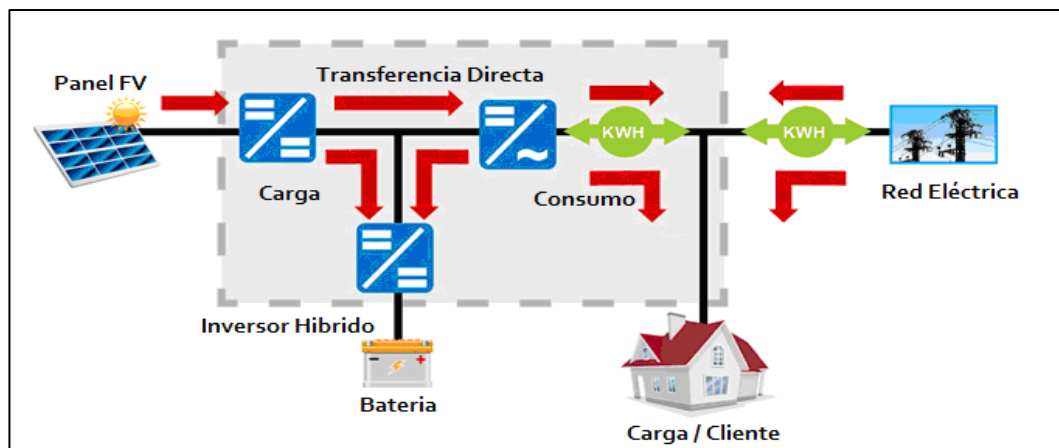


Figura 9. Sistema fotovoltaico de conexión híbrida [31].

1.6.1 Panel solar fotovoltaico

Un panel o modulo fotovoltaico es un dispositivo conformado por celdas o células solares las cuales transforman la radiación solar en diferencia de potencial, las combinaciones de células solares incrementan el voltaje y la corriente, estas son organizadas entre sí para formar un panel fotovoltaico. Existe tres tipos de paneles destacando el de tipo mono cristalino que es el más eficiente debido a que la temperatura no afecta considerablemente a su rendimiento a comparación de los policristalinos ya que estos no son hechos únicamente de cristales de silicio, sino de varios cristales. Los de tipo amorfo o también llamados “capa fina” poseen un rendimiento menor a los cristalinos debido al tipo de construcción y poco material de silicio en polvo y finalmente el de tipo flexible tienen la ventaja de cambiar su geometría debido a que las células solares se encuentran encapsuladas en polímeros, estos entregan menor rendimiento al momento de la recolección solar [32].

Así mismo los paneles pueden combinarse en serie, paralelo o inclusive mixtos. Existe varios parámetros para obtener un rendimiento alto en paneles fotovoltaicos, como condiciones ambientales (radiación solar) las cuales influyen en la potencia generada.

1.6.2 Banco de baterías

Alessandro Volta un físico y químico italiano dio a conocer el descubrimiento de la pila eléctrica, un invento que utilizaba placas de zinc y plata, y como medio un electrolito para obtener diferencia de potencial, a este efecto se lo denominó electrolisis. Luego de algunos años Gaston Planté logró fabricar el primer modelo de batería de plomo-acido logrando comercializarse y perfeccionándose continuamente [33].

Las baterías son dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica, dentro de los sistemas de recolección fotovoltaico desconectados de la red eléctrica, es necesario la implementación de estas debido a que la radiación solar que recibe el panel fotovoltaico no coincide con la carga de los dispositivos y además la radiación solar no se encuentra todo el tiempo. Las baterías son recargadas progresivamente y se descargan para equilibrar cargas bajas en dispositivos que lo necesiten, la eficiencia de estas baterías es de un 80% ya que no es posible descargarlas más, existe 4 tipos de baterías los cuales son las baterías de plomo, de (Ni-Cd), de ion-litio y de gel selladas

con base en gel de sílice como electrolito utilizadas para descargas lentas y profundas, su costo varía en función de su autonomía. [34]

1.6.3 Controlador Solar

Este equipo se encarga de controlar los parámetros y variables eléctricas de los paneles fotovoltaicos para abastecer de carga eléctrica estable a equipos. Es necesario optar por el controlador adecuado, influyente en el rendimiento y la eficiencia del sistema. Es imprescindible el uso de un controlador que trabaje con el máximo punto de poder del panel y a su vez que proteja las baterías de cargas excesivas [35].

1.6.4 Inversor de Corriente

Los inversores de corriente transforman la corriente de continua a alterna y viceversa. Para el uso en paneles solares es necesario la inversión de corriente continua la cual suministra el panel fotovoltaico a corriente alterna para el uso de dispositivos que usen tal corriente como es el caso en la mayoría de los dispositivos residenciales e industriales.

Dentro de los tipos de inversores solares nos encontramos con los inversores de tipo cadena, micro inversores e inversores centrales. Los inversores de tipo cadena son usados comúnmente en paneles con conexión en serie debido a que este módulo de inversión puede trabajar con altos voltajes, un inconveniente que presentan este tipo de inversores es que entregan la potencia del panel que en menor cantidad produce en el sistema debido a su arreglo en cadena, por ello es recomendable usar este módulo en sistemas con la misma inclinación y sin ningún tipo de sombra.

El micro inversor es un módulo que se conecta en cada panel solar y trabajan de manera independiente logrando así que si existiese alguna falla en algún modulo solar, se cuente con la potencia neta de los otros módulos. Para estos módulos de inversión es posible una salida para monitoreo, sea mediante red alámbrica o inalámbrica, pero teniendo un costo más elevado en relación con el inversor de tipo cadena, además de ello los micro inversores no requieren baterías para el almacenamiento de energía debido a la transformación directa de la misma.

Finalmente existen los inversores centrales que son mayormente usados en estaciones fotovoltaicas en el cual se maneja un numero alto de módulos fotovoltaicos conectados en serie y paralelo, aceptando trabajar con voltajes y corrientes muy altas. Para ello en

un número determinado de módulos solares es necesario la instalación de cajas de combinación para evitar problemas con el cableado eléctrico y reducir costes de instalación [36].

Las características más importantes de los inversores se encuentran en la calidad de corriente que entregan, entre ellas el voltaje de alimentación determinando así la mayor eficiencia y reduciendo los armónicos eléctricos, Para aumentar la flexibilidad del sistema se utilizara un inversor on-grid (conectado a la red) [37].

1.7 Mecanismo biaxial

Un mecanismo biaxial es un sistema de varios elementos mecánicos con el objetivo de transmitir movimiento en 2 ejes. En dispositivos de recolección de energía solar se utiliza ángulos de trayectoria solar llamados Azimut y Zenith, estos ángulos determinan la ubicación solar en función de coordenadas terrestres. El ángulo de variación Azimut empieza desde el norte hacia el este, por lo que una estrella en el norte tiene un Azimut de 0° , una estrella en el oriente tiene un Azimut de 90° . El ángulo Zenith dependerá de la variación del tiempo en función del día tomando como ángulo 0 el de la coincidencia entre el plano del observador y del sol. Es necesario automatizar el movimiento de estos ejes para lograr la mayor captación solar, ya sea con el uso de sensores o mediante la programación de la trayectoria solar.

1.7.1 Actuadores de movimiento

Dentro del mecanismo biaxial es necesario contar con un elemento motriz que disponga las células solares en posición perpendicular al sol en función del tiempo. Una solución adecuada para este tipo de movimiento es un actuador lineal y un motorreductor, tanto para el movimiento lineal de control de altitud como el motorreductor de movimiento rotacional para el movimiento azimutal.

Un actuador es un componente encargado de modificar el estado de un evento o proceso mediante una señal ya sea eléctrica, neumática o incluso hidráulica para realizar un proceso automatizado, dentro de los actuadores principales en el mercado se encuentran los actuadores eléctricos que comúnmente activan motores eléctricos, resistencias eléctricas o señalización mediante el encendido o apagado de luminarias y los actuadores electrónicos que comprenden cualquier dispositivo que trabaje con corriente directa. Así mismo existen actuadores de uso neumático y de uso hidráulico

con sus respectivos procesos. Para el control del proceso de rastreo solar se utilizará un actuador de tipo electrónico y otro de tipo eléctrico.

1.7.1.1 Actuador lineal

Un actuador de tipo lineal es un instrumento que transforma el movimiento giratorio de un motor en movimiento lineal ya sea para empujar o halar, estos son muy utilizados en mecanismos que necesiten un cambio en la inclinación de un plano, elevación y descenso o en empuje y arrastre de cargas, esto lo realizan con un movimiento suave y constante con alto grado de precisión y fuerza. En el mercado existen varios tipos de actuadores lineales pero debido a las prestaciones y la aplicación se optará por un actuador eléctrico en paralelo, su nombre se debe a que el motor se encuentra en paralelo a un tornillo sin fin que trabaja como vástago de arrastre o empuje del sistema, dentro del actuador el motor cuenta con engranajes y bandas para aumentar su torque pero reduciendo su velocidad como se observa en la figura 10 [38].

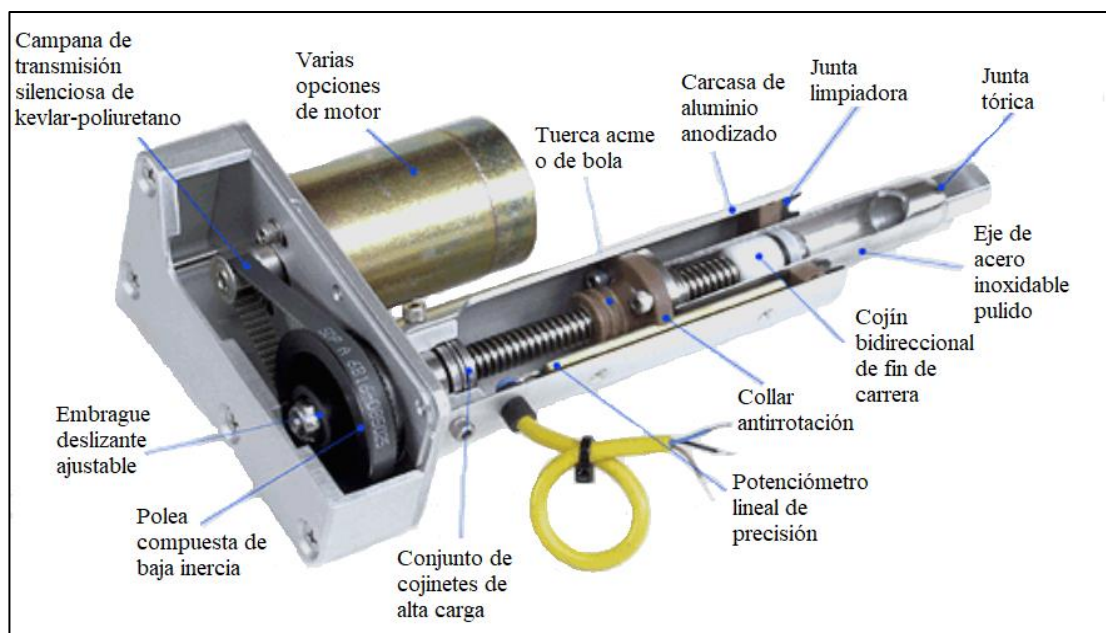


Figura 10. Actuador lineal Ultramotion en corte e identificación de piezas [39].

El actuador lineal al ser movido por un motor en corriente directa es necesario que el controlador sea conectado a un “Puente H” el cual es un circuito eléctrico con el fin de controlar la dirección de giro y las revoluciones de un motor de corriente directa sin afectar su funcionamiento.

El “Puente H” basa su funcionamiento en la conmutación de un interruptor sea este de accionamiento manual o digital en este caso el accionamiento será entregado por el

controlador que envía una señal digital en 5 voltios en función la programación lo requiera, una vez que se envía una señal a través del switch 1 (sw1) activando el transistor Q1 y permitiendo el flujo de electrones de la fuente de 12 voltios hacia el motor por el lado positivo, a su vez el switch 1 activa el transistor Q4 que conecta el lado negativo del motor y a su vez cierra el circuito con tierra y la batería de 12 voltios en su conector negativo, produciendo el giro del motor ya sea en sentido horario o anti horario, es necesario aclarar que los transistores Q2 y Q3 no se encuentran activos evitando la circulación de corriente, una vez que el controlador conmuta al switch 3 pasando por tierra, este activará los transistores Q2 y Q3 pero desactivará los transistores Q1 y Q4 invirtiendo la conexión del motor y generando un giro inverso al de la conexión con el switch 1 como se describe en el diagrama de la figura 11 o en el esquema de general de la figura 43.

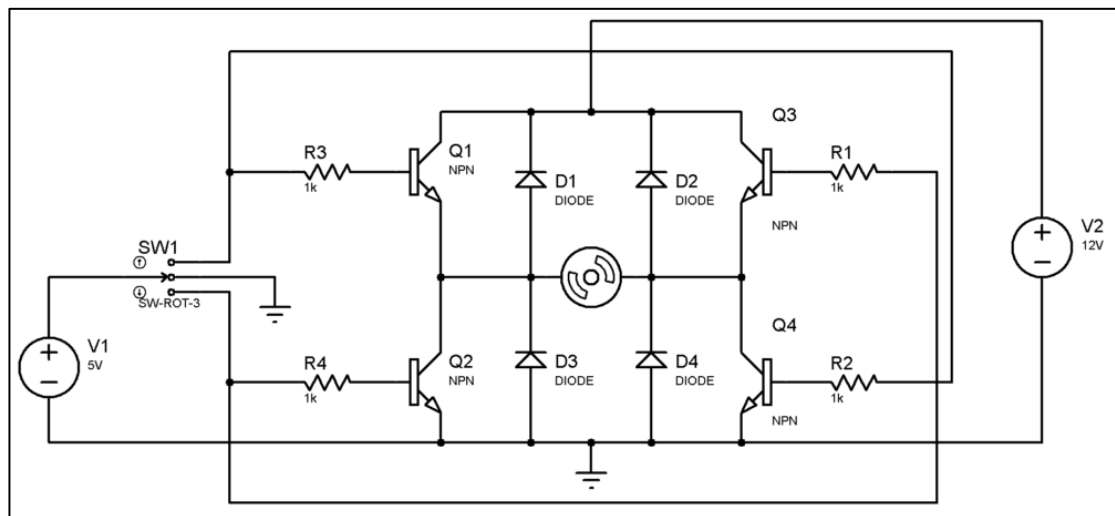


Figura 11. Puente H control de movimiento de actuador lineal [40].

1.7.1.2 Motorreductor

Un motorreductor es un arreglo mecánico-eléctrico compuesto de 2 partes, de un motor eléctrico y una caja de reducción mecánica, sus usos son muy variados desde estar presentes en juguetes hasta formar parte de máquinas muy complejas.

Uno de los conceptos principales de los motorreductores es la relación de reducción, que es la relación entre los diámetros de 2 engranajes de diferente tamaño, para que exista una relación de reducción es necesario un engranaje conductor y un engranaje conducido y que el diámetro bruto del engranaje conductor sea menor que el engranaje conducido, en este caso el engranaje conductor que se encuentra acoplado al motor

eléctrico debe girar más veces para que el engranaje conducido de una sola vuelta. Si el número de vueltas del engranaje conductor es 3 y el número de vueltas del engranaje conducido es 1 entonces estamos ante una relación de reducción de 3 a 1, otra manera de determinar la relación es dividiendo el diámetro del engranaje conducido para el diámetro del engranaje conductor.

Otro concepto que es necesario comprender es el par o el torque entregado por el motorreductor, el torque se define como la fuerza de giro o momento aplicado a un eje, este momento o par se lo puede medir en [kg-m], [lb-ft] y sus derivaciones. El torque aplicado dentro de un determinado tiempo se convierte en potencia del motorreductor, existe una fórmula para determinar el torque de un motorreductor y viene dado por la siguiente ecuación [41].

$$T = \frac{P \cdot 716}{n} \quad (1)$$

Donde:

T: es el torque medido en [kg-m].

P: la potencia medida en [HP]

n: el número de revoluciones medido en rpm.

1.8 Sistema de control

La implementación de un mecanismo biaxial es necesario con el objetivo de rastrear el posicionamiento solar. Este mecanismo debe ser controlado y desplazado alrededor de dos ejes mediante un sistema que logre controlar dichos ejes.

Un sistema de control se define como la unión de componentes que trabajan juntos y se interrelacionan para lograr una respuesta deseada, los sistemas de control son utilizados para regular parámetros dinámicos de un proceso, sea este físico como la velocidad variable de un motor o abstractos como un software de economía. El fundamento de estos sistemas se basa en la teoría de sistemas lineales, remarcando un vínculo entre causa y efecto en su proceso mediante sus componentes como puede ser una estación completa de generación de energía o simplemente un motor eléctrico, por ello un componente o subproceso puede ser representado mediante un bloque con

entrada o entradas, su proceso y su salida o salidas como se observa en la figura 12 [42], [43].

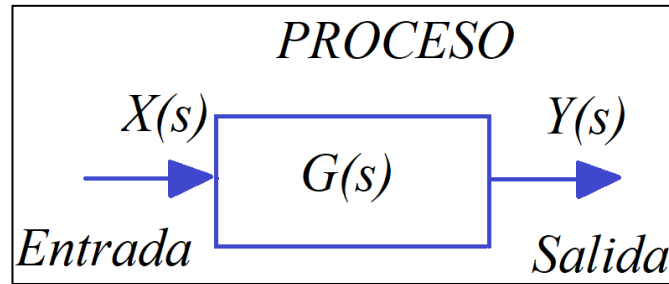


Figura 12. Diagrama Simplificado de un sistema de control [44].

Para los sistemas de control dinámicos existe dos tipos de interconexiones o arreglos, los sistemas conocidos como lazo cerrado y los sistemas de tipo lazo abierto.

1.8.1 Sistema de control lazo abierto

Estos sistemas de control también llamados sistemas no retroalimentados son utilizados en aplicaciones no críticas debido a su simplicidad y economía, son usualmente inexactos ya que no regulan las variables de funcionamiento con el fin de llegar a su objetivo. Usualmente se lo usa como señal actuante directa en un proceso, como controlador puede tomar las funciones de amplificador, filtro de señal o unión mecánica, estos sistemas se diseñan en base a la experiencia con el fin de obtener el valor de salida requerido, pero no compensan o regulan si existe alguna clase de distorsión en las variables de entrada o salida como se observa en la figura 13 [45].

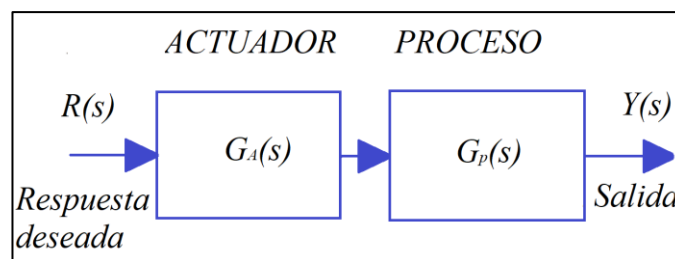


Figura 13. Diagrama sistema de control lazo abierto [44].

Estos sistemas son usualmente utilizados con un temporizador, un ejemplo de ello es el funcionamiento de una lavadora, ya que el movimiento del motor es regulado por un temporizador que es ejecutado por un operador humano y un actuador que envía una señal de movimiento al motor. Al existir un componente que mediante la carga de agua y ropa envíe una señal al motor de modificar su velocidad, dejaría de ser un sistema de lazo abierto y sería un sistema retro alimentado mediante un sensor. [46]

1.8.2 Sistema de control lazo cerrado

Los sistemas de lazo cerrado respecto los sistemas de lazo abierto son más exactos y adaptables debido a una o varias conexiones de realimentación de la salida hacia la entrada del sistema, la señal al aumentar su exactitud tiende a ser estable y constante incluso con perturbaciones hacia los cambios en las variables (condiciones de operación). Para lograr este tipo de control el sistema toma el valor de salida y lo compara con el valor de entrada como una referencia, esta diferencia grande o pequeña producirá una señal que será posteriormente leído por el controlador que modificará los parámetros del actuador y así continuamente corrigiendo el error que tiende a ser menor y operar dentro de un rango para su estabilidad como se muestra en la figura 14. Además de ello el costo de un sistema lazo cerrado es superior debido a que este cuenta con sensores para enviar la lectura de realimentación, además de que el controlador tiene que ser compatible con esta señal y operar las variaciones del mismo [43], [45].



Figura 14. Diagrama sistema de control lazo cerrado [47].

Para controlar el movimiento de los actuadores para el rastreador solar es necesario contar con un sistema de control retroalimentado on-off con histéresis para un movimiento suave y preciso al movimiento del sol.

En el diagrama del sistema de control por lazo cerrado se tiene la señal de entrada o set point o punto de referencia a controlar. Este representa la señal que envían los sensores de iluminación solar, y son comparados con una señal de posición en la planta o mecanismo biaxial, al compararlos mediante un controlador se reduce la diferencia entre la referencia y la posición actual, mediante la activación de elementos de actuación sea un motor o actuador lineal, para corregir la posición actual del proceso.

1.9 Sistema de sensado

Para conocer el sistema de sensado es necesario conocer la descripción de un sensor. un sensor es un componente el cual puede transformar variables físicas y químicas en pulsos eléctricos, existe varios tipos de sensores en función de la variable física o química a transformar como por ejemplo la temperatura de un cuerpo, distancia entre puntos, presión, humedad, velocidad, aceleración, pH, inclinación, fuerza, rugosidad intensidad lumínica, entre otros. Estas variables al ser transformadas en pulsos eléctricos son interpretadas mediante un controlador y posteriormente ejecuta acciones que incluye procesos mecánicos o digitales como respuesta a la variable obtenida por el sensor, estos procesos actúan de manera continua y cíclica para el constante control del proceso [48].

Para entender el trabajo de un sensor es preciso clasificarlos en dos grupos, de acuerdo con su alimentación y al tipo de señal entregada al controlador.

De acuerdo con el tipo de alimentación existe 2 tipos los sensores activos y pasivos. Los sensores activos que para su correcto funcionamiento es indispensable contar con una fuente de alimentación independiente al sistema de sensado. Los sensores pasivos no necesitan una fuente externa ya que las magnitudes físicas, químicas son suficientes para la lectura del fenómeno a censar.

De acuerdo con el tipo de señal entregada al controlador se clasifican en dos subtipos digitales y analógicos, los sensores de tipo digital brindan al controlador una digital ``0`` o ``1`` valores lógicos que representan dos opciones lleno o vacío, prendido o apagado, dependerá del tipo de representación en el sistema. Los sensores de tipo analógicos envían una señal dentro de un rango pudiendo tomar cualquier valor entre el rango, esta medición puede leerse en función de la tensión o corriente entregada por el sensor [49].

1.10 Políticas, normativas, permisos y regulaciones

El organismo que se encarga de regular esta tecnología en el Ecuador es la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL), esta agencia en conjunto con la Ley Orgánica de Servicio Público de Energía Eléctrica en el 2018 dictaminó las características que debe de presentar un micro sistema de generación eléctrica para uso

residencial e industrial, con el fin de reducir del consumo de la red de distribución, lo que implica una reducción en la factura por servicio de energía [50].

Según el ARCONEL [50] las características generales para la conexión, instalación y operación de un micro sistema de generación fotovoltaica debe de cumplir los siguientes aspectos:

- a. El sistema debe conectarse con las redes de bajo o medio voltaje de la empresa de distribución.
- b. El interesado debe ser propietario del inmueble donde se va a instalar el sistema.
- c. El diseño debe de tener como objeto reducir el consumo de energía de la red.
- d. La instalación debe ser condicionada a la emisión de factibilidad de conexión de la empresa distribuidora.
- e. La capacidad nominal no podrá ser mayor a 100 kW.

Además de esto el ARCONEL determino un plazo máximo de operación para un sistema de generación eléctrica fotovoltaica es de veinte años, el cual se empieza a contabilizar a partir de la fecha de entrada en operación. Una vez culminado este periodo, se debe desconectar el sistema de la red de distribución, esta condición debe estar establecida en el contrato de suministro [50].

Para el trámite de autorización para la conexión, el consumidor debe solicitar a la empresa distribuidora evaluar la factibilidad de conexión a la red de distribución, indicando cual es la capacidad máxima que tendrá el sistema, esta empresa evaluará la capacidad máxima a instalar, el punto de conexión, considerando aspectos como: Capacidad por corriente de cortocircuito, regulación de voltaje y capacidad de corriente del alimentador de baja y/o media tensión [50].

La ARCONEL dictamina que la empresa distribuidora de energía eléctrica también esta encardada de dictaminar las causas por lo que se puede realizar la desconexión del sistema fotovoltaico debido al mal uso como por ejemplo los siguientes casos [50]:

- a. Incumplimiento de la fecha de pruebas y entrada en operación, determinado en el cronograma.

- b. Incumplimiento de las recomendaciones y demás requerimientos técnicos efectuados por la empresa de distribución, antes de la entrada en operación.
- c. No permitir las inspecciones por el personal de la empresa de distribución al sistema fotovoltaico, antes de la entrada en operación.
- d. Por terminación del plazo de operación establecido en el contrato de suministro.
- e. Incumplimiento de las recomendaciones y requerimientos técnicos efectuados por la empresa de distribución.
- f. Por realizar cambios significativos al sistema fotovoltaico, como la ampliación de la capacidad nominal instalada inicial del proyecto sin previa autorización de la empresa distribuidora.
- g. Manipulación e intervención del sistema de medición, previa comprobación.
- h. Comercializar energía a terceros.

1.11 Factibilidad técnica-operativa

El análisis de alternativas del sistema seleccionado y de los componentes presenta una selección adecuada, además es necesario probar las habilidades de diseño, construcción y programación. Estas habilidades son necesarias para la ejecución del actual proyecto, las cuales fueron adquiridas en el transcurso previo al actual trabajo de titulación como son los conocimientos en energías renovables, diseño de elementos de máquinas, electrónica y programación, entre otros ayudados mediante metodologías para la correcta ejecución del proyecto.

De igual manera es imprescindible contar con el capital suficiente para afrontar el costo de los materiales, costos de construcción y costos para los debidos permisos en caso de existir un rubro por ellos. Los permisos y normativas serán considerados y ejecutados en función de los estatutos y políticas ambientales y legales de La República del Ecuador, lugar actual en donde se desarrolla el proyecto.

CAPITULO II

2 OBTENCIÓN DE DATOS

En este capítulo se expondrán los datos principales para desarrollar el apartado de diseño y construcción, útiles en capítulos posteriores como el consumo eléctrico en la instalación solar fotovoltaica y valores de radiación en la ciudad de dicha instalación, además se desarrollará un diagrama general de la instalación, así como sus partes. Finalmente se realizará un análisis de alternativas y se determinará la factibilidad técnica operativa para la instalación del sistema solar fotovoltaico con rastreo para el sector residencial del Distrito Metropolitano de Quito.

2.1 Generación autosustentable de la instalación solar fotovoltaica.

Es necesario conocer los consumos mensuales del lugar de la instalación fotovoltaica, debido que según los requisitos de ARCONEL no es posible la producción de energía fotovoltaica on-grid que supere los valores consumidos, para ello se debe realizar un análisis de los últimos 6 meses. Por ello es necesario acudir a la cartilla de luz eléctrica correspondiente al año de solicitud del medidor bidireccional, mostrando los siguientes datos.

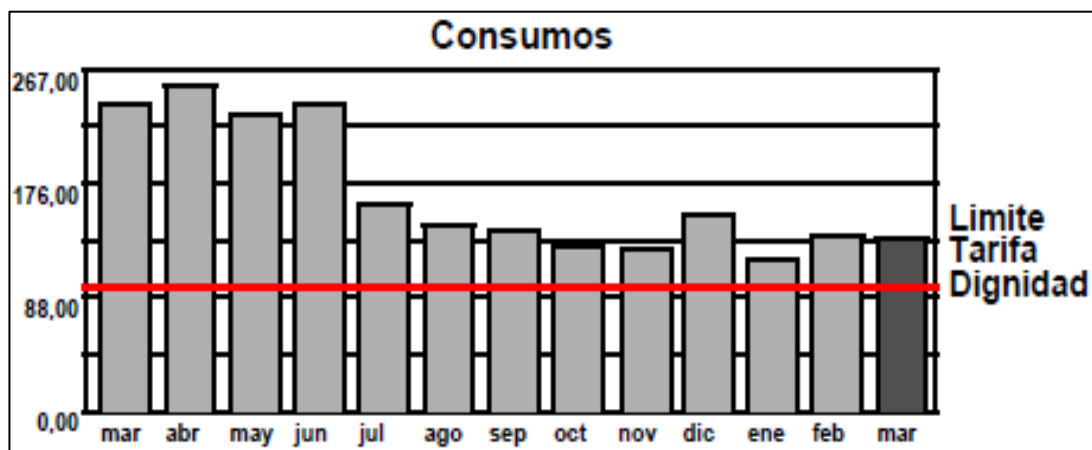


Figura 15. Consumos de la instalación residencial. Elaborado por Agila & Landázuri.

En la figura 15 el consumo de los meses de marzo a junio del año 2020 tiene un promedio de consumo eléctrico de 250 kWh y a partir del mes de julio un promedio de 137 kWh mensual. Teniendo en cuenta el límite de tarifa dignidad correspondiendo a 110 kWh, tomando en cuenta 7 horas solares pico y de la capacidad del sistema se obtiene que porcentaje de la demanda se cubre mediante el siguiente cálculo.

$$\text{Energía SFV mensual} = \text{HSP} \times \text{Capacidad SFV} \times 30 \text{ días} \quad (2)$$

$$\text{Energía SFV mensual} = 7h \times 600 W \times 30 \text{ días} = 126 \text{ kWh}$$

Tomando en cuenta la generación de 126 kWh logra cubrir una demanda del 91.9 % en los meses de menor consumo y un 50,4 % en los meses de mayor consumo.

2.2 Proceso para la generación de energía solar

El sol al igual que otras estrellas están en continua producción de energía, esto es debido a un fenómeno físico llamado fusión. La fusión es un proceso nuclear a nivel atómico dentro del cual dos partículas de hidrógenos chocan fusionándose y produciendo un núcleo de Helio (He) más pesado y expulsando fotones al espacio atravesando el vacío en forma de ondas pertenecientes al espectro electromagnético. Las más importantes reacciones solares son las siguientes:

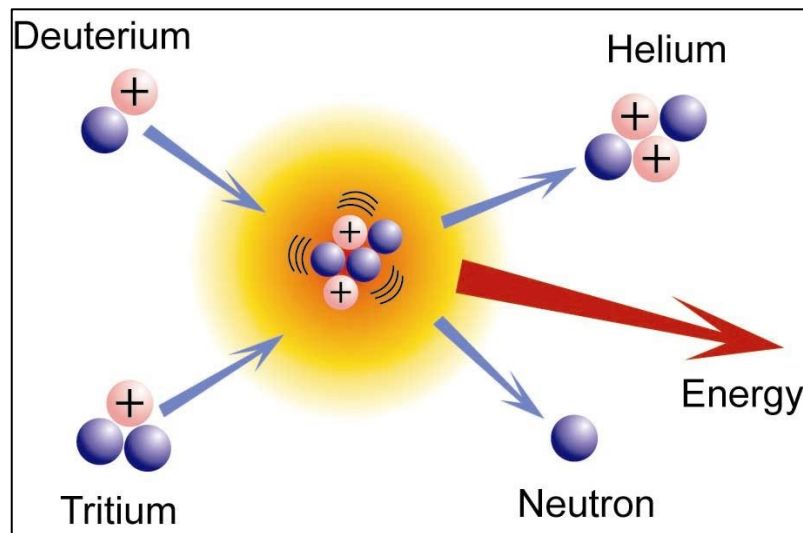


Figura 16. Formación de Helio (He) y producción de energía en la superficie solar [51].

La temperatura del sol logra fusionar dos isotopos de Hidrogeno, Deuterio y Tritio obteniéndose Helio con dos protones y dos neutrones, liberando 17,6 MeV de energía y 1 neutrón como se puede observar en la figura 16 y en la ecuación 3.



Al fusionar dos isotopos de Deuterio se obtiene Helio 3 formado por 2 protones y 1 neutrón, liberando 3,2 MeV de energía y un neutrón representado en la ecuación 4.



Finalmente, al fusionar dos isotopos de Deuterio, se logra obtener un isotopo de Tritio, liberando 4,03 MeV de energía y un protón representado en la ecuación 5.

Debido a las altas temperaturas del sol, los núcleos atómicos son constantemente alimentados con energía, por lo que aumentan su velocidad y vencen las fuerzas electroestáticas, debido a esto los electrones se encuentran dispersos logrando así la fusión de los isotopos de hidrogeno, se calcula que se pueden obtener 335 mega-Joules por cada miligramo de deuterio- tritio [52].

2.3 Espectro electromagnético ley de Planck

Como se describe en el apartado anterior, la energía es un producto de las reacciones nucleares de fusión del Hidrogeno (H). En el sol se eleva la temperatura de la superficie en alrededor de 5778 K. El desprendimiento de los neutrones, fotones y la energía logra generar ondas electromagnéticas, estas atraviesan el vacío y logran llegar a la tierra en un aproximado de 8 minutos con 19 segundos debido a la distancia de 150 millones de kilómetros a una velocidad de $3 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Las ondas electromagnéticas del sol son visibles en gran parte, mientras otro grupo de ondas son imperceptibles y poseen varias características correspondientes al espectro electromagnético, de entre ellas destaca la luz visible que en función de la longitud de onda (λ) varia su color y su temperatura desde la luz infrarroja hasta la luz ultravioleta. Además de este tipo de ondas existe muchos tipos de ellas clasificándose principalmente en radiación ionizante y no ionizante como se observa en la figura 17.

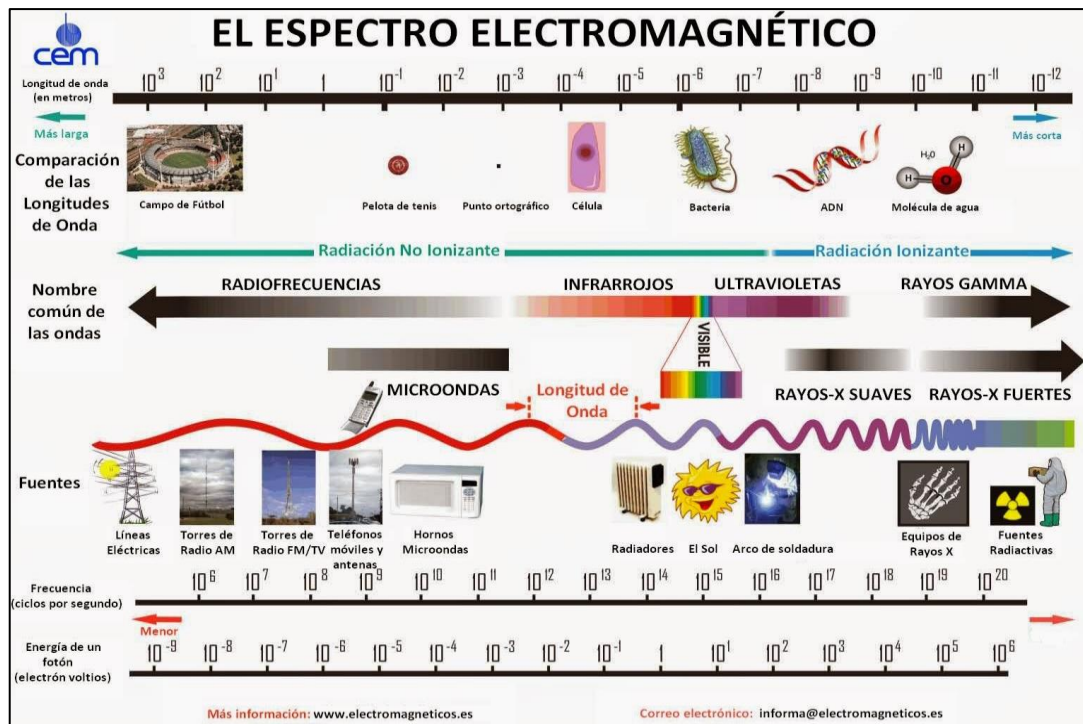


Figura 17. Espectro electromagnético [53].

Para determinar la cantidad de energía de la onda electromagnética es necesario recurrir a la Ley de Planck, esta describe la energía de radiación emitida por un cuerpo negro a determinada temperatura T y frecuencia ν , representada en la ecuación 6.

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (6)$$

Donde:

I : Representa la radiancia espectral que es la energía del fotón de la onda electromagnética en el sistema internacional $W \cdot s \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ o $erg \cdot cm^{-3} \cdot s^{-1}$.

ν : frecuencia de la onda electromagnética en hercios (Hz).

λ : longitud de onda en metros (m) o centímetros (cm).

T : Representa la temperatura del cuerpo negro que emite en grados Kelvin (K)

h : Representa la constante de Planck correspondiente a $6.626 \times 10^{-34} J \cdot s$ o $2.136 \times 10^{-15} eV$

c : velocidad de la luz en (m/s) o (cm/s)

e : base de logaritmo natural

k : constante de Stefan Boltzmann en (J/K) o (erg/K)

Mediante la ecuación 6 es posible determinar un rango aproximado de la cantidad de energía entregada por el sol como se puede observar en la figura 17. Alrededor de $6.31999 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ de radiación se produce en la superficie solar y llega a la atmósfera terrestre. La radiación solar comprende desde la banda ultravioleta hasta el infrarrojo cercano tomando valores de longitud de onda corta, entre 2×10^{-7} metros a 3×10^{-6} metros cómo se puede visualizar en la figura 17.

Cerca de 1361 W/m^2 se produce de radiación emitida por el sol y llega a la atmósfera terrestre, parte de esta radiación un 19% es absorbida por los gases atmosféricos y un 30% es reflejado hacia el espacio exterior, alrededor del 50% es absorbido por la superficie terrestre. De este último se divide 2 tipos de radiaciones, la radiación directa, la cual llega en dirección perpendicular del sol con mayor intensidad y la radiación solar difusa cuya energía llega a la superficie solar pero su dirección cambia debido a factores como el espesor atmosférico que incluye gases partículas y la misma reflexión de la radiación en la superficie terrestre chocando con la atmósfera [54].

Para aplicaciones de uso como en celdas solares o procesos que involucre la fotosíntesis el rango de longitud de onda de la radiación debe comprenderse en entre 2×10^{-7} metros a 4×10^{-6} metros.

2.4 Balance radiactivo entre el sol y la tierra

Es necesario demostrar la propagación del calor y energía del sol hacia la tierra. Para ello es preciso utilizar la ley de Stefan-Boltzmann de cual establece que cualquier cuerpo negro que produce radiación térmica con determinada cantidad de potencia emisiva para sólidos hemisféricos será directamente proporcional a la temperatura elevada a la cuarta medida en ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) siguiendo la ecuación 7.

$$\frac{P}{A} = e\sigma(T^4 - T_c^4) \quad (7)$$

Donde:

P: Potencia radiada neta [W]

A: Área radiante del radiador [m^2]

σ : Constante Stefan-Boltzmann $5,6703 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

e: Factor de emisividad ($0 < e \leq 1$) en donde 1 representa un cuerpo negro

T: Temperatura del radiador [K]

Tc: Temperatura circundante [K]

Para determinar la potencia superficial radiada por el sol se debe tomar en cuenta que el valor de Tc es igual a cero debido a que se determinara en la superficie solar, el factor de emisividad es igual a 1 debido a que el sol es considerado como cuerpo negro, remplazando los valores se llega a la expresión:

$$\frac{P}{A} = \sigma(T^4) \quad (8)$$

$$\frac{P}{A} = \frac{5,6703 \times 10^{-8} \text{ W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \times ((5778 \text{ K})^4)$$

$$\frac{P}{A} = 6.31999 \times 10^7 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

La cantidad de energía emitida por el sol por cada m^2 de superficie es $6.3199 \times 10^7 [\text{W}/\text{m}^2]$. Para determinar la cantidad total de energía de la superficie solar se multiplica el flujo de energía por la superficie total del sol.

$$P = 6.31999 \times 10^7 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \times 4\pi r^2$$

$$P = 6.31999 \times 10^7 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \times 4\pi (6.9634 \times 10^8)^2 [\text{m}^2]$$

$$P = 3.84 \times 10^{26} \text{ W}$$

La potencia en términos de energía de toda la superficie del sol es $3.84 \times 10^{25} \text{ W}$. Con este dato es posible calcular la constante solar K, que es la porción de energía recibida por el sol en la tierra calculado en 1 unidad astronómica UA por cada m^2 de la superficie de la tierra, mediante la siguiente formulación.

$$K = \frac{P}{4\pi(1\text{UA})^2} \quad (9)$$

$$K = \frac{3.84 \times 10^{26} \text{ W}}{4\pi(1.496 \times 10^{11} \text{ m})^2}$$

$$K = 1361 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

El valor de la constante solar K variará debido al movimiento traslacional de la órbita terrestre respecto al sol en las diferentes estaciones, pero es científicamente aceptado el valor de $K=1367 \text{ [W/m}^2\text{]}$. Además de ello se puede determinar la temperatura promedio de un planeta mediante un balance radiativo entre la energía absorbida de la tierra por el sol y la energía emitida de la tierra.

$$E_{absorvida} = E_{emitida} \quad (10)$$

$$(1 - a)K\pi r_T^2 = \sigma T_T^4 4\pi r_T^2 \quad (11)$$

$$T_T = \sqrt[4]{\frac{K(1 - a)}{4\sigma}}$$

$$T_T = \sqrt[4]{\frac{1361 \left[\frac{W}{m^2}\right] (1 - 0,33)}{4 \left(\frac{5,6703 \times 10^{-8} W}{m^2 K^4}\right)}}$$

$$T_T = 251,8 \text{ } ^\circ K \cong -21,34 \text{ } ^\circ C$$

El balance radiativo nos da que la temperatura terrestre es de $-21,34^\circ C$, este valor no representa a la temperatura actual de la tierra de $13^\circ C$ debido a que este análisis es realizado con planetas sin atmosfera y sin efecto invernadero. Debido a este efecto que provoca el aumento de la temperatura terrestre aumenta alrededor de $1,1 \text{ } ^\circ C$, lo que es perjudicial para la vida en la tierra y para aplicaciones de energía solar.

2.5 Producción de energía en paneles con seguimiento solar

Como se explicó en apartados anteriores la irradiación global está compuesta por la irradiación directa (I_0), difusa (I_d) y reflejada. La irradiación directa es la más eficiente para el uso aplicaciones solares, como es el caso para células fotovoltaicas. La radiación es descrita por el modelo de Hottel en la cual es necesario hallar el ángulo de incidencia solar con el panel mediante la siguiente formulación [55].

$$I_0 = E_0 \cdot K \cdot \cos \theta_z \quad (12)$$

Donde:

E_0 : relación al cuadrado entre la distancia tierra sol promedio igual a 1UA y la distancia tierra sol en un día cualquiera del año.

K: Constante solar 1367 [W/m²].

θ_z : El ángulo formado desde el eje Cenital y el centro solar.

Relación Tierra sol específica (E_0):

$$E_0 = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \quad (13)$$

Donde:

r_0 : Distancia promedio entre la Tierra y el Sol igual a una unidad astronómica (UA)

r : Distancia Tierra-Sol en un día n del año empezando desde el 1 de enero.

El ángulo de incidencia solar (θ_z) es el ángulo que se forma entre el centro del disco solar y el eje Cenital como se muestra en la figura 18, es llamado y representado con dos ecuaciones tanto para una superficie plana como para una superficie plana inclinada mediante las siguientes formulaciones [56].

Para superficie plana:

$$\cos \theta_z = \cos \beta \cdot \sin \alpha + \sin \beta \cdot \cos \alpha \cdot \cos(\psi - \gamma) \quad (14)$$

Para superficie plana inclinada orientada hacia el sur:

$$\cos \theta_z = \sin \alpha = \sin \Phi \cdot \sin \delta + \cos \Phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (15)$$

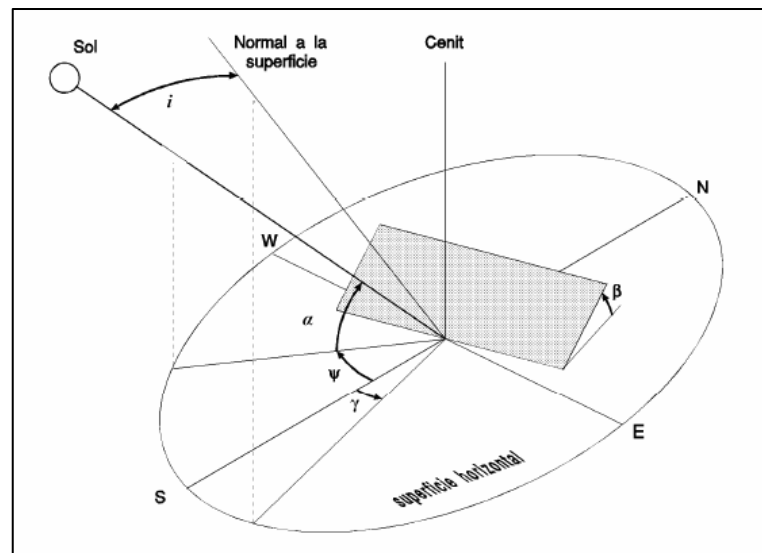


Figura 18. Ángulo de incidencia de los rayos solares sobre una superficie [55].

El ángulo formado entre el horizonte y el centro del disco solar es llamado ángulo de altitud solar (β) y su ecuación es la siguiente [55].

$$\sin \beta = \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \delta \quad (16)$$

El ángulo de latitud (φ) indica la posición angular desde el norte al sur desde la línea ecuatorial tomado desde el sur -90° hacia el norte 90° .

$$-90^\circ < \varphi < 90^\circ \quad (17)$$

El ángulo de hora solar (ω) representa el movimiento solar durante el día medido desde el este o al oeste de un meridiano fijo, siendo TLA el tiempo local aparente.

$$\omega = (TLA - 12) \cdot 15 \quad (18)$$

El ángulo de declinación del sol (δ) es el ángulo producido por el plano ecuatorial y la línea que une los centros del sol y de la tierra [55].

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left[360 \cdot \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right] \quad (19)$$

El ángulo de Azimut solar (ψ) es el ángulo entre la línea hacia el sur y la sombra emitida por una línea vertical en la tierra [55].

$$\sin \psi = \frac{\sin \omega \cdot \cos \delta}{\sin \theta_z} \quad (20)$$

El ángulo de variación de una superficie respecto al norte es llamado ángulo de Azimut de cara (γ)

$$-90^\circ < \gamma < 90^\circ \quad (21)$$

El ángulo entre la superficie y la horizontal es el ángulo inclinación de superficie (α)

$$-90^\circ < \alpha < 90^\circ \quad (22)$$

La radiación difusa que es la radiación directa dispersada por la atmosfera y con cambio de dirección por la reflexión de esta, Dentro de la radiación difusa existe 3 tipos de radiación debido a diferentes factores como la presencia de polvo por aerosoles, moléculas de aire, entre otros. Estas se determinan por medio de la siguiente ecuación [57].

$$I_d = K \cdot k_d \cdot \sin \alpha \quad (23)$$

Donde:

I_d : Es la radiación difusa total para una superficie horizontal o inclinada

k_d : Es el índice de claridad del cielo varía acorde la estación del año, nubosidad y densidad de micropartículas en el ambiente.

α : Es la altitud solar en grados.

Además, es posible determinar cada una de las 3 radiaciones individualmente debido a factores antes mencionados, mediante las siguientes ecuaciones.

$$I_d = I_{dr} + I_{da} + I_{dm} \quad (24)$$

Donde:

I_{dr} : Es la radiación difusa producida por la difusión de moléculas de aire también llamada difusión de Rayleigh.

I_{da} : Es la radiación producida por la presencia de partículas de polvo en aerosoles.

I_{dm} : Es la radiación difusa producto de la reflexión de la superficie.

Para el diseño del seguidor y el análisis se debe tomar como una superficie plana durante todo el día ya que los motores dispondrán a los paneles en posición perpendicular a la radiación directa durante el día. Mediante los valores de irradiancia solar teóricos y prácticos se podrá determinar la cantidad de producción de energía en 2m² de panel fotovoltaico. Además de ello existe varios sitios meteorológicos que nos brindan una estadística del mensual de la cantidad de irradiación global, directa y difusa como se observa en la figura 19.

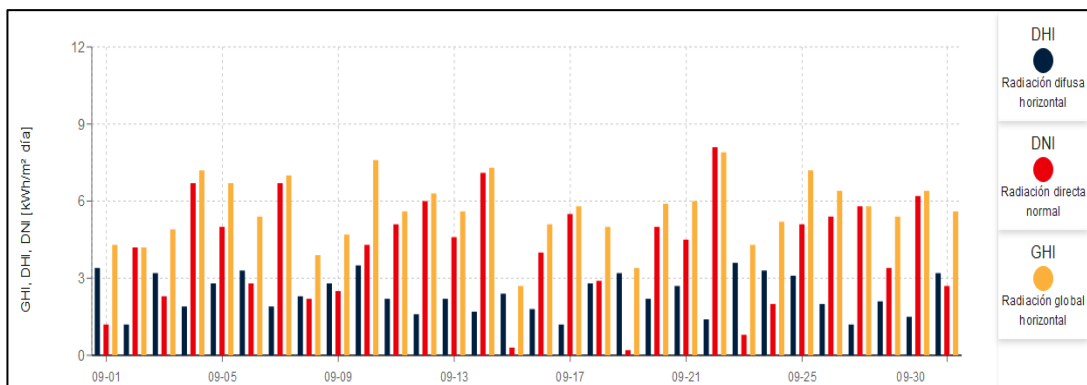


Figura 19. Irradiación en estación meteorológica El Bosque 09-2020 [58].

Así mismo en la figura 19 se observa los valores de irradiación solar durante el mes de septiembre en la estación El Bosque ubicado en las calles Calle Joaquín Morales y Torres y calle 1, en la ciudad de Quito a 5 km de la instalación solar. La gráfica muestra un promedio de irradiación global de 5.626 kW-h/m² día, radiación directa de 4.08 kW-h/m² día y una radiación difusa de 2.39 kW-h/m² día.

2.6 Inclinación y disposición para paneles fijos y móviles.

Ya que es necesario realizar una comparación cuantitativa entre los valores de producción de los paneles solares al ser instalados en modo fijo y los valores mediante el seguimiento solar, es preciso conocer la inclinación y disposición óptima de mayor producción solar tomando referencia la ubicación geográfica de la instalación. Para ello se ubica la instalación en un software de coordenadas como indica la figura 20.

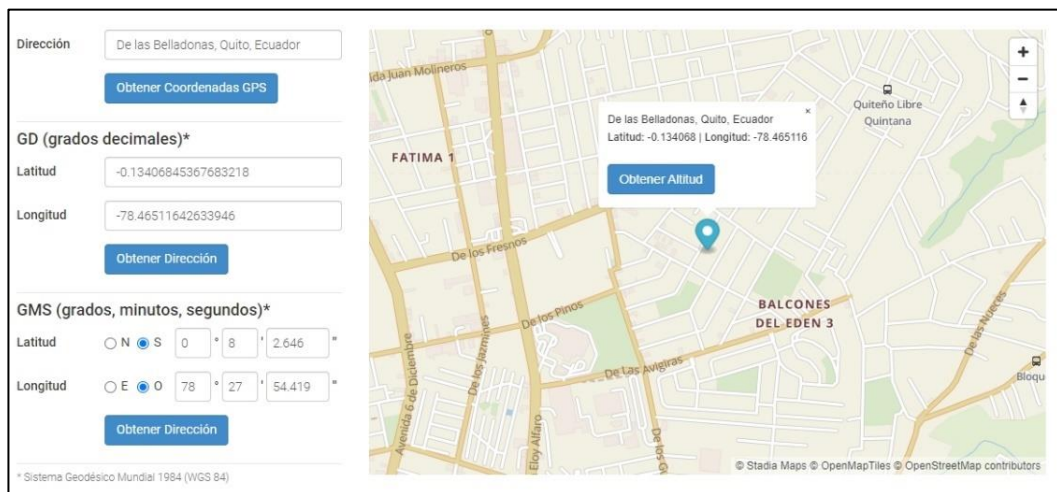


Figura 20. Ubicación geográfica de la instalación fotovoltaica [59]

En la figura 20 la ubicación que se muestra corresponde a la latitud $-0,1340^\circ$ y longitudud de $-78,46^\circ$, según la ubicación el ángulo de inclinación óptimo de los paneles solares en una instalación fija está dado por la tabla 1.

Tabla 1. Recomendaciones de inclinaciones de acuerdo a localización geográficas [60].

Ángulos de inclinación para sistemas fijos	
Latitud de lugar (en grados)	Ángulo 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°

En la tabla 1 podemos observar que la inclinación recomendada para los paneles es de 0° a 15° . Pero debido que para evitar polvo y estancamiento de agua se los ubicara en 10° para la toma de datos para su posterior comparación. Se precede a simular el sistema mediante un software profesional de instalación solar llamado PvSyst, obteniendo los resultados de la figura 21.

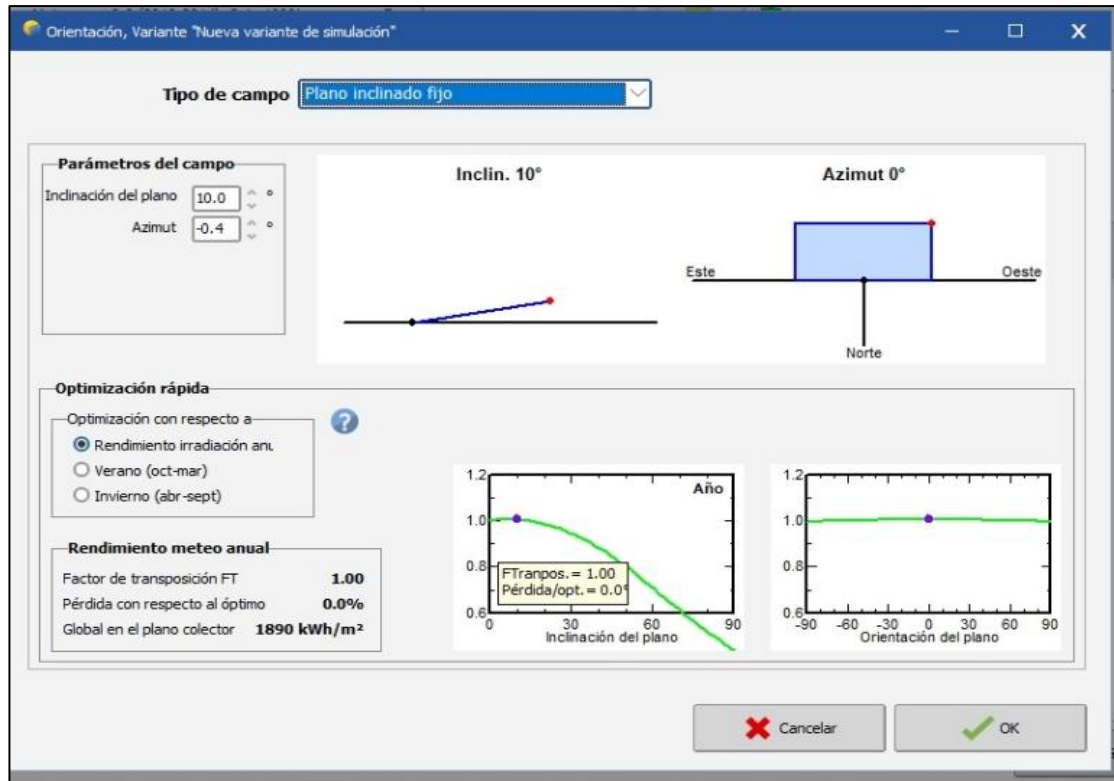


Figura 21. Simulación de la orientación del SFV estático. Elaborado por Agila & Landázuri.

En la figura 21 se puede observar acorde al ángulo azimut 0° que los paneles deben estar orientados hacia el norte de forma horizontal, además de una inclinación de 10° se puede obtener la mayor recolección de energía solar obteniendo 0% de pérdida. De igual manera estas estimaciones son importantes para determinar la posición de instalación del actuador lineal que cambiara el ángulo de inclinación dependiendo de la posición solar, para ello se dispone a instalar según las orientaciones de la figura 22.

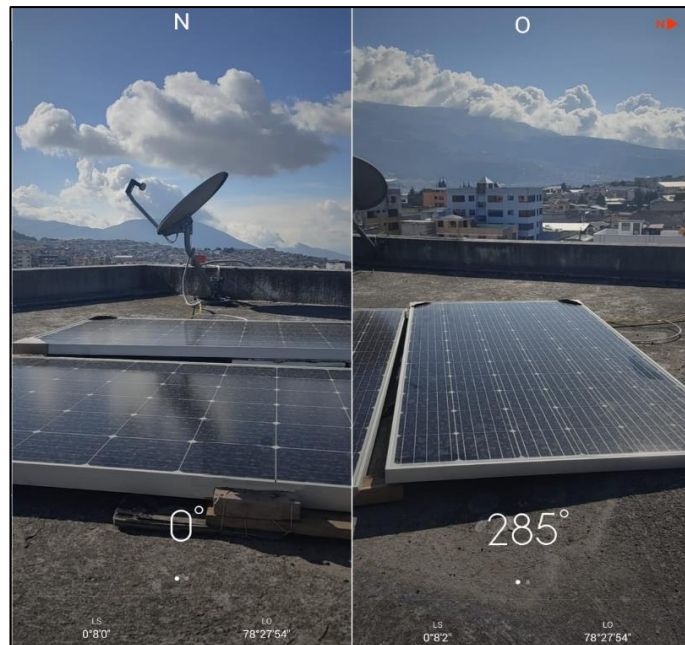


Figura 22. Orientación y disposición real de los paneles solares fijos por ubicación. Elaborado por Agila & Landázuri.

Para la disposición de los paneles móviles o también llamados paneles con rastreo solar biaxial se debe tomar en cuenta las trayectorias solares descritas en el plano cartesiano de la figura 7, además de tomar en cuenta que la mayor producción empieza desde las 8:00 am hasta las 17:00 pm se pueden tomar valores desde 15° inclinación hacia el este y llegando hacia los 25° en el oeste para un total de un recorrido de 105°.

2.7 Análisis de alternativas

Existen diferentes sistemas o tipos de seguidores de energía solar fotovoltaica, así como aplicaciones de estos por ello se han clasificado por sus diferentes características.

2.7.1 Clasificación por el dispositivo que realiza el movimiento

2.7.1.1 Seguidor activo

Es el sistema en el que se utilizan motores eléctricos, actuadores lineales, engranajes o tornillos sin fin, los cuales son controlados por elementos electrónicos. Por lo general este tipo de seguidores son energizados por una fuente externa o también por el mismo sistema fotovoltaico convirtiendo en un sistema autónomo [61].

2.7.1.2 Seguidor Pasivo

Este tipo de sistema se utiliza gas con un bajo punto de ebullición, el cual es conducido hacia un lado o hacia el otro, esto dependerá del calor transferido por la luz solar incrementando de esta manera la presión de gas, provocando el que el sistema se mueva, uno de las principales desventajas de este sistema es que es impreciso [61].

2.7.2 Clasificación por el tipo de sistema fotovoltaico

2.7.2.1 Seguidores de sistemas fotovoltaicos concentrados

En este tipo de sistema se requiere que la luz directa este concentrada en un punto específico, por lo tanto, debe estar orientado con alta precisión, este tipo de sistema por lo general orientan un espejo o conjunto de espejos, esto con el fin de que la luz sea direccionada a un colector fotovoltaico, la precisión que se requiere este tipo de sistemas debe de ser de un máximo de 2° y un mínimo de 0.1° para que se logre entregar un 90% de potencia nominal de salida [61].

2.7.2.2 Seguidores de sistemas fotovoltaicos no concentrados

Este tipo de sistemas por lo general utilizan paneles fotovoltaicos, por lo tanto, aceptan luz directa como difusa, de esta manera no se requiere de gran precisión para obtener una potencia aceptable, este tipo de sistema se utiliza para minimizar el ángulo de incidencia entre la luz y los paneles solares, logrando de esta manera producir una mayor cantidad de energía [61].

2.7.3 Clasificación por grados de libertad

2.7.3.1 Un solo eje horizontal o eje vertical

En sistema de eje horizontal se encuentra ubicado de Norte a Sur y durante el día los paneles giran sobre este eje persiguiendo el movimiento solar, mientras que en el sistema de eje vertical el eje se encuentra vertical con respecto al suelo, son recomendables en latitudes lejanas al Ecuador, por lo general están orientados al eje de rotación.

2.7.3.2 Un solo eje inclinado

En este caso los paneles tienen la misma inclinación del eje, este tipo de seguidores tienen la inclinación igual a la latitud donde van a ser instalados, con una orientación de su eje de polo a polo, simulando de esta manera el movimiento de la tierra, pero en sentido contrario [61].

2.7.3.3 Seguidores de dos ejes de inclinación

Presentan un eje primario horizontal con respecto a la tierra, y el eje secundario es perpendicular al primario, son alineados con el Norte magnético o con algún paralelo, uno de estos ejes permite orientar el panel en posición Norte-Sur y el otro en Este-Oeste dependiendo de la ubicación del sol [61].

2.7.3.4 Seguidor Acimut-Altitud

Este tipo de seguidores tienen su eje primario vertical con respecto al suelo y el eje secundario es perpendicular al primario, este sistema es el más implementado en seguidores de dos ejes debido a su sencillez en la estructura. Además de no necesitar una gran altura, este tipo de seguidores se ubican frente al sol y gira alrededor del Acimut y elevan su inclinación en función de la altitud a la que se encuentra el Sol como se observa en la figura 23[61].

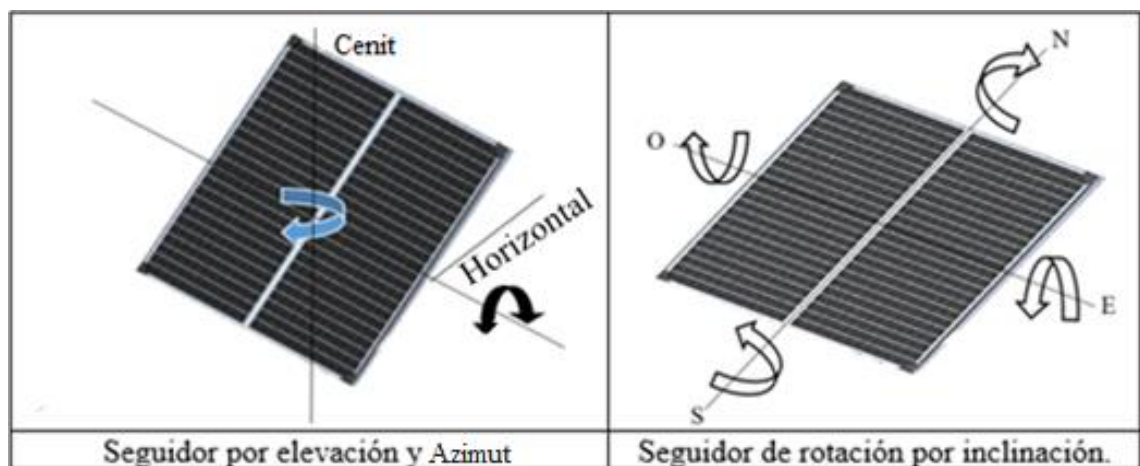


Figura 23. Tipos de seguidores solares de 2 ejes. Elaborado por Agila & Landázuri.

Tanto para el movimiento del seguidor por elevación y azimut como para el seguidor por inclinación-rotación es necesario optar por actuadores siendo para el primero un actuador lineal para el movimiento en altitud y para el movimiento alrededor del eje

Azimut un motor o motorreductor, para el segundo caso es necesario el uso de 2 actuadores lineales.

Se presenta un análisis cuantitativo para la selección del tipo de seguidor tomando varios criterios de selección y calificándolos con valores numéricos de 1 a 4 tomando como 4 la mejor opción y 1 la peor opción.

Tabla 2. Análisis de alternativas. Elaborado por Agila & Landázuri

Alternativas	Criterios							Valoración total
	Peso	Precisión	Mantenimiento	Productividad	Impacto ecológico	Calidad tecnológica	Protección IP	
Seguidor por elevación y azimut	3	3	3	3	3	4	4	23/28
Seguidor por rotación-inclinación	3	4	2	3	3	4	3	22/28

Como se puede observar en la tabla 2 la opción más conveniente es la opción del seguidor por elevación y azimut con un total de 23 sobre 28 puntos, a pesar de que el seguidor por rotación e inclinación esté un punto abajo no se lo seleccionó debido a que es necesario una configuración de estructura más compleja y pesada la primera opción. Para ello es necesario contar con una estructura y mecanismo apto para su movimiento debido que dentro del mercado ecuatoriano no existe y es necesario construirlo.

2.8 Diagrama del sistema fotovoltaico

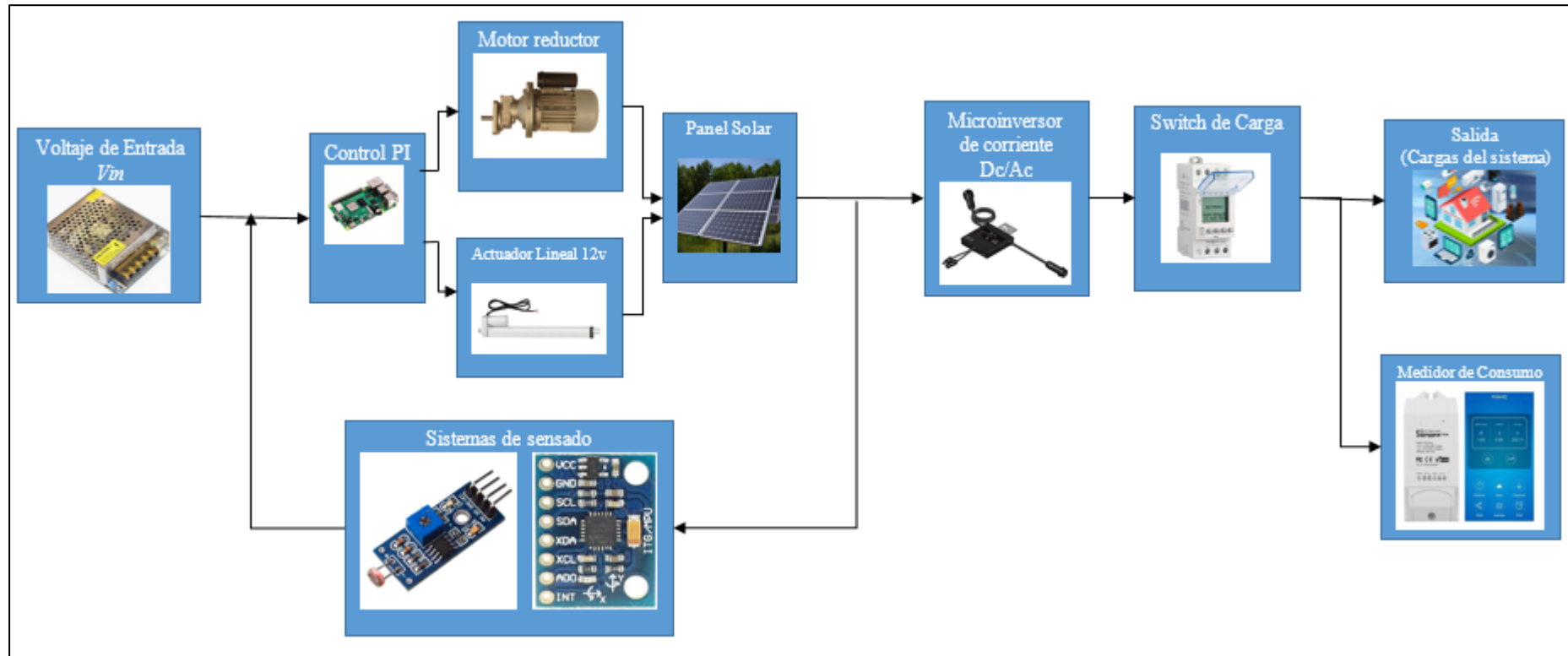


Figura 24. Esquema general del sistema de rastreo solar fotovoltaico. Elaborado por Agila & Landázuri.

En la figura 24 se aprecia todo el esquema de control para un sistema de rastreo solar biaxial para generación de 600 w-h de energía eléctrica, simplificando todos los componentes, a continuación, se determinará los sistemas de control de los componentes como motores sensores, limitadores de carga, controladores, entre otros.

CAPITULO III

3 DISEÑO MECÁNICO, ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO

En este capítulo se desarrollará el diseño electrónico, eléctrico y mecánico del seguidor solar biaxial además de sus cálculos correspondientes para la construcción, instalación, selección de materiales y equipos para su funcionamiento.

El seguidor biaxial presenta 3 subsistemas importantes que tienen que diseñarse en orden y en función de los requerimientos de los paneles como volumen, peso, cableado, disposición de instalación, entre otros. Para esto es necesario diseñar y construir el sistema mecánico ya que este debe estar configurado para el resto de los sistemas. Dentro del sistema mecánico se encuentran 2 subsistemas, el correspondiente a la estructura y el subsistema motriz que corresponde al movimiento de los paneles.

Una vez construido el sistema mecánico es necesario diseñar e instalar el sistema eléctrico con sus debidas protecciones siendo estos el motorreductor, actuador lineal y conexión de los paneles a la red eléctrica.

Finalmente, para controlar el sistema eléctrico y mecánico se desarrolla el diseño electrónico el cual se clasifica en sensores y controlador, estos dispositivos son los encargados activar o desactivar el apartado eléctrico en función de su programación.

A continuación en la figura 25 la cual representa el despiece de la maquina con sus dimensiones , materiales, normas y referencias.

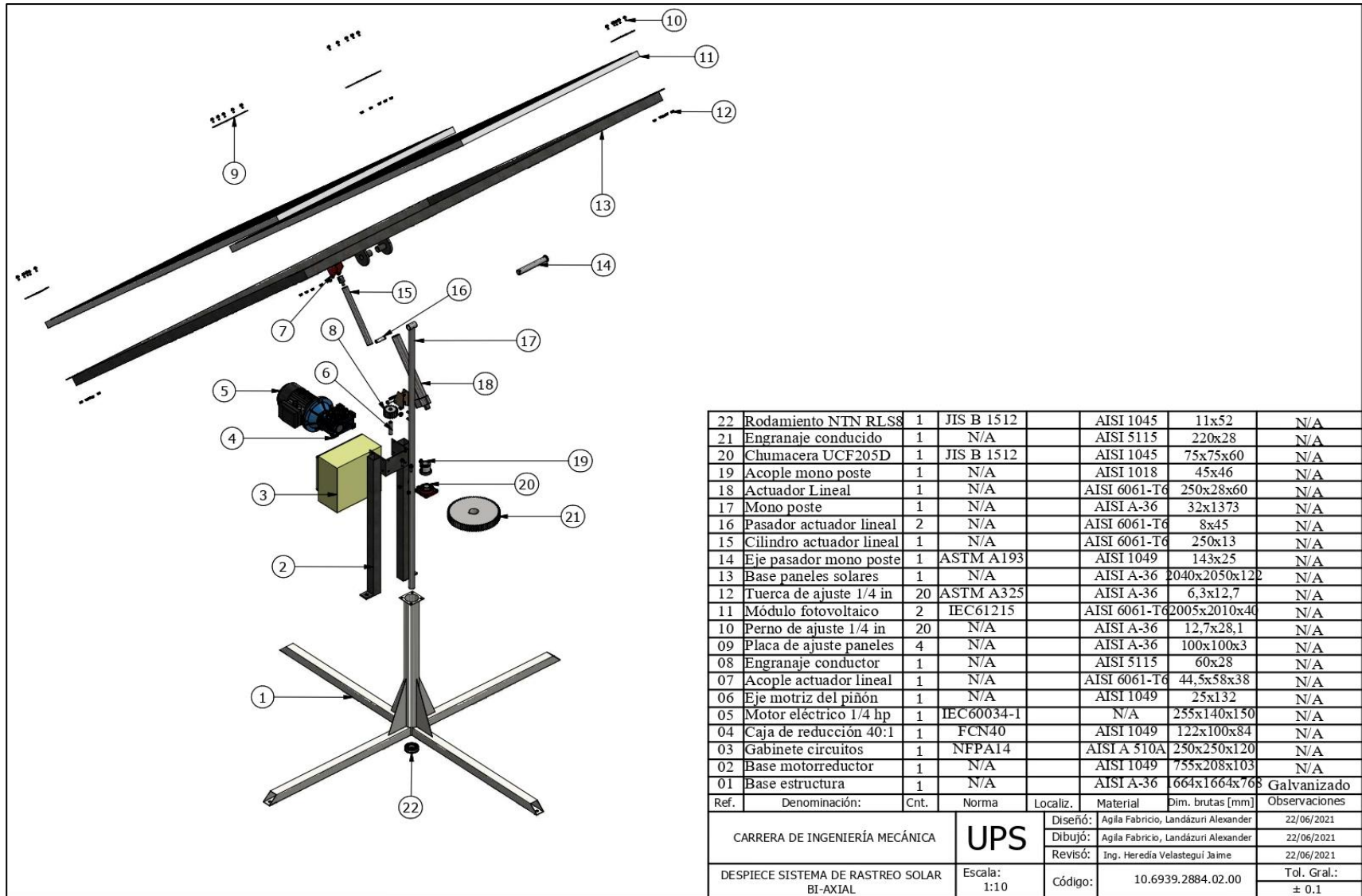


Figura 25. Plano despiece y lista de materiales sistema de seguimiento solar. Elaborado por Agila & Landázuri.

3.1 Diseño mecánico

Para el diseño mecánico del sistema de seguidor biaxial se tomará en cuenta factores vistos en capítulos anteriores, como el desplazamiento solar durante el año, la orientación adecuada de los paneles para optima recolección de energía así mismo como los límites de movimiento que el sistema debe de tener, para empezar con el diseño se realizó un análisis de requerimientos que debe de cumplir el sistema de seguidor biaxial

- a. Es necesario que el sistema presente dos grados de libertad, es decir que tenga la capacidad de moverse en dos direcciones distintas de forma lineal y que sean perpendicularmente distintas, como se observa en la Figura 26.

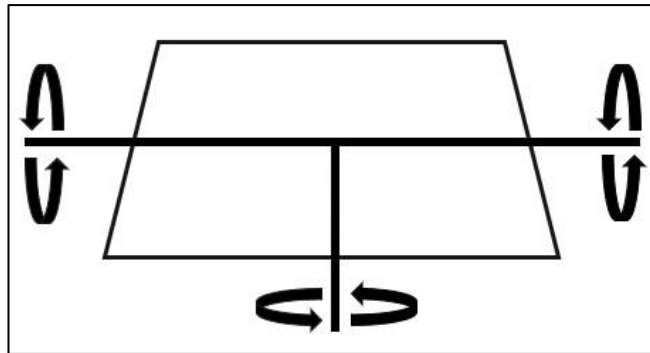


Figura 26. Movimientos requeridos para los paneles solares. Elaborado por Agila & Landázuri.

- b. El sistema estará expuesto a la intemperie, es decir, debe soportar, vientos leves, lluvias de fuerza impredecible, granizadas, calor y en casos extremos fenómenos naturales de gran impacto, por lo que el sistema se debe diseñar para resistir todo tipo de inclemencias climáticas.
- c. El sistema debe de tener la capacidad de soportar las cargas generadas por los elementos que lo conforman como paneles solares, su estructura, motores, entre otros, además sus actuadores deben de tener la capacidad de mover a los elementos móviles del sistema en función del movimiento del sol.

3.1.1 Grados de libertad

Para empezar, se va a determinar los grados de libertad que va a presentar el sistema, para este análisis se va a utilizar el criterio de Grübler que sirve para hallar la cantidad de grados de libertad de una máquina o mecanismo mediante sus elementos y partes de los cuales está compuesta [62], teniendo la siguiente ecuación:

$$G = 3 \cdot (N - 1) - 2p_I - 2p_{II} \quad (25)$$

Donde:

N: es el número de eslabones

p_I : Juntas completas

p_{II} : Juntas semicompletas

La figura 27 muestra el diseño tentativo del sistema de seguidor solar biaxial, en la que se puede visualizar tres eslabones, que son la estructura de los paneles solares, el monoposte y la base, el sistema presenta dos juntas completas o juntas que generan un solo grado de libertad, la primera se encuentra en el punto *a* entre la unión del monoposte con la estructura de los paneles solares y la segunda se encuentra en el punto *b* entre la unión de la base con el monoposte, en esta junta se va a generar el movimiento alrededor del acimut, en este caso el sistema no presenta juntas semicompletas o juntas que generen 2 o más grados de libertad debido a esto se va a asumir un valor de cero.

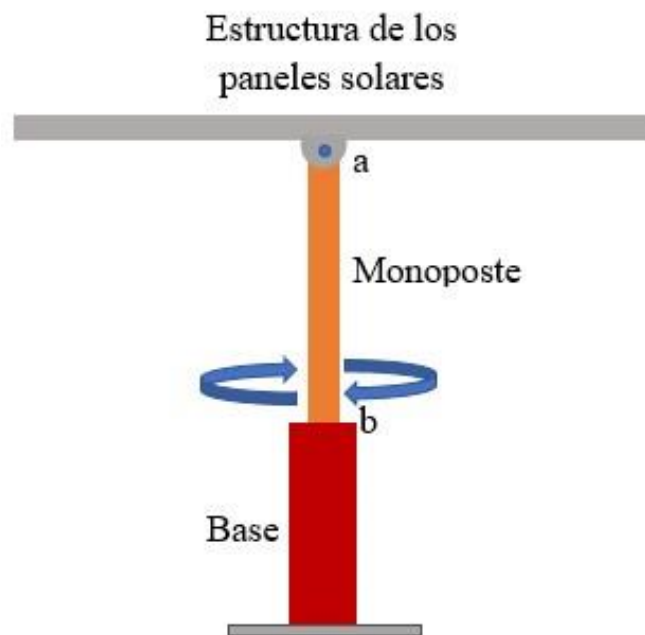


Figura 27. Diseño del sistema de seguidor solar biaxial. Elaborado por Agila & Landázuri

Al reemplazar los datos vistos anteriormente en la ecuación 25 se obtienen el siguiente resultado:

$$G = 3 \cdot (3 - 1) - 2(2) - 2(0)$$

$$G = 2$$

Determinando de esta manera que el sistema va a presentar dos grados de libertad, logrando cumplir con uno de los requerimientos del seguidor solar biaxial.

3.1.2 Diseño de la estructura de los paneles solares

El sistema de seguidor solar biaxial va a contar con 2 paneles fotovoltaicos de la marca IKAO cada uno con una potencia de 300 W, como se puede observar en la tabla 13 cada panel tiene unas dimensiones de 99.0 cm de ancho, 196.0 cm de alto y un espesor de 4.0 cm, cada panel cuenta con un peso de 21.5 kg por lo que la estructura a diseñar debe de soportar el peso de los dos paneles y debe de contar con las dimensiones exactas para una correcta instalación.

Para la estructura se ha propuesto el diseño y materiales que se pueden observar en la figura 28, como se puede ver para la parte exterior de la estructura se ha decidido usar ángulo estructural de 40x40mm con espesor de 2mm, mientras que para la parte interna se ha propuesto usar platinas de 40mm y 80 mm cada una con espesor de 2mm, en las esquinas se van a soldar unas platinas de 20x2mm las cuales van a presentar unas perforaciones para poner fijar los paneles solares y finalmente para conectar la estructura con el mono poste se ha propuesto usar una platina de 80mm con espesor de 10 mm la cual va a estar perforada en el centro.

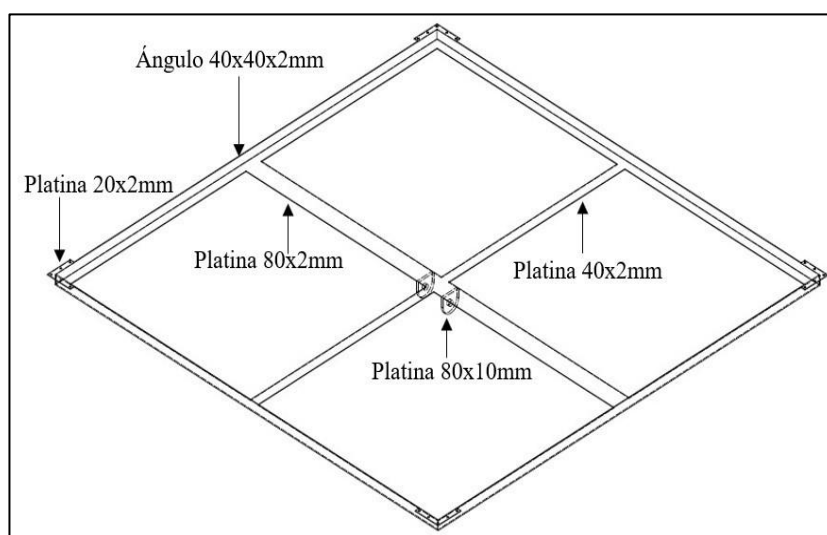


Figura 28. Diseño y materiales de la estructura de los paneles solares. Elaborado por Agila & Landázuri.

Con las dimensiones vistas anteriormente de los paneles solares se ha diseñado a la estructura con unas dimensiones exteriores de 2005 mm de largo y 2010 mm de ancho, mientras que las perforaciones en las orejas de la estructura que conectan con el mono poste tienen un diámetro de 22mm.

3.1.3 Diseño del Mono poste

El mono poste es el elemento del sistema ya que va a soportar las cargas generadas por la estructura, los paneles solares y torque generado por los elementos de transmisión, además en este elemento se va a instalar el actuador lineal, este actuador lineal va a ser el encargado de generar el movimiento de los paneles solares en altitud. El mono poste va a estar conectado a un motor eléctrico mediante un sistema de transmisión por engranajes generando de esta manera que los paneles se muevan alrededor del acimut.

Para el mono poste se ha propuesto usar tubo estructural A-36 de diámetro 1 pulgada con espesor de 1.5 mm, en la parte superior del tubo va a tener soldado un tubo de las mismas características con una longitud de 32mm, esta sección va a ayudar a conectar el mono poste con la estructura de los paneles solares, el mono poste va a presentar dos perforaciones de 8 mm para la instalación del actuador lineal y también va a tener soldado una pieza cilindrada que va a servir de refuerzo, ya que esta pieza va a soportar las cargas producidas en el sistema de transmisión además de permitir la instalación del engranaje, en la figura 29 se puede observar el diseño del monoposte.

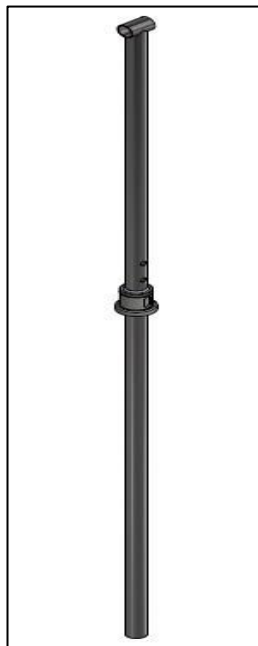


Figura 29. Diseño del mono poste. Elaborado por Agila & Landázuri.

3.1.4 Diseño de ejes

El sistema va a contar con un eje, un acople y un pasador, estos elementos van a ser diseñados bajo el criterio de la teoría de distorsión de Von Mises, según esta teoría predice la falla por fluencia que ocurre cuando la energía de deformación es igual o mayor a la energía de deformación correspondiente a la resistencia a la fluencia en compresión y tensión del material [63], teniendo la siguiente ecuación:

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} \quad (26)$$

Donde:

σ_x : Es la suma de todos los esfuerzos generados en el eje x .

σ_y : Es la suma de todos los esfuerzos generados en el eje y .

τ_{xy} : Es la sumatorio de esfuerzos de torsión y de corte generados en el eje x y y .

Como se mencionó anteriormente Von Mises relaciona el valor obtenido de la ecuación de energía de distorsión con la resistencia a la fluencia del material, mediante este criterio se puede determinar el factor de seguridad, este valor debe de ser mayor o igual que 1 para comprobar que el diseño no va a fallar por cargas o esfuerzos a los que se encuentra sometido el elemento, la ecuación que describe lo anteriormente mencionado es:

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma'} \quad (27)$$

Donde:

S_y : Es la resistencia a la fluencia del material

σ' : Es la energía de distorsión de Von Mises

Para la construcción del pasador y del eje del motor se ha propuesto usar el acero AISI 1049, que es un acero al carbono usado para uso estructural de maquinarias, presentando una facilidad para ser maquinado por lo que lo hace ideal para la fabricación de ejes, este material presenta un módulo de elasticidad de 340 MPa, mientras que la elaboración del acople que se va a instalar en el mono poste se va usar el acero AISI 1018 este igual es un acero al carbono que ofrece una buena resistencia, ductilidad y tenacidad además de su facilidad para soldar y mecanizar, por lo que es

usado para la fabricación de ejes, bujes, levas, entre otros, este material presenta un módulo de elasticidad de 235 MPa.

3.1.4.1 Diseño eje del motor

Este eje se va a encargar de transmitir el movimiento generado por el motor eléctrico al piñón, por lo que debe tener la capacidad de soportar las cargas generadas por el motor y de tener las características adecuadas para su correcta instalación, en la figura 30 se puede observar las dimensiones recomendadas por el fabricante para el eje de salida del motor eléctrico, este motor presenta una potencia de $\frac{1}{4}$ HP y 17 RPM, con estos datos se puede empezar a realizar el diseño de este eje.

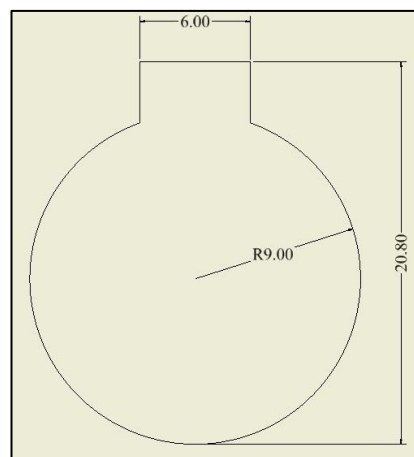


Figura 30. Dimensiones del eje de salida del motor. Elaborado por Agila & Landázuri

De acuerdo con la imagen 40 el eje debe de tener un diámetro de 18 mm, además de que se debe de utilizar chaveteros para la para la transmisión de movimiento y como elementos de protección, mediante las dimensiones dadas por el fabricante se ha determinado mediante la norma DIN 6885 que la chaveta a utilizar es una de 6x6 mm y que la profundidad para su instalación en el eje es de 3.5 mm.

El eje va a contar con tres secciones, la primera sección va estar instalada en el motor eléctrico, esta sección va a contar con dos ranuras para la instalación de 2 chaveteros de 6x6mm y una longitud de 25 mm, también va a contar con una ranura para una anillo de retención que va ayudar a que el eje no se salga del motor, esta sección presentará un diámetro de 18 mm y una longitud total de 87 mm, mientras que la segunda sección presentará un diámetro de 25 mm y una longitud de 10 mm, esta sección va a servir como apoyo para el piñón y finalmente la tercera sección va a presentar una sección de un diámetro de 18 mm y una longitud de 35 mm, en esta

sección es donde se va a instalar el piñón por lo que esta sección también va a contar con una ranura para la instalación de una chaveta de 6x6mm y una longitud de 22 mm, además también va a tener una ranura para la instalación de una anillo de retención para evitar que el engranaje se salga del eje, en la figura 31 se observa el diseño del eje.

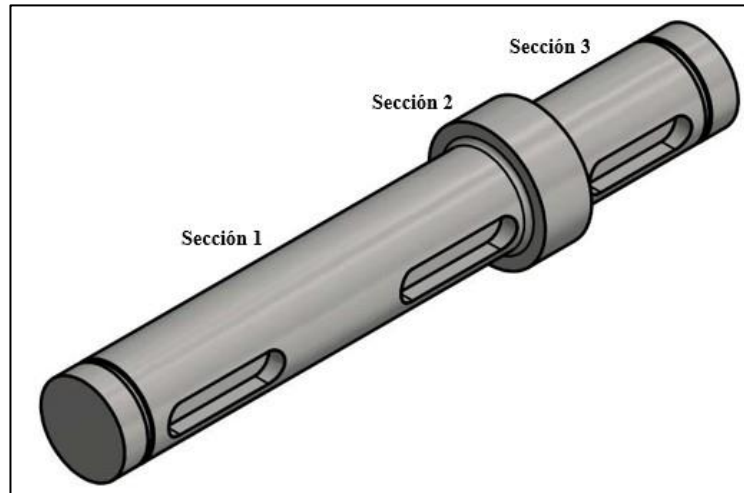


Figura 31. Diseño del eje del motor. Elaborado por Agila & Landázuri.

Este eje va a estar sometido únicamente al esfuerzo de torsión generado por el torque que transmite el motor, este torque es de 104.7 N·m, para el análisis del eje se lo va a tomar como un eje con un diámetro de 18mm, en este caso no se a tomar el cambio de sección ya que esta simplemente es de apoyo para el piñón por lo no va a sufrir ningún tipo de esfuerzos, como se mencionó el eje solo está sometido a torsión debido a esto se va a utilizar la siguiente ecuación que es usada para elementos circulares:

$$\tau = \frac{16 \cdot T}{\pi \cdot d^3} \quad (28)$$

Donde:

T : Par de torsión

d : Diámetro del eje

Al remplazar los valores vistos anteriormente en la ecuación 28 se tiene:

$$\tau = \frac{16 \cdot (104.7 \text{ N} \cdot \text{m})}{\pi \cdot (0.018 \text{ m})^3}$$

$$\tau = 91.4 \text{ MPa}$$

Logrando obtener un esfuerzo de torsión de 91.4 MPa, al remplazar este valor en la ecuación 26 nos da como energía de distorsión 158.36 MPa y al remplazar estos valores en la ecuación 27 se obtiene un factor de seguridad equivalente a 2.14 y al ser este mayor que 1 se asegura de que eje no va a fallar a las cargas a las que está sometido.

3.1.4.2 Diseño del acople del monoposte

Este acople va a estar instalado en el monoposte y va a cumplir con dos funciones, la primera es que en este elemento se va a instalar el engranaje y su segunda función es la de reforzar al monoposte debido a que por sí solo no soporta por completo el torque transmitido por el engranaje.

Como se puede observar en la figura 32 el acople es hueco esto debido a que va a estar instalado en el monoposte, el eje presenta dos secciones, la primera que tiene una longitud de 10 mm y un diámetro de 50 mm, esta sección va a servir de apoyo para el engranaje, mientras que la segunda sección presenta una longitud de 34 mm y un diámetro de 42 mm, en esta sección se va a instalar al engranaje, debido a esto tiene una ranura para una chaveta de 12x8mm de longitud de 25 mm, además tiene una ranura para una anillo de retención que va ayudar a evitar de que el engranaje se salga del eje.

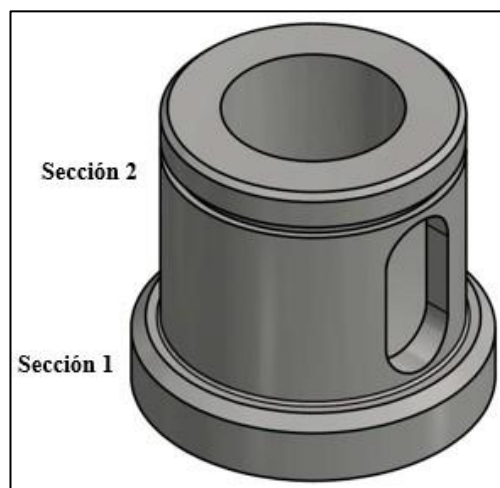


Figura 32. Diseño del eje del monoposte. Elaborado por Agila & Landázuri.

Este eje va a estar sometido únicamente al esfuerzo de torsión generado por el torque que transmite el engranaje conducido, este torque es de 410.4 N-m, para el análisis del eje se lo va a tomar como un tubo con un diámetro interior de 25.4mm y un diámetro

exterior de 42mm, en este caso no se a tomar el cambio de sección ya que esta simplemente es de apoyo para el engranaje.

Al remplazar los datos vistos anteriormente en la ecuación 28, se obtiene un esfuerzo de torsión de 32.56 MPa y al remplazar este valor en la ecuación 26 nos da como energía de distorsión 56.40 MPa, obteniendo un factor de seguridad de 4.1 y al ser este mayor que 1.0 se asegura de que el acople no va a fallar a la carga de torsión a la que está sometido.

3.1.4.3 Diseño del pasador

El pasador es el elemento encargado de incorporar la estructura de los paneles solares a el monoposte, además de que va a permitir el movimiento de los paneles solares en altitud, debido a esto la importancia de este elemento, por lo cual debe de soportar las cargas generadas por los componentes mencionados anteriormente.

Como se puede observar en la figura 33 el pasador cuenta con dos secciones, la primera de una longitud de 8mm y un diámetro de 25 mm, mientras que la segunda sección que tiene una longitud de 150 mm y un diámetro de 22 mm, en esta sección es donde se va a conectar el mono poste con la estructura de los paneles solares, además al final de esta sección presenta una ranura de 1.3x0.5 mm para la instalación de un anillo de retención para evitar que el pasador se salga por el movimiento de la máquina.

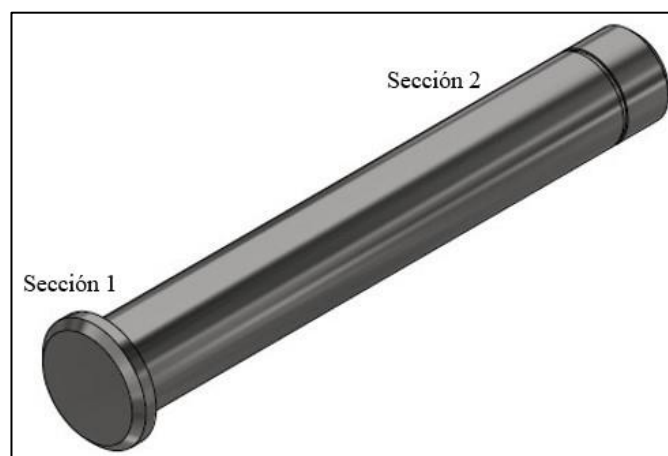


Figura 33. Diseño del pasador. Elaborado por Agila & Landázuri

El pasador va a estar sometido a cargas puntuales generadas por los paneles y la estructura estas cargas son transmitidas al pasador mediante dos platinas que se encuentran soldadas en la estructura de los paneles solares, cada platina transmite una

carga puntual de 392.4 N, para el análisis se toma en cuenta cuando toda la carga es soportada por el pasador, esto sucede cuando los paneles solares se encuentran a 180° esto sucede alrededor del mediodía, como esta carga es radial al pasador va a sufrir esfuerzos de flexión y cortante.

El esfuerzo de flexión es igual a:

$$\sigma = \frac{M \cdot r}{J} \quad (29)$$

Donde

M : Momento máximo

r : Radio de la superficie exterior

J : Segundo momento de inercia

Mientras que el esfuerzo por cortante máximo para un eje circular está dado por la siguiente ecuación:

$$\tau_v = \frac{4V}{3A} \quad (30)$$

Donde

V : Fuerza de corte máxima

A : Área transversal del pasador.

Para el cálculo del momento y la fuerza de corte máximo es necesario realizar una sumatoria de fuerzas y de momentos generados en el pasador, en la figura 34 se puede observar el diagrama de fuerzas y dimensiones a la que está sometido el pasador.

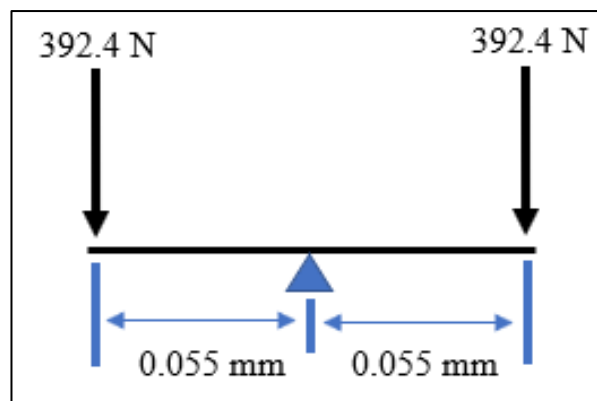


Figura 34. Diagrama de fuerzas. Elaborado por Agila & Landázuri.

Donde la sumatorias de momentos es igual:

$$\Sigma Fy = 0$$

$$392.4N + 392.4N - Ra = 0$$

$$Ra = 784.8 N$$

Dando una reacción de 784.8 N y como se pueden observar en la figura 35 se obtuvo una fuerza de corte máxima de 392.4 N y un momento máximo de 21.582 N·m

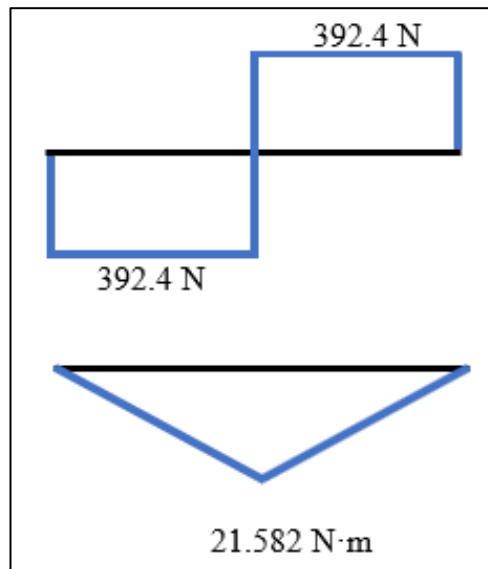


Figura 35. Diagrama de cortante y momento máximo. Elaborado por Agila & Landázuri.

Con los valores obtenidos del momento y cortante máximo se calculó los esfuerzos de flexión y de corte al que está sometido el pasador, obteniendo como resultado un esfuerzo de flexión máximo de 20.64 MPa y un esfuerzo cortante máximo de 1.37 MPa, estos valores se procede a remplazarlos en la ecuación 26, obteniendo un valor de energía de distorsión de 20.77 MPa y al reemplazar este valor en la ecuación 27 se obtiene un factor de seguridad de 16.3 determinando de esta manera que el material no va a fallar a las cargas que está sometido el eje.

3.1.5 Diseño del sistema de transmisión

Para este sistema se planea utilizar un sistema de transmisión por engranajes, debido a que el torque generado por el motor eléctrico no cumple con las capacidades necesarias para mover al sistema alrededor del azimut, para el diseño de estos elementos se ha decidido diseñarlos bajo las normas AGMA, ya que establece normas para la fabricación, diseño y explotación de los engranajes.

3.1.5.1 Radio de Giro

Como punto de partida para el diseño se deben de tomar en cuenta el torque necesario para mover el mecanismo, por lo que es necesario tomar en cuenta las dimensiones y peso de los componentes del sistema del seguidor biaxial, la importancia de calcular el radio de giro es que describe la distribución de masa que se distribuye alrededor del eje central con este dato al multiplicarlo por la carga total se puede obtener el torque mínimo para mover el sistema.

Para empezar, se realizará el cálculo del radio de giro, se tomará en cuenta al componente que se desea mover del sistema, que en este caso es la unión de la estructura con los paneles solares, se asumirán a estos componentes como un rectángulo como se puede observar en la figura 36, tiene una base de 2010 mm y una altura de 2005 mm.

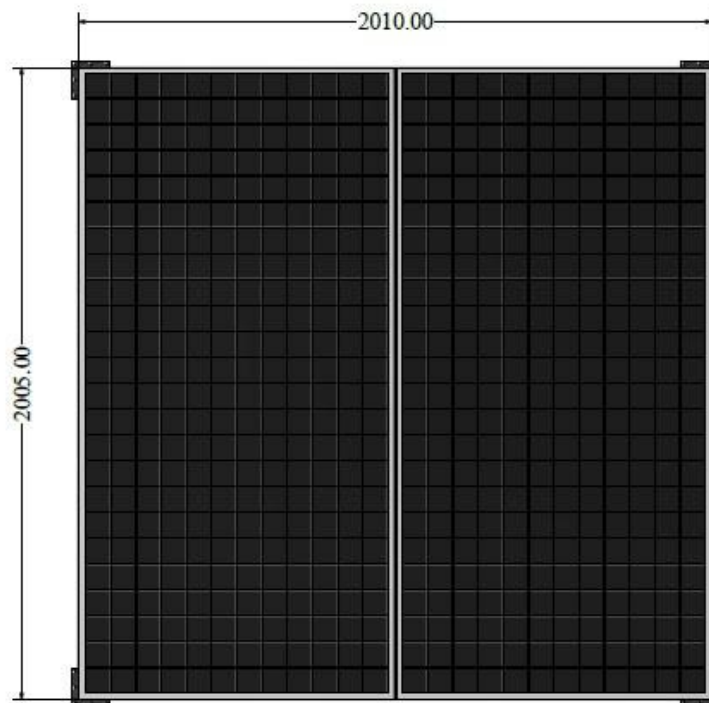


Figura 36. Dimensiones de la estructura con los paneles solares. Elaborado por Agila & Landázuri.

La ecuación que se va a utilizar para el cálculo del radio de giro es la siguiente:

$$r_i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (31)$$

Donde

I : Inercia de la figura geométrica

A : Área de la figura geométrica

Para el análisis es necesario calcular el radio de giro alrededor del eje x y y , debido a esto es necesario también realizar el cálculo de la inercia en estos ejes.

Donde la inercia de un rectángulo alrededor del eje x es:

$$I_x = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (32)$$

Y la inercia de un rectángulo alrededor del eje y es:

$$I_y = \frac{b^3 \cdot h}{12} \quad (33)$$

Donde

b : base del rectángulo

h : altura del rectángulo

Con los datos y formulas vistos anteriormente se procedió a realizar los cálculos obteniendo los resultados se pueden visualizar en la tabla 3.

Tabla 3. Valores del radio de giro. Elaborado por Agila & Landázuri.

Propiedad	Magnitud
I_x	1.350 m ⁴
I_y	1.356 m ⁴
r_x	0.578 m
r_y	0.582 m

Como se puede observar el radio de giro máximo esta alrededor del eje y con un valor de 0.582 m, con este valor al multiplicar por el peso del monoposte, estructura y paneles solares que es de aproximadamente de 588.6 N, se obtiene un torque mínimo de 342.56 N-m, debido a este valor se ha decidido usar un motorreductor de 1/4 HP y 17 rpm con un torque nominal de 104. 7 N-m y mediante el uso de un sistema de transmisión por engranajes aumentar el torque del motor hasta lograr superar torque mínimo calculado.

3.1.6 Diseño del piñón y engranaje.

Como se mencionó anteriormente el sistema a utilizar para aumentar el torque nominal del motor va a ser un sistema de transmisión por engranajes, para su construcción se plantea utilizar como material el acero AISI 5115, este material es usado para piezas que necesitan dureza superficial y un núcleo tenaz, usado generalmente para piezas que deben de soportar fatiga superficial como piñones, engranajes, catalinas, vástagos, bielas, etc.

Debido a que el torque necesario para mover el sistema en relación con el torque que genera el motor eléctrico es cuatro veces mayor se ha decidido usar los datos de la tabla 4 para el diseño del piñón y engranaje

Tabla 4. Datos iniciales de diseño. Elaborado por Agila & Landázuri.

Descripción	Magnitud
Ángulo de presión	20°
Módulo	3 mm
Ancho del diente	28 mm
Numero de dientes piñón	18
Numero de dientes engranaje	64
Velocidad del piñón	17 rpm
Torque inicial	104.7 N·m

3.1.6.1 Torque total

Antes de empezar con el diseño de los engranajes se debe de comprobar que la configuración seleccionada de estos elementos va a lograr que torque nominal transmitido por el motor sea mayor al torque mínimo calculado anteriormente, para empezar, es necesario encontrar la fuerza tangencia que se transmite del piñón al engranaje, donde la fuerza tangencial se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$F_t = \frac{W}{v} \quad (34)$$

Donde

W : es la potencia entregada por el motor en kW y

V : es la velocidad lineal del piñón o del engranaje en $m \cdot s^{-1}$

Donde la velocidad lineal está dada por la siguiente ecuación:

$$v = \frac{\pi \cdot d_{p-g} \cdot n}{60000} \quad (35)$$

Donde

d_{p-g} : es el diámetro de paso del engranaje o del piñón en mm

n : es la velocidad angular en rpm.

Donde el diámetro del piñón es de 54 mm y el motor presenta una velocidad de 17 rpm y al remplazar los valores en la ecuación 34 se obtiene:

$$v = \frac{\pi \cdot (54 \text{ mm}) \cdot (17 \text{ rpm})}{60000}$$

$$v = 0.048 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Y al remplazar este valor en la ecuación 33 se obtiene:

$$Ft = \frac{0.186 \text{ kW}}{0.048 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}$$

$$Ft = 3.875 \text{ kN}$$

Y al multiplicar la fuerza tangencial con el radio del engranaje que es de 108 mm, se obtiene el siguiente valor:

$$T_{trans} = 108 \text{ mm} \cdot 3.875 \text{ kN}$$

$$T_{trans} = 418.5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Con la configuración de engranajes seleccionada el torque nominal del motor es 418.5 N·m, determinando que con esta configuración se un obtiene un torque mayor que el torque mínimo necesario para mover al sistema siendo este de 346.52 N·m.

3.1.6.2 Esfuerzo a flexión AGMA

Para el diseño de los engranajes se va a empezar con el análisis de esfuerzo a flexión AGMA, donde se buscar encontrar la resistencia del diente del engranaje y del piñón al ser sometido a diferentes cargas [63], teniendo la siguiente ecuación:

$$\sigma_f = \frac{Ft}{mbY_j} \cdot K_O \cdot K_V \cdot K_S \cdot K_B \cdot K_H \cdot K_I \quad (36)$$

Donde

m : Es el módulo

b : Es el ancho de cara

Y_j : Es el factor geométrico

K_O : Es el factor de sobrecarga

K_V : Es el factor dinámico

K_S : Es el factor de tamaño

K_B : Es el factor de espesor del anillo

K_H : Es el factor de distribución de carga

K_I : Es el factor de engrane loco

El siguiente factor es el factor geométrico Y_j , este es un factor de resistencia a la flexión en la punta y su selección se la realizan en base a la precisión de manufactura del engranaje, si las tolerancias de fabricación son bajas se asumen que los engranes son de alta precisión, entonces se puede asumir que comparten la carga los dientes y se puede usar las tablas de hpstc como se observa en la figura 37.

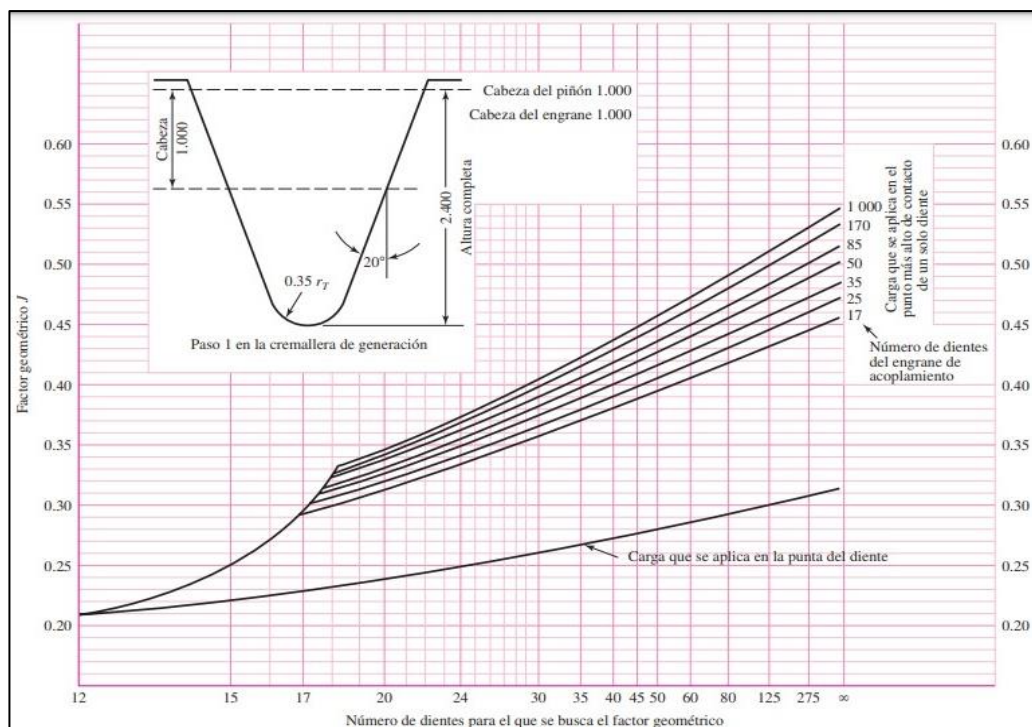


Figura 37. Factor geométrico J de engranajes rectos [63].

Para este caso se utiliza la curva de carga que se aplica en la punta del diente, esto debido a que no existe una alta precisión en la fabricación del piñón y del engranaje.

K_O el factor de sobrecarga es el factor que incremente el esfuerzo en el diente en base al grado de choque de la maquinaria conectada al tren de engranajes, en la tabla 5 se puede visualizar los diversos valores de para este factor en función de la fuente de poder.

Tabla 5. Factor de sobrecarga K_O [63].

Fuente de poder	Uniforme	Moderado	Alto
Uniforme (motor eléctrico, turbina)	1.00	1.25	1.75
Ligero (Motor de varios cilindros)	1.25	1.50	2.00
Liviano (Motor de un solo cilindro)	1.50	1.75	2.25

Para el diseño se va a tomar un factor de sobrecarga de 1 ya que se está utilizando un motor eléctrico con una potencia de tan solo 0.25 HP.

K_V el factor dinámico trata de tomar en cuenta las cargas vibratorias internas generadas por el impacto de los dientes, lo que produce un desajuste en los dientes del engranaje, estas cargas también son conocidas como error de transmisión y son más altas en engranajes de baja precisión, se pueden observar las diferentes ecuaciones para obtener este factor dependiendo la precisión de fabricación del engranaje. AGMA ha representado una serie de ecuaciones para el cálculo del factor dinámico K_V dependiendo de tipo de proceso de fabricación de perfil del engranaje [64].

Perfil moldeado, hierro fundido

$$K_v = \frac{3.05 + v}{3.05} \quad (37)$$

Perfil cortado o fresado

$$K_v = \frac{6.1 + v}{6.1} \quad (38)$$

Perfil generado por fresa madre o cepillado

$$K_v = \frac{3.56 + \sqrt{v}}{3.56} \quad (39)$$

Perfil cepillado o esmerilado

$$K_v = \frac{5.56 + \sqrt{v}}{5.56} \quad (40)$$

Donde v esta expresado en $m \cdot s^{-1}$, además según la norma AGMA el valor de K_v debe de ser mayor a 1, para la fabricación del perfil del engranaje y del piñón se lo a realizar mediante una fresa madre, por lo que se utiliza esta ecuación para el cálculo de K_v .

El factor de tamaño K_S es un valor que AGMA aún no estandarizado, pero recomienda utilizar un valor de 1, a excepción que el diseñador desee elevar este valor por situaciones específicas como dientes muy largos para estos casos AGMA recomienda valores de 1.25 y 1.50.

K_H es el factor de distribución trata de predecir cualquier tipo de desviación o desalineación en la forma del diente ya que causan que la Ft se distribuya de forma desigual solo el ancho de cara de los dientes del engranaje, para encontrar el valor de K_H se tiene la tabla 6, la cual está en función con el ancho de cara del engranaje.

Tabla 6. Factor de distribución de carga K_H [63].

Ancho de cara (mm)	K_H
<50	1.6
160	1.7
250	1.8
≥500	2.0

K_I es el factor de engrane loco, cuando un sistema tiene este elemento es debido a que un engrane loco está sometido a más ciclos de esfuerzo por unidad de tiempo por lo que sufre de mayores cargas alternantes, para esto el factor se K_I es igual a 1.42 para este elemento y 1.0 para cuando se tiene un engrane normal. Finalmente para completar el análisis es necesario calcular la resistencia corregida a fatiga por flexión en el que AGMA emplea valores denominados números de esfuerzo permisible [63], teniendo la siguiente ecuación:

$$S_{fb} = \frac{K_L}{K_T \cdot K_R} \cdot S'_{fb} \quad (41)$$

Donde

K_L : es el factor de vida.

K_T : es el factor de temperatura.

K_R : es el factor de confiabilidad.

S'_{fb} : es la resistencia a la fatiga por flexión publicada por la AGMA.

Para encontrar el factor de vida K_L se utiliza la figura 38, donde la zona sombreada superior se usa para aplicaciones comerciales y la parte inferior es usada para aplicaciones críticas de servicio, donde es permitido un poco de picado y desgaste en el diente, donde se requiere suavidad en la operación y niveles de vibración bajos [63].

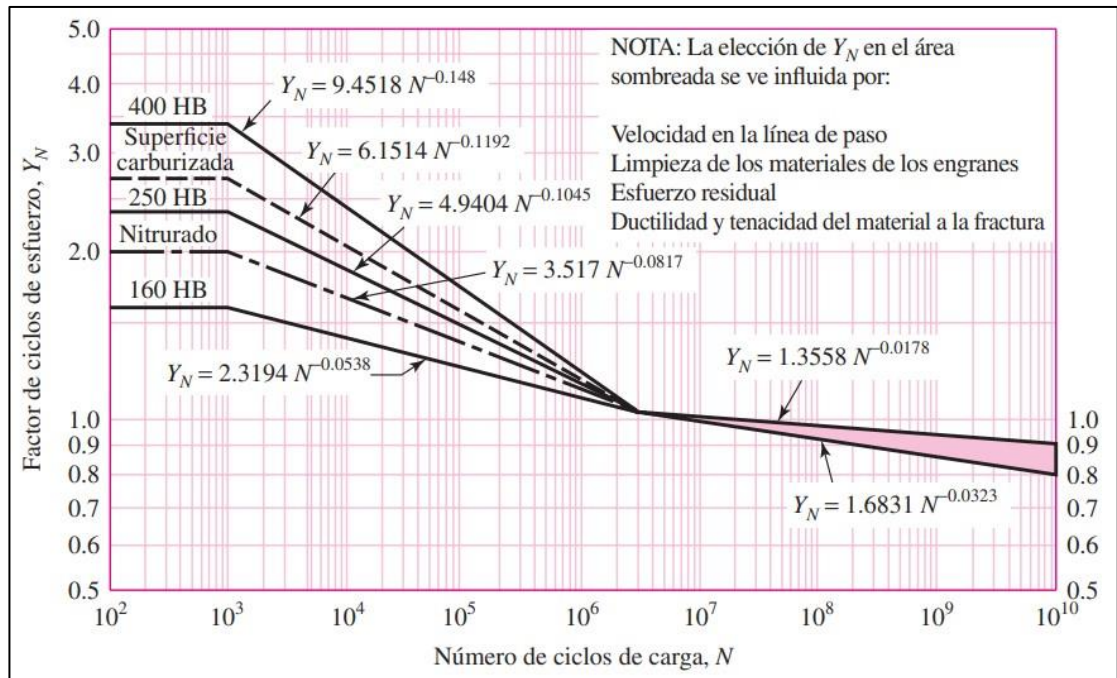


Figura 38. Factor de vida K_L [63].

Para el diseño se va a utilizar la ecuación para 250 HB ya que esa es la dureza superficial del material que se va a usar para la construcción del piñón y del engranaje.

El factor de temperatura K_T Este factor está en función con la temperatura del lubricante a utilizar en el engranaje, para temperaturas de aceite hasta los 250 °F K_T es igual a 1, mientras que para temperaturas mayores se tiene la siguiente ecuación:

$$K_T = \frac{460 + T_F}{620} \quad (42)$$

Donde

T_F : es la temperatura del lubricante.

El factor de confiabilidad K_R es un factor en el que AGMA se basan en la probabilidad y estadística de 1 falla en 100 muestras, es decir, 99% de confiabilidad, este valor dependerá del fabricante, en la tabla 7 se pueden observar los distintos valores de K_R en función del porcentaje de confiabilidad [63].

Tabla 7. Factor de confiabilidad K_R . [63].

% de probabilidad	K_R
90	0.85
99	1
99.9	1.25
99.99	1.50

Para finalizar AGMA relaciona el esfuerzo a la flexión del engranaje con la resistencia a la fatiga por flexión del material, esta resistencia a la fatiga por flexión es publicada por AGMA S'_{fb} y está en función de la dureza Brinell del material en la figura 39 se puede observar las dos ecuaciones que están en función del grado del material, AGMA recomienda por seguridad tomar la curva de grado 1, en caso de no tener la información específica del material [64].

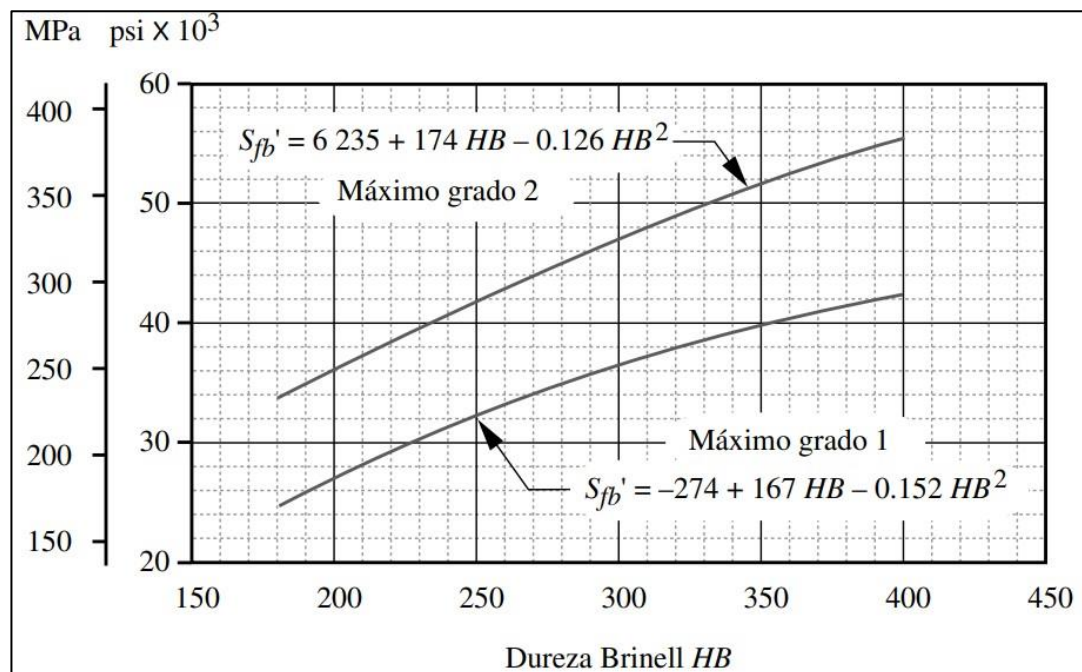


Figura 39. Resistencia a la fatiga por flexión publicada por la AGMA S'_{fb} [64].

Una vez calculados los valores del esfuerzo a flexión AGMA σ_f y resistencia corregida a fatiga por flexión S'_{fb} , se relacionan estos valores para el cálculo del factor de seguridad, mediante la siguiente ecuación:

$$\eta_f = \frac{S_{fb}}{\sigma_f} \quad (43)$$

Con los datos, ecuaciones, tablas y figuras vistos anteriormente se obtuvieron los siguientes resultados para el piñón y el engranaje:

Tabla 8. Valores y resultados del esfuerzo a flexión AGMA. Elaborado por Agila & Landázuri.

Factor	Piñón	Engranaje
Ft	3655.7 N	3655.7 N
Y_j	0.23	0.288
K_O	1	1
K_S	1	1
K_V	1.04	1
K_B	1	1
K_H	1.6	1.6
σ_f	314.859 MPa	302.749 MPa
K_L	1.88	1.88
K_T	1	1
K_R	1	1
S'_{fb}	220.4 MPa	200.7 MPa
S_{fb}	414.352 MPa	377.316 MPa
η_f	1.32	1.25

Como los valores obtenidos se puede determinar que el piñón y el engranaje no a fallarán por fatiga a la flexión, debido a un factor de seguridad de 1.2 y 1.4.

3.1.6.3 Esfuerzo a la Picadura Superficial

Aparte del análisis de flexión AGMA también se realizará el análisis de picadura superficial esto debió a que carga que se aplican en la superficie del diente generan grietas y estas se expanden hasta provocar la separación de pequeñas partículas de material [63], para este análisis tenemos la siguiente ecuación:

$$\sigma_H = Z_E \sqrt{\frac{F_T}{b \cdot d \cdot Z_I} \cdot K_V \cdot K_O \cdot K_S \cdot K_H \cdot Z_R} \quad (44)$$

Donde:

Z_E : es el coeficiente elástico.

d : el diámetro de paso.

Z_I : es el factor geométrico de resistencia a la picadura.

Z_R : es el factor de condición superficial.

Para el factor geométrico a la resistencia a la picadura Z_I AGMA lo expresa con la siguiente ecuación:

$$Z_I = \frac{\text{sen}\varphi \cdot \text{cos}\varphi}{2} \cdot \frac{R}{R + 1} \quad (45)$$

Donde

φ : es el ángulo de presión

R : es el cociente de los diámetros y se expresa de la siguiente manera:

$$R = \frac{d_g}{d_p} \quad (46)$$

Donde

d_g y d_p : son los diámetros de paso del engranaje y el piñón (en el caso de que la relación de los engranes sea interna entonces R sería negativo).

Z_R que el factor de acabado superficial se utiliza para considerar acabados superficiales inusuales en la superficie de los dientes del engranaje, la AGMA aún no establece valores para este factor sin embargo recomienda un Z_R igual a 1 para engranajes fabricados por métodos convencionales, a pesar de estos su el valor puede incrementar cuando se tiene superficies muy ásperas.

El coeficiente elástico Z_E se toma en cuenta las diferencias en los materiales de los dientes del engranaje y el piñón [63], este valor se obtiene a partir de:

$$Z_E = \sqrt{\frac{1}{\pi \left[\left(\frac{1 - \nu_p^2}{E_p} \right) + \left(\frac{1 - \nu_g^2}{E_g} \right) \right]}} \quad (47)$$

Donde:

E_p y E_g : son los módulos de elasticidad del material del engranaje y del piñón.

ν_p y ν_g : Números de Poisson del piñón y del engranaje

En la tabla 9 se puede observar una serie de valores para Z_E que a desarrollado AGMA para varias combinaciones de materiales comunes par engranajes y piñones, asumiendo un numero de Poisson de 0.3 para todos los materiales.

Tabla 9. Coeficiente elástico Z_E de la AGMA en unidades de MPa [64].

Material del piñón	Material del engranaje					
	Acero	Hierro maleable	Hierro modular	Hierro fundido	Bronce al aluminio	Bronce al estaño
Acero	191	181	179	174	162	158
Hierro Maleable	181	174	172	168	158	154
Hierro Modular	179	172	170	166	156	152
Hierro Fundido	174	168	166	163	154	149
Bronce al Aluminio	162	158	156	154	145	141
Bronce al estaño	158	154	152	149	141	137

Al igual que con el análisis de resistencia a la flexión AGMA relaciona al esfuerzo a la picadura superficial con la resistencia a la fatiga superficial del material, esta resistencia es dada por AGMA y se puede ver en la ecuación 47, en la que hay cuatro factores de corrección que se aplican a los datos publicados por la AGMA, que tienen la finalidad de obtener la resistencia corregida de fatiga superficial en los engranajes [64], teniendo la siguiente ecuación:

$$S_{fc} = \frac{C_L \cdot C_H}{C_T \cdot C_R} \cdot S'_{fc} \quad (48)$$

Donde

C_L : es el factor de vida (K_L),

C_T : es el factor de temperatura (K_T),

C_R : es el factor de confiabilidad (K_R),

C_H : el factor de dureza

S'_{fc} : es la resistencia a la superficie superficial AGMA.

El factor de dureza C_H se encuentra entre la razón de engrane y la dureza relativa del piñón y de engranaje, este valor siempre es mayor o igual a 1 porque es usado para aumentar la resistencia aparente del engranaje. Este factor es usado en situaciones donde los dientes del piñón son más duros que el del engranaje, para el cálculo del C_H se tienen la siguiente ecuación:

$$C_H = 1 + A \cdot (m_G - 1) \quad (49)$$

Donde

m_G : es la razón de engrane

y A se obtiene a partir de:

$$\text{Si } \frac{HB_p}{HB_g} < 1.2 \text{ entonces } A = 0$$

$$\text{Si } 1.2 \leq \frac{HB_p}{HB_g} \leq 1.7 \text{ entonces } A = 0.00898 \cdot \frac{HB_p}{HB_g} - 0.00829$$

$$\text{Si } \frac{HB_p}{HB_g} > 1.7 \text{ entonces } A = 0.00698$$

Donde

HB_p y HB_g : son las durezas en Brinell del piñón y del engranaje.

Finalmente, la resistencia a la fatiga superficial S'_{fc} AGMA define las especificaciones del tratamiento térmico para los aceros con recubrimiento endurecido, en la figura 40 se muestra dos rectas con los intervalos de las resistencias de la AGMA de fatiga superficial para aceros, en función de su dureza Brinell [64].

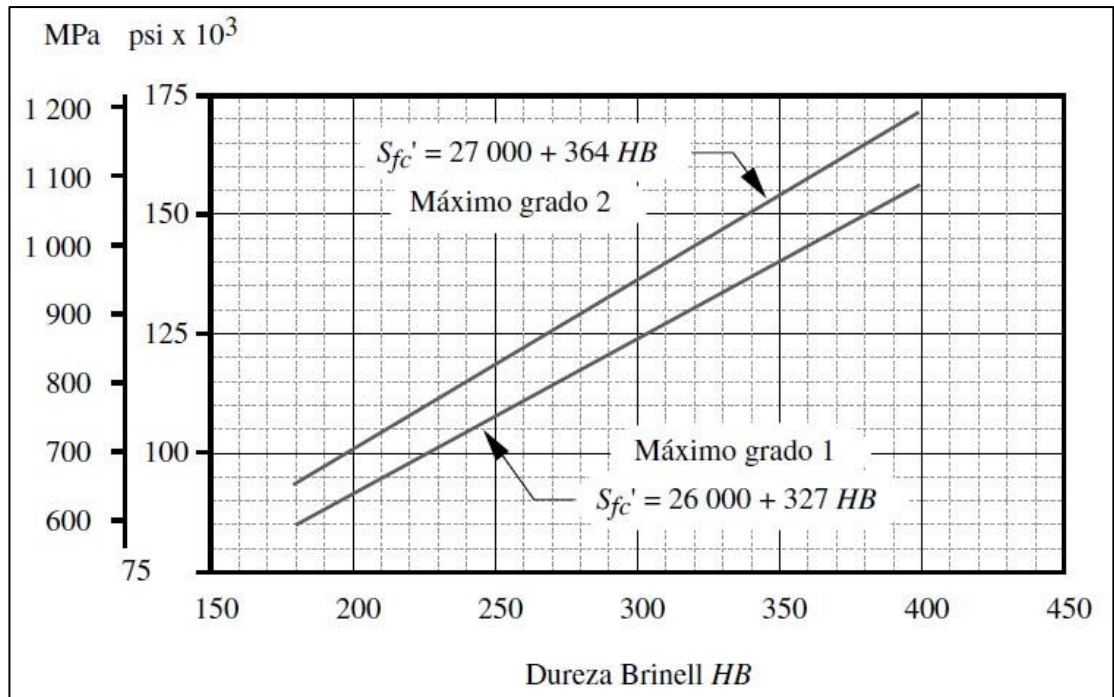


Figura 40. Resistencia a la fatiga superficial AGMA S'_{fc} [64].

Con las ecuaciones, figuras y datos vistos anteriormente se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 10. Valores y resultado a la fatiga superficial AGMA. Elaborado por Agila & Landázuri.

	Piñón	Engranaje
Z_I	0.13	0.13
Z_R	1	1
d	54	192
Z_E	191	191
σ_H	1304.68	691.911
C_H	1	1
S'_{fc}	742.9	675.3
S_{fc}	1396.65	1269.564
η	1.1	1.8

Como se puede observar en la tabla 10 se llega a tener para el piñón un factor de seguridad de 1.1 mientras que para el engranaje se tiene un factor de 1.8, con estos valores se puede afirmar que estos elementos no van a fallar ni por flexión ni por fatiga superficial.

3.1.7 Base

Este elemento es el encargado de fijar el sistema al piso, además de servir de guía al monoposte, esta base va a ser fabricada de acero galvanizado esto debido va a estar en contacto directo con el piso, por lo que debe de soportar las inclemencias del clima de Quito, en este elemento se van a instalar una chumacera y un rodamiento, la chumacera va a servir para dar un movimiento suave y fluido al monoposte mientras que el rodamiento va a servir de guía para este elemento.

La base presenta un tubo redondo de diámetro de 64 mm con espesor de 3mm, en esta sección es donde se van a instalar el rodamiento y la chumacera, este elemento presenta cuatro patas las cuales van a hacer de tubo cuadrado de 40x40 mm, estas al final van a tener una perforación para poder empotrar la base al piso, además van a tener soldadas unas platinas con el fin de reforzar la base, en la figura 41 se puede observar el diseño del elemento.

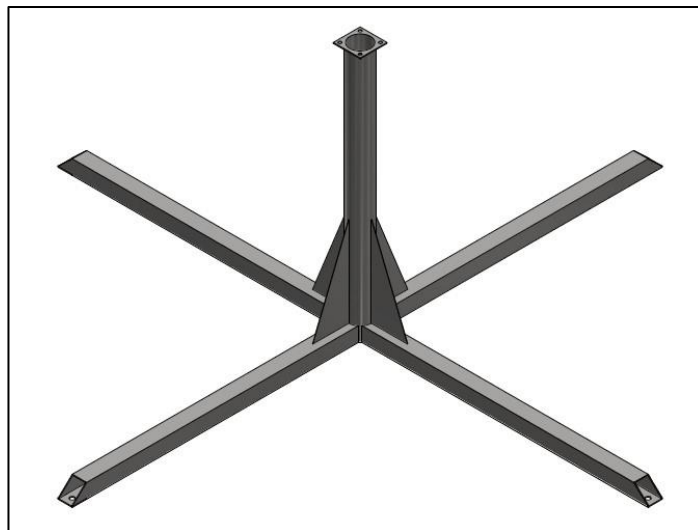


Figura 41. Diseño de la base del sistema. Elaborado por Agila & Landázuri.

3.1.8 Base motorreductor

Debido a que el motorreductor necesita transmitir su movimiento rotacional desde el engranaje conductor hacia el engranaje conducido es necesario contar con una base a nivel y que a su vez pueda fijarse, cabe recalcar que esta estructura será empotrada en el piso para su fijación, para la construcción se ha optado por utilizar perfil cuadrado de 40 x 40 [mm] y platinas de 3 mm en el material de acero estructural ASTM A-36, además de esto se realizó perforaciones en las platinas para sujeción mediante pernos entre el chasis de la caja reductora y la base como se observa en la figura 42.

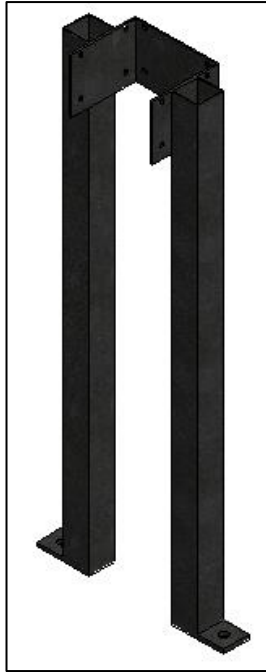


Figura 42. Base del Motorreductor. Elaborado por Agila & Landázuri.

3.1.9 Selección del rodamiento y chumacera

Para la selección del rodamiento y la chumacera que se va a utilizar en sistema se la realizo mediante el catálogo general de rodamientos de NTN, según este catálogo las chumaceras de rodamiento de bolas no solamente soportan cargas radiales sino que también soportan cargas combinadas, en este caso la chumacera debe de resistir las cargas producidas por el sistema de transmisión de engranajes además de soportar la carga axial generada por los elementos del sistema para este tipo de casos NTN recomienda usar la siguiente ecuación:

$$Pr = X \cdot Fr + Y \cdot Fa \quad (50)$$

Donde:

X : es el factor de carga radial

Fr : es la Carga radial

Y : es el Factor de carga axial

Fa : es la Carga axial

Los factores de carga axial y radial se encuentran en el catálogo de NTN, al reemplazar estos valores en la ecuación 50, se procedió a seleccionar la chumacera UCF2050D, mientras que para la selección del rodamiento se tomó en cuenta que este elemento

simplemente va a servir de guía por lo que no va a estar sometido a ningún tipo de carga por lo que se buscó en el catálogo un rodamiento que cumpla con dimensiones necesarias para su instalación llegando a seleccionar un rodamiento de bolas LLB-ZZ-6305.

3.2 Diseño eléctrico

3.2.1 Actuadores

3.2.1.1 Actuator Lineal

El actuador lineal que es necesario dentro del proceso corresponde a una extensión de eje de alrededor de 240 a 270 [mm], un avance de 15 [mm/s] y con carga mínima de 820 N o 185 lb-f por ello se decide instalar el siguiente actuador lineal con las siguientes especificaciones como se indica en la tabla 11.

Tabla 11. Especificaciones técnicas actuador lineal [65].

Especificaciones técnicas actuador lineal	
Marca	Homend
Modelo	S250
Longitud de vástago [mm]	250
Longitud de actuador comprimido [mm]	370
Longitud de actuador extendido [mm]	620
Velocidad de avance [mm/s]	10
Carga Máxima [N]	900
Materiales	Aluminio 6061 y acero 1018
Corriente máxima de trabajo [A]	3
Voltaje de funcionamiento dc [V]	12
Ruido [dB]	50
Nivel de Protección	IP54

El actuador lineal responde a los requerimientos para la instalación del seguidor biaxial.

3.2.1.2 Motorreductor

Dentro del mercado ecuatoriano existe 2 tipos de motorreductores, los de tipo monofásico y los de tipo trifásico, dentro de los requerimientos para el movimiento del sistema es necesario contar con un motor eléctrico monofásico de 110Vac tensión y 3A de corriente, con potencia de 0.25 hp a 1700 rpm, con protección al agua y polvo (IP54) y frecuencia de 60 H, además de una caja de reducción ortogonal de 100 a 1. Para ello se seleccionó el siguiente motorreductor con las características de la tabla 12.

Tabla 12. Especificaciones técnicas motorreductor. Elaborado por Agila & Landázuri.

Especificaciones técnicas motorreductor	
Marca	WEG
Modelo	W12
Tipo	Monofásico
Voltaje de operación (Vac)	110-120 / 220-240
Frecuencia de trabajo (Hz)	60
Potencia máxima de trabajo (HP)	0.25
Corriente de Operación (A)	3.06-3.12 / 1.53-1.56
Revoluciones por minuto (rpm)	1705 / 1720
Factor de potencia (FP)	0.98 / 0.96
Factor de servicio (FS)	1.15
Eficiencia (η)	54.5% / 50%
Nivel de Protección	IP54
Diagrama de conexión	Tipo G
Tipo de caja reductora	Tipo gusano
Disposición	Ortogonal
Serie	FCN40
Relación de reducción	100:1

Dentro del diseño eléctrico corresponde realizar una simulación en el software eléctrico Cade-Simu, de los dispositivos eléctricos para corroborar tanto el movimiento como la activación y desactivación de los actuadores como se muestra en el anexo 4 y 5.

Es necesario contar con sistemas de protección para brindar la seguridad a los dispositivos y al usuario debido a sobretensiones, subtensiones, sobrecargas, cortocircuitos y variaciones de frecuencia que pueda existir en el sistema, todas estas perturbaciones en la calidad de la energía entregada pueden dañar los equipos o incluso riesgos de electrocución al usuario. Por ello se presenta a continuación un esquema en el cual se presenta los sistemas necesarios para el buen funcionamiento del sistema fotovoltaico y biaxial como se puede observar en el esquema general del sistema en la figura 43.

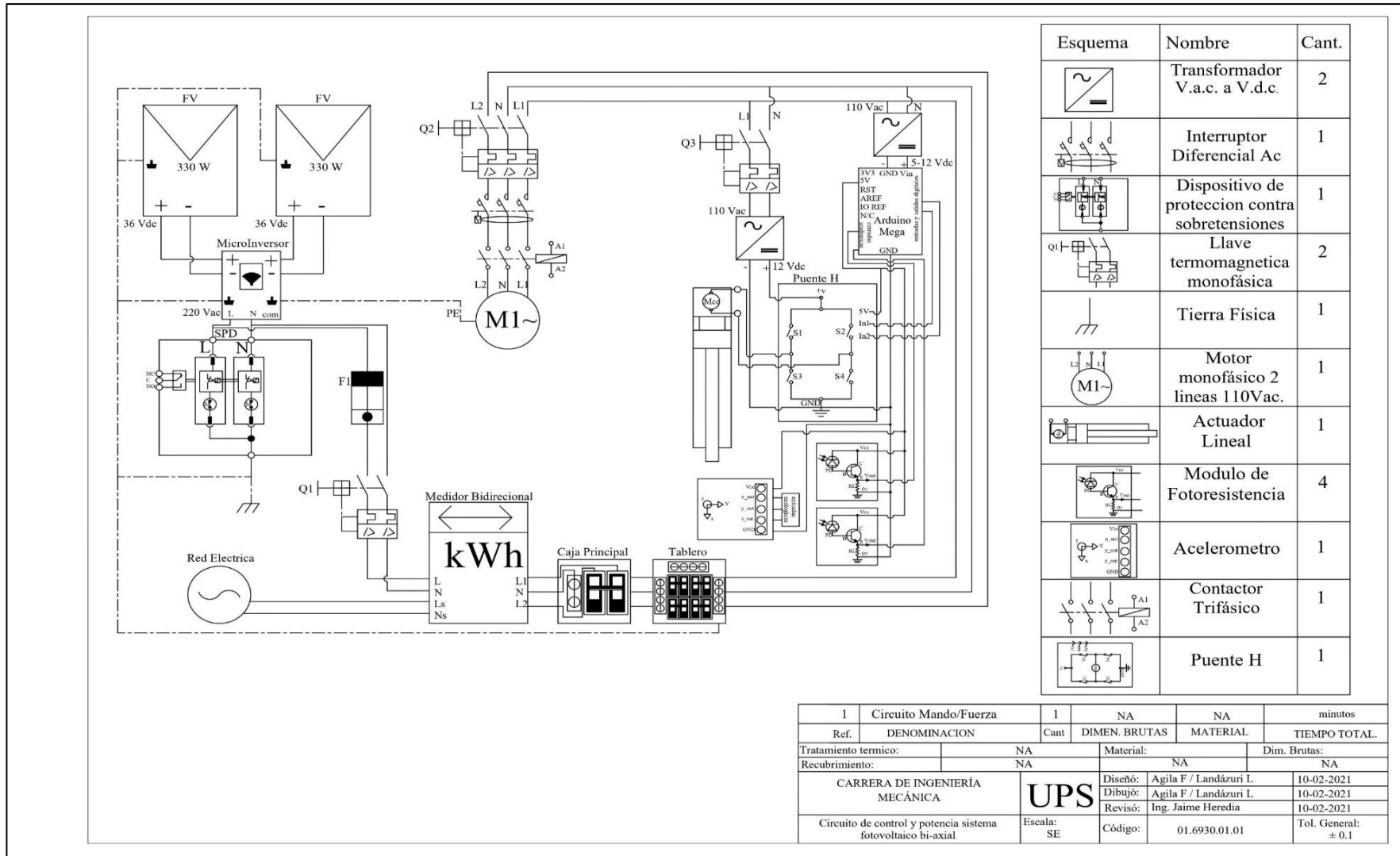


Figura 43. Circuito de control y potencia del sistema fotovoltaico biaxial. Elaborado por Agila & Landázuri.

Dentro del esquema se cuenta con 3 tipos de protecciones, para el sistema fotovoltaico, para los actuadores y para el suministro en el domicilio a continuación se explica los diversos dispositivos de los que está compuesto cada uno.

3.2.2 Protecciones sistema fotovoltaico

Para desarrollar el análisis de los elementos de protección para el sistema fotovoltaico es necesario conocer las especificaciones técnicas del panel fotovoltaico, presentadas en la tabla 13 a continuación.

Tabla 13. Especificaciones técnicas panel solar. Elaborado por Agila & Landázuri.

Especificaciones técnicas panel solar	
Tipo de módulo	Mono – Cristalino
Potencia máxima (Pmax)	330 W
Tolerancia salida de potencia	0/+3%
Voltaje de circuito abierto (Voc)	45.0 VDC
Corriente de cortocircuito (Isc)	9.57 A
Voltaje en potencia máxima (Vmp)	36.8 VDC
Corriente en potencia máxima (Imp)	8.96 A
Eficiencia	16.5 %
Max. Serie de fusible	15 A
Caja de conexiones (grado de protección)	≥ IP65
Máxima tensión del sistema	1000 VDC
Rango de temperatura de funcionamiento	-40°C a 85°C
Peso	21.5 kg
Dimensiones (altura x ancho x profundidad)	1960 mm / 990 mm / 40 mm
Clase de aplicación	A
Conector	MC4 / IP67
Calificaciones y certificado	IEC 61215, IEC 61730, CE, ISO 9001:2015, ISO 14001:2015, BS OHSAS 18001:2007, SA 8000:2015
STC: irradiación de 1000 W/m ² , temperatura del módulo de 25 °C, espectro AM1.5g según EN 60904-3.	
Reducción de eficiencia relativa promedio de 3.3% a 200 W/m ² según EN 60904-1.	

3.2.2.1 Llave termomagnética

Para que el sistema fotovoltaico trabaje adecuadamente es necesario evitar cortocircuitos y sobre tensiones entre la corriente de la red como de la corriente entregada por los paneles para ello es primordial la instalación de una llave termo

magnética mono polar de 220 VAC el cual abre el circuito en caso de calentarse o quemar el cableado. Además, es necesario determinar el amperaje en circuito cerrado para la selección de la llave termomagnética, al revisar la ficha técnica de los paneles solares se obtiene que la corriente en cortocircuito es de 9 A. Sin embargo, al contar con 2 paneles del mismo tipo y al estar conectados en paralelo su corriente se duplica obedeciendo a la Ley de Ohm, obteniendo un valor de 18 A. Al no existir una llave termomagnética de tal valor y al conocer que la corriente de corto del microinversor es de 30A se opta por una llave termomagnética mono polar de 30A y 220 VAC.

3.2.2.2 S.P.D. (*surge protección device*)

Dentro de las protecciones necesarias en el sistema fotovoltaico es la implementación de un SPD o también llamado dispositivo de protección contra sobretensiones (SPD) es un circuito que permite descargar cargas muy elevadas, pero con muy poco tiempo de intervención entre ellas el factor más común son las descargas electrostáticas del ambiente (rayos o tormentas eléctricas). Para este caso en particular es necesaria la instalación de dicho dispositivo debido a la localización geográfica y la altura, la ciudad de Quito en Ecuador al encontrarse a 2850 msnm., formar parte de las cadenas montañosas de los Andes y debido a que su instalación es en techos o terrazas es propensa a descargas electrostáticas principalmente en las temporadas de invierno como se muestra en la figura 44.

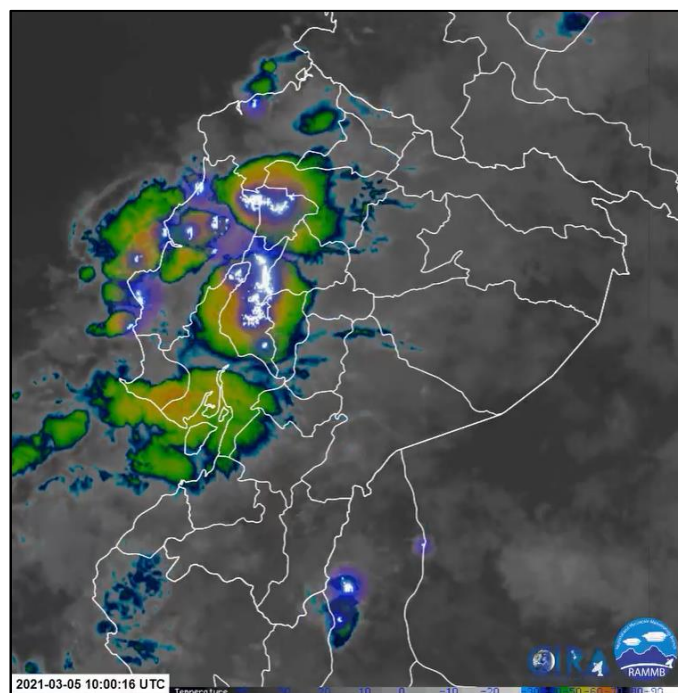


Figura 44. Monitoreo de precipitación y tormentas eléctricas 03-05-2021.[66].

En la figura 44 se logra divisar el fenómeno meteorológico de las tormentas eléctricas del día 5 de marzo de 2021 en temporada de invierno de la República del Ecuador divisando que la mayor cantidad de descargas eléctricas se encuentra en la región de la costa central.

De acuerdo con el nivel de protección (capacidad de descarga) es necesario la selección de un SPD, para ello se selecciona el SPD con las siguientes características.

Protección de tipo 2: este tipo de protección se encarga de contrarrestar las cargas electromagnéticas que se insertan en el sistema eléctrico generando sobretensiones y ruido, estas son producidas después de una descarga electrostática del ambiente y poseen menor resistencia que las protecciones de tipo 1.

Para el sistema solar fotovoltaico con seguimiento biaxial es necesario la instalación de un dispositivo de protección contra sobretensiones de tipo 2 en corriente alterna, debido a la ubicación, el costo y nivel de protección es el adecuados para dicho sistema.

3.2.3 Protección de actuadores

3.2.3.1 *Motorreductor*

Para definir las protecciones del motorreductor es necesario conocer las características eléctricas del motor, esencialmente su voltaje, amperaje y potencia de trabajo, equivalente a 110 Vac, 3.12 A y 186.5 W respectivamente. Para estas características de motor se decide trabajar con una llave trifásica para sus 2 líneas de 110Vac y su línea neutra, su trabajo es detectar sobretensiones en el motor debido a la desconexión de una fase o cortocircuito entre las fases además de un interruptor diferencial bifásico de 20 amperios en corriente alterna.

3.2.3.2 *Actuador lineal*

Como se revisó anteriormente cualquier dispositivo necesita su protección de sobre corriente y cortocircuitos, para el actuador lineal es necesario determinar el consumo máximo de dicho dispositivo, tomando en cuenta la ficha técnica del actuador lineal el consumo es de 3 A con tensión de 12 voltios en corriente continua. Para ello es necesario contar con un transformador de corriente alterna a continua que logre entregar la tensión exacta de 12 voltios y que suministre la corriente necesaria de máximo 3 A. Debido a que el transformador se encontrara conectado por un

tomacorriente, el elemento de protección corresponde al interruptor termo magnético del tablero siendo este de 10 A.

3.3 Diseño electrónico

Para el desarrollo del sistema electrónico del seguidor es necesario conocer que variables físicas son operables en el entorno de la instalación del equipo. Debido a que el equipo necesita activarse durante el día y desactivarse en la noche es necesario un control del tiempo, así como la porción de luz que entra en el sistema y la inclinación que debe tener los paneles y el seguidor para captar la mayor cantidad de radiación. Para ello es necesario un sistema de sensado que entregue información al sistema.

3.3.1 Sistema de sensado

Dentro de las variables físicas que son necesarias entregar al controlador del sistema se encuentra el tiempo debido al movimiento solar durante un periodo de tiempo, el lux que es la cantidad de luminosidad en 1 metro cuadrado de superficie y la inclinación.

3.3.1.1 Acelerómetro

Dentro de los sensores útiles en el sistema se encuentra el acelerómetro que es un sensor para medir los cambios en la aceleración incluyendo la gravedad o la variación de la velocidad de un objeto, un cambio de velocidad alto genera una aceleración alta, y un cambio de velocidad pequeño genera una aceleración pequeña, y si no existe cambio de velocidad significa una aceleración 0 o que el objeto se encuentra en reposo. Su uso en la industria va encaminado en medir las vibraciones y oscilaciones de máquinas. Dentro de los tipos de acelerómetros tenemos los de tipo capacitivo, con tecnología piezoeléctrica, piezoresistiva, mecánica y micromecánica.

Debido a la viabilidad del proyecto y disponibilidad del mercado se decide instalar un acelerómetro capacitivo que determina la variación de la aceleración mediante el micromovimiento de las placas de un condensador. En este caso se utiliza el chip ADXL335, logrando así detectar la variación de la velocidad y a su vez el grado de inclinación de los paneles solares en 3 ejes de giro X, Y y Z como se muestra en la figura 45 a continuación [67].

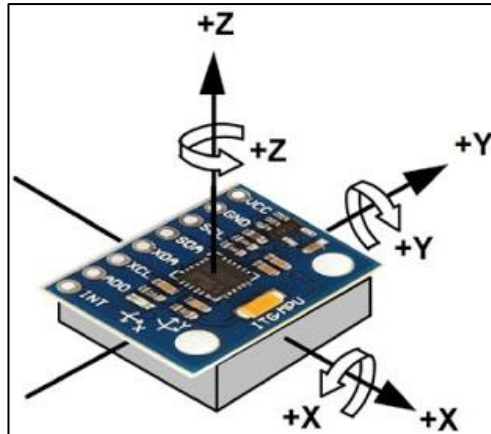


Figura 45. Ejes de medición de un giroscopio digital MPU6050. [68]

3.3.1.2 Reloj en tiempo real

Dado que la radiación se produce en horas del día es necesario activar y desactivar el sistema, para ello se incluirá en el sistema un módulo RTC DS3231, el cual mejorará el control del sistema, este módulo es de muy bajo consumo y posee alta precisión, incluso en altas temperaturas, el módulo a usarse se encuentra en la figura 46.



Figura 46. Módulo reloj de tiempo real RTC DS3231.[69]

3.3.1.3 Sensor LDR

Dentro de los sistemas de seguimiento solar es necesario contar con sensores que detecten el cambio de luz solar o intensidad lumínica este tipo de sensores son conocidos como fotorresistencias LDR el cual es un dispositivo electrónico pasivo-analógico el cual disminuye los valores de resistencia en función del aumento de intensidad lumínica conocido como efecto fotoeléctrico, esta relación no es lineal sino dependerá de la ecuación [52].

$$R = AL^{-\alpha} \quad (51)$$

En la ecuación 50 se puede observar la gráfica y relación entre la cantidad de luz y la resistencia en donde:

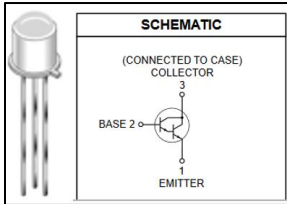
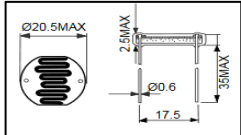
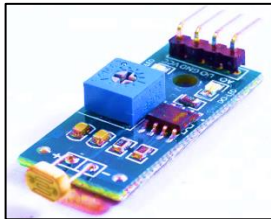
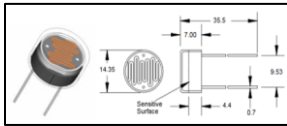
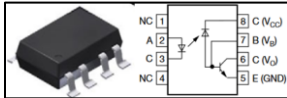
R: representa el valor de resistencia medido en Ohm's [Ω].

L: cantidad de luz recibida al sensor medido en Lux.

A, α : Valores dependientes del material del sensor y su conductor.

En el mercado cada sensor varía su valor de resistencia, por ello es necesario revisar los valores máximos y mínimos para una configuración correcta y esta responda a los cambios de intensidad de forma estable, por ello se debe analizar los diferentes tipos de fotorresistencia que se encuentran en el mercado en la tabla 14.

Tabla 14. Tipos de fotorresistencias en el mercado ecuatoriano. Elaborado por Agila & Landázuri.

Tipos de fotorresistencias en el mercado ecuatoriano				
Nombre	Características	Descripción física	Rango de lectura	Ejemplo
Fototransistor Darlington [70]	<p>Top: -65 a 125 [°C]</p> <p>Tmax: -65 a 150 [°C]</p> <p>Vmax: 25 VDC</p> <p>Pmax: 125mW/cm²; 5v</p>		<p>510 nm a 850nm</p> <p>1000 Ω a 10 Ω</p> <p>t de respuesta: 30μs</p>	L14F2
LDR CDS [71]	<p>Top: -30 a 70 [°C]</p> <p>Tmax: -65 a 150 [°C]</p> <p>Vmax: 10 VDC</p> <p>Pmax: 100mW/cm²; 5v</p>		<p>350 nm a 560 nm</p> <p>1000 kΩ a 200 kΩ</p> <p>t de respuesta: 30 ms</p>	PGM2000
Modulo Sensor LDR LM393 [72]	<p>Top: 0 a 70 [°C]</p> <p>Vop: 3.3 a 5 [VDC]</p> <p>Salida digital y analoga</p> <p>Sensibilidad ajustable</p> <p>Conexión de 4 cables: Vcc, Gnd, Do, Ao</p>		<p>350 nm a 560 nm</p> <p>1000 kΩ a 200 kΩ</p> <p>t de respuesta: 1,3μs</p>	LM393
Fotorresistencia CDS encapsulada [73]	<p>Top: -60 a 75 [°C]</p> <p>Tmax: -60 a 75 [°C]</p> <p>Vmax: 250 VDC o VAC</p> <p>Pmax: 250mW/cm²; 5v</p>		<p>400 nm a 550 nm</p> <p>1000 kΩ a 5,4 kΩ</p> <p>t de respuesta: 30 ms</p>	NORPS-12
Opto-transistor [74]	<p>Top: -55 a 100 [°C]</p> <p>Tmax: -55 a 150 [°C]</p> <p>Vmax: 20 VDC</p> <p>Pmax: 100mW/cm²; 5v</p>		<p>380 nm a 750 nm</p> <p>1000 kΩ a 100 Ω</p> <p>t de respuesta: 1,5 μs</p>	6N136

Dentro del mercado ecuatoriano se ha escogido la instalación en el sistema de un módulo LDR LM393 debido a su sencilla instalación, tiempo de respuesta y gran sensibilidad en relación con otros sensores, además de su compatibilidad con microcontroladores.

3.3.2 Controlador

Como se observó en el capítulo I, para que el movimiento del mecanismo biaxial sea suave y preciso es necesario de un sistema de control regido por un controlador eléctrico-electrónico. Dentro de los controladores adaptados a un sistema proporcional integral dentro de la industria nos encontramos con los controladores lógicos programables (PLC`s), controladores de encendido y apagado, controladores PID de afinación automática, controladores multibucle, controladores de límite de seguridad, placas de control programable como Raspberry pi, Arduino, Odroid-X, entre otros.

Debido a las prestaciones de los controladores, la calidad y el precio se ha decidido optar por una placa de micro control de condigo abierto de la empresa italiana Arduino en especial el modelo Mega 2560 rev3. En términos de potencia el consumo es mínimo acercándose a 1,12 Vatios. En la figura 47 se observa un diagrama de la placa programable con sus diversas entradas y salidas.

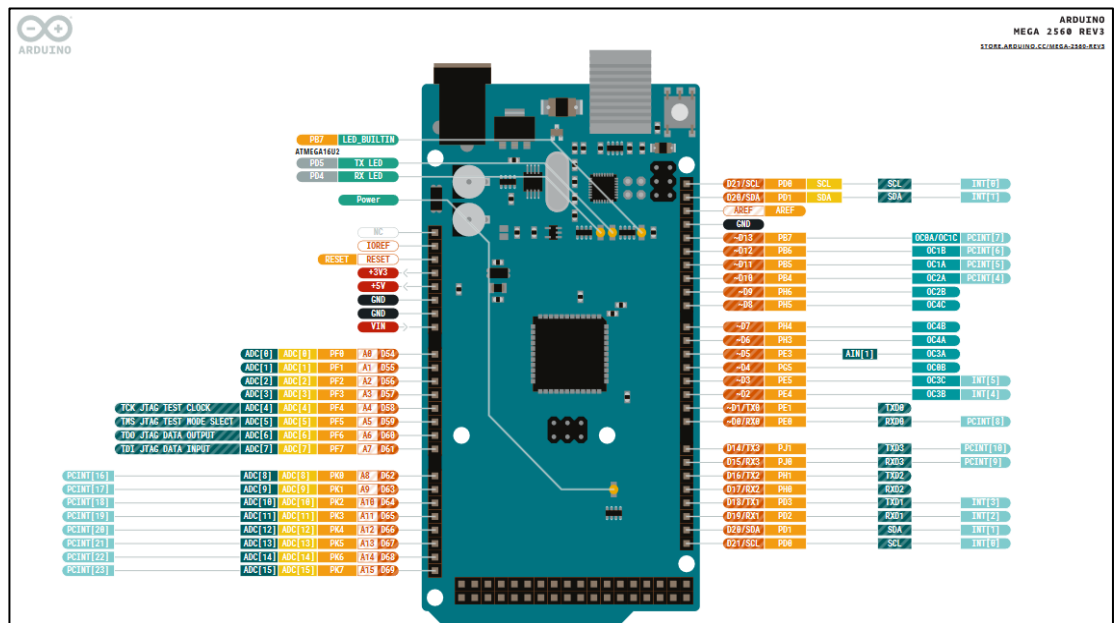


Figura 47. Diagrama placa programable Arduino Mega 2560 [75].

Para que los actuadores sean controlados por la placa controladora es necesario programar mediante software, en este caso el software libre de Arduino utilizando el lenguaje de programación en C, como lo muestra el programa en el anexo 2.

3.3.3 Esquema electrónico de sensorado

A continuación, se presenta el esquema principal del conexionado electrónico entre los sensores, controlador y actuadores en los cuales se ha procedido a programar en función de los requerimientos como se observa en la figura 48.

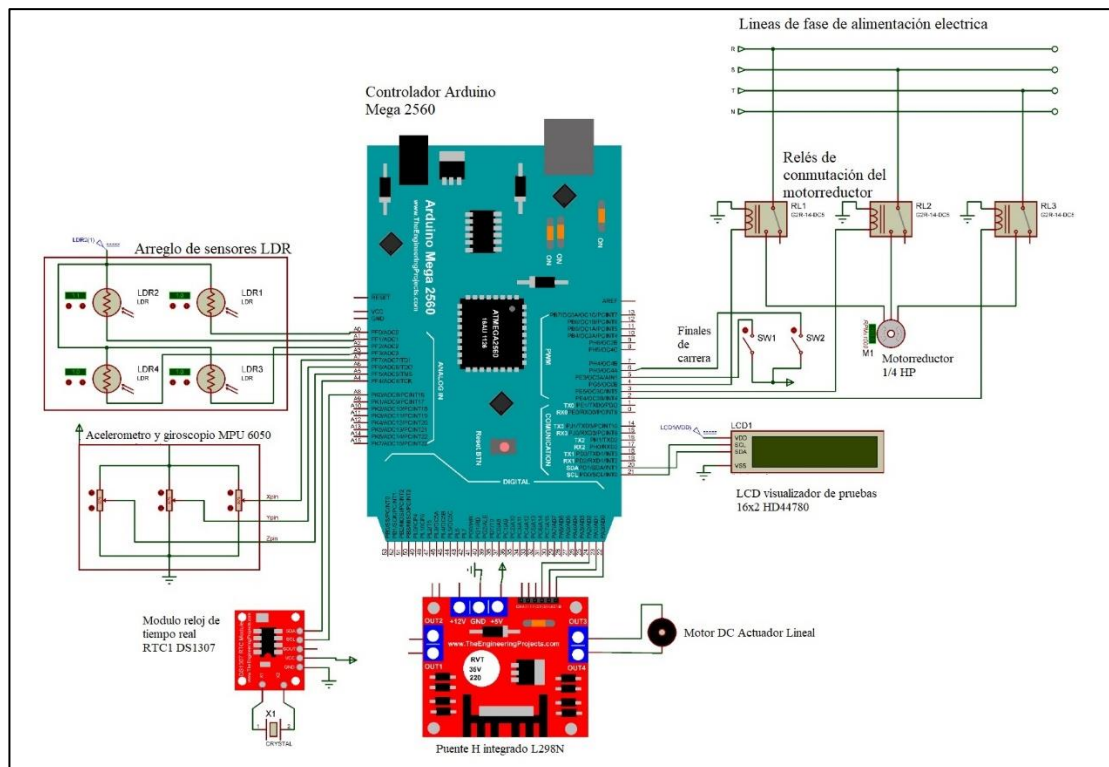


Figura 48. Esquema electrónico de sensores con el controlador. Elaborado por Agila & Landázuri.

Para el apartado de programación es necesario seguir una lógica secuencial y ordenada para lo cual se desarrolla un flujograma de operación que se muestra en el anexo 1.

3.3.4 Lógica de programación

Para una mejor interpretación para el lector para la programación es necesario detallar como opera el sistema. El programa basa su funcionamiento en 4 sensores LDR dispuestos de la siguiente manera.

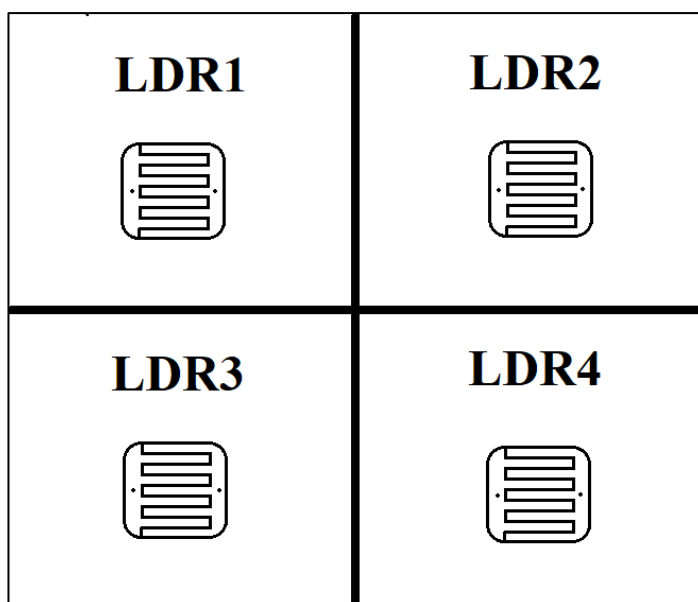


Figura 49. Disposición de los sensores LDR para el seguimiento solar. Elaborado por Agila & Landázuri.

Como se puede ver en la figura 49 los sensores forman una matriz 2 por 2, esto es debido a que el controlador y el programado deben actuar en función de la cantidad de luz obtenida en cada uno de los sensores como ve en la figura 50.

























Extensión de Actuador Lineal		Retracción de Actuador Lineal		Paro de los actuadores	
LDR1 	LDR2 	LDR1 	LDR2 	LDR1 	LDR2 
LDR3 	LDR4 	LDR3 	LDR4 	LDR3 	LDR4 
Giro Horario Motorreductor		Giro Antihorario Motorreductor		Paro de los actuadores	
LDR1 	LDR2 	LDR1 	LDR2 	LDR1 	LDR2 
LDR3 	LDR4 	LDR3 	LDR4 	LDR3 	LDR4 

Figura 50. Esquema de sensado para cada condición de luminosidad. Elaborado por Agila & Landázuri.

En la figura 50 se puede apreciar 6 diferentes estados correspondientes a las diferentes condiciones que se presentan para los sensores, para lo cual se programa para las siguientes condiciones de cada estado.

a. Estado 1 extensión del actuador lineal

Cuando LDR1 y LDR2 obtiene mayor luz que 1000 lux y LDR3 y LDR4 obtienen valores menores a 900 lux entonces el actuador lineal extenderá su brazo hasta que los valores sean progresivamente iguales y se detenga el sistema.

b. Estado 2 retracción del actuador lineal

Cuando LDR3 y LDR4 obtiene mayor luz que 1000 lux y LDR1 y LDR2 obtienen valores menores a 900 lux entonces el actuador lineal extenderá su brazo hasta que los valores sean progresivamente iguales y se detenga el sistema.

c. Estado 3 paro de los actuadores

Este estado ocurre cuando los 4 sensores reciben muy poca cantidad de luz, menor a 900 lux, esto se debe a que el entorno se encuentra oscuro o nublado, en este caso tanto el actuador lineal como el motorreductor se mantienen detenidos.

d. Estado 4 giro horario motorreductor

Para este estado se compara un promedio entre los valores de los LDR1 y LDR3 y un promedio entre los LDR2 y LDR4, en caso de que el promedio entre LDR1 y LDR3 sea mayor al promedio entre LDR2 y LDR4, el motorreductor actuará en sentido horario por dos segundos moviéndose alrededor de 10° , hasta que la diferencia entre los 2 promedios sea menor o igual a 25.

e. Estado 5 giro anti horario motorreductor

Este estado es muy similar al estado 4, sin embargo, lo que cambia es el orden de comparación, si el promedio entre LDR2 y LDR4 es mayor al promedio de LDR1 y LDR3 entonces el motorreductor girará en sentido anti horario por 2 segundos, hasta que la diferencia sea menor o igual a 25.

f. Estado 6 paro de los actuadores

En el caso de que los 4 Sensores reciban iluminación mayor a los 1500 lux entonces el sistema se mantendrá detenido, esto se realizará hasta que uno o 2 sensores cambien a valores de lux menor a los 900 lux.

Debido a que la sensibilidad de los LDR's es muy alta y por protección del clima se realiza una capsula como se puede ver en la figura 51 en el cual no afectará al aparatado electrónico de los sensores y mejorará en el sensado de la luminosidad y por ende al rastreo solar, esta capsula debe estar ubicada en el centro de los 2 paneles con el fin de disponer a los paneles perpendicularmente con el sol.

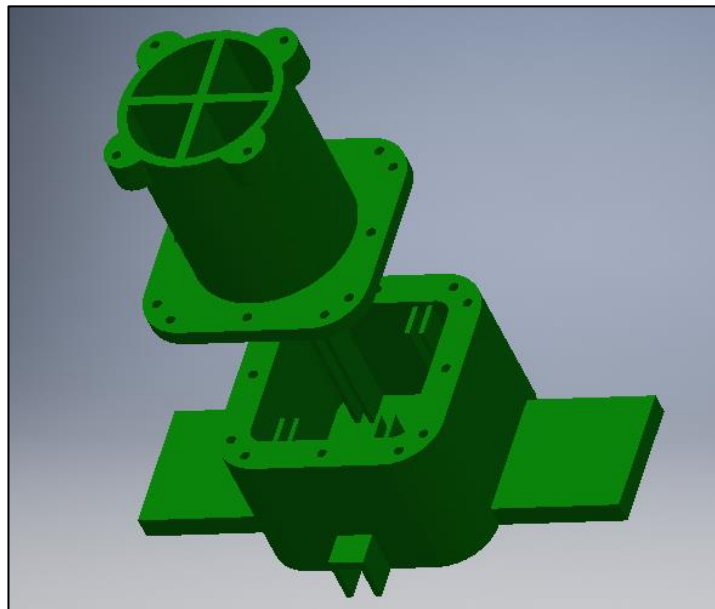


Figura 51. Capsula de reposo de los sensores. Elaborado por Agila & Landázuri.

Además, el programa se encuentra configurado para realizar estas rutinas en un intervalo de tiempo desde las 8:30:00 am hasta las 17:29:59 pm y a las 17:30:00 pm el sistema procede a posicionarse en forma extendida para evitar las corrientes de aire excesivas durante la noche hasta las 8:29:00 am del día siguiente y procediendo a ubicarse hacia el este y con el actuador retrayéndose para empezar la lectura de datos. El movimiento del reposicionamiento se logra mediante finales de carrera ubicados a S45°E y S45°O, teniendo un rango de operación de 270° en todo el movimiento del motorreductor. Como se puede observar en la siguiente imagen.

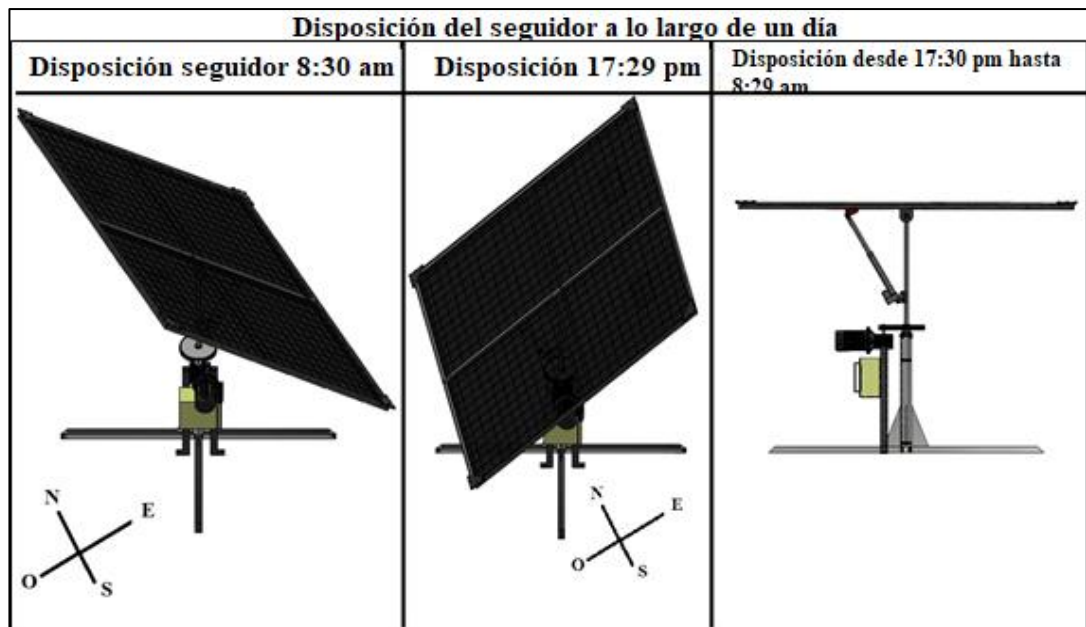


Figura 52. Disposición del seguidor a lo largo de un día. Elaborado por Agila & Landázuri.

Con estos datos de funcionamiento y sensado se procede a realizar un flujograma que corresponda y opere en función de los requerimientos de luminosidad y de tiempo para enviar información a los actuadores y corregir el curso de los módulos fotovoltaicos.

El sistema inicia a las 8:30 am de cualquier día, esto se logra mediante el módulo DS1307, el cual opera como reloj, la frecuencia de actualización del reloj con el programa es de 1 segundo, por ende, mientras el reloj se encuentre entre el horario indicado el controlador decidirá si debe operar o no. Luego se incluye la condición de que si está activado el sw1 y el giroscopio se proceda a la lectura de los sensores LDR caso contrario si el final de carrera sw2 está en contacto se debe activar el motorreductor en sentido horario por 12 segundos.

Una vez transcurran estas condiciones se procede a la lectura de los sensores realizando comparativas entre ellos como se pudo observar en la figura 50, para los diferentes casos de luminosidad, con intervalos de 30 minutos. Una vez llegado a las 17:29 el sistema procede a posicionarse en función de que los paneles estén horizontal a la superficie terrestre, esto es debido a que la mayor cantidad de viento ocurre en la noche y posicionarlos horizontal evita que el mecanismo sea afectado por fuerza de este, esta posición cambia a las 8:30 am del día siguiente para tomar lecturas. Como se observa en la figura 53.

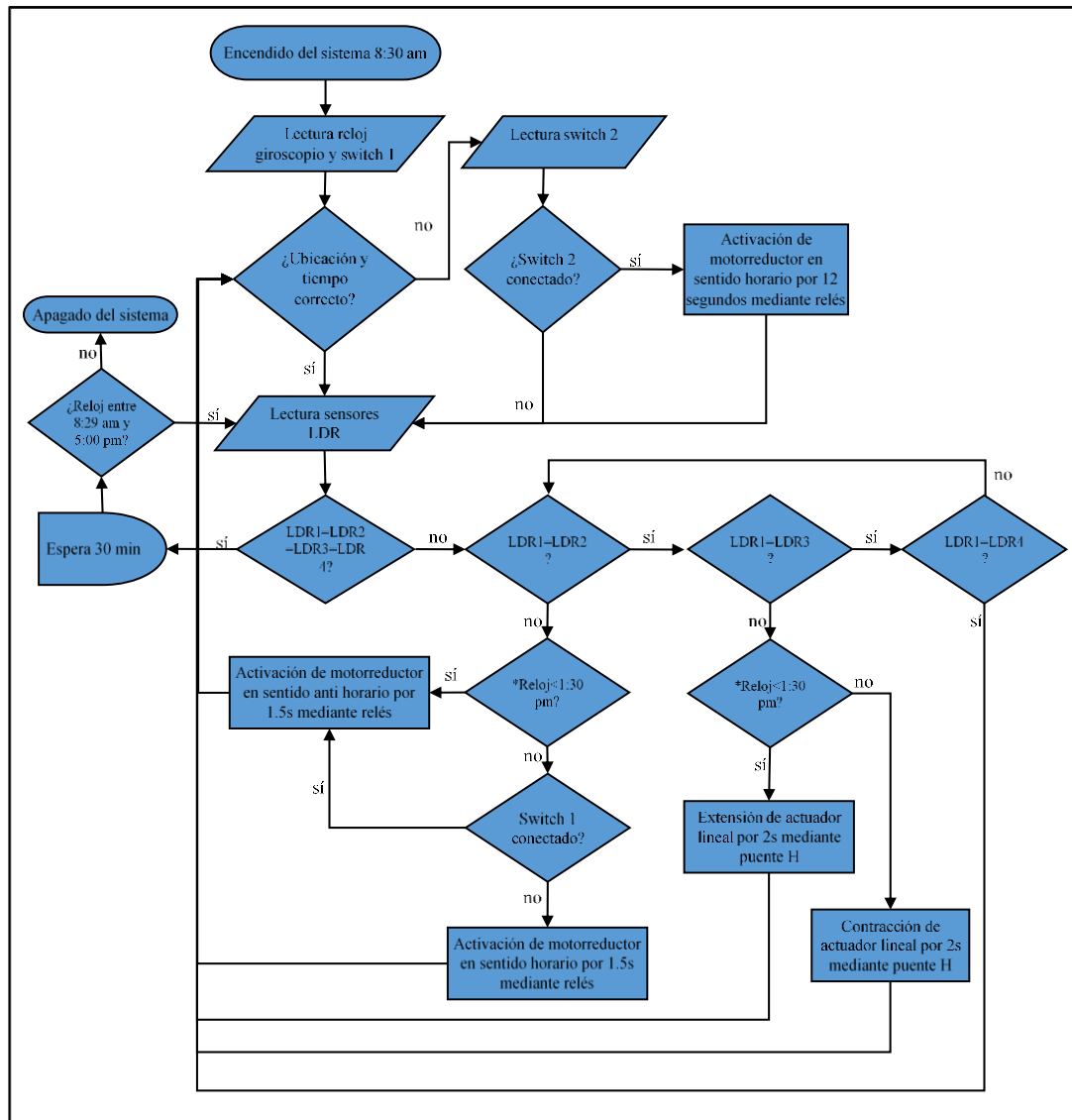


Figura 53. Flujoograma de operación del sistema electrónico. Elaborado por Agila & Landázuri.

3.4 Análisis general del sistema de seguidor solar biaxial

Para el diseño el sistema de seguidor solar biaxial se tomó en cuenta tres parámetros importantes como es el diseño mecánico, eléctrico y electrónico. Estos parámetros ayudaron a determinar los elementos y diseño que debía de cumplir el sistema para su correcto funcionamiento, se empezó con el diseño mecánico que ayudó a determinar las dimensiones, elementos y materiales que se debía usar para la construcción del sistema, para la fabricación del eje, pasador y acople se utilizó los aceros AISI 1018 y el AISI 1049 que son aceros de transmisión, mientras que para la construcción de la estructura de los paneles solares, monoposte y base del motor se utilizó el acero estructural A-36, para la base del sistema se utilizó el acero A-36 galvanizado el cual

va a estar empotrado a una terraza con 4 pernos de anclaje y para el sistema de transmisión por engranajes se utilizó el acero AISI 5115.

Con los parámetros calculados en el diseño mecánico se empezó con la selección de los componentes electromecánicos como el actuador lineal que presenta fuerza de empuje de 900 N que va a permitir el movimiento de los paneles solares en altitud y un motorreductor eléctrico de ¼ HP y 17 rpm que va a generar el movimiento alrededor del acimut. Además, se realizó la selección de dos paneles fotovoltaicos policristalinos de 330 W cada uno y de un microinversor de 1200 W que va a cumplir con la función de transformar la energía colectada por los paneles solares en energía eléctrica y esta va a ser enviada a red de eléctrica pública mediante un medidor de luz bidireccional, en este apartado además se determinó los elementos de protección para cada uno de los elementos de potencia.

Finalmente, en el apartado electrónico se realizó la selección de un Arduino Mega como tarjeta controladora del sistema, además de los sensores que van a permitir el funcionamiento del mecanismo como es los LDR que van ayudar al posicionamiento de los paneles fotovoltaicos en función de la posición solar, también de un sensor de tiempo que va permitir controlar el tiempo de operación del sistema y dos finales de carrera que van ayudar a determinar la posición inicial y final del sistema, mediante el software de diseño Inventor 2019 se realizó el diseño y ensamblaje del sistema fotovoltaico de seguidor solar biaxial, en el que se determinó el correcto funcionamiento del sistema, en la figura 54 se puede observar las dimensiones brutas y el diseño final del sistema de seguidor solar biaxial.

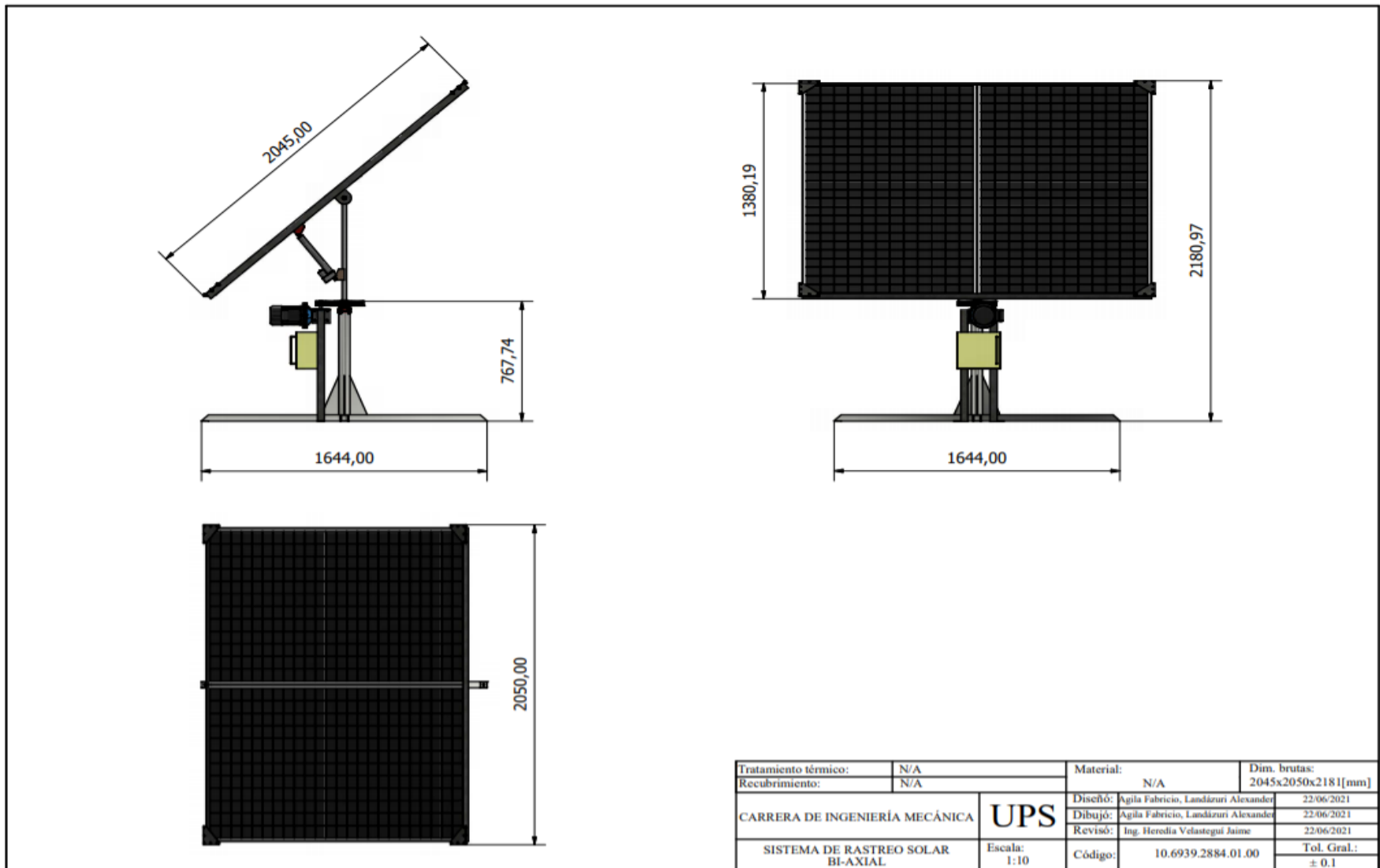


Figura 54. Diseño final del sistema fotovoltaico con seguidor solar biaxial. Elaborado por Agila & Landázuri.

CAPITULO IV

4 RESULTADOS DEL PROYECTO

En este capítulo se va a proceder con la construcción de la máquina, basado en el diseño mecánico, eléctrico y electrónico vistos en el capítulo 3. Además, se realizará un análisis comparativo de la producción de energía y rentabilidad de un sistema fotovoltaico fijo y del sistema de seguidor biaxial. Finalmente se realizará un cronograma de mantenimiento que garantice un correcto funcionamiento y vida útil de la máquina.

4.1 Construcción del seguidor solar biaxial.

Como se mencionó anteriormente el diseño del sistema de rastreo solar, debe cumplir con las configuraciones y parámetros eléctricos, electrónicos y mecánicos propuestos en el capítulo 3. La instalación se la realizó en la terraza superior de un edificio residencial el cual no influye en las actividades de los inquilinos y al no contar con edificios altos o bosques cerca se convierte en un lugar ideal para la instalación del sistema de seguidor solar biaxial, en la figura 55 se puede apreciar el sistema instalado en la terraza.



Figura 55. Sistema de rastreo solar biaxial en operación durante el mediodía. Elaborado por Agila & Landázuri.

Para fijar el sistema a la terraza se utilizaron 6 pernos de anclaje de $\frac{1}{2} \times 2 \frac{3}{4}$ de pulgada, 4 para el anclaje de la base principal y 2 para anclar la base que soporta al motorreductor, este sistema es alimentado desde el tablero principal del departamento

y la energía generada entregada al tablero para uso de los electrodomésticos o enviada a la red eléctrica mediante el medidor bidireccional.

4.2 Análisis comparativo de producción de energía de un sistema con seguidor solar biaxial y sin el sistema de seguidor solar biaxial.

Mediante el sistema de monitoreo de radiofrecuencia entre el micro inversor y un módulo de recepción conectado al router de la residencia se logró obtener los datos de producción de los paneles solares, brindando la información acerca de la potencia y energía producida. Para esta comparación se tomaron datos del mes de mayo cuando no se utilizó el sistema de seguidor solar biaxial y los datos del mes de junio usando el seguidor solar biaxial. Cabe mencionar que al momento de realizar la toma de datos no se logró trabajar con el medidor bidireccional por lo que no se logró alimentar de forma correcta al micro inversor, por lo que los datos obtenidos no representan lo que realmente pueden generar los paneles solares, sin embargo, estos valores servirán de referencia para comparar la producción de un sistema fotovoltaico con y sin seguidor solar biaxial.

En la figura 56 se observa la producción de energía del mes de mayo en la que no se utilizó el sistema seguidor solar biaxial, como se puede ver la producción de energía en días nublados o lluviosos ronda desde 25 Wh hasta los 40 Wh mientras que en los días parcialmente despejados o soleado se obtuvieron valores desde los 45 Wh hasta 86 Wh, llegando a obtener una producción mensual de 1602 Wh.

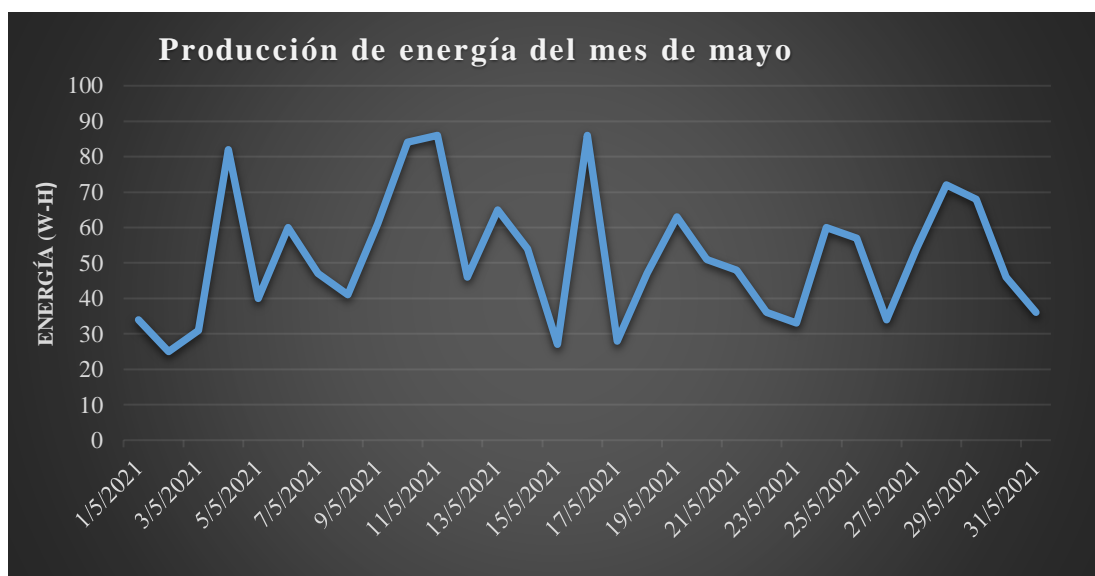


Figura 56. Producción energética del mes de mayo mediante el uso de un sistema fotovoltaico fijo. Elaborado por Agila & Landázuri

En la figura 57 se puede observar la producción de energía del mes de junio, en la que se utilizó el sistema de seguimiento solar, logrando obtener una producción de energía en días lluviosos o nublados desde los 41 Wh hasta los 65 Wh, mientras que en los días soleados o parcialmente nublados se logró una captación de energía que ronda desde los 70 Wh hasta los 124 Wh, llegando a obtener una producción mensual de 2044 Wh.

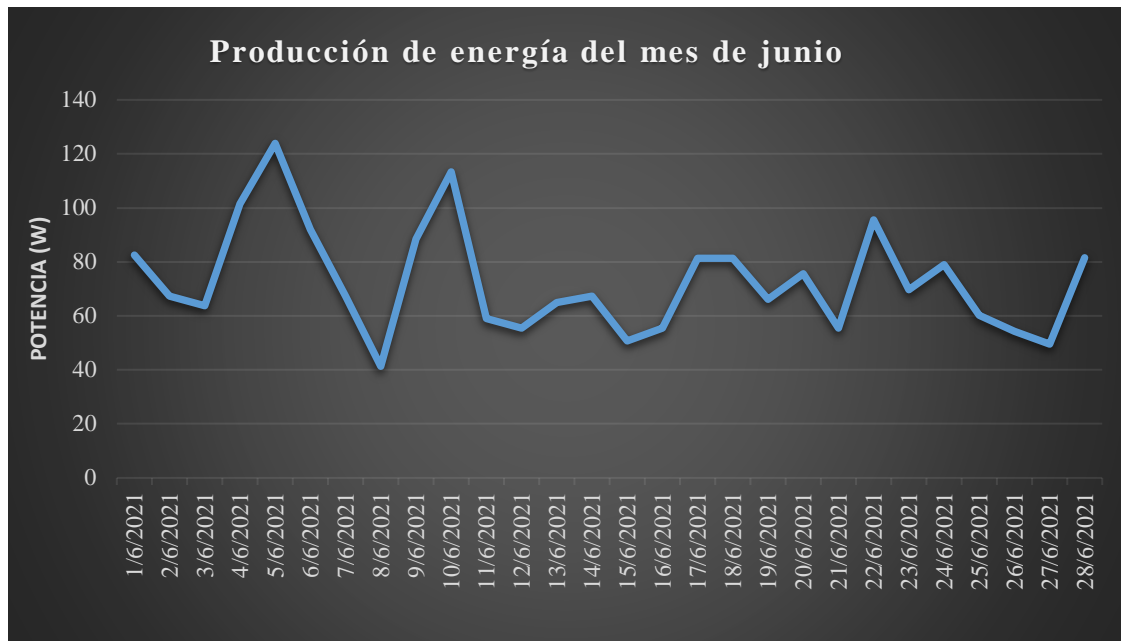


Figura 57. Producción energética de junio mediante el uso del seguidor biaxial. Elaborado por Agila & Landázuri.

Además, se decidió realizar una comparación del comportamiento de la recolección de energía diaria en estos dos meses, para esta comparación se utilizaron los valores obtenidos el día 28 de mayo y del 24 de junio esto debido a que su generación de energía era muy parecida.

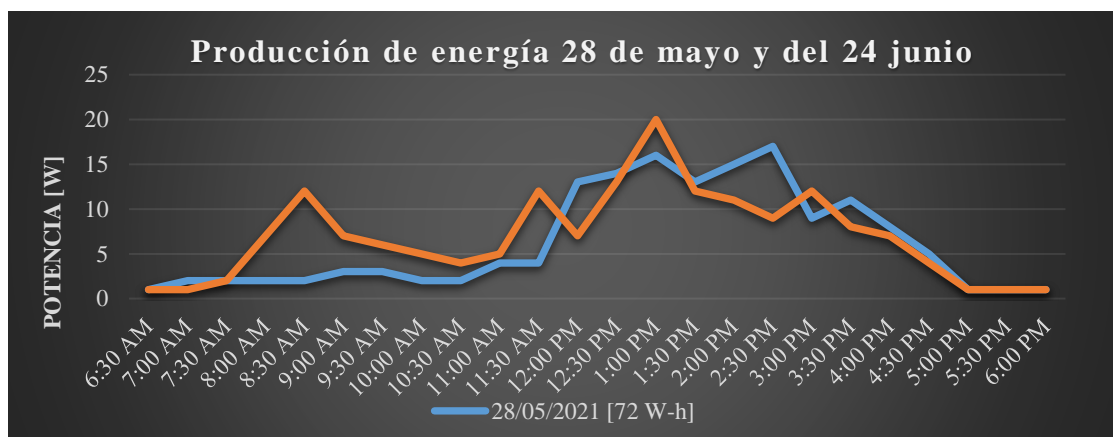


Figura 58. Producción de energía del 28 de mayo y del 24 de junio. Elaborado por Agila & Landázuri

Como se puede observar en la figura 58, el día 28 de mayo empieza a producir energía alrededor de las 11:00 am y se mantiene generando hasta alrededor de las 17:00, mientras que el 24 de junio se logra generar energía a partir de las 8:30 hasta las 17:00, logrando tener un mayor tiempo de recolección de energía, cabe recalcar el 24 junio estuvo parcialmente nublado debido a esto se puede ver en la gráfica picos de alza y de baja debido a las diversas nubosidades que se presentaron en el día a pesar de esto se logró una producción de energía de 79 Wh, mientras que el día 28 de mayo estuvo despejado a pesar de esto se puede observar que la generación de energía se da por un corto lapso de tiempo debido a esto en esa hora se puede ver que la gráfica se mantiene equilibrada y solo se logró la generación 72 Wh.

Como se puede visualizar las gráficas anteriores, en el mes de junio se obtiene un aumento significativo en la generación de energía en relación al mes de mayo, llegando a tener una producción media diaria de 73 Wh que en comparación con el mes de mayo que es de tan solo 51.7 Wh, además con los datos obtenidos se determinó que con el uso del sistema de seguidor solar biaxial se puede obtener una media de 6.5 horas de sol diaria, mientras que sin el uso de este sistema solo se obtiene una media 4 horas de sol, con estos valores se puede determinar la eficiencia del sistema del seguidor solar biaxial mediante la siguiente ecuación:

$$Eficiencia = \frac{t_{ssb} \cdot p_{ssb}}{t_{sss} \cdot p_{sss}} \cdot 100\% \quad (52)$$

Donde:

t_{sss} : horas de sol media sin el sistema de seguidor solar biaxial.

p_{sss} : producción de energía media sin el sistema de seguidor solar biaxial.

t_{ssb} : horas de sol media con el sistema de seguidor solar biaxial.

p_{ssb} : producción de energía media con el sistema de seguidor solar biaxial.

Al reemplazar los valores en la ecuación obtenemos el siguiente resultado:

$$Eficiencia = \frac{4 h \cdot 51.7 Wh}{6.5 h \cdot 73 Wh} \cdot 100\%$$

$$Eficiencia = 43.6\%$$

Mediante la ecuación 51 se logró determinar que mediante el uso del sistema de seguimiento solar se logra aumentar la eficiencia en un 43.6% en comparación con un sistema fijo.

4.3 Rentabilidad del proyecto.

Para realizar el análisis de la rentabilidad del proyecto es necesario comparar dos circunstancias diferentes, el primer caso cuando instalación solar fotovoltaica sea totalmente fija y el segundo caso con la implementación del seguidor biaxial, para ambos casos es necesario determinar costos fijos y variables, luego obtener la cantidad de ingresos anuales y finalmente determinar el punto de equilibrio para conocer si el proyecto es viable económicamente, cabe mencionar que, para este análisis se asumirán los valores de la producción energética de los paneles solares. Como se mencionó anteriormente, el sistema aún no cuenta con el medidor bidireccional que alimenta de forma correcta al micro inversor, por lo que los valores obtenidos no reflejan la capacidad de producción real de los paneles solares.

Para empezar, se realizó un análisis de costos de construcción y mantenimiento del sistema solar fotovoltaico fijo, en la tabla 15 se pueden observar los componentes y costo de cada uno, además se asumió un el valor total para el mantenimiento del sistema para un periodo de 20 años, obteniendo de esta manera un costo total de fabricación y mantenimiento de 1185 USD por todo el proyecto.

Tabla 15. Costos instalación SFV fija. Elaborado por Agila & Landázuri.

Costos de construcción y mantenimiento de un sistema solar fotovoltaica fija		
Concepto	Costos Fijos [\$]	Costos Variables [\$]
Paneles	395	N/A
Inversor	350	N/A
Estructura	100	N/A
Monitoreo	100	N/A
Medidor Bidireccional	200	N/A
Cableado	20	N/A
Interruptor diferencial	20	N/A
Mantenimiento [20 años]	N/A	60
Costo Total		1185

Mientras que en la tabla 16 se puede observar los componentes, costos y mantenimiento, para la construcción del sistema del seguidor biaxial, como se puede observar presenta más componentes en comparación con el sistema fotovoltaico fijo, debido a esto también presenta un costo de mantenimiento mayor, además de que su construcción es más compleja, el costo de fabricación de este sistema es de 2140 USD.

Tabla 16. Costos instalación del sistema de seguidor biaxial. Elaborado por Agila & Landázuri

Costo de construcción y mantenimiento del sistema solar fotovoltaica con seguidor solar biaxial		
Concepto	Costos Fijos [\$]	Costos Variables [\$]
Paneles	395	N/A
Estructura	200	N/A
Motorreductor	250	N/A
Actuador lineal	110	N/A
Material electrónico	50	N/A
Inversor	350	N/A
Monitoreo	80	N/A
Medidor bidireccional	200	N/A
Cableado	20	N/A
Material eléctrico	10	N/A
Engranajes	225	N/A
Rodamientos	30	N/A
Pernos	20	N/A
Mantenimiento [30 años]	N/A	200
Costo Total		2140

A pesar de que el costo de construcción del sistema del seguidor sola biaxial es un 55% más caro que el sistema fotovoltaico fijo, este sistema presenta una mayor eficiencia, debido a esto se va a realizar comparación del costo benéfico entre estos dos sistemas.

Para empezar con este análisis se van a asumirlos valores de producción energética de los paneles solares, utilizando la ecuación 52 se va a tratar de predecir la potencia anual total que se puede producir en el sistema fotovoltaico fijo y el sistema de seguidor solar biaxial, en esta ecuación se utiliza una cantidad de 335 como números de días del año, esto debido a que no todos los días se puede lograr la misma captación de energía.

$$P_t = \frac{P_p \cdot N_p \cdot H_s \cdot 335}{1000} \quad (53)$$

Donde:

P_p : Potencia nominal de cada panel solar [W].

N_p : Numero de Paneles solares.

H_s : Horas de sol por día.

Para el análisis es necesario conocer el costo del kWh , donde según datos del ARCONEL el costo para la ciudad de Quito es de 0.087 centavos de dólar [76]. Al realizar el producto entre la potencia anual total y el consto del kWh, se puede obtener el ahorro anual que se puede llegar a obtener mediante el uso del de los sistemas fotovoltaicos.

Para el número de horas de sol promedio por día para el sistema fotovoltaico fijo es de cuatro horas, mientras que para el sistema de seguidor solar biaxial es de 6.5 horas, con todos los valores establecidos se realizaron gráficas del punto de equilibrio en la que se relaciona el ahorro anual con el costo de construcción del sistema fotovoltaico, debido a que el ARCONEL solo permite el funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos para un periodo de trabajo de 20 años se realizaron las gráficas para este periodo.

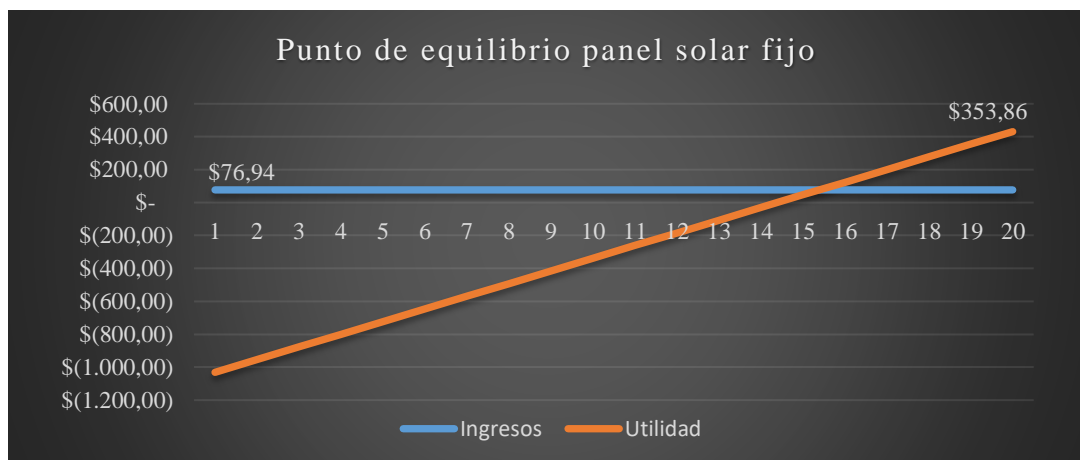


Figura 59. Punto de equilibrio rentabilidad del sistema fotovoltaico fijo. Elaborado por Agila & Landázuri

En la figura 59 la gráfica muestra el punto de equilibrio para el sistema fotovoltaico fijo, obteniendo un ahorro anual 76,94 USD, este ahorro es constante para todos los

años, esto debido a que los paneles y el microinversor logran mantener la generación de energía de forma constante por lo que no existe una variación significativa, además se observa que se logra recuperar lo invertido en aproximadamente 15.4 años, logrando obtener un beneficio de 353.86 USD para el año 20.



Figura 60. Punto de equilibrio rentabilidad del sistema de seguidor solar biaxial. Elaborado por Agila & Landázuri

En la figura 60 se tiene la gráfica del punto de equilibrio del sistema de seguidor biaxial, en la que se puede observar que se tiene un ahorro mensual de 125.03 USD, logrando recuperar el valor invertido en el sistema en un tiempo aproximado de 17 años, logrando obtener un beneficio de 354,45 USD para el año 20.

Al comparar los valores obtenidos del sistema solar fotovoltaico fijo con el sistema del seguidor solar biaxial, se puede ver que a pesar de que el valor invertido se recupera en menos tiempo se logra tener un costo beneficio para el año 20 similar para los dos sistemas.

4.4 Cronograma de mantenimiento.

Dentro del cronograma de mantenimiento se encuentra clasificadas cada uno de los sistemas que componen la máquina de seguimiento solar, entre ellos, se encuentra el sistema estructural (armazón), mecánico, electro-mecánico, eléctrico, electrónico; además, se detalla el nombre del elemento, el número de elementos, el número de subelementos de revisión, su periodicidad, el nombre del elemento a revisar, sus parámetros de control, las pruebas a ejecutar en el elemento y si es necesario algún equipo auxiliar para realizar las pruebas o testeado del elemento o dispositivo como se observa en la figura 61.

CRONOGRAMA DE MANTENIMIENTO SEGUIDOR BI-AXIAL							
Subsistema	ELEMENTO/ DISPOSITIVO	Cant	ELEMENTOS A REVISAR			PARÁMETROS A CONTROLAR	PRUEBAS A EJECUTAR Y EQUIPO AUXILIAR
			Subelementos de revision	Periodicidad revisión (meses)	Elementos de revisión		
Estructurales	Base anclada (Inox)	1	2	9	Estructura/pernos de anclaje	Estructura: Soldadura, Fatiga Pernos de anclaje: Fatiga y Oxidacion	Inspección visual, nivel de burbuja y químico anticorrosivo
	Poste direccional	1	1	6	Estructura	Soldadura, Pandeo y Corrosión	Inspección visual, nivel de burbuja, lija y químico anticorrosivo
	Base paneles	1	2	6	Estructura	Soldadura, Fatiga y Corrosión	Inspección visual y químico anticorrosivo
	Placa de sosten reductor	1	1	18	Estructura	Pandeo y Corrosión	Nivel de burbuja y químico anticorrosivo
Mecánicos	Chumacera	1	2	5	Carcasa/rodamiento	Fatiga/Lubricación	Limpieza superficial y lubricación con grasa de rodamiento
	Rodamiento NTN	1	1	5	Junta entre anillos	Lubricación	Lubricación con grasa de rodamiento
	Engranaje conductor	1	2	2	Desgaste/chavetero	Desgaste, fatiga, lubricación y corrosión	Inspección visual, lubricación con aceite apropiado, químico anticorrosivo
	Engranaje conducido	1	2	2	Desgaste/chavetero	Desgaste, fatiga, lubricación y corrosión	Inspección visual, lubricación con aceite apropiado, químico anticorrosivo
	Acople engranaje conducido	1	2	4	Desgaste/chavetero	Desgaste, soldadura y corrosión	Inspección visual y químico anticorrosivo
	Eje pasador	1	2	5	Vincha de seguridad/chavetero	Desgaste, pandeo y corrosión	Inspección visual, nivel de burbuja, lija y químico anticorrosivo
	Eje motoreductor	1	2		Anillo de seguridad/chavetero	Desgaste, fatiga, lubricación y corrosión	Inspección visual, lubricación con aceite apropiado, químico anticorrosivo
Electro-mecánico	Motorreductor	1	5	3	Camara de aceite, Conexión electrica, sellos de protección, pernos, cableado	Nivel de aceite, fugas de corriente o cortocircuitos, aislamiento electrico, desgaste cables	Inspección visual, cinta aislante
	Actuador lineal	1	4	3	Pasador de instalacion, cableado electrico, puente h, elementos mecanicos	Desgaste, pandeo y corrosión/ fugas de corriente o corto-circuitos/ comunicación con controlador/ lubricación	Inspección visual, nivel de burbuja y químico anticorrosivo/ cinta aislante/ aceite
Electricos	Panel solar	2	3	2	Cableado, Limpieza	fugas de corriente o cortocircuito/ Limpieza superficial	Inspección visual y cinta aislante
	Microinversor solar	1	3	3	Cableado, Monitoreo	Temperatura, Comunicación con el servidor	Termometro, Internet
	Interruptor termomagnetico	1	1	5	Cableado	Fugas de corriente o cortocircuito	Inspección visual y cinta aislante
	Cableado [m]	40	2	4	Desgaste, Entramado	Fugas de corriente o cortocircuito	Inspección visual y cinta aislante
Electronicos	Arduino Mega	1	2	2	Comunicación y alimentación	Conexiones fijas	Inspección visual y manual
	Sensor de luminosidad	4	3	1	Comunicación, alimentación y posicion	Conexiones fijas	Inspección visual y manual
	Reloj	1	2	2	Comunicación y alimentación	Conexiones fijas	Inspección visual y manual
	Giroscopio	1	2	2	Comunicación y alimentación	Conexiones fijas	Inspección visual y manual
	Final de carrera	2	2	2	Conexión y posición	Conexiones fijas/ inclinación	Inspección visual y manual
	Reles	3	1	2	Conexión	Conexiones fijas	Inspección visual y manual
Otros	Caja de paso	1	1	12	Estructura/Puerta	Estructura: desgaste, golpes y corrosion Puerta: sello aislante	Cambiar sello

Figura 61. Cronograma de mantenimiento para el seguidor biaxial. Elaborado por Agila & Landázuri.

5 CONCLUSIONES

La ciudad de Quito presenta una irradiación global media que va desde los $4.5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ hasta los $5.7 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ siendo un lugar idóneo para el funcionamiento de sistemas fotovoltaicos, por esta razón se realizó el diseño y construcción del sistema solar fotovoltaico con seguidor biaxial, concluyendo que este es funcional tanto como en la parte mecánica, de control y eléctrica, mediante los resultados obtenidos se determina que el sistema aumenta de forma significativa el rendimiento en la generación de energía de los paneles solares.

Mediante el uso del sistema del seguidor solar biaxial se logra obtener una media de horas de sol diarias de 6.5 llegando a tener una producción de energía diaria media de 73 Wh, mientras que con el sistema fotovoltaico fijo se logra una media de horas de sol diarias de 4 llegando a tener una producción de energía diaria media de 51.7 Wh, determinando de esta manera que el sistema solar fotovoltaico con seguimiento biaxial es un 43.7% más eficiente en la generación de energía que un sistema fotovoltaico fijo.

Respecto a la rentabilidad del proyecto se analizó varios factores entre ellos el costo de construcción y mantenimiento, tanto del sistema fotovoltaico fijo como para el sistema con rastreo solar correspondiente a 1185 USD y 2140 USD respectivamente. Es necesario tomar en cuenta periodo de funcionamiento aproximado de los paneles solares siendo este de 20 años. Al comprar los costos se obtiene que el sistema fijo es 55% más económico que el sistema con rastreo.

Se realiza un análisis del punto de equilibrio de los sistemas deduciendo que, para el sistema fotovoltaico fijo la inversión de construcción y mantenimiento se logra recuperar en 15,4 años, mientras que, para el sistema de rastreo solar se logra recuperar en 17,1 años, no obstante, la ganancia anual obtenida por los paneles es de 76,94 USD con el sistema fijo y 125.03 USD con el sistema de seguimiento solar logrando obtener al final de su periodo de funcionamiento una ganancia total de 353,86 USD con el sistema fijo y de 354,45 USD con el sistema de seguimiento solar.

6 RECOMENDACIONES

Para futuros cambios se recomienda el uso de aluminio para la estructura de los paneles solares, ya que, esto haría de que el sistema sea más liviano lo que permitiría la instalación de más paneles solares sin realizar grandes cambios en el sistema del seguidor solar biaxial.

En el caso de que el sistema de seguidor solar biaxial se utilice en zonas rurales se debería utilizar un banco baterías para la acumulación de energía, sin embargo, la autonomía de estos elementos va disminuyendo en función del tiempo.

Para brindar una mayor seguridad de la máquina se recomienda realizar un análisis CFD, con el fin de obtener datos de resistencia en función de las diferentes velocidades del viento producido en la zona de instalación, para posteriormente aumentar la rigidez de las juntas y de la estructura en general.

Es necesario realizar una búsqueda futura en el mercado para adquirir paneles de mayor eficiencia, menor peso y al menor costo, con el objetivo de aumentar su eficiencia y reducir los costos de instalación y aumentando la rentabilidad del seguidor.

Se recomienda efectuar varias pruebas a la máquina en estaciones del año diferentes con el objetivo de obtener datos precisos de producción y a su vez decidir si el sistema debiese o no estar en funcionamiento durante los meses de menor producción energética.

Se recomienda la instalación de un sensor de humedad que encienda o apague el sistema debido a que al existir precipitaciones involucra la presencia de nubes las cual aumentan el albedo entre el sol y las celdas solares provocando la disminución de producción solar.

7 LISTA DE REFERENCIAS

- [1] L. A. Aulestia Martínez y M. S. Celi Panata, “Implementación de un sistema de paneles solares fotovoltaicos con capacidad de 20 kw/mes para ser utilizados en instalaciones industriales”, *Tesis*, pp. 1–100, 2017.
- [2] R. Hernández, “Análisis de factibilidad para la instalación de un sistema de energía limpia mediante celdas fotovoltaicas para la alimentación eléctrica del edificio 4 en el ITSLV”, 2017.
- [3] N. X. Recalde Regalado y F. X. Prieto Briceño, “Diseño e implementación de un sistema Fuzzy-PID para el control del ángulo de inclinación del panel solar monocristalino de 30 Watt”, 2014.
- [4] ACCIONA, “Energía solar fotovoltaica y su contribución”, *Acciona business as unusual*, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-solar/fotovoltaica/>. [Consultado: 23-ago-2021].
- [5] A. E. Mejia, M. H. Londoño, y J. C. Osorio, “Diseño e implementación de un seguidor solar para la optimización de un sistema fotovoltaico”, *Sci. Tech.*, vol. 1, núm. 44, pp. 245–250, 2010.
- [6] J. A. P. López, A. L. Soto, F. B. Ramos, y B. G. Flores, “Comparativa de la eficiencia entre un sistema fotovoltaico con seguimiento solar y un sistema fotovoltaico fijo / Comparison between a photovoltaic solar tracker efficiency and a fixed photovoltaic system”, *CIBA Rev. Iberoam. las Ciencias Biológicas y Agropecu.*, vol. 7, núm. 13 SE-Artículos Científicos, jul. 2018.
- [7] M. Gradella y J. R. Gazoli, *Energia Solar Fotovoltaica Conceptos y Aplicaciones*, Editora Er. Sao Paulo: Saraiva, 2012.
- [8] D. J. Arrieta Morelo y S. Y. Puello Bravo, “Diseño y construcción de un seguidor solar para aumentar el rendimiento energético en paneles fotovoltaicos de un sistema de bombeo”, 2015.
- [9] E. K. Mpodu, Z. Tjiparuro, y O. Matsebe, “Review of dual axis solar tracking and development of its functional model”, *Procedia Manuf.*, vol. 35, pp. 580–588, 2019.
- [10] N. AL-Rousan, N. A. Mat Isa, y M. K. Mat Desa, “Efficient single and dual axis solar tracking system controllers based on adaptive neural fuzzy inference system”, *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, 2020.
- [11] Z. Zhang *et al.*, “A novel solar tracking model integrated with bistable composite structures and bimetallic strips”, *Compos. Struct.*, vol. 248, núm. May, p. 112506, 2020.
- [12] C. Jamroen, P. Komkum, S. Kohsri, W. Himananto, S. Panupintu, y S. Unkat, “A low-cost dual-axis solar tracking system based on digital logic design: Design and implementation”, *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 37, núm. October 2019, p. 100618, 2020.
- [13] RAE - ASALE, “Diccionario de la lengua española”, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://dle.rae.es/energía>.

- [14] Y. Cengel A y M. Boles A, *Termodinámica*, Octava Edi. Mexico DF, 2015.
- [15] N. Stephen A, “Energy Resources”, *Earth Environ. Sci.* 1110, 2015.
- [16] B. Dudley, “BP Statistical Review of World Energy 2019”, *JAMA J. Am. Med. Assoc.*, vol. 68, núm. 3, pp. 299–306, 2019.
- [17] J. C. Vega de Kuyper y S. Ramírez Morales, *Fuentes de energía, renovables y no renovables aplicaciones*, Primera. 2014.
- [18] O. Planas, “Blog sobre energía solar”, *¿Qué es la energía solar activa?* [En línea]. Disponible en: <https://solar-energia.net/que-es-energia-solar>.
- [19] E. Mazria, *El libro de la energía solar pasiva*, 2a ed., vol. 1, núm. Tecnología y Arquitectura. 1983.
- [20] Czajko, “Diferentes tipos de sistemas pasivos para climatización de edificios.” 2012.
- [21] UNED, “Energía y desarrollo sostenible: Sistemas de producción”, *Energía y desarrollo sostenible*, 31-mar-2016. [En línea]. Disponible en: <https://www2.uned.es/biblioteca/energiarenovable3/sistemas.htm>. [Consultado: 01-ago-2021].
- [22] IDEAM, “CARACTERÍSTICAS DE LA RADIACIÓN SOLAR”, 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/caracteristicas-de-la-radiacion-solar>. [Consultado: 01-ago-2021].
- [23] A. L. Oliver y A. B. G. Mon, “Comprensión De Los Conceptos De Irradiancia Y Radiancia Para Los Espacios Arquitectónicos Así Cómo Las Unidades Radiométricas Y Fotométricas”.
- [24] P. Maldonado Nogales, “Representación Grafica De La Posición Solar Y Una Superficie Dada Para La Ciudad De Cochabamba - Bolivia”, *ResearchGate*, 14-nov-2011. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/333808598_Representacion_Grafica_De_La_Posicion_Solar_Y_Una_Superficie_Dada_Para_La_Ciudad_De_Cochabamba_-_Bolivia.
- [25] Djexplo, “Latitud y longitud en la Tierra”. 2020.
- [26] O. F. Vaca Revelo Diego, *Mapa Solar del Ecuador*. 2019.
- [27] J. Cevallos-Sierra y J. Ramos-Martin, “Spatial assessment of the potential of renewable energy: The case of Ecuador”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, núm. June 2017, pp. 1154–1165, 2018.
- [28] Efimarket, “¿Qué es la Hora Solar Pico (HSP), para qué sirve y cómo calcularlo?”, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.efimarket.com/blog/la-hora-solar-pico-hsp-sirve-calcularlo/>. [Consultado: 21-abr-2021].
- [29] S. E. Tools, “Cálculo de la posición del sol en el cielo para cada lugar en cualquier momento”, *Creative Commons*, 2021. .
- [30] M. Badii, A. Guillen, y O. Lugo Serrato, “History and Use of Renewable Energies”, *Daena Int. J. Good Conscienc.*, vol. 10, núm. 1, pp. 1–18, 2015.

- [31] E. Inteligentes, “Sistema fotovoltaico híbrido”. 2014.
- [32] R. G. Cordero, “Tipos de Placas Solares | Según Tecnología y Aplicaciones”, *Sun Fields Europe*, 2018. .
- [33] S. Eliseo, “Ideas para hacer un Banco de baterías solares”. .
- [34] S. Seguí Chilet, R. Masot Peris, S. Orts Grau, y F. J. Gimeno Sales, “Control vectorial de inversores trifásicos 2”, *Rev. española electrónica*, núm. 582, pp. 66–72, 2003.
- [35] M. de M. y Energias, “Reglamento técnico de instalaciones electricas (RETIIE)”, p. 127, 2013.
- [36] HG INGENIERÍA Y CONSTRUCCIONES, “Inversores solares ¿Qué tipos existen?”, 2016. .
- [37] I. Anaclides, R. Mossandei, C. O. Brown, M. Ii, C. A. Mujica, y C. Ii, “Riego por goteo con energía solar para el tomate en Cavaco, Benguela, Angola”, *Rev. Ciencias Técnicas Agropecu.*, vol. 24, núm. 2, pp. 11–17, 2015.
- [38] TiMOTION, “¿Qué es un actuador lineal eléctrico y cómo elegirlo?”, 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.timotion.com/es/news/news_content/news-and-articles/general/part-1:-what-is-an-electric-linear-actuator-and-how-to-choose-it%3F?upcls=1481189409&guid=1496375365. [Consultado: 12-mar-2021].
- [39] Ultramotion, “Actuador Lineal”, *Ultramotion*. p. 1, 2008.
- [40] A. García González, “El puente H: Invirtiendo el sentido de giro de un motor con Arduino”, *Panama Hitek*. Ciudad de Panamá, 2013.
- [41] Paradacreativa, “¿Cuál es el funcionamiento de un motorreductor?”, *Tercesa*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://tercesa.com/noticias/funcionamiento-motorreductor/>. [Consultado: 15-mar-2021].
- [42] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*. Pearson Educación, 2003.
- [43] R. C. Dorf, R. H. Bishop, S. D. Canto, y R. D. Canto, *Sistemas de control moderno*. Pearson Educación, 2005.
- [44] V. L. Vásquez, “Ingeniería de Control”, Ciudad de Mexico, 2005.
- [45] W. Bolton, *Ingeniería de control*, 2da Edició., vol. 1, núm. 3. Mexico DF, 2006.
- [46] B. C. Kuo, *Sistemas de control automático*. Prentice Hall Hispanoamericana, 1996.
- [47] L. Velez, “Diagrama sistema de control lazo cerrado.” Makinando, Sevilla, 2018.
- [48] M. Gutiérrez Hiestroza y S. A. Iturralde Kure, *Fundamentos Básicos de Instrumentación y Control*, Universida. Santa Elena - Ecuador: UPSE, 2017.
- [49] A. Serna, F. Ros, y J. C. Rico, *Guía Práctica de Sensores*. Creaciones Copyright, 2013.
- [50] ARCONEL, “Resolución No. ARCONEL -042/18 Regulacion No. ARCONEL-003/18 Codificación”, *Arconel*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp->

content/uploads/downloads/2019/03/042-18.pdf.

- [51] R. J. Ariza, “Energía limpia: fusión nuclear”, *SileXx*, 2020.
- [52] O. Planas, “Fusión Nuclear ¿Qué es la energía nuclear?”, *Energía nuclear*, 2019. .
- [53] DelaObra, “Espectro electromagnético y su aplicación en la E.D.M”. 2014.
- [54] IDEAM, “La radiación solar y su paso por la atmósfera”, 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/la-radiacion-solar-y-su-paso-por-la-atmosfera>. [Consultado: 21-abr-2021].
- [55] M. A. S. Pérez y S. M. Tejera, “Radiación solar”, *VR Perez, Radiac. Sol.*, pp. 8–29, 2003.
- [56] C. Cajo y J. Taco, “Diseño Y Construcción De Un Sistema De Calentamiento De Agua Potable Con Una Capacidad De 60 L/Día, Mediante El Uso De Energía Solar Para Una Vivienda Unipersonal.”, 2017.
- [57] M. V. Chamorro, O. C. Silvera, G. V. Ochoa, E. V. Ortiz, y A. O. Castro, “Cálculo de las radiaciones total, directa y difusa a través de la transmisibilidad atmosférica en los departamentos del Cesar, La Guajira y Magdalena (Colombia)”, *Espacios*, vol. 38, núm. 7, 2017.
- [58] F. Ordoñez, J. López Villada, D. Vaca Revelo, C. Tapia, y J. Borja, “Scinergy Meteorology”, *Escuela Politécnica Nacional*, 2020. .
- [59] Maps Stadia, “Ecuador Quito 170149 c/ Belladonas y c/ Del los Almendros”, *Ubicación por latitud y longitud*, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://stadiamaps.com/>. [Consultado: 12-feb-2021].
- [60] J. D. Plata González, “Asistencia de investigación: Evaluación de una red experimental para un sistema fotovoltaico con capacidad de 5.0 kw en la Universidad de Ibagué”, *Universidad de Ibagué*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unibague.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12313/1277/2/Articulo.pdf>.
- [61] D. Guardado y V. Rivera, “Implementación de seguidor solar en dos ejes para el Sistema Fotovoltaico de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UES .”, p. 138, 2012.
- [62] A. Avello, *Teoría de Máquinas*, 2da Edició. Navarra, 2014.
- [63] R. Budynas y K. Nisbett, *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*, núm. 1. 2014.
- [64] R. L. Norton, *Diseño De Maquinas Un Enfoque Integrado*, Cuarta Edi. 2011.
- [65] Talkingbread, “Homend DC12V 6inch Stroke Linear Actuator with Mounting Bracket 900N 225lbs”, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://www.talkingbread.co.il/Linear-Motion-Actuators/Homend-DC12V-6inch-Stroke-Linear-Actuator-with-Mounting-Bracket-900N-225lbs-Maximum/526245/>. [Consultado: 12-mar-2021].
- [66] Instituto nacional de meteorología e hidrología (INAMHI), “Monitoreo de precipitación y tormentas eléctricas 03-05-2021”, *Gobierno de la Republica del Ecuador*, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/>. [Consultado: 16-mar-2021].

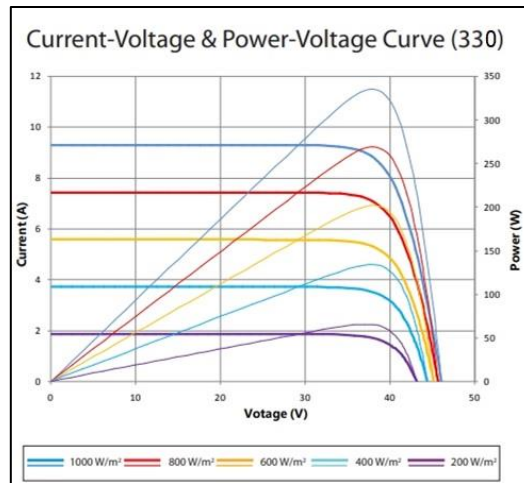
- [67] H. Bouziane, “Diseño e implementación de un acelerómetro, velocímetro móvil digital controlado por un PIC de microchip”, Universidad Politécnica de Catalunya, 2009.
- [68] F. Figueroa, “Arduino: como funciona un acelerometro”, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://sensoricx.com/arduino/como-funciona-un-acelerometro/>. [Consultado: 25-abr-2021].
- [69] Xukyo, “Usando un módulo DS3231 con Arduino”, *AranaCorp*, 24-nov-2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.aranacorp.com/es/usando-un-modulo-ds3231-con-arduino/>. [Consultado: 25-abr-2021].
- [70] F. Semiconductor, “Hermetic Silicon Photodarlington L14F1 and L14F2”, *Pulse*, vol. 230. pp. 1–4, 2001.
- [71] P. C. Photoresistors, “CDS Light-Dependent Photoresistors”. Taiwan, pp. 1–3, 2010.
- [72] T. Instrument, “Datasheet Chipset LMx93-N and LM2903-N”, núm. Datasheet. pp. 1–31, 2018.
- [73] Silonex, “NORPS-12 Plastic Packaged CdS Photocell”, núm. 1. Montreal, p. 104510, 2018.
- [74] V. Semiconductors, “High Speed Optocoupler , 1 MBd , Transistor Output SYMBOL”, núm. Electronic Component Description. www.vishay.com, pp. 1–8, 2018.
- [75] Arduino, “Arduino Mega 2560 rev 3 Pinout Diagram”. Ivrea - Italia, pp. 20–23, 2020.
- [76] Agencia de regulación y control de energía y recursos naturales no renovables, “Análisis de costos empresas distribuidoras, costo del servicio de distribución y costos unitarios del servicio publico de energía eléctrica”, Quito, Ecuador, 2020.

8 ANEXOS

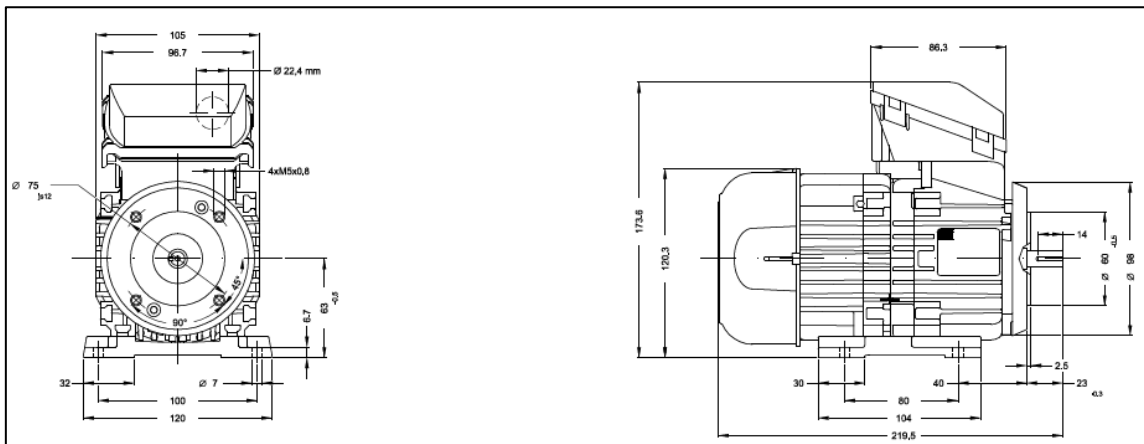
Anexo 1. Ficha técnica modulo fotovoltaicos 330W. Elaborado por Agila & Landázuri.



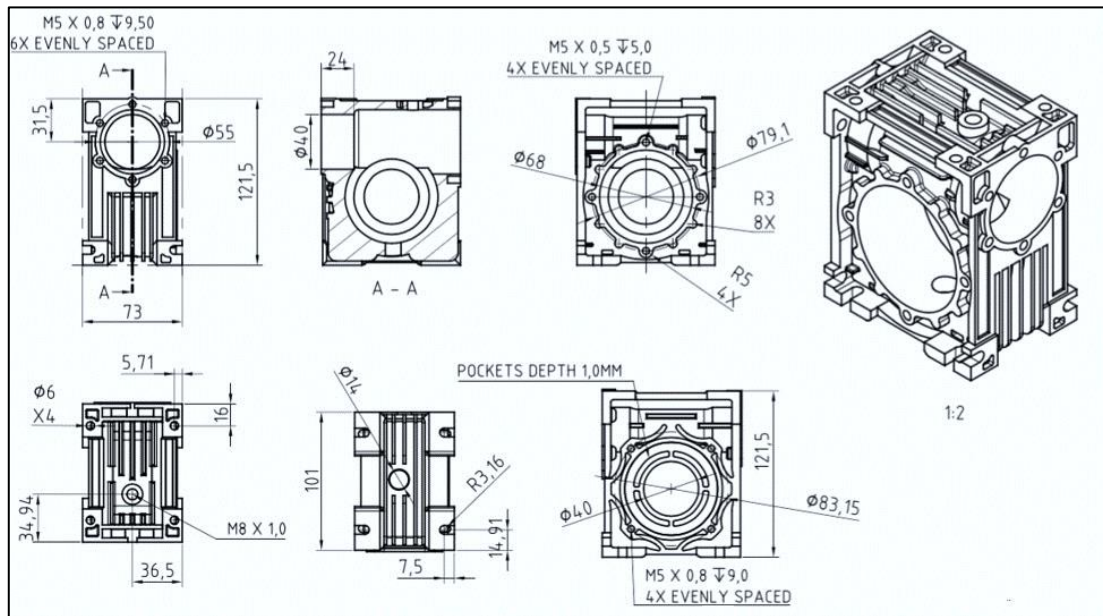
Anexo 2. Curva de potencia vs corriente-voltaje para valores de radiación. [68]



Anexo 3. Dimensiones principales motor eléctrico WEG W12. [69]



Anexo 4. Dimensiones principales caja de reducción FCN40. [69]



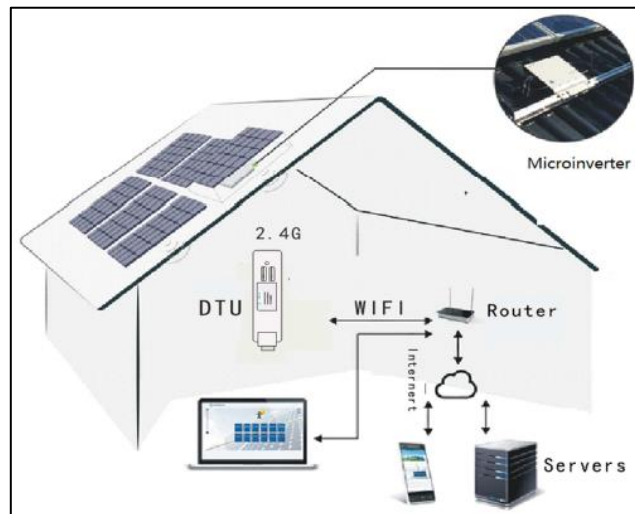
Anexo 5. Ficha técnica monitoreo DTU-W100. [70]

Model	DTU-W100
RF communication	
Communication method	2.4G RF
Communication frequency	2400MHz to 2483.5MHz
Number of channels	5
Communication distance (empty environment)	200Meter
Maximum number of components that can be connected	99 MI-250 ,49 MI-500, or 24 MI-1000
Telecommunication	
WIFI communication standard	802.11b/g/n
Data upload time	15 minutes
Power Supply	
Power supply	External adapter
Adapter input voltage / frequency	100 to 240 V AC / 50 or 60Hz
Adapter output voltage / current	5V / 1A
Power consumption	0.8W (normal)
Mechanical Data	
Ambient temperature range (°C)	-20°C to 55°C
Size (W×H×D)	143mm×33mm×12.5mm
Weight	0.1kg
Mounting system	Direct power supply
Display	LED
Features	
Standard	IEC60950 IEC61000-6-2 FCC Part15 Class B / Class C
Standard warranty	2 years

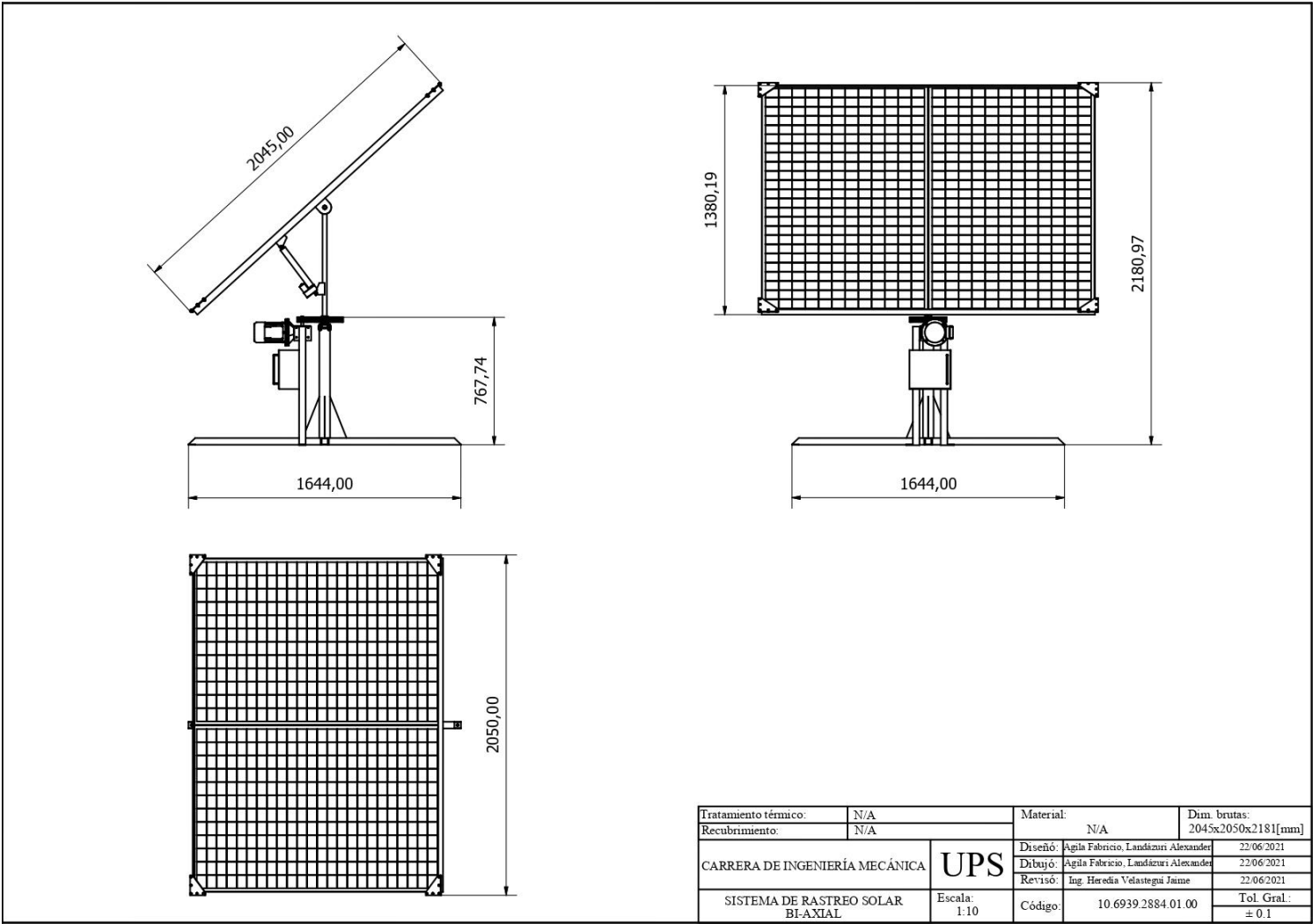
Anexo 6. Ficha técnica microinversor Hoymiles MI-1200. [71]

Model		MI-1000 / MI-1200 (4X60 cells / 4X72 cells)		
Input Data(DC)				
Recommended input power (W)	Up to 1240 / 1520			
Peak power MPPT voltage range (V)	27 ~ 48 / 32 ~ 48			
Start-up voltage(V)	22			
Operating voltage range (V)	16 ~ 60			
Maximum input voltage (V)	60			
Maximum input current (A)	10,5			
Output Data (AC)		@208V AC	@240V AC	@230V AC
Rated output power (W)	1000 / 1200	1000 / 1200	1000 / 1200	1000 / 1200
Rated output current (A)	4.81 / 5.76	4.16 / 5	4.35 / 5.22	4.35 / 5.22
Nominal output voltage/range (V)	208/183-250	240 / 211-264	230/180-275	230/180-275
Nominal frequency/range (Hz)	60/59.3-60.5	60 / 59.3-60.5	50/45-55	50/45-55
Power factor	> 0.99	> 0.99	> 0.99	> 0.99
Output current harmonic distortion	< 3%	< 3%	< 3%	< 3%
Maximum units per 20A branch	3 / 3	4 / 3	4 / 3	4 / 3
Efficiency				
CEC peak efficiency	96.50%			
CEC weighted efficiency	96.00%			
Nominal MPPT efficiency	99.80%			
Night time power consumption (mW)	<50			
Mechanical Data				
Ambient temperature range (°C)	-40 ~ +65			
Operating temperature range (°C)	-40 ~ +85			
Dimensions (W×H×D mm)	280×176×33			
Weight (kg)	3.75(including 1.9m AC cable)			
Enclosure rating	NEMA6(IP67)			
Cooling	Natural convection - No fans			
Loading Quantity				
Container	1X20' GP	1X40' GP / 1X40' HQ		
Pallet No.	10	22		
Carton No.	360	756		
Total Quantity	1800	3780		
Other Features				
Communication	Wireless			
Design lifetime	> 25 years			
Standard Compliance				
EMC	EN61000-6-3:2007+A1:2011EN61000-6-2:2005EN61000-3-2:2014 EN61000-3-3:2013			
Safety	EN62109-1:2010EN62109-2:2011IEC 62109-1 Ed 1.0IEC 62109-2 Ed 1.0 UL Std No.1741-Second EditionEN 60529			
On-Grid	AS/NZS 4777.2:2015VDE-AR-N4105:2011-06DIN V VDE V 0126-1-1/A1:2012:02 IEC61727:2004EN50438:2013ANSIIEEE 1547.1IEC62116:2011UTE C 15-712-1:2010-07 NBT32004-2013			

Anexo 7. Comunicación entre el monitoreo y el microinversor.[70]



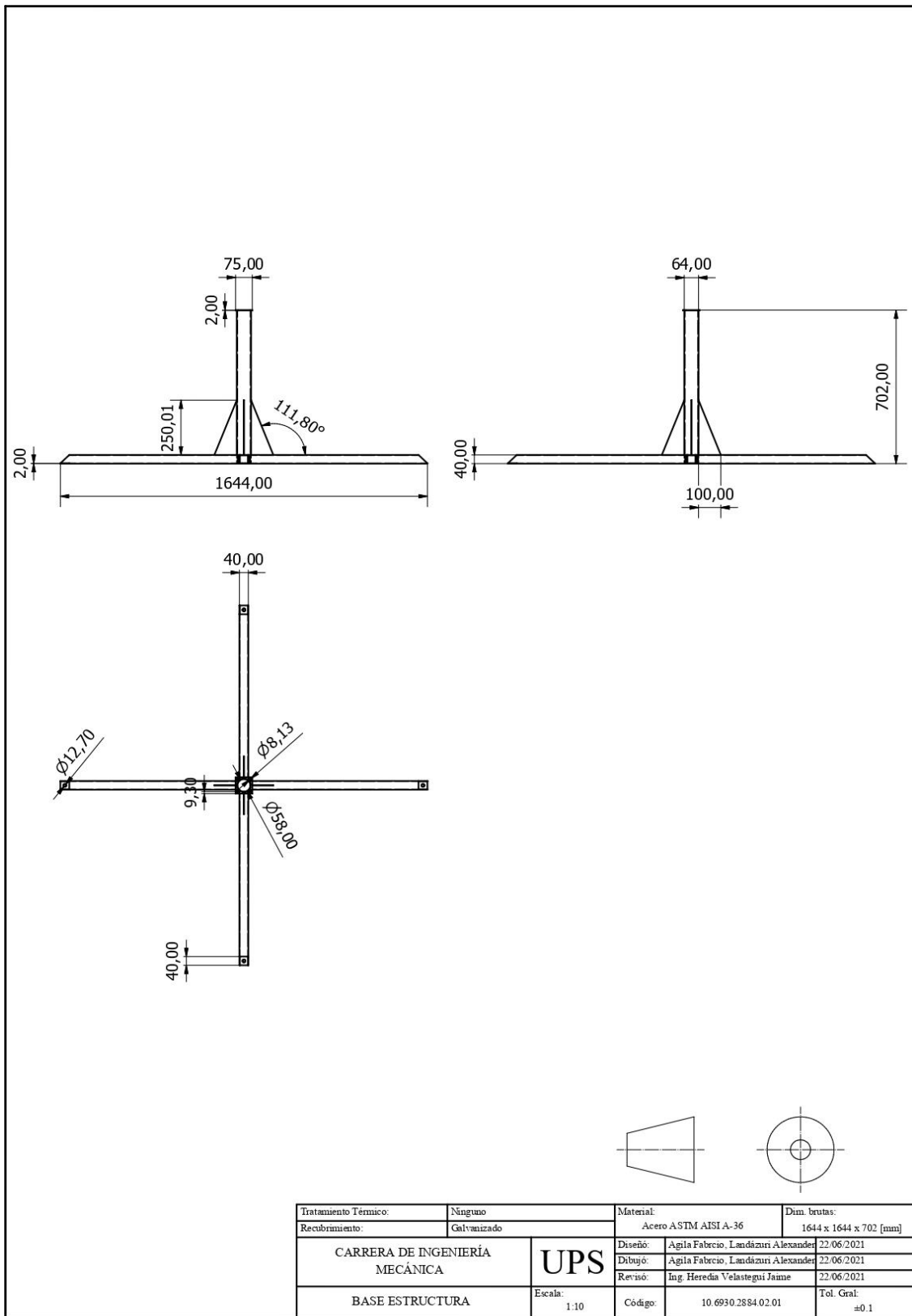
Anexo 8. Plano general sistema de seguimiento solar. Elaborado por Agila & Landázuri.



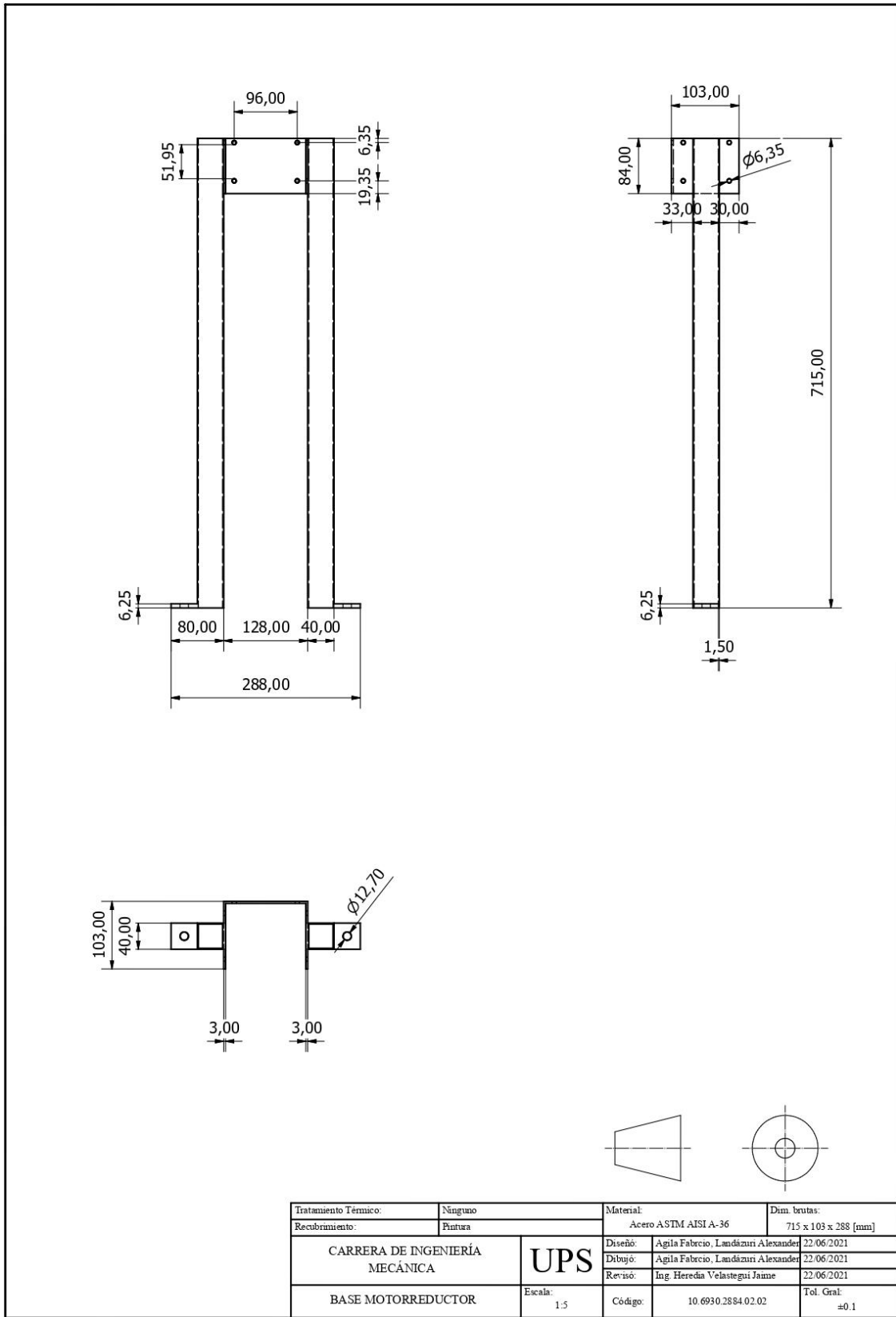
Anexo 9. Plano despiece y lista de materiales sistema de seguimiento solar. Elaborado por Agila & Landázuri.

22	Rodamiento NTN RLS8	1	JIS B 1512		AISI 1045	11x52	N/A
21	Engranaje conducido	1	N/A		AISI 5115	220x28	N/A
20	Chumacera UCF205D	1	JIS B 1512		AISI 1045	75x75x60	N/A
19	Acople mono poste	1	N/A		AISI 1018	45x46	N/A
18	Actuador Lineal	1	N/A		AISI 6061-T6	250x28x60	N/A
17	Mono poste	1	N/A		AISI A-36	32x1373	N/A
16	Pasador actuador lineal	2	N/A		AISI 6061-T6	8x45	N/A
15	Cilindro actuador lineal	1	N/A		AISI 6061-T6	250x13	N/A
14	Eje pasador mono poste	1	ASTM A193		AISI 1049	143x25	N/A
13	Base paneles solares	1	N/A		AISI A-36	2040x2050x122	N/A
12	Tuerca de ajuste 1/4 in	20	ASTM A325		AISI A-36	6.3x12.7	N/A
11	Módulo fotovoltaico	2	IEC61215		AISI 6061-T6	2005x2010x40	N/A
10	Perno de ajuste 1/4 in	20	N/A		AISI A-36	12.7x28,1	N/A
09	Placa de ajuste paneles	4	N/A		AISI A-36	100x100x3	N/A
08	Engranaje conductor	1	N/A		AISI 5115	60x28	N/A
07	Acople actuador lineal	1	N/A		AISI 6061-T6	44,5x58x38	N/A
06	Eje motriz del piñón	1	N/A		AISI 1049	25x132	N/A
05	Motor eléctrico 1/4 hp	1	IEC60034-1		N/A	255x140x150	N/A
04	Caja de reducción 40:1	1	FCN40		AISI 1049	122x100x84	N/A
03	Gabinete circuitos	1	NFPA14		AISI A 510A	250x250x120	N/A
02	Base motorreductor	1	N/A		AISI 1049	755x208x103	N/A
01	Base estructura	1	N/A		AISI A-36	664x1664x768	Galvanizado
Ref.	Denominación:	Cnt.	Norma	Localiz.	Material	Dim. brutas [mm]	Observaciones
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				UPS			
				Diseño:	Agila Fabricio, Landázuri Alexander	22/06/2021	
				Dibujó:	Agila Fabricio, Landázuri Alexander	22/06/2021	
				Revisó:	Ing. Heredia Velastegui Jaime	22/06/2021	
DESPIECE SISTEMA DE RASTREO SOLAR BI-AXIAL				Escala: 1:10	Código: 10.6939.2884.02.00		Tol. Gral.: ± 0.1

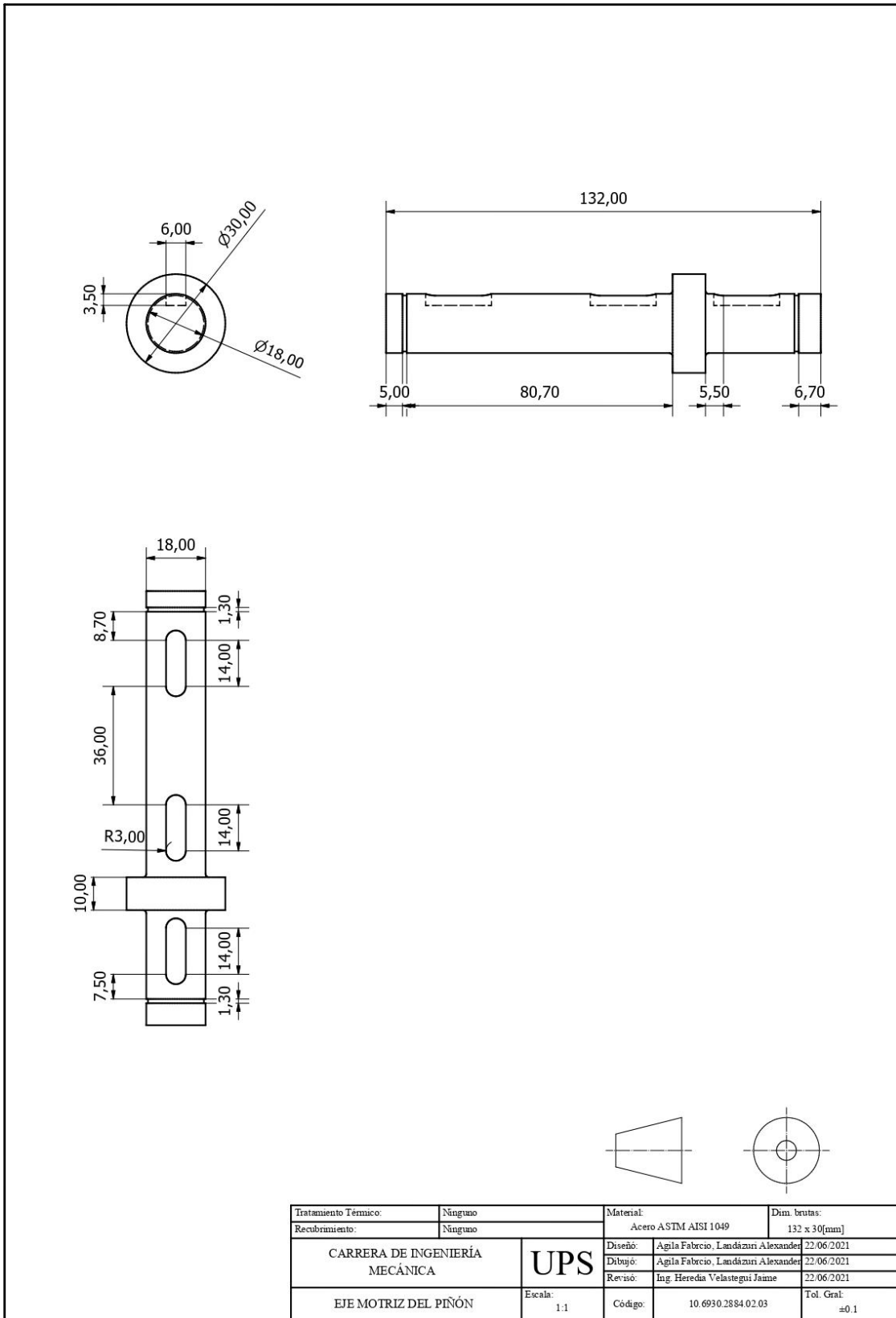
Anexo 10. Plano base estructura principal. Elaborado por Agila & Landázuri.



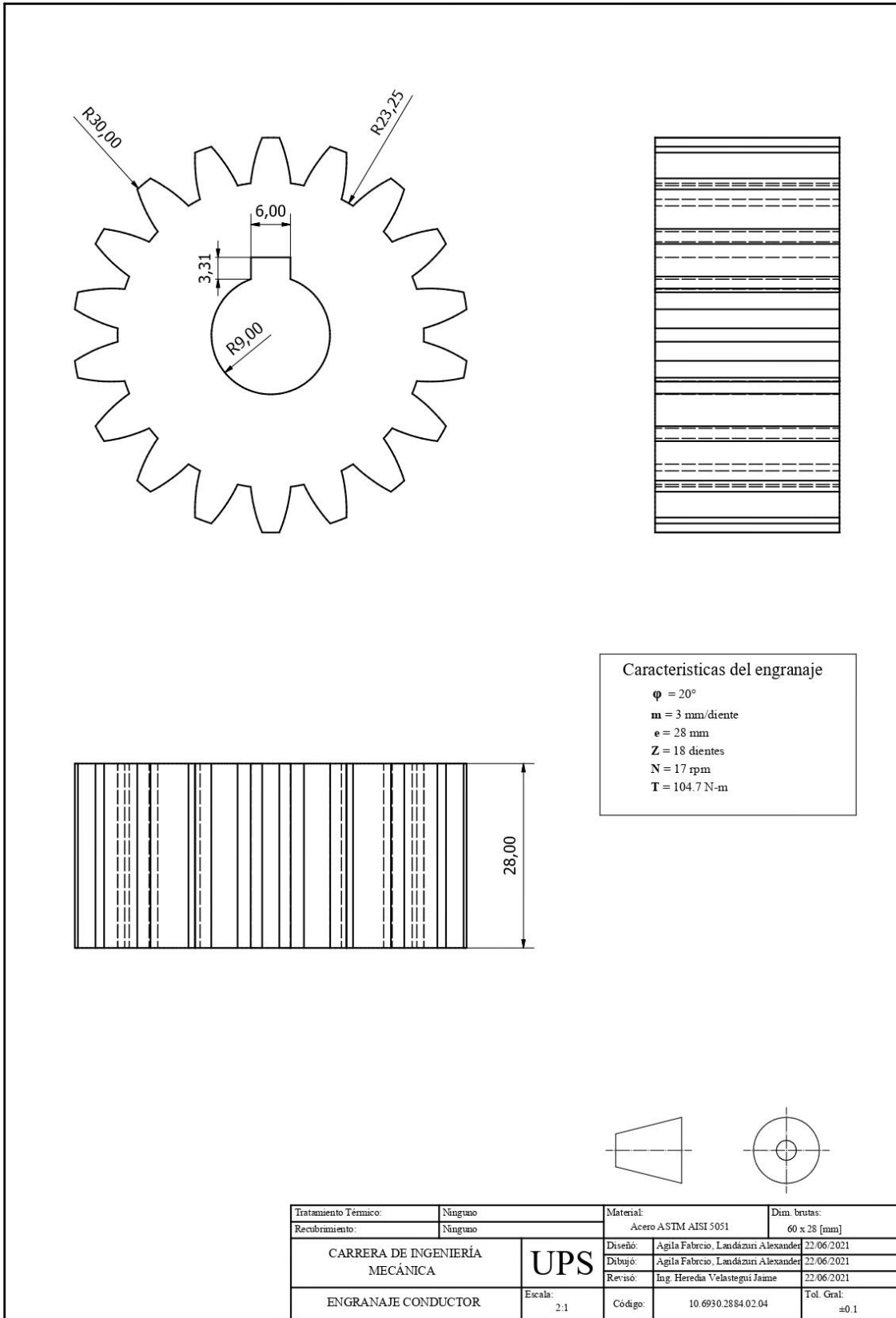
Anexo 11. Plano base motorreductor. Elaborado por Agila & Landázuri.



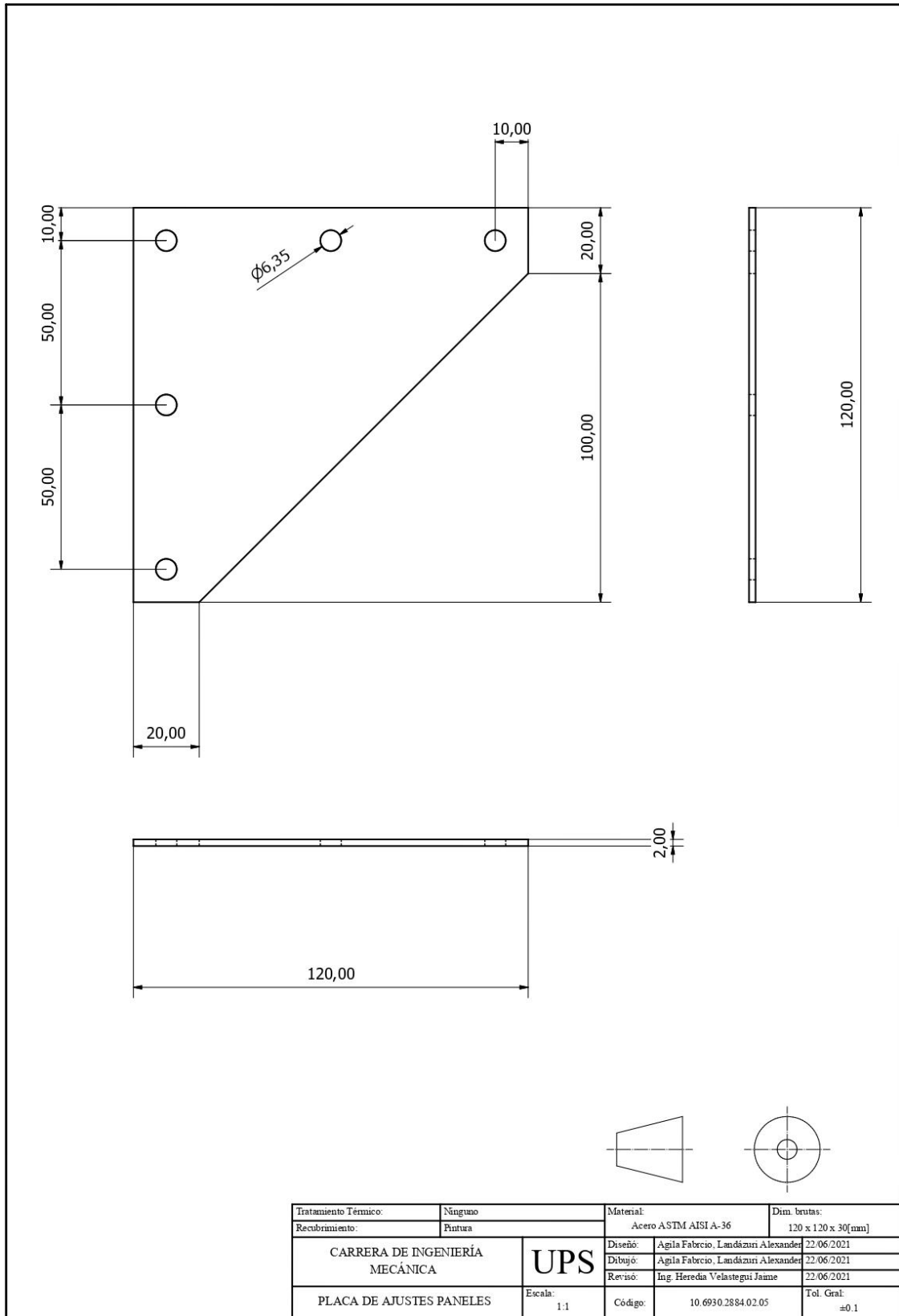
Anexo 12. Plano eje motriz de piñón motriz del piñón. Elaborado por Agila & Landázuri.



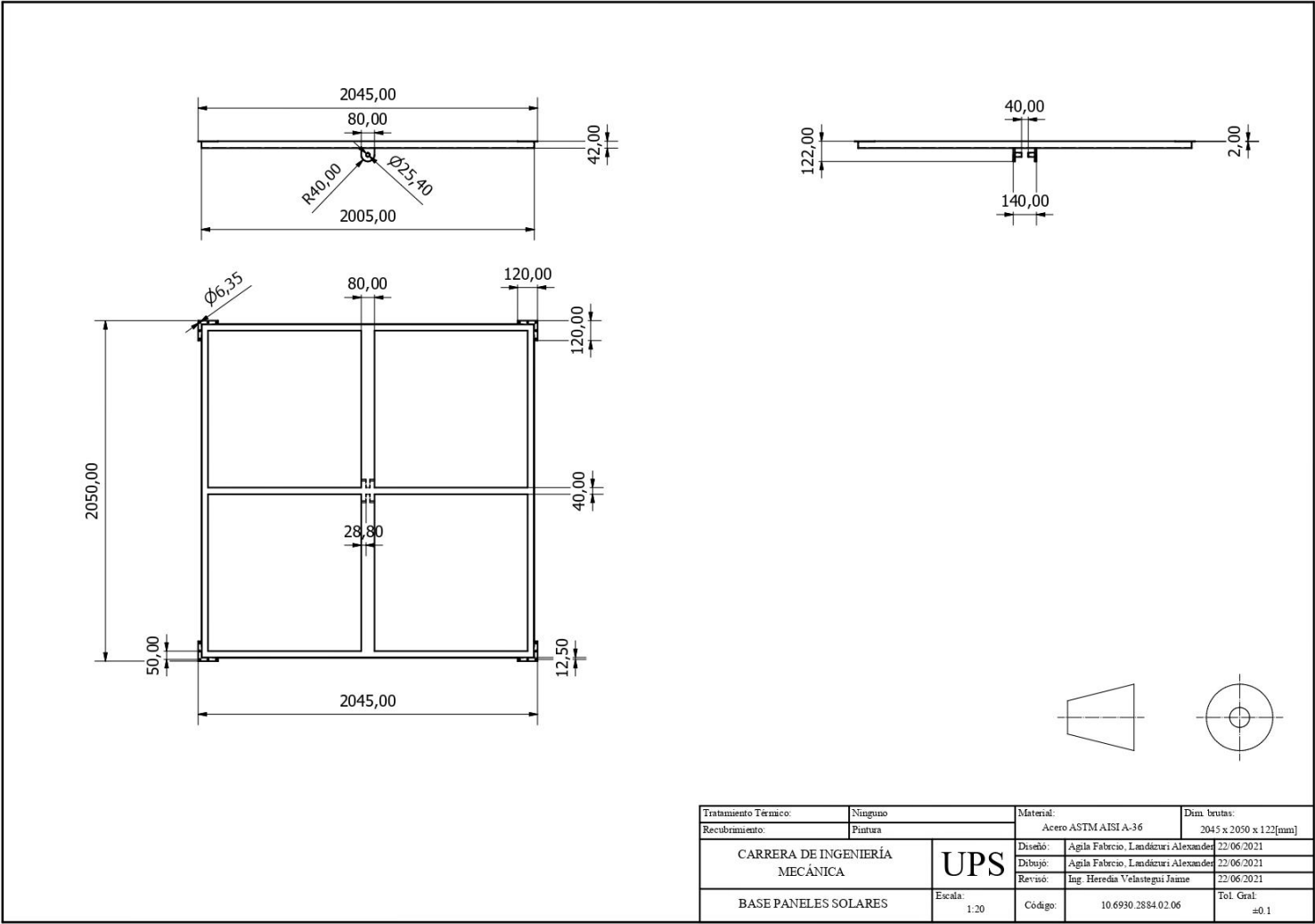
Anexo 13. Plano engranaje conductor. Elaborado por Agila & Landázuri.



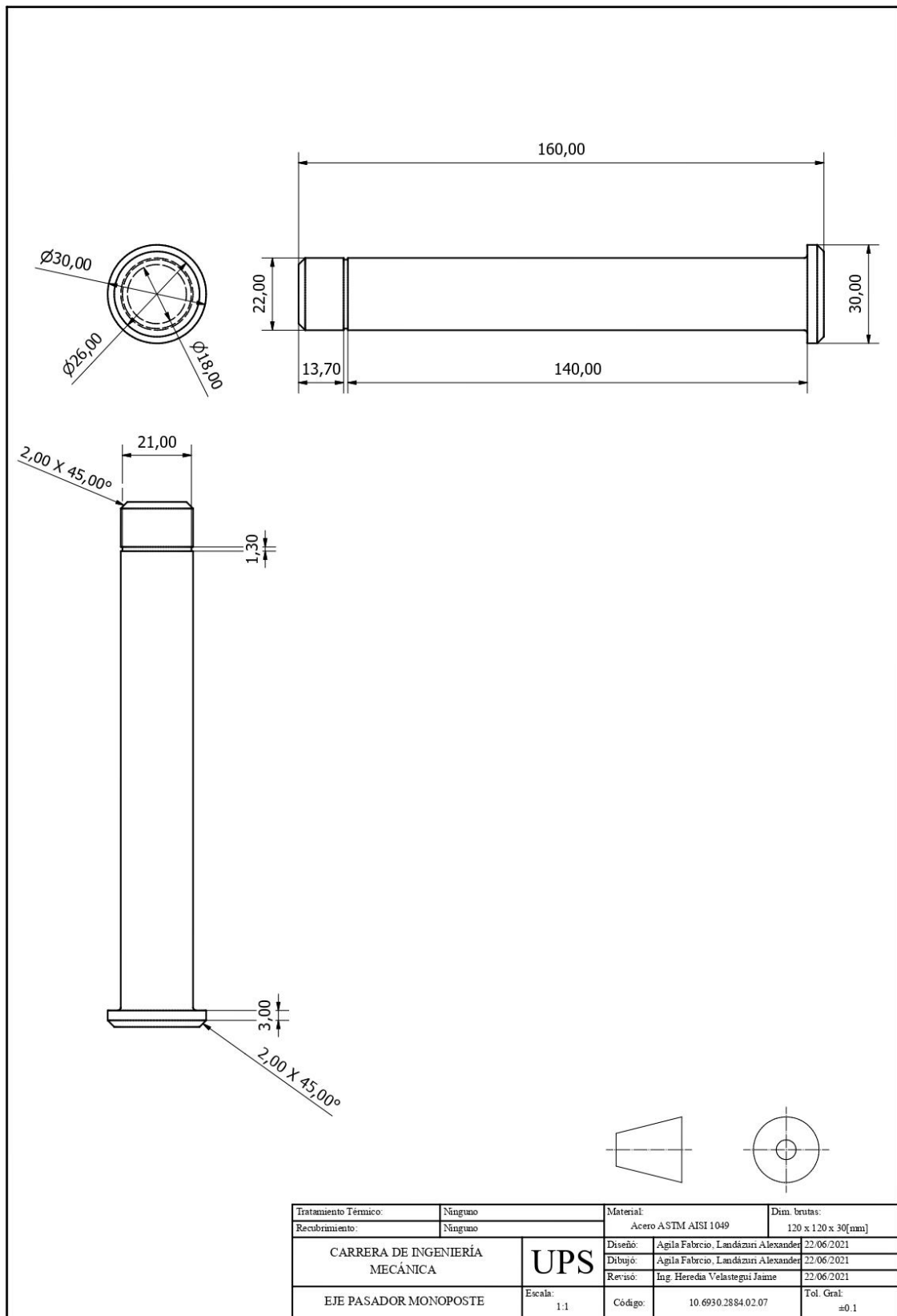
Anexo 14. Plano placa de ajuste paneles. Elaborado por Agila & Landázuri.



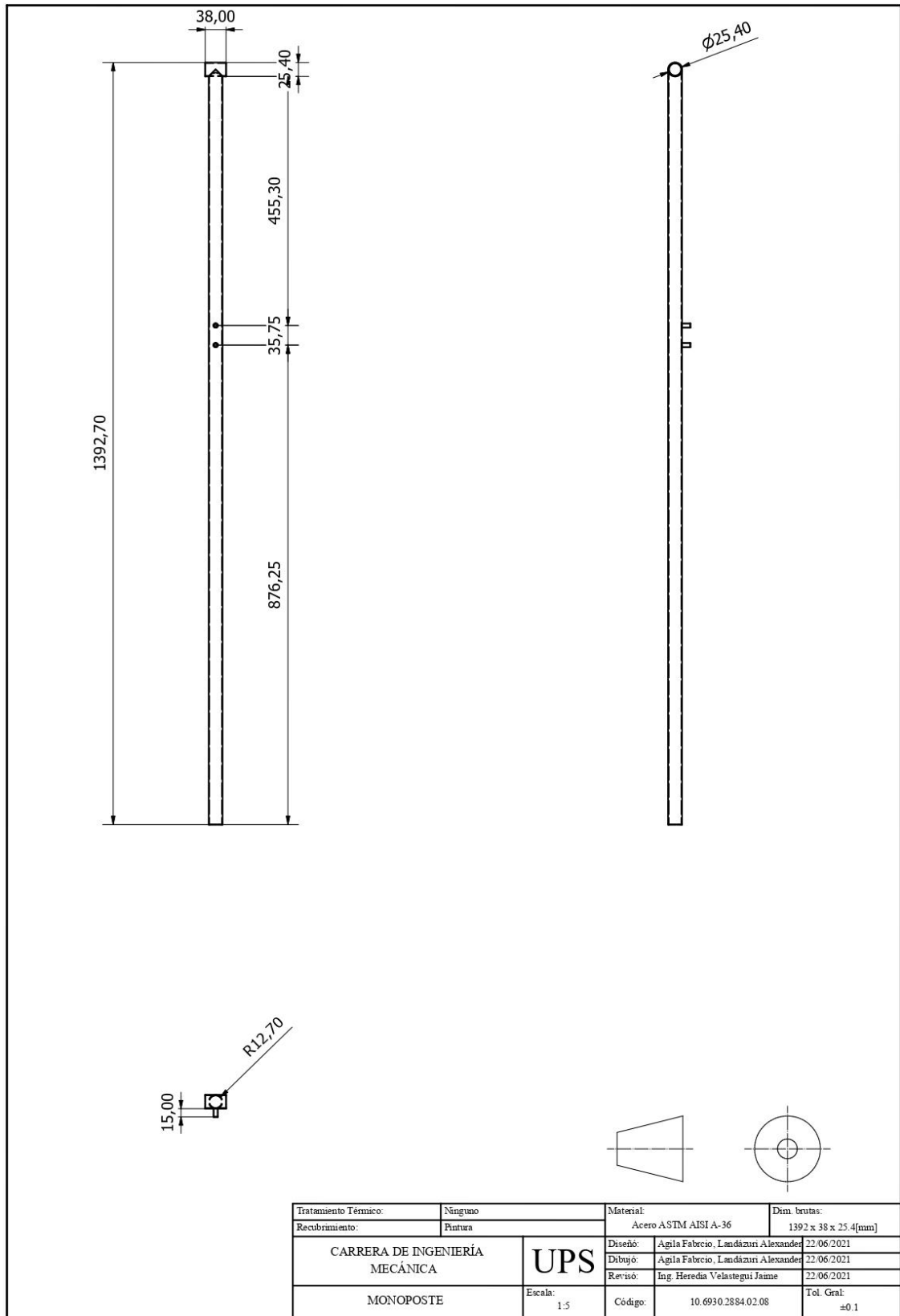
Anexo 15. Plano base paneles solares. Elaborado por Agila & Landázuri.



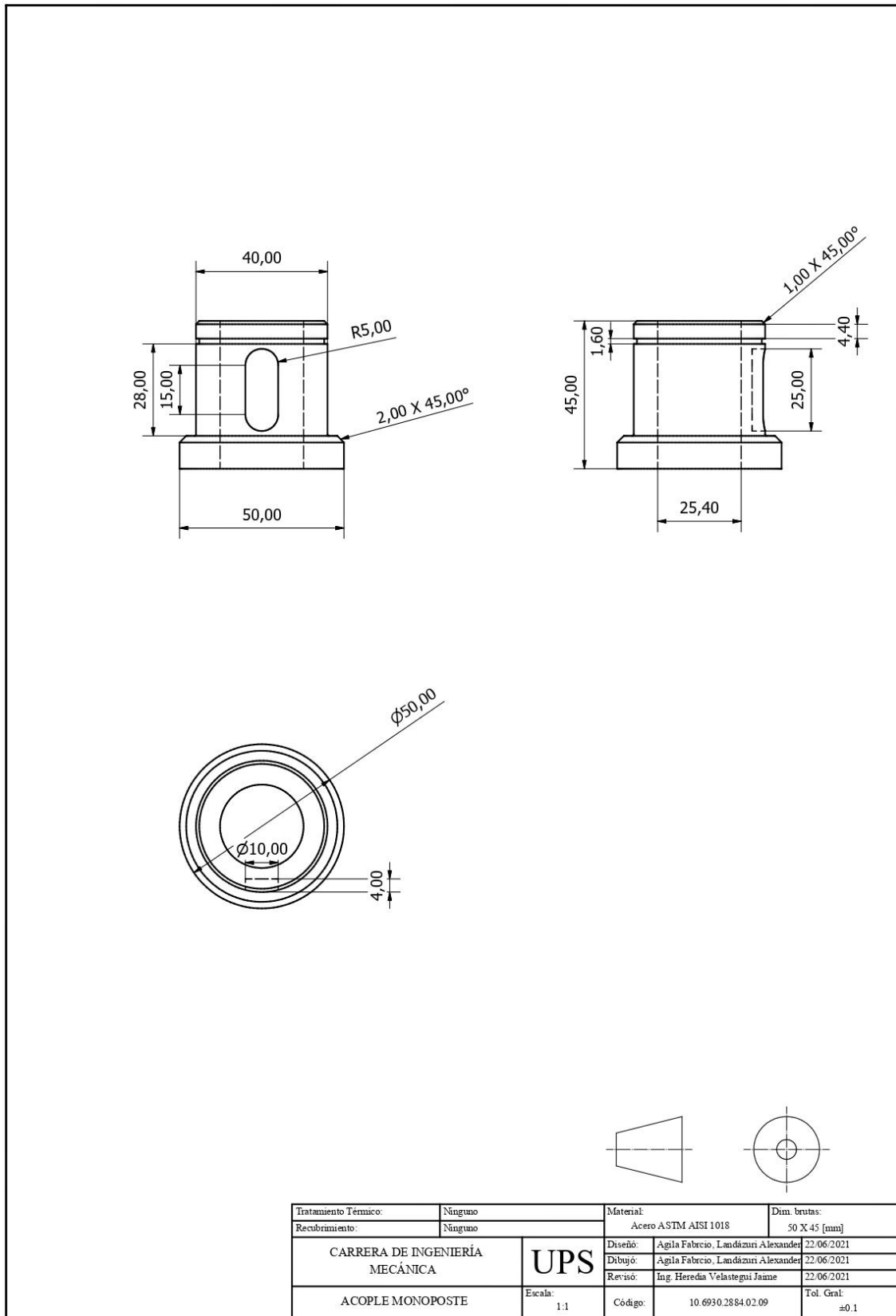
Anexo 16. Plano eje pasador monoposte. Elaborado por Agila & Landázuri.



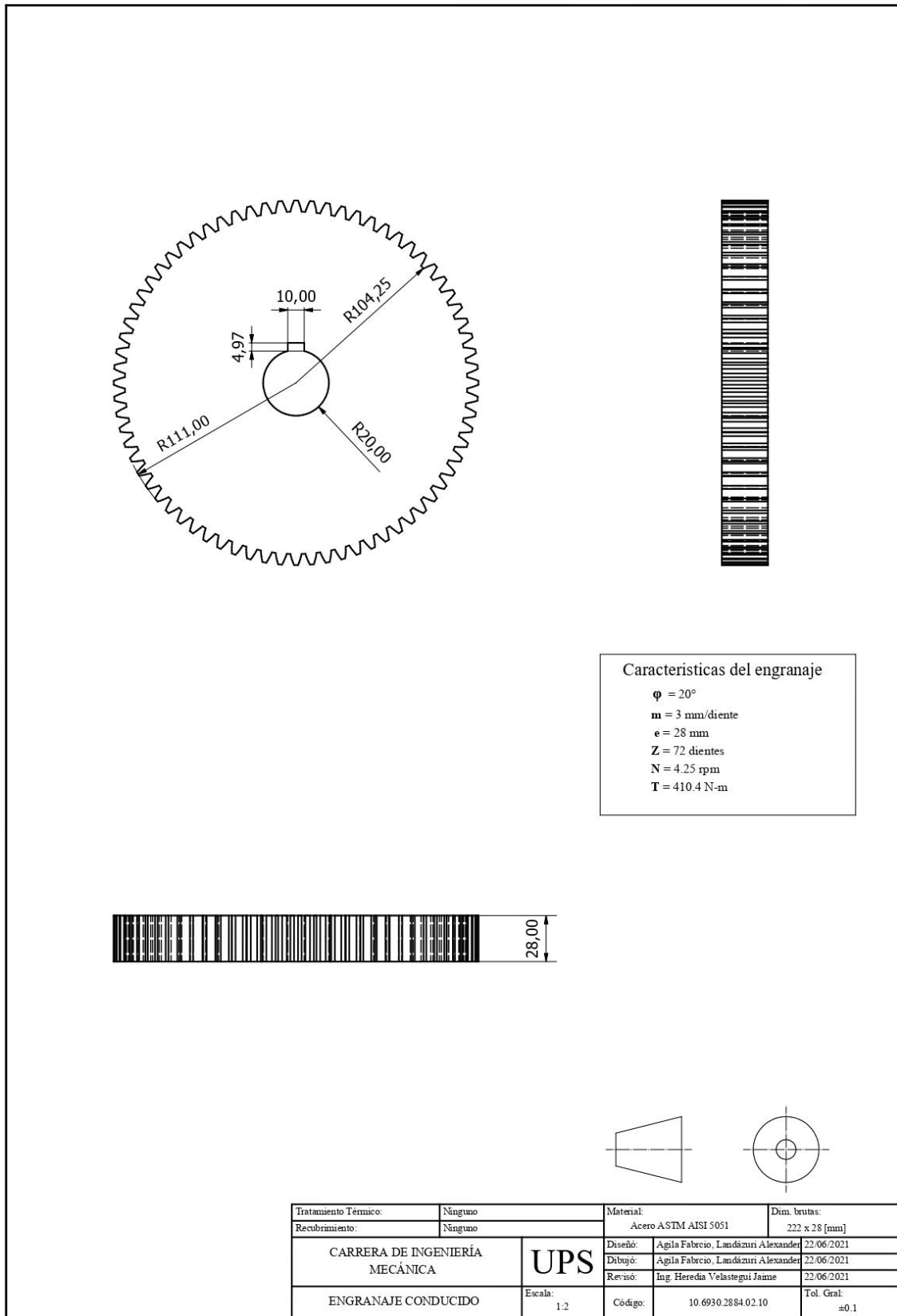
Anexo 17. Plano monoposte. Elaborado por Agila & Landázuri.



Anexo 18. Acople monoposte. Elaborado por Agila & Landázuri.



Anexo 19. Plano engranaje conducido. Elaborado por Agila & Landázuri.



Anexo 20. Programa incluido en el microcontrolador Arduino. Elaborado por Agila & Landázuri.

```

#include <Wire.h>
#include <RTClib.h>
RTC_DS3231 rtc;
bool setpoint = true;
bool evento_fin = true;
int ledPIN1 = 2; //Pin rele doble movimiento motor
int ledPIN2 = 3; //Pin rele doble movimiento motor
int ledPIN3 = 4; //Rele de on/off motor
int swOeste = 5; //Pines final de carrera
int swEste = 6; //Pines final de carrera
int Este = LOW;
int Oeste = LOW;
int IN1 = 9; //pin actuador lineal +
int IN2 = 8; //pin actuador lineal -
int ENA = 10; //pin pwm vel de actuador lineal
const int Rc = 83673; //Resistencia calibracion en KΩ
const int K0 = 4.7; //Resistencia calibracion en KΩ
const int K1 = 4.9; //Resistencia calibracion en KΩ
const int K2 = 2.8; //Resistencia calibracion en KΩ
const int K3 = 2; //Resistencia calibracion en KΩ
const int LDRPin0 = A0; //Pin del LDR
const int LDRPin1 = A1; //Pin del LDR
const int LDRPin2 = A2; //Pin del LDR
const int LDRPin3 = A3; //Pin del LDR
const int inl = 900;
const int inls = 1000;
long VP13; //promedio sens1 y sens3
long VP24; //promedio sens2 y sens4
int A; //antihorario
int H; //horario
long V0;
long lux0;
long V1;
long lux1;
long V2;
long lux2;
long V3;
long lux3;
void setup() {
  pinMode(ledPIN1 , OUTPUT);
  pinMode(ledPIN2 , OUTPUT);
  pinMode(ledPIN3 , OUTPUT);
  pinMode(IN1, OUTPUT);
  pinMode(IN2, OUTPUT);
  pinMode(swOeste, INPUT);
  pinMode(swEste, INPUT);
  Serial.begin(9600);
  if (! rtc.begin()) { //
    // si falla la inicializacion del modulo
    Serial.println("Modulo RTC no encontrado !");
    // muestra mensaje de error
    while (1);
    // bucle infinito que detiene ejecucion del programa
  }
}
void loop() {
  Este = digitalRead(swEste);
  Oeste = digitalRead(swOeste);
  DateTime fecha = rtc.now();
  if ((fecha.hour() == 10 && fecha.minute() == 56)
    && (fecha.hour() <= 17 && fecha.minute() <= 29)) {
    if ( setpoint == true ) {
      Serial.println("-----");
      Serial.println( "Sistema Operando" );
      busqueda();
      setpoint = false;
    }
  }
  if (fecha.hour() == 17 && fecha.minute() == 30) {
    //modo de medianoche
    if ( evento_fin == true ) {
      Serial.println("-----");
      Serial.println( "Sistema Apagado" );
      analogWrite (ENA, 200);
    }
    //Velocidad del actuador
    digitalWrite (IN1, HIGH);
    digitalWrite (IN2, LOW);
    delay(1000);
    //cambiar a valor para extensión en horizontal
    while(Este == 0) {
      digitalWrite(ledPIN3 , HIGH);
      digitalWrite(ledPIN1 , HIGH);
      digitalWrite(ledPIN2 , HIGH);
    }
  }
}

```

```

    evento_fin = false;
  }
}
Serial.print(fecha.hour());
// funcion que obtiene la hora de la fecha completa
Serial.print(":");
// caracter dos puntos como separador
Serial.print(fecha.minute());
// funcion que obtiene los minutos de la fecha completa
Serial.print(":");
// caracter dos puntos como separador
Serial.println(fecha.second());
// funcion que obtiene los segundos de la fecha completa
delay(1000);
if ( fecha.hour() == 7 && fecha.minute() == 30)
//reseteo del conteo para el día siguiente
    setpoint = true;
    evento_fin = true;
    Serial.println("-----");
    //Serial.println( "Posicionamiento horizontal" );
    //analogWrite (ENA, 200); //Velocidad de motor
1
    //digitalWrite (IN1, HIGH);
    //digitalWrite (IN2, LOW);
    //delay(20000);
}
void busqueda(){
//Lectura de sensores
V0 = analogRead(LDRPin0);
V1 = analogRead(LDRPin1);
V2 = analogRead(LDRPin2);
V3 = analogRead(LDRPin3);
lux0 = K0*((Rc/V0)+1);
lux1 = K1*((Rc/V1)+1);
lux2 = K2*((Rc/V2)+1);
lux3 = K3*((Rc/V3)+1);
VP13 = ((lux0+lux2)/2);
VP24 = ((lux1+lux3)/2);
H = abs(VP13-VP24);
Serial.print("Sensor 1: ");
Serial.println(lux0);
Serial.print("Sensor 2: ");
Serial.println(lux1);

```

```

Serial.print("Sensor 3: ");
Serial.println(lux2);
Serial.print("Sensor 4: ");
Serial.println(lux3);
delay(1000);
//Actuador Lineal
if ((lux0>inls) and (lux1>inls)
and (lux2>inls) and(lux3>inls)){
    Serial.println("Paro Aclineal");
    digitalWrite (IN1, LOW);
    digitalWrite (IN2, LOW);
    delay(30000);
}
else if ((lux0<inl) and (lux1<inl)
and (lux2<inl) and(lux3<inl)){
    Serial.println("Paro Aclineal2");
    digitalWrite (IN1, LOW);
    digitalWrite (IN2, LOW);
    delay(5000);
}
else if (((lux0>inl)and(lux1>inl))
and((lux2<inl)and(lux3<inl))){
    Serial.println("Retrosceso");
    analogWrite (ENA, 100);
//Velocidad de motor 1
    digitalWrite (IN1, LOW);
    digitalWrite (IN2, HIGH);
    delay(1000);
}
else if (((lux2>inl)and(lux3>inl))
and((lux0<inl)and(lux1<inl))){
    Serial.println("Avance");
    analogWrite (ENA, 100); //Velocidad de motor 1
    digitalWrite (IN1, HIGH);
    digitalWrite (IN2, LOW);
    delay(1000);
}
//Motoreductor
if ((H<25) and (VP13>300) and (VP24>300)){
    digitalWrite(ledPIN3 , LOW);
    digitalWrite(ledPIN1 , LOW);
    digitalWrite(ledPIN2 , LOW);
    Serial.println("Diferencia");
    Serial.println(H);
    Serial.println("MotorOffparo");
}

```

```

    delay(1000);
}
else if ((VP13<VP24) and (H>=100)
and (VP13>300) and (VP24>300)){
    if ((Este == 0)&&(Oeste == 0)){
        digitalWrite(ledPIN3 , HIGH);
        digitalWrite(ledPIN1 , HIGH);
        digitalWrite(ledPIN2 , HIGH);
        Serial.println("Diferencia1");
        Serial.println(H);
        Serial.println("Giro Horario");
        delay(1000);
        digitalWrite(ledPIN3 , LOW);
        digitalWrite(ledPIN1 , LOW);
        digitalWrite(ledPIN2 , LOW);
        delay(1000);
    }
    else if (Este==1){
//Si la búsqueda llega mas allá del Sur30°Oeste
        digitalWrite(ledPIN3 , HIGH);
        digitalWrite(ledPIN1 , LOW);
        digitalWrite(ledPIN2 , LOW);
        delay(10000);
    }
}

else if ((VP13>VP24)and (H>=100)
and (VP13>300) and (VP24>300) ){
    if ((Este == 0)&&(Oeste == 0)){
        digitalWrite(ledPIN3 , HIGH);
        digitalWrite(ledPIN1 , LOW);
        digitalWrite(ledPIN2 , LOW);
        Serial.println("Diferencia2");
        Serial.println(H);
        Serial.println("Giro Antihorario");
        delay(1000);
        digitalWrite(ledPIN3 , LOW);
        digitalWrite(ledPIN1 , LOW);
        digitalWrite(ledPIN2 , LOW);
        delay(1000);
    }
    else if (Oeste == 1){
        digitalWrite(ledPIN3 , HIGH);
        digitalWrite(ledPIN1 , HIGH);
        digitalWrite(ledPIN2 , HIGH);

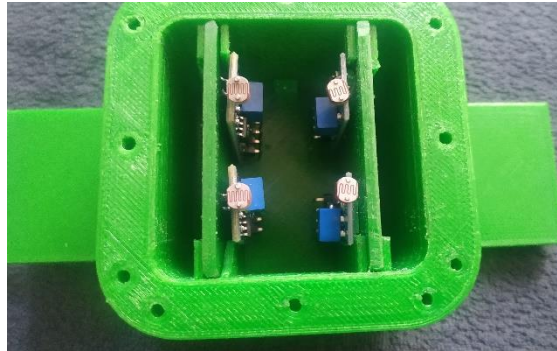
```

```

    delay(10000);
}
}
else {
    digitalWrite(ledPIN3 , LOW);
    digitalWrite(ledPIN1 , LOW);
    digitalWrite(ledPIN2 , LOW);
    Serial.println("Ninguno de los casos");
}
}
}

```

Anexo 21. Disposición de los sensores LDR en capsula. Elaborado por Agila & Landázuri.



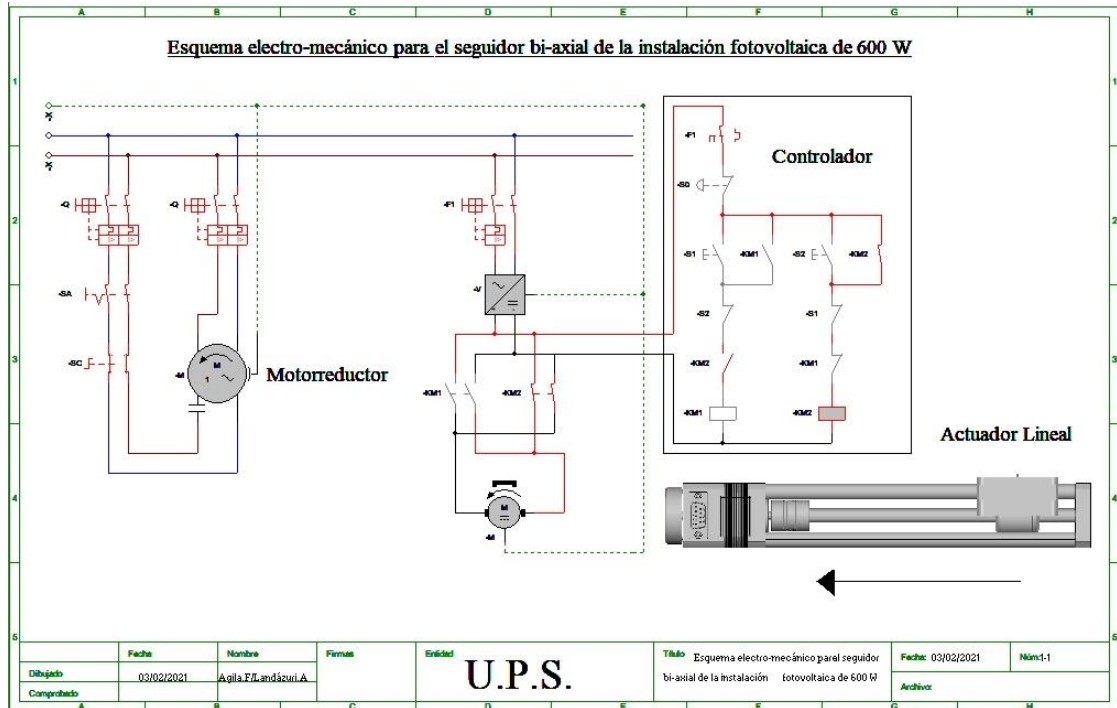
Anexo 22. Sensor de radiación solar. Elaborado por Agila & Landázuri.



Anexo 23. Sistema de seguimiento solar operando en un día despejado. Elaborado por Agila & Landázuri.



Anexo 24. Esquema electro-mecánico para el seguido biaxial en sentido anti horario.
Elaborado por Agila & Landázuri



Anexo 25. Esquema electro-mecánico para el seguido biaxial en sentido horario.
Elaborado por Agila & Landázuri

