

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

*Trabajo de titulación previo
a la obtención del título de
Ingeniero Mecatrónico*

PROYECTO TÉCNICO:

**“DISEÑO DE UN SEGUIDOR SOLAR DE DOBLE EJE PARA UN SISTEMA DE
ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN EL CENTRO DE SALUD DE LA
COMUNIDAD DE YAAPI”**

AUTORES:

SERGIO VINICIO ARPI PUGA
BRIAN GUILLERMO PRADO BERMEO

TUTOR:

ING. DIEGO PAÚL CHACÓN TROYA, MSc.

CUENCA - ECUADOR

2022

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Sergio Vinicio Arpi Puga con documento de identificación N° 0106424039 y Brian Guillermo Prado Bermeo con documento de identificación N° 0106693039, 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: **“DISEÑO DE UN SEGUIDOR SOLAR DE DOBLE EJE PARA UN SISTEMA DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN EL CENTRO DE SALUD DE LA COMUNIDAD DE YAAPI”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Mecatrónico*, 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 hago entrega del trabajo final en formato digital a la biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, febrero de 2022.

Sergio Vinicio Arpi Puga

C.I. 0106424039

Brian Guillermo Prado Bermeo

C.I. 0106693039

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“DISEÑO DE UN SEGUIDOR SOLAR DE DOBLE EJE PARA UN SISTEMA DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN EL CENTRO DE SALUD DE LA COMUNIDAD DE YAAPI”**, realizado por Sergio Vinicio Arpi Puga y Brian Guillermo Prado Bermeo, obteniendo el *Proyecto Técnico*, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, febrero de 2022.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Diego Paúl Chacón Troya', written in a cursive style.

Ing. Diego Paúl Chacón Troya, MSc.

C.I. 1900268168

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Sergio Vinicio Arpi Puga con documento de identificación N ° 0106424039 y Brian Guillermo Prado Bermeo, con documento de identificación N° 0106693039, autores del trabajo de titulación: **“DISEÑO DE UN SEGUIDOR SOLAR DE DOBLE EJE PARA UN SISTEMA DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN EL CENTRO DE SALUD DE LA COMUNIDAD DE YAAPI”**, certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico*, es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, febrero de 2022.



Sergio Vinicio Arpi Puga

C.I. 0106424039



Brian Guillermo Prado Bermeo

C.I. 0106693039

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia, parte fundamental en mi vida, en especial a mi madre Nancy Puga y mi Padre Marco Arpi, con quienes conté desde el inicio de este proyecto y sé que se encontrarán orgullosos por todo el logro alcanzado.

Sergio

Dedico esta tesis a mis padres María Bermeo y Cesar Prado, ya que brindaron toda su confianza por verme alcanzar un logro más y a pesar de las circunstancias nunca dieron un paso hacia atrás. A Katherine Prado y Laura Padilla que siempre están presentes en mi vida, siendo mi motivo y dándome fuerzas para que esto sea posible, a Gabriela Ochoa por haberme acompañado gran parte de este periodo académico y apoyarme en mis momentos más difíciles, espero que todos se sientan orgullosos.

Brian

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la sabiduría para culminar esta etapa de mi vida con éxito. A mi Familia, por el apoyo incondicional en cada momento. Al Ing. Luis López por su paciencia y colaboración para que este proyecto fuera exitoso.

Sergio

Agradezco a Dios por darme la salud física y mental ya que sin ello no sería posible todo esto. A mi familia por siempre estar presente y apoyarme en cada etapa de mi vida. Al ingeniero Diego Chacón por el apoyo y por haber soportado todo este tiempo para que la tesis sea un buen proyecto

Brian

RESUMEN

El presente trabajo propone un diseño de seguidor solar de doble eje para un sistema de energía fotovoltaica en el centro de salud de la comunidad de Yaapi, para ello se analizaron parámetros como la ubicación, la radiación solar de la zona, el tipo de movimiento del seguidor, el tipo de material y los tipos de seguidores según diferentes autores. Como parte del diseño mecánico se tomó en cuenta la ergonomía y el análisis de los puntos más críticos de la estructura como los ejes de transmisión, el cálculo del torque para la selección del motor y el dimensionamiento. Para el diseño eléctrico y electrónico se propuso sensores de luminosidad utilizados industrialmente en plantas de seguidores fotovoltaicos, microcontrolador y reloj digital. Se escogió un controlador del motor reductor para diseñar un circuito de potencia y un circuito para el seguimiento de luz. En el apartado de control se seleccionó un algoritmo híbrido (lazo abierto-lazo cerrado), que, mediante un diagrama de flujo, se explica su funcionamiento.

Los resultados de los cálculos de las partes críticas fueron corroborados mediante un software de simulación garantizando el correcto dimensionamiento de dichos elementos. Por último, se generó una propuesta de costo tomando en cuenta los precios actuales en el mercado actual.

Palabras clave: Seguidor solar, doble eje, paneles solares, sensores, actuadores.

ABSTRACT

This work proposes a dual-axis solar tracker design for a photovoltaic energy system in the Yaapi community health center. For this purpose, parameters such as location, solar radiation in the area, type of tracker movement, type of material and types of trackers according to different authors were analyzed. As part of the mechanical design, ergonomics, and the analysis of the most critical points of the structure such as the transmission shafts, torque calculation for motor selection and sizing were considered. For the electrical and electronic design, light sensors used industrially in photovoltaic tracker plants, microcontroller and digital clock were proposed. A gear motor controller was chosen to design a power circuit and a circuit for light tracking. In the control section, a hybrid algorithm (open-loop-closed-loop) was selected, which, by means of a flowchart, its operation is explained.

The results of the calculations of the critical parts were corroborated by means of simulation software to guarantee the correct dimensioning of these elements. Finally, a cost proposal was generated considering current market prices.

Keywords: Solar tracker, dual axis, solar panels, sensors, actuators

INDICE

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR	I
CERTIFICACIÓN	II
DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
CAPITULO I.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Problema de Estudio	2
1.2.1 Antecedentes	2
1.2.2 Importancia y alcances	3
1.3 Delimitación.....	4
1.3.1 Delimitación geográfica	4
1.3.2 Delimitación temporal	5
1.3.3 Delimitación institucional	5

1.4 Problema general	5
1.5 Objetivos	6
1.5.1 Objetivo general	6
1.5.2 Objetivos específicos	6
CAPITULO II.....	7
MARCO TEORICO	7
1.6 Energías renovables	7
1.7 Energía solar	7
1.8 Generación fotovoltaica	8
1.9 La trayectoria solar	8
1.10 Comportamiento del sol.....	9
1.11 Atlas solar del Ecuador.....	10
1.12 Sistema de seguidor solar.....	11
1.13 Identificación de los parámetros iniciales para el seguidor solar de doble eje para el sistema de energía fotovoltaica.....	12
1.13.1 Localización	12
1.13.2 Observación del comportamiento solar en la provincia de Morona Santiago.....	13

1.13.3	Movimientos requeridos por el seguidor.....	15
1.13.4	Tipos de Seguidores	16
1.13.5	Dimensionamiento del soporte del panel.	21
1.13.6	Numero de paneles en función de la potencia requerida en el centro de salud de la comunidad de Yaapi	22
1.13.7	Tipos de materiales para la estructura del seguidor solar.....	23
CAPITULO III		26
DISEÑO DE LA PROPUESTA Y METODOLOGIA.....		26
1.14	Diseño Mecánico.	26
1.14.1	Propuesta de diseño del seguidor solar de doble eje.	26
1.14.2	Diseño del soporte abatible de los paneles solares.....	27
1.14.3	Cálculo de la energía para girar el soporte	30
1.14.4	Selección del motor	34
1.14.5	Cálculos para los engranes de diente rectos.	35
1.14.6	Calculo eje de transmisión	43
1.14.7	Cálculo de la columna central	85
1.14.8	Diseño ensamblado del seguidor solar	92

1.15	Diseño eléctrico y electrónico.....	93
1.15.1	Propuesta de sensores de luminosidad.	94
1.15.2	Propuesta de microcontroladores.	97
1.15.3	Propuesta de reloj digital en tiempo real.....	98
1.15.4	Circuito electrónico y circuito de potencia.	99
1.15.5	Unidad de control de motor CC sin escobillas.....	99
1.16	Diseño de Control	103
1.16.1	Algoritmos.....	103
1.17	Simulación de verificación de las partes críticas.	110
1.17.1	Simulación de cargas aplicadas en los ejes del seguidor solar.....	110
1.17.2	Comparación de resultados de la simulación y los cálculos de las cargas aplicadas a los ejes del seguidor solar.....	116
1.18	Presupuesto del diseño del seguidor solar del sistema de energía fotovoltaica.	116
1.18.2	Comparación presupuestaria del sistema de seguidor solar	123
	Conclusiones	123
	Recomendaciones	125
	Referencias.....	126

ANEXOS	131
--------------	-----

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Datos obtenidos de la insolación difusa, directa y global en la provincia de Morona Santiago.....	14
Tabla 2: Ventajas y desventajas de los tipos de seguidores solares.....	17
Tabla 3: Paneles solares más eficientes del 2021.	21
Tabla 4: Consumo de potencia en el centro de salud.....	22
Tabla 5: Selección de material.....	25
Tabla 6: Pesos de los componentes del soporte.....	30
Tabla 7: Tipos de motores que cumplen con las características del sistema.	34
Tabla 8: Datos calculados para la elaboración de la rueda conductora.	42
Tabla 9: Diámetros calculados para cada sección respectiva del eje 1 sometido bajo una carga a 0°.	62
Tabla 10: Diámetros calculados para cada sección del eje sometido a una carga con una inclinación a 60°.	67
Tabla 11: Peso de los componentes que conforman el ensamblaje del eje 2.....	68
Tabla 12: Diámetros calculados para cada sección del eje 2 bajo una carga aplicada en dirección 0°.	77

Tabla 13: Diámetros calculados para cada sección respectiva del eje 1 sometido bajo una carga a 30°.	81
Tabla 14: Características generales de los ejes de transmisión.	84
Tabla 15: Sensores de radiación solar industriales.	95
Tabla 16: Microcontroladores comúnmente utilizados en la industria.	97
Tabla 17: Relojes digitales utilizados para la medición de datos en tiempo real.	98
Tabla 18: Elementos que conforman el circuito electrónico.	102
Tabla 19: Características físicas del acero implementadas en el software.	111
Tabla 20: Resultados obtenidos en el simulador para cada eje.	116
Tabla 21: Presupuesto calculado para los materiales necesarios que requiere la construcción del seguidor solar de doble eje.	117
Tabla 22: Presupuesto calculado para los procesos de mecanizado.	118
Tabla 23: Presupuesto calculado para los insumos normalizados.	118
Tabla 24: Presupuesto calculado para los acabados finales.	119
Tabla 25: Presupuestos calculados para los gastos en la cimentación.	120
Tabla 26: Presupuesto estimado para el transporte.	121
Tabla 27: Valor total calculado para el seguidor solar.	121
Tabla 28: Costo total del seguidor solar añadido el valor al impuesto agregado.	121
Tabla 29: Seguidores solares disponibles en el mercado.	122

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación del centro de salud de la comunidad de Yaapi.	5
Figura 2: movimiento aparente del sol en la bóveda celeste	9
Figura 3: Mapa de Radiación solar de Ecuador.....	10
Figura 4: Insolación en los distintos meses del año: directa, difusa, global.....	11
Figura 5: Datos obtenidos de la ubicación exacta del centro de salud de la comunidad de Yaapi.	13
Figura 6: Gráfica de Insolación difusa, directa y global de la provincia de morona Santiago	15
Figura 7: Silueta de los movimientos requeridos del panel solar.	16
Figura 8: Tres estados para el seguimiento del sol.	18
Figura 9: Seguidor de un eje.	18
Figura 10: Seguidor de dos ejes.....	19
Figura 11: Mono-poste.	20
Figura 12: Horas de movimiento ideales.	20
Figura 13: Boceto inicial.	26
Figura 14: Diseño del soporte.	28
Figura 15: Análisis de esfuerzo y deformación del soporte.	29

Figura 16: Soporte del Panel.	29
Figura 17: Distancia del centroide desde su punto inicial a su posición final.	33
Figura 18: Diseño de la rueda conductora.	39
Figura 19: Diseño del piñón.	41
Figura 20: Elementos que conforman el ensamble de los engranes.	42
Figura 21: Resistencia a la fatiga S_n en función de la resistencia a la tensión, para acero forjado con varias condiciones de superficie.	44
Figura 22: Factor por tamaño.	45
Figura 23: Eje de transmisión.	47
Figura 24: Cargas aplicadas en el eje 1.	47
Figura 25: Diagrama de la transmisión del eje al engrane	48
Figura 26: Posicionamiento del panel solar con respecto al eje.	50
Figura 27: Serie FBB T3 motor – reductor DC sin escobillas.....	52
Figura 28: Diagrama de cuerpo libre del eje 1 en dirección Y.	55
Figura 29: Diagramas de fuerza cortante y momento flector en el eje 1 en dirección Y.	56
Figura 30: Diagrama de cuerpo libre del eje 1 en dirección X.....	57
Figura 31: Diagrama de esfuerzo cortante y momento flector del eje 1 en dirección X.	58
Figura 32: Posicionamiento del eje 1.	63

Figura 33: Diagrama de cuerpo libre del eje 1 bajo una carga aplicada en dirección 60° .	63
.....	
Figura 34: Diagramas de esfuerzo cortante y momento flector del eje 1 en dirección X y Y.	64
Figura 35: Diagrama de cuerpo libre del eje 2 en 3D.	70
Figura 36: Diagrama de cuerpo libre del eje 2 con respecto al eje Y.	70
Figura 37: Diagrama de esfuerzo cortante y momento flector del eje 2 con respecto al eje Y.	72
Figura 38: Diagrama de cuerpo libre del eje 2 con respecto al eje X.	73
Figura 39: Diagrama de esfuerzo cortante y momento flector del eje 2 con respecto al eje X.	74
X. Fuente: Autores.	74
Figura 40: Movimiento del eje 2.	78
Figura 41: Diagrama de cuerpo libre en 3D del eje 2 con la carga aplicada a 30°	78
Figura 42: Diagramas de esfuerzo cortante y momento flector del eje 2 bajo la carga a 30° de inclinación.	79
Figura 43: Catálogo KF de rodamientos.	83
Figura 44: Resultados del dimensionamiento del eje 1.	84
Figura 45: Resultados del dimensionamiento del eje 2.	85
Figura 46: Montaje del eje 1.	85

Figura 47: Longitud Efectiva K.....	89
Figura 48: Columna central y elementos de apoyo.	91
Figura 49: Diseño de la cimentación del seguidor solar de doble eje con medidas en mm.	92
Figura 50: Estructura en 3D del seguidor solar de doble eje.....	93
Figura 51: Diagrama de bloques del funcionamiento del sistema.....	94
Figura 52: Starter Kit BDC D1.....	100
Figura 53: Circuito de potencia para motores.	101
Figura 54: Circuito de control.	102
Figura 55: Diagrama de bloques de lazo abierto.	103
Figura 56: Diagrama de bloques de lazo cerrado.	105
Figura 57: Diagrama de bloques en lazo híbrido.....	106
Figura 58: Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema.....	108
Figura 59: Diagrama de flujo del motor reductor 1.....	109
Figura 60: Diagrama de flujo del motor reductor 2.....	110
Figura 61: Simulación del eje de transmisión.	112
Figura 62: Ubicación de los apoyos en los extremos del eje.....	112
Figura 63: Análisis de elementos finitos del eje 1 con una carga aplicada a 0° de inclinación.....	113

Figura 64: Análisis de elementos finitos del eje 1 con una carga aplicada a 60° de inclinación.....	114
Figura 65: Simulación del eje 2.....	114
Figura 66: Análisis de elementos finitos del eje 2 con una carga aplicada a 0° de inclinación.....	115
Figura 67: Análisis de elementos finitos del eje 2 con una carga aplicada a 30° de inclinación.....	115

CAPITULO I

1.1 Introducción

El presente proyecto de titulación tiene como objetivo diseñar un seguidor solar de doble eje para el Centro de Salud de la comunidad de Yaapi, el cual influirá de manera positiva en la localidad en dos sentidos fundamentales. El primero, en beneficio del medioambiente porque su fuente de energía es renovable, y segundo, a nivel social, por el mejoramiento de la calidad de los beneficios de la salud.

El documento se divide en cuatro partes fundamentales; la primera, abarca los parámetros iniciales del seguidor solar de doble eje para el sistema de energía fotovoltaica, en donde se investigan los tipos de seguidores según diferentes autores, así como el comportamiento solar del lugar. La segunda, propone el diseño de un seguidor solar de doble eje para el sistema de energía fotovoltaica, donde se realizan los planos del sistema mecánico del seguidor solar, y de la misma manera, se establecen los materiales con los que van a ser diseñados.

La tercera, recoge las simulaciones de la carga aplicada a los ejes del seguidor solar para el sistema de energía fotovoltaica mediante un software tipo CAE, donde se simula la carga aplicada en los ejes, obteniendo un resultado de esfuerzo y deformación para comprobar que el diseño sea adecuado. Por último, se presenta la propuesta y el costo del diseño del seguidor solar para el Centro de Salud de la comunidad de Yaapi.

1.2 Problema de Estudio

1.2.1 Antecedentes

Durante los últimos años las energías renovables se han utilizado de manera cada vez más constante y progresiva, no sólo por sus beneficios ambientales, sino por las condiciones en que se generan en cuanto a los costos, su disponibilidad infinita y los impactos sociales que de ella se desprenden.

En ese sentido es necesario partir tomando en cuenta que la energía solar que se recibe en la superficie de la tierra se ha calculado equivalente a 178000 TW-año. En 1990 se calculaba que esta cantidad era 15.000 veces mayor que el consumo global. No obstante, cerca del 30% de esta energía es reflejada en el espacio, 50% es absorbida, convertida en calor y reenviada a la superficie terrestre; de este 50%, 49.000 TW-año son reenviados como energía calorífica bajo la forma de radiación electromagnética y 40.000 TW-año como energía calórica propiamente dicha (CONELEC, 2008).

Por este motivo, las instalaciones solares fotovoltaicas de autoconsumo, como parte de las energías renovables, permiten al usuario generar su propia energía eléctrica. Es decir, el usuario produce la energía en el mismo lugar donde la consume, a partir de la radiación solar y de paneles fotovoltaicos (Jiménez 2017).

Por su parte, el uso de energía solar para generar electricidad a través de sistemas fotovoltaicos ha tenido un desarrollo mundial sin precedentes en los últimos 10 años (Noriega, 2016). Cuando se utilizan paneles solares fijos para captar la energía del sol, no siempre se hace el mejor uso del recurso porque durante el transcurso del día los rayos del sol no siempre serán

perpendiculares al plano de los paneles, y, por tanto, la producción energética es mínima.

Además, para responder a este fenómeno, se presenta la opción de utilizar seguidores solares. Estos últimos, son dispositivos mecánicos que orientan los paneles para que permanezcan lo más perpendiculares posible a los rayos del sol durante el día, siguiendo la trayectoria solar desde el amanecer hasta el atardecer, para de esta manera obtener una mayor y mejor captación de luz (González, et al. 2021).

De igual manera, mejorar la eficiencia de conversión de los paneles solares se ha convertido en un área de estudio desafiante para los investigadores. Los seguidores solares son una alternativa para alcanzar este objetivo, como se ha demostrado en muchos casos, al rastrear los cambios de posición del sol, la productividad del panel aumenta. De ahí que según Robles, Ospino y Casas (2016), actualmente, existen dos tipos principales de seguidores solares: el de un eje y los de dos ejes. Y de ellos se han desarrollado estudios que implementan seguidores de un eje, seguidores de dos ejes con y sin sensores. Y también seguidores de dos ejes utilizando diferentes técnicas de control.

La fotovoltaica de seguimiento de dos ejes, que es el caso sobre el que hemos desarrollado nuestra propuesta, propone teóricamente una mejora del 41% en la entrada de energía en una región de latitud media con respecto al panel fotovoltaico fijo. Además, la mejora para un sistema de seguimiento de un eje es del 36%. La energía solar captada por el sistema de seguimiento solar está relacionada con las condiciones meteorológicas y de la región (Clifford, 2004).

1.2.2 Importancia y alcances

Con este proyecto se pretende de manera tentativa dar una solución inmediata a la falta de

suministro energético en el Centro de Salud de Yaapi ocasionado por diversos factores ambientales y territoriales, que de una u otra manera impiden la llegada del sistema eléctrico nacional a zonas remotas ubicadas en la región oriental. Por otro lado, esta propuesta aporta a la población de Yaapi un mejoramiento de la calidad de atención médica, reduciendo la posibilidad de traslados a otras instituciones médicas por falta de equipos médicos que son de gran importancia para estabilizar los signos vitales del paciente y poder salvar vidas, y que por su puesto requieren de energía eléctrica.

Por otro lado, se espera que esta idea no únicamente sea adoptada por este Centro de Salud sino de la misma manera sea recibido por diferentes subcentros que atraviesan esta situación y mejoren los servicios y la calidad de vida.

1.3 Delimitación

1.3.1 Delimitación geográfica

El proyecto se realizará en la comunidad de Yaapi, perteneciente al cantón Logroño, provincia de Morona Santiago, está a una altitud de 352m con su clima cálido y templado a una temperatura de 15°C a 35°C aproximadamente. En la figura 1 se muestra los datos geográficos de la comunidad de Yaapi obtenidos del software RETScreen.

Figura 1: Ubicación del centro de salud de la comunidad de Yaapi.



Fuente: Autores

1.3.2 Delimitación temporal

La investigación y diseño del seguidor solar tendrá una duración de 4 a 5 meses aproximadamente, dividiendo las mismas en diseño y simulación.

1.3.3 Delimitación institucional

La investigación y diseño se realiza para el Centro de Salud de la comunidad de Yaapi.

1.4 Problema general

Con la falta de energía en el centro de salud de la comunidad de Yaapi es posible diseñar un seguidor solar de doble eje, por lo que es importante identificar los parámetros iniciales. De igual manera se debe evaluar el diseño mediante un software tipo CAE y finalmente presentar la propuesta y el costo para el diseño del seguidor solar.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

- Diseñar un seguidor solar de doble eje para un sistema de energía fotovoltaica en el centro de salud de la comunidad de Yaapi.

1.5.2 Objetivos específicos

- Identificar los parámetros iniciales para el seguidor solar de doble eje para el sistema de energía fotovoltaica.
- Proponer el diseño de un seguidor solar de doble eje para el sistema de energía fotovoltaica.
- Simular el diseño de un seguidor solar de doble eje para el sistema de energía fotovoltaica mediante un software tipo CAE.
- Presentar la propuesta y el costo para el diseño del seguidor solar del sistema de energía fotovoltaica al centro de salud de la comunidad de Yaapi.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

1.6 Energías renovables

Las energías renovables se producen de manera inagotable y de forma continua comparada a la escala del ser humano con un tiempo de vida corto, aunque se debe tomar en cuenta el no alterar los ciclos naturales para estas fuentes de energía. Por otra parte, el sol es el origen de toda energía renovable ya que el calor que produce crea una diferencia de presión en la tierra que forma el viento, siendo esta la fuente de energía eólica. También comanda el ciclo del agua, lo que provoca la evaporación, que tiende a formar nubes y finalmente la lluvia y posterior a ello producir la energía hidráulica. De igual forma, las plantas utilizan el sol para la fotosíntesis, la supervivencia y el crecimiento, por lo que toda la materia vegetal es biomasa. Finalmente, el sol se utiliza directamente para la energía solar, incluida la energía térmica y la fotovoltaica. (Merino, 2012)

La energía renovable es esencial para la economía mundial y el bienestar actual y futuro de las generaciones, y contribuye de una manera equilibrada de alcanzar el objetivo general de la seguridad energética y la protección del medio ambiente (Fausto García, 2018).

1.7 Energía solar

La energía solar constituye la principal fuente de vida en la tierra, dirige los ciclos biofísicos, geofísicos y químicos que mantienen la vida en el planeta, los ciclos del oxígeno, del agua, del carbono y del clima. La energía del Sol es la que induce el movimiento del viento y del agua, y el incremento de las plantas, por ello la energía solar es el origen de la mayoría de las

fuentes de energías renovables: eólica, hidráulica, biomasa, de las olas y corrientes marinas, además de la solar. (Espejo, 1983)

También se puede decir que la energía solar fotovoltaica en la actualidad, después de la energía eólica es la segunda fuente de energía renovable más utilizada e implementada en el mundo. Esto se debe a que brinda soluciones a un gran número de problemáticas en distintas áreas de desarrollo tecnológico (Ramírez, 2017).

1.8 Generación fotovoltaica

Las centrales de generación fotovoltaica (FV) están compuestas de varios paneles fotovoltaicos que se encargan de convertir la energía lumínica (rayos solares) en energía eléctrica. Los paneles están conectados entre sí, en configuraciones de serie o paralelo para obtener la potencia y voltajes necesarios según la aplicación. Para poder obtener energía eléctrica estable estas centrales poseen módulos convertidores e inversores, en conjunto de baterías para poder almacenar la energía (Messenger R., 2017).

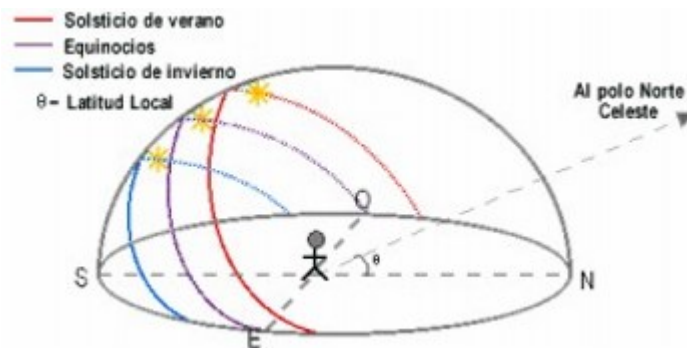
1.9 La trayectoria solar

Además de las condiciones atmosféricas hay otro parámetro que afecta radicalmente a la incidencia de la radiación sobre un captador solar, este es el movimiento aparente del sol a lo largo del día y a lo largo del año, (Ver Figura 2). Se dice "aparente" porque en realidad la Tierra es la que está girando y no el Sol. La Tierra tiene dos tipos de movimientos: uno alrededor de su propio eje, el cual da lugar al día y la noche y el otro; alrededor del sol siguiendo una trayectoria elíptica, el cual da lugar a las estaciones del año. (Gutiérrez, 2012)

Al apuntar directamente al sol, la matriz fotovoltaica recibirá la luz solar máxima. Por esta

razón, es necesario seguir al sol durante el día y durante todo el año. Esto requiere el ajuste de dos ángulos: los ángulos de elevación para seguir el movimiento diario del sol en la dirección norte-sur, y el ángulo azimut para seguir el movimiento anual de la trayectoria solar en la dirección este-oeste. (Palomar et al. 2009).

Figura 2: movimiento aparente del sol en la bóveda celeste



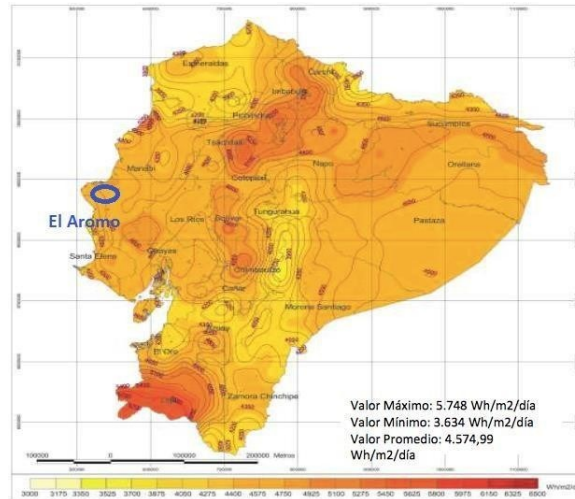
Fuente: Lacasa, E. (2012)

1.10 Comportamiento del sol

El sol es un astro que tiene reacciones nucleares producidas tanto en su centro como su corona, lo cual brinda una gran fuente de energía. Por lo que al tomar en cuenta su masa de gran tamaño, se puede suponer que su tiempo de vida es considerablemente mayor a la del hombre que habita en la tierra. Por otro lado, la tierra recibe en forma de radiación electromagnética una gran parte de esta energía llamada comúnmente como energía del sol o energía solar, la cual se compone por “luz” y “calor”. (Abella & Romero 2009)

La disponibilidad y aprovechamiento de este tipo de energía depende del lugar en donde se quiera utilizar, ya que en ciertas zonas se puede tener mayor cantidad de energía solar y por ende transformarla en energía eléctrica. En la Figura 3 se pueden observar los lugares en donde existe un mayor potencial de la energía solar en el Ecuador y su aprovechamiento. (Mora, 2017)

Figura 3: Mapa de Radiación solar de Ecuador.



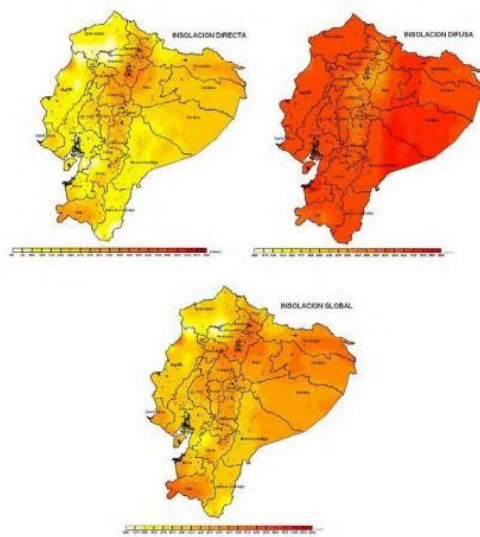
Fuente: CONELEC (2008)

La radiación que llega a la superficie terrestre se puede clasificar en directa y difusa: la radiación directa es aquella que se recibe en la superficie terrestre sin que haya sufrido ninguno de los procesos antes mencionados al pasar por la atmósfera y la radiación difusa es la que se recibe después de que la luz solar cambió su dirección debido a los procesos de refracción y reflexión que ocurren en la atmósfera. (Mora, 2017)

1.11 Atlas solar del Ecuador

En la figura 4 se muestra el atlas solar del Ecuador.

Figura 4: Insolación en los distintos meses del año: directa, difusa, global.



Fuente: CONELEC (2008)

1.12 Sistema de seguidor solar

Un sistema que coloca un objeto en un ángulo con respecto al Sol. Las aplicaciones más comunes de los seguidores solares son la colocación de paneles fotovoltaicos (PV) (paneles solares) para que permanezcan perpendiculares a los rayos del Sol y posicionar los telescopios espaciales para que puedan determinar la dirección del Sol. Los seguidores solares fotovoltaicos ajustan la dirección en la que se enfrenta un panel solar de acuerdo con la posición del Sol en el cielo. Al mantener el panel perpendicular al Sol, más luz solar incide en el panel solar, se refleja menos luz y se absorbe más energía (Yoshitake, 2016).

Los estudios han demostrado que el ángulo de luz afecta la potencia de salida de un panel solar. Un panel solar que es exactamente perpendicular al Sol produce más energía que un panel solar que no es perpendicular. Los ángulos pequeños desde la perpendicular tienen un efecto menor en la salida de potencia que los ángulos más grandes. Además, el ángulo solar cambia de norte a

sur estacionalmente y de este a oeste a diario. Como resultado, aunque el seguimiento de este a oeste es importante, el seguimiento de norte a sur tiene un impacto menos significativo (Yoshitake, 2016).

1.13 Identificación de los parámetros iniciales para el seguidor solar de doble eje para el sistema de energía fotovoltaica.

Para poder implementar esta propuesta de diseño de un seguidor solar de doble eje, se debe tomar en consideración ciertos aspectos como: la ubicación, el análisis del comportamiento solar, el estudio y análisis de seguidores solares, los tipos de materiales, entre otros. Como es el caso de los paneles fotovoltaicos los cuales precisan de ciertas condiciones para su buen funcionamiento, tales como: encontrar una excelente posición geográfica dentro del terreno, un buen clima, disposición de luz solar, etc. El objetivo principal por el cual se requiere estos parámetros es para que la instalación sea favorable para el aprovechamiento óptimo del sistema. A continuación, se detallan los aspectos generales de la zona que se tomó como referencia para el empleo de este tipo de dispositivos, de igual manera se describen los requerimientos para el diseño.

1.13.1 Localización

Yaapi es una comunidad, que está situada en el sector del Logroño en la provincia de Morona Santiago cuyos meridianos son de $76^{\circ} 05'$ y $78^{\circ} 58'$ con una longitud occidental y paralelos de $1^{\circ} 25'$ y $3^{\circ} 54'$ El clima es uno de los mejores aliados de esta zona, ya que la posición en que se encuentra el sol permite un buen ángulo de incidencia constante durante todo el año. La radiación que se efectúa en el lugar es la más conveniente para que se puede producir un buen funcionamiento del seguidor solar de doble eje, se estima que esta radiación es de

aproximadamente es de 3.76 KWh/m²/d, tal como se muestra en la figura 5.

Figura 5: Datos obtenidos de la ubicación exacta del centro de salud de la comunidad de Yaapi.

Mes	Temperatura del aire °C	Humedad relativa %	Precipitación mm	Radiación solar diaria - horizontal kWh/m ² /d	Presión atmosférica kPa	Velocidad del Viento m/s	Temperatura del suelo °C	Grados-días de calefacción 18 °C °C-d	Grados-días de refrigeración 10 °C °C-d
Enero	23,2	82,1%	113,46	3,66	93,5	0,9	23,2	0	409
Febrero	23,1	82,4%	131,04	3,44	93,5	0,9	23,1	0	367
Marzo	22,9	84,2%	167,40	3,47	93,5	0,9	22,8	0	400
Abril	22,6	85,2%	159,00	3,66	93,6	0,9	22,6	0	378
Mayo	22,1	84,9%	154,07	3,64	93,7	0,9	22,0	0	375
Junio	21,3	83,4%	138,30	3,45	93,8	0,9	21,3	0	339
Julio	21,2	79,9%	112,84	3,53	93,8	0,9	21,2	0	347
Agosto	22,2	74,3%	98,89	3,88	93,7	1,0	22,2	0	378
Setiembre	23,0	73,2%	104,40	4,04	93,6	1,0	23,0	0	390
Octubre	23,2	79,3%	150,35	4,24	93,5	1,0	23,2	0	409
Noviembre	23,3	82,8%	142,20	4,25	93,4	0,9	23,2	0	399
Diciembre	23,1	83,4%	136,71	3,85	93,4	0,9	23,1	0	406
Anual	22,6	81,3%	1.608,66	3,76	93,6	0,9	22,6	0	4.598
Fuente	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA
Medido a					m	10	0		

Fuente: Autores.

1.13.2 Observación del comportamiento solar en la provincia de Morona Santiago

Según datos obtenidos a través del Consejo Nacional de Electricidad “CONELEC”, nos menciona que, en la provincia de Morona Santiago se puede percibir un comportamiento solar, en el cual se puede observar una radiación directa, difusa y global. Para una mayor comprensión es indispensable saber cómo funcionan y como están relacionadas con la zona. La radiación directa es la que llega directamente del sol y existe solo cuando este es visible. Mientras que la difusa proviene de la atmosfera, por dispersión de parte de la radiación solar en ella. Cuando hay días soleados y no hay presencia de nubosidades este tipo de radiación puede suponer aproximadamente un 15%, pero cuando hay días nublados en los que se reduce la cantidad de irradiación directa, esta aumenta de manera considerable. En cuanto a la radiación global, es la suma de estas dos, tanto directa como difusa.

Mediante mapas mensuales, un monitoreo de la zona, observación del comportamiento del sol, se puede determinar cómo este actúa en esta provincia. En base a estos se estipula que en

Morona Santiago el promedio de la radiación directa es de 2300, la difusa es de 2900 y la global es de 4580. Esta insolación puede variar de acuerdo con el tiempo, clima y zona, no todos los meses son iguales. En base a esta observación se puede considerar que meses serán los más beneficios para nuestra propuesta. En la siguiente tabla se indica los meses y los tipos de radiación que hay en la provincia y su variación.

Tabla 1: Datos obtenidos de la insolación difusa, directa y global en la provincia de Morona Santiago.

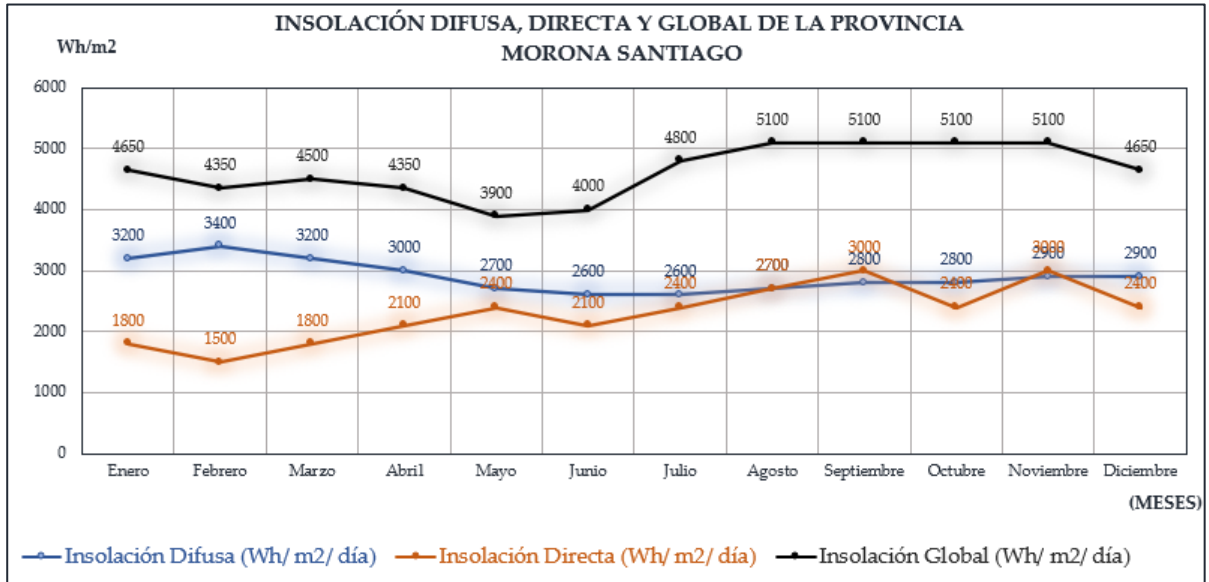
Mes	Insolación Difusa (Wh/ m2/ día)	Insolación Directa (Wh/ m2/ día)	Insolación Global (Wh/ m2/ día)
Enero	3200	1800	4650
Febrero	3400	1500	4350
Marzo	3200	1800	4500
Abril	3000	2100	4350
Mayo	2700	2400	3900
Junio	2600	2100	4000
Julio	2600	2400	4800
Agosto	2700	2700	5100
Septiembre	2800	3000	5100
Octubre	2800	2400	5100
Noviembre	2900	3000	5100
Diciembre	2900	2400	4650
Promedios	2900	2300	4580

Fuente: CONELEC (2008)

En la figura 6 se puede distinguir los parámetros de comportamiento solar en la provincia de Morona Santiago durante todo el año, transmitidos a través de “CONELEC”. En este grafico se registra una variación de la radiación y se representa por medio de curvas de potencia con tonalidades, de acuerdo con su tipo de irradiación. Se identifica como insolación directa al tono naranja, como insolación difusa al matiz azul y como insolación global al matiz negro. Por

consiguiente, se determina que, en los meses de agosto hasta noviembre se produce una mayor cantidad de radiación solar en términos de potencia. Por lo que se determina que, en estos meses se puede obtener un notable aprovechamiento para el rendimiento del seguidor solar.

Figura 6: Gráfica de Insolación difusa, directa y global de la provincia de morona Santiago

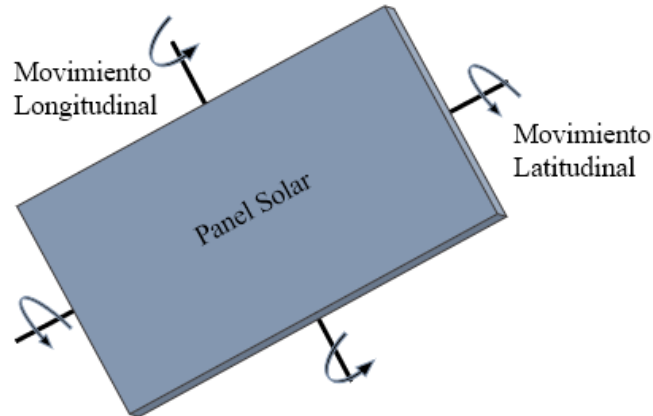


Fuente: CONELEC (2008)

1.13.3 Movimientos requeridos por el seguidor

- El sistema debe orientar los paneles solares perpendicularmente a los rayos del sol, por lo que este debe moverse en dos ejes hacia dos direcciones y que sea de tipo de doble inclinación como se muestra en la figura 7.

Figura 7: Silueta de los movimientos requeridos del panel solar.



Fuente: Autores

- El sistema tendrá una exposición a factores ambientales externos como vientos leves y fuertes, terremotos y temblores de magnitudes inciertas, lluvias, granizadas, calor, entre otras. Estos fenómenos pueden ser impredecibles por lo cual el seguidor solar debe ser lo suficientemente firme ante estas situaciones.
- La plataforma del sistema se orientará mediante motorreductores.

1.13.4 Tipos de Seguidores

Existen dos tipos de seguidores solares, los de un eje y los de doble eje. Los seguidores solares de un eje son un sistema que cambian su posición en dirección del sol a lo largo del día. Por otro lado, los seguidores solares de doble eje poseen dos grados de libertad y permiten seguir el sol en dirección Norte – Sur y de Este a Oeste siendo los más eficientes a la hora de captar energía solar. En la siguiente tabla se muestra las ventajas y desventajas entre estos dos tipos de seguidores.

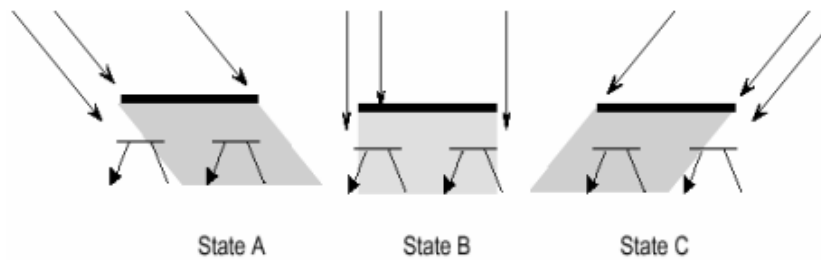
Tabla 2: Ventajas y desventajas de los tipos de seguidores solares.

Tipo de seguidor	Ventajas	Desventajas
	Son más baratos que los seguidores de dos ejes debido a que tienen un mecanismo simple y funcionan a bajo costo.	Seguimiento solar poco preciso.
Seguidor solar de un eje	Mayor simplicidad.	Menor energía captada
	Adaptable en cubiertas. Ideales para empresas con un presupuesto más bajo o áreas generalmente nubladas.	Actualización tecnológica limitada
	Seguimiento solar preciso. Incremento en un 35% mayor a otros sistemas de seguimiento solar.	Representa un mayor costo.
Seguidor solar de doble eje	Proporcionan una salida de energía constante durante todo el día. Estos seguidores generan un 45-50% más de potencia de salida cada año, en comparación con una estación estática de la misma capacidad. El periodo de recuperación de la inversión es menor en el caso de los seguidores de dos ejes.	Mayor complejidad técnica.

Fuente: (solarfeeds, 2021)

Por otro lado, los autores Rizk y Chaiko proponen un diseño de seguidor solar, el cual está compuesto por tres distintos métodos. Uno de los cuales utiliza sensores foto resistivos que reaccionan al cambio de intensidad lumínica.

Figura 8: Tres estados para el seguimiento del sol.



Fuente: Ávila, F. (2018)

En la figura 8 se puede distinguir los 3 estados para el seguimiento del sol. En el estado A, el cual se da a primeras horas del día, este permite la activación del sensor izquierdo por un periodo de tiempo, hasta que la sombra cubra el estado B. Con forme avanza el día se llegará al estado C, donde se activará el sensor derecho permitiendo al sistema retornar hacia el estado B. Estos harán que el ciclo se repita a lo largo del día logrando un mayor aprovechamiento de la luz solar.

Figura 9: Seguidor de un eje.

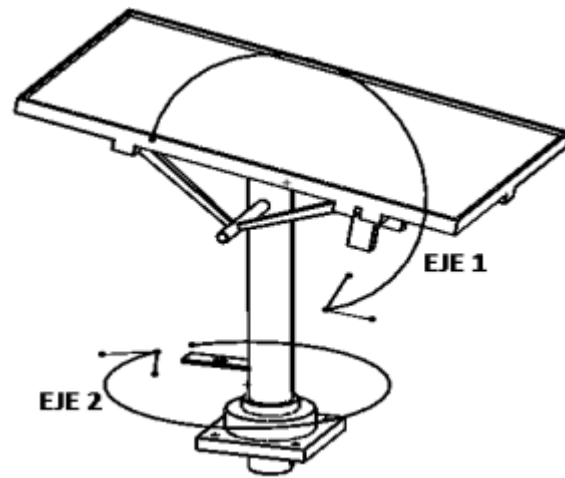


Fuente: Ávila, F. (2018)

Esta propuesta de diseño de panel solar manifiesta algunos problemas, por los cuales no es muy factible su funcionamiento. Uno de estos problemas es su foto resistores, estos poseen un rango pequeño de sensibilidad, por lo que no se puede utilizar en condiciones específicas. El otro problema es su mecanismo, este soporta cargas bajas menores a los 8Kg debido a que su estructura es simple, tal como se muestra en la figura 9.

Otros autores como Martínez y Hernández plantean un sistema de seguidor solar totalmente diferente. Este dispone de una rotación azimutal y altitudinal, también se destaca un análisis más completo de la estructura, este no necesita estar en contacto con el suelo, para proceder a su funcionamiento. Los movimientos que este diseño efectúa son de un giro alrededor de su eje vertical más conocido como ángulo azimut y una elevación de paneles en el ángulo de altitud para un adecuado seguimiento del sol, tal como se indica en la figura 10.

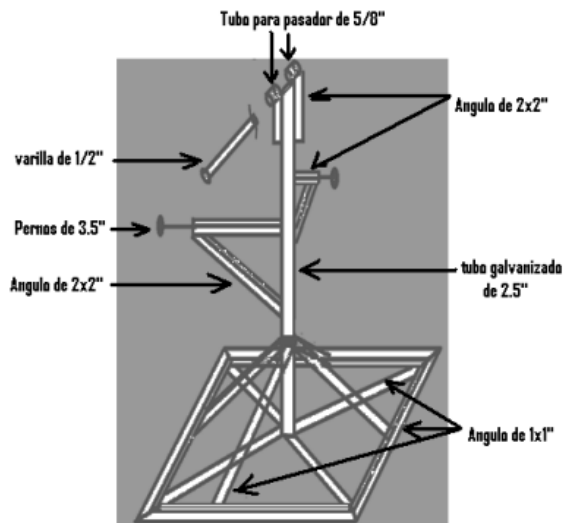
Figura 10: Seguidor de dos ejes.



Fuente: Ávila, F. (2018)

Por último, los autores Guardado y Rivera proyectan un seguidor solar de doble eje. Este panel está formado por una estructura mecánica basada en un mono-poste con un soporte cuadrado, de esta manera puede ser anclado al concreto como se muestra en la figura 11.

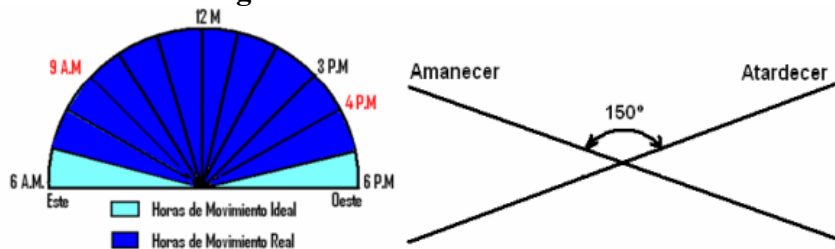
Figura 11: Mono-poste.



Fuente: Ávila, F. (2018)

El autor de este diseño considera que el mecanismo debe cubrir una trayectoria de 180° a lo largo del día, con un margen de error de 15° en la mañana y en la tarde, lo que da como resultado una hora sin seguimiento, tal como se manifiesta en la siguiente figura.

Figura 12: Horas de movimiento ideales.



Fuente: Autores

En cuanto a la tabla 2, se presentan las ventajas y desventajas tanto para seguidores solares de un eje como de doble eje, los cuales permiten conocer sus características, optando por el seguidor solar de doble eje ya que es más preciso y por lo tanto tiene un mayor incremento de captación de energía solar, aunque el costo es mayor, no representa un problema ya que se garantiza un seguidor preciso y consigo un 35% mayor de captación de energía en comparación con otros sistemas de seguimiento solar.

1.13.5 Dimensionamiento del soporte del panel.

En este apartado se busca un peso y tamaño estándar para el soporte, debido a que existen distintos tipos de paneles solares con diferentes dimensiones según sus características técnicas, de tal manera que el soporte del panel pueda adaptarse a los diferentes tipos de paneles solares existentes en el mercado.

Según Alonso J. (2019) realiza un estudio de los paneles solares más eficientes que existen en el mercado fotovoltaico entre los años 2019 y 2021, los cuales se muestran en la tabla 3. Donde considera la eficiencia de cada panel, así como el modelo, la potencia y las dimensiones establecidas por cada fabricante.

Tabla 3: Paneles solares más eficientes del 2021.

Fabricante	Modelo	Eficiencia del panel	Potencia del panel	Tamaño (Largo x ancho) mm	Peso kg
SunPower	MAX3-400	22.6%	400W	1.690 x 1.046	19
SunPower	MAX3-390	22.1%	390W	1.690 x 1.046	19
Futura	FU360M Zebra	21.28%	350W	1.685 x 1.004	19.5
SunPower	MAX3-370	20.9%	370W	1.690 x 1.046	19
LG Neon R	LG360Q1C-A5	20.8%	360W	1.700 x 1.016	17.5
Futura	FU350M Zebra	20.69%	350W	1.685 x 1.004	19.5
LG	LG355Q1C-A5	20.6%	355W	1.700 x 1.016	17.5
AUO	SunForte PM096B00	20.6%	335W	1.559 x 1.046	18.6
SunPower	MAX2-360	20.4%	360W	1.690 x 1.046	19
AUO	SunForte PM096B00	20.3%	330W	1.559 x 1.046	18.6
SunPower	MAX3-350	19.8%	327W	1.690 x 1.046	19
Panasonic	VBHN330SJ53	19.7%	330W	1.590 x 1.053	18.5
Panasonic	VBHN325SJ53	19.4%	325W	1.590 x 1.053	18.5
Eco green energy	EGE-375M	19.3%	375W	1.956 x 992	22.8

Fuente: Alonso J. (2021)


Otros aspectos que se han contemplado para el análisis de estos paneles solares son su peso y el tamaño, puesto que existe una variedad de seguidores solares con distintas magnitudes. Para determinar las dimensiones apropiadas para el sistema de seguimiento solar, se escogen las




medidas mayores, tanto de largo como de ancho, siendo estas de 1956 x 1053 mm, para que no existan problemas de incompatibilidad, de tal forma que al implementar el sistema se pueda adquirir cualquier panel sin importar el dimensionamiento. Para establecer el peso se ejecutó el mismo método, se empleó las cantidades más altas en este caso de 22,8Kg. Por lo que, al momento de realizar los cálculos, no debería existir inconvenientes si se utiliza otros tipos de paneles.

1.13.6 Numero de paneles en función de la potencia requerida en el centro de salud de la comunidad de Yaapi

Para conocer el número de paneles fotovoltaicos que necesita el centro de salud de la comunidad de Yaapi, primero se obtiene el consumo energético de todos los aparatos eléctricos, como computadora, impresora, lavadora, entre otros. Posteriormente se tiene la potencia de cada uno de ellos y es multiplicado por el número de horas de trabajo, obteniendo la potencia total consumida en el día que es de 3375Wh/día como se puede apreciar en la tabla 4.

Tabla 4: Consumo de potencia en el centro de salud.

Elementos	Horas	Potencia (W)	Consumo (Wh/día)	Figura
Computadora	4	200	800	

Impresora	0.5	660	330	
Refrigerador	24	80	1920	
Lavadora	1	325	325	
TOTAL			3375Wh	

Fuente: Autores

Posteriormente mediante el software para instalaciones fotovoltaicas, denominado PVSYST se procede a realizar el cálculo de números de paneles que requiere el centro de salud, en el mismo se añade los datos de radiación de la comunidad de Yaapi, el resultado que se obtiene en el software es de 3 paneles fotovoltaicos de 400Wp (Ver ANEXO A).

1.13.7 Tipos de materiales para la estructura del seguidor solar

En este apartado se realiza una tabla de comparación de los tipos de materiales, cuáles son los apropiados, la densidad del material, sus funciones y sus costos. Para esta analogía se contemplan los diferentes tipos metales más utilizados, estos deben de ser lo suficientemente resistentes ante las variaciones climáticas, con el propósito de que no existan problemas de

corrosión por humedad. Los metales que se han escogido para esta alegoría son: el acero galvanizado, acero inoxidable y aluminio, los cuales dan como resultado una gran resistencia a la corrosión.

Cabe mencionar que cada uno de estos metales cumplen diferentes funciones, algunos tienen mayor resistencia que otros y se adaptan a la zona. El primero en ser considerado es el acero galvanizado, este comúnmente se ocupa en construcciones de estructuras, cuenta con una variedad de catálogos, protege el acero de la oxidación, es ideal para proyectos en áreas abiertas, además que el acero galvanizado es más económico que el acero inoxidable, por consiguiente, este podría ser el más efectivo en los proyectos. En cambio, el acero inoxidable tiene otras funcionalidades, este se aplica mayormente a las industrias alimenticias y farmacéuticas, por lo que no es el más apropiado para zonas abiertas, sin contar que su precio es cuatro veces mayor que del galvanizado. El último en ser observado es el aluminio, el cual tiene diferentes aplicaciones, este se usa más en edificios, marcos de ventanas, buques, trenes, etc. El aluminio en comparación con el acero es flexible y se deforma con mayor facilidad, aunque es resistente a la corrosión, su precio no es tan accesible como el acero galvanizado, pero se encuentra dentro de los estándares.

En resumen, se considera que, el acero galvanizado es el más óptimo para el uso de esta propuesta de diseño de seguidores solares, debido a que su costo es accesible en comparación a los 2, su traslado es más factible debido a su baja densidad, es fácil de manufacturar, es el más adecuado para la construcción de la estructura y cumple con los parámetros requeridos para este proyecto. En la siguiente tabla se detalla todo sobre estos materiales.

Tabla 5: Selección de material.

Material	Corrosión	Costo	Densidad	Expansión térmica	Aplicaciones
Acero galvanizado	“Este tipo de acero presenta un revestimiento de zinc que protege el acero de la oxidación. Es ideal para proyectos en áreas abiertas.” ^a	1670\$ por tonelada	7.8g/cm ³	11.3x10 ⁻⁶ /K	“Trabajo de conductos Componentes de automoción Algunos tipos de sujetadores Vigas estructurales Gabinets de metal Barandilla Pasarelas Señales de tráfico Postes eléctricos.” ^b
Acero inoxidable	“Constituyen un grupo de aceros altamente aleados diseñados para proporcionar gran resistencia a la corrosión.” ^c	6680\$ por tonelada	8.03g/cm ³	16x10 ⁻⁶ /K	“Equipo de procesamiento de alimentos Equipo de fabricación farmacéutica Componentes de motores aeroespaciales Aparatos de cocina Ciertos tipos de sujetadores.” ^b
Aluminio	“Su resistencia a la corrosión es excelente debido a la formación de una película superficial de óxido, delgada y dura.” ^c	2645\$ por tonelada	2.7g/cm ³	22.5x10 ⁻⁶ /K	“Líneas eléctricas Edificios de gran altura Marcos de ventana Electrónica de consumo Electrodomésticos e industriales Componentes de aeronaves Componentes de la nave espacial Buques Trenes Vehículos personales.” ^d

Fuente: ^a (Galvanizing, 2020). ^b (Jnablog, 2020). ^c (Groover, 2010). ^d (real, 2021)

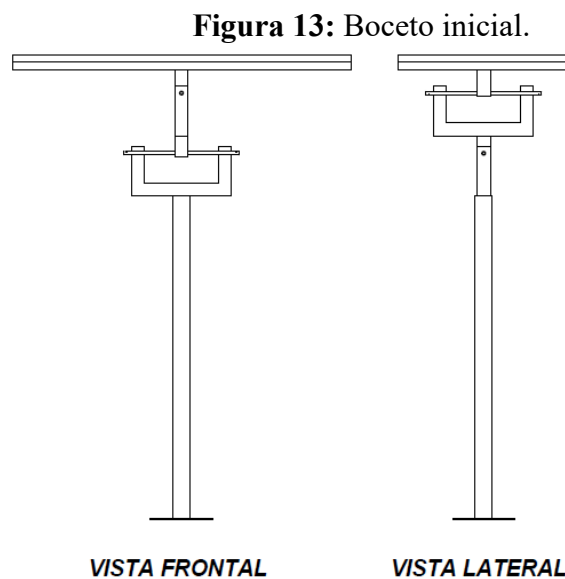
CAPITULO III

DISEÑO DE LA PROPUESTA Y METODOLOGIA

1.14 Diseño Mecánico.

1.14.1 Propuesta de diseño del seguidor solar de doble eje.

En base al estudio realizado de los diferentes tipos de seguidores solares propuestos por diferentes autores, se procede a diseñar uno en específico partiendo de los modelos planteados por los autores Heriberto Guardado y Eulises Rivera, donde se rescata la idea de utilizar un monoposte para el soporte principal de la estructura, además de la idea de un sistema de doble eje por su mayor efectividad al momento de la captación de luz solar, por último la selección del material es asequible y tienen buena resistencia a los factores climáticos en la zona. Como se muestra en la figura 13 donde se realiza el boceto inicial para el sistema de seguimiento solar con dos grados de libertad.



Fuente: Autores.

1.14.2 Diseño del soporte abatible de los paneles solares

Se propone utilizar dos paneles de 400Wp ya que son los más potentes en generación eléctrica y de mayor tamaño, de esa manera el sistema puede tener una buena captación de radiación solar por lo que para diseñar el soporte se debe considerar el peso que se escogió en la tabla 3 de 22,8 kg, en 2 paneles tenemos 45.6 kg.

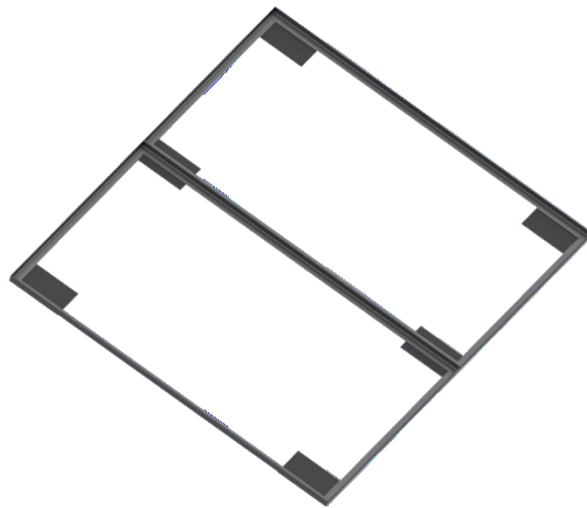
Posteriormente se plantea el uso de perfiles angulares debido a su forma, ya que permite sujetar los paneles sin riesgo a que se puedan caer. Este tipo de perfiles se escogen mediante catálogos de empresas nacionales como la empresa IPAC, que es la mayor fabricante de aceros estructurales en Ecuador.

Luego para definir sus dimensiones, se debe considerar que el espesor de cada panel es de 40 mm, por lo que, se utilizara el perfil cuyas dimensiones estén dentro del rango establecido. Según el catálogo, el acero es ASTM, que cuenta con recubrimiento negro o galvanizado y bajo la norma NTE INEN 1623, lo cual nos brinda seguridad y confiabilidad en el uso de estos elementos. Luego para evitar el sobredimensionamiento únicamente se ha centrado en considerar los valores de 40 mm en base y altura debido al espesor del panel ya establecido.

Con respecto al espesor adecuado, se realiza un análisis de elementos finitos mediante un software CAE y se selecciona la norma ISO para perfiles angulares, puesto que el software no cuenta con la normativa INEN. posteriormente al momento de escoger un espesor de 1.5mm, siendo este el más pequeño otorgado por el catálogo de IPAC, se muestra que la normativa ISO cuenta únicamente con espesores de 3 a 5 mm, por lo que se ha considerado realizar el análisis con los datos que ofrece el software y verificar si este espesor es el más adecuado para soportar los

esfuerzos a los que se encuentra sometida la estructura. La figura 14 muestra el diseño planteado para el soporte de los paneles solares en 3D donde se muestra el uso de planchas laminadas de color negro que permiten fortalecer las uniones de los perfiles y permiten que el soporte sea adaptable a otros paneles cuyas dimensiones sean inferiores a las establecidas.

Figura 14: Diseño del soporte.

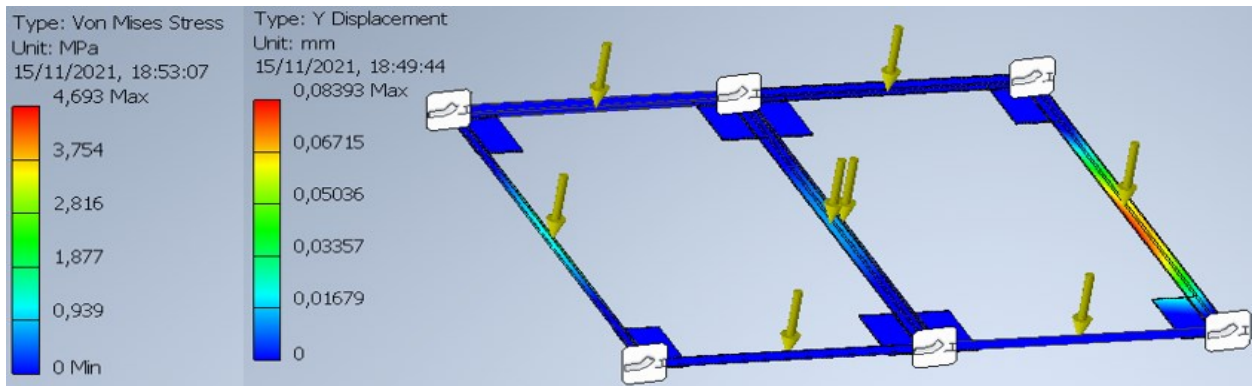


Fuente: Autores.

Posteriormente se efectúa un análisis de esfuerzo y deformación a los que se encuentra sometido el soporte, bajo la carga aplicada de 55.917 N en cada uno de los perfiles. Para la investigación del esfuerzo se basa en la teoría de la energía de deformación máxima, también conocida como la teoría de Von Mises, la cual predice que la falla por fluencia ocurre cuando la energía de deformación total por unidad de volumen alcanza o excede la energía de deformación por unidad de volumen correspondiente a la resistencia a la fluencia en tensión o en compresión del mismo material (Shigley, 2008). En este caso el esfuerzo obtenido en la simulación no excede al permisible del material por lo que la estructura se encuentra en óptimas condiciones para soportar el peso de los paneles solares. En la figura 15 se puede observar que la deformación máxima que tiene la estructura es de 0.083 mm, la cual indica que el espesor establecido de 3mm

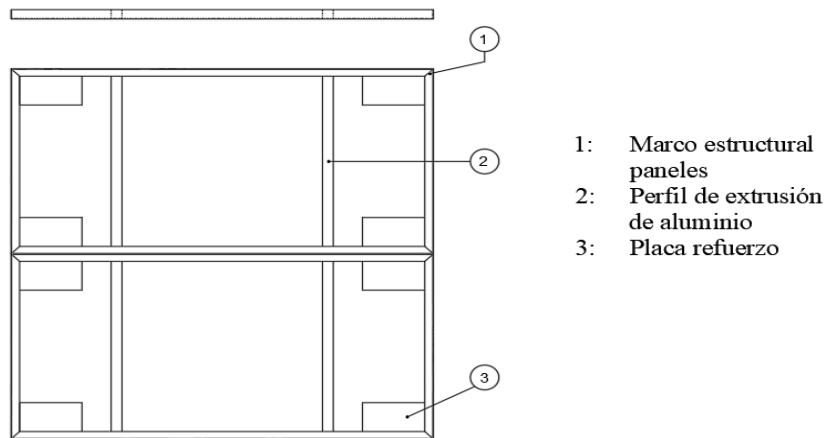
para los perfiles angulares soporta confiablemente el peso aplicado, mientras que el esfuerzo máximo al que se encuentra sometida la estructura es de 4,693 MPa, el cual es menor a 250 MPa, siendo este último el esfuerzo de fluencia de perfiles estructurales según la norma ASTM A36 (Zamudio, 2013). Por último, en la figura 16 se muestra el diseño y las partes del soporte, las mismas están detallados en los planos en el anexo E.

Figura 15: Análisis de esfuerzo y deformación del soporte.



Fuente: Autores.

Figura 16: Soporte del Panel.



Fuente: Autor.

Con el material seleccionado de tipo acero galvanizado, se puede obtener la masa y el peso de cada elemento que conforma el soporte mediante el catálogo de IPAC, los cuales se muestran en la tabla 6, de esa manera se conoce el peso total.

Tabla 6: Pesos de los componentes del soporte.

Descripción	Cantidad	Masa Unitaria kg	Masa total kg	Peso total N
Marco estructural paneles, perfiles angulares	2	13.45	26.90	263.976
Perfil de aluminio de extrusión	2	1.38	2.76	27.075
Placas refuerzo Plancha negra comercial	8	0.54	17.28	169.52
TOTAL			46.95	460.57

Fuente: Autores

1.14.3 Cálculo de la energía para girar el soporte

Para obtener la fuerza que se requiere para mover la estructura bajo las condiciones que se plantearon en anteriores apartados, se utiliza el principio de trabajo y energía el cual nos permite conocer la variación del movimiento de un cuerpo. Mediante el uso de este principio se puede determinar también el trabajo necesario para mover la estructura. Donde se sabe que el sistema parte del reposo por lo que la energía cinética inicial es $T_1 = 0$, W_m es el trabajo ejercido por el motor, W_p el trabajo ejercido por el peso y T_2 es la energía cinética final.

Según la ecuación (1) se procede a realiza el cálculo de la energía debido a que este se encuentra en un movimiento de rotación dinámica, para ello se considera el eje que soporta más peso que es el eje 2, por lo tanto, el eje 1 va a requerir un poco menos de energía.

$$T_1 + \sum U_{1-2} = T_2 \quad (1)$$

$$0 + (W_m - W_p) = T_2$$

El trabajo del motor viene dado por la siguiente ecuación:

$$W_m = \tau(\Delta\theta) \quad (2)$$

Donde:

- $\Delta\theta$: Es el desplazamiento angular.
- τ : Representa el torque del motor.

Se sabe que el desplazamiento máximo de la estructura será de 60° desde su posición inicial, por ende, se obtiene dicho valor en radianes mediante conversión de unidades.

$$\Delta\theta = \frac{\pi}{180^\circ} (60^\circ) = \frac{\pi}{3} rad$$

Reemplazando los datos para el trabajo del motor se tiene:

$$W_m = \tau \cdot \frac{\pi}{3} rad$$

Por otro lado, se sabe que para obtener la energía cinética final T_2 se utiliza la ecuación (3):

$$T_2 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (3)$$

La velocidad lineal v se obtiene aplicando la ecuación:

$$v = \omega \cdot r \quad (4)$$

Para calcular la velocidad lineal se considera la velocidad angular que posee el soporte y este tendrá un Angulo que inicia desde los 60° hasta los 120° vistos desde la horizontal 0° , con un recorrido total para su giro de 60° ; es decir, realizara una rotación pequeña para captar la mayor cantidad de luminosidad para ubicar al sol, entonces lo realizara en 10s. Por lo que se obtiene la velocidad angular mediante la siguiente ecuación:

$$\omega = \frac{\theta}{t}$$

Donde:

- θ : es la posición angular y
- t : es el tiempo.

Transformando de grados a radianes se tiene:

$$60^\circ \frac{\pi}{180^\circ} = \frac{1}{3} \pi \text{ rad}$$

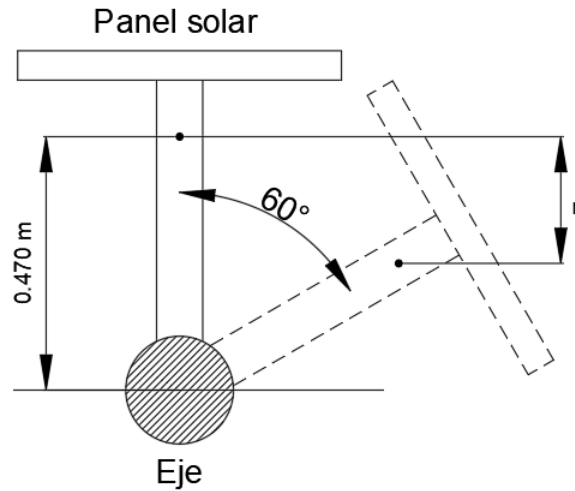
Al remplazar los datos obtenemos:

$$\omega = \frac{\frac{1}{3} \pi \text{ rad}}{10\text{s}}$$

$$\omega = \frac{\pi \text{ rad}}{30 \text{ s}} = 0.104 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Por otra parte, r es la distancia que tiene el centroide desde su posición inicial a su posición final, como se muestra en la figura 17. La obtención del centro de gravedad de la estructura se realizó mediante el software Inventor. Ver anexo C

Figura 17: Distancia del centroide desde su punto inicial a su posición final.



Fuente: Autores

Por lo tanto, mediante leyes trigonométricas se puede obtener el valor de r de la siguiente manera:

$$r = 0.470 \text{ m}(1 - \text{sen } 60^\circ)$$

$$r = 0.012 \text{ m}$$

$$v = 0.104 \text{ rad/s}(0.012)$$

$$v = 0.001248 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Finalmente se tiene los datos faltantes, los cuales se pueden obtener en el software que se muestra en el anexo C.

$$I = 32.140 \text{ Kg m}^2 \text{ (Software)}$$

$$m = 91.366 \text{ kg (Masa total de la estructura y los paneles solares)}$$

Con estos datos se puede obtener la energía cinética final:

$$T_2 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$$

$$T_2 = \frac{1}{2}(91.366 \text{ kg}) \left(0.001248 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 + \frac{1}{2}(32.140 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2) \left(0.104 \frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)^2$$

$$T_2 = 0.1738J$$

Reemplazando los datos obtenidos con anterioridad en la ecuación (1) se tiene:

$$0 + (W_m - W_p) = T_2$$

$$0 + \left(\frac{\pi}{3}\tau - 91.366(9.81)(0.062)\right) = 0.1738J$$

$$\tau = 53.23 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Finalmente se tiene que el torque requerido para mover la estructura es de 53.23 Nm.

1.14.4 Selección del motor

En base a los datos calculados se selecciona un motor que se adapte al sistema, el cual cumpla con una fuerza de torsión superior a 54 Nm y gire a 1 rpm. Existen varios tipos de motores que cumplen con estas necesidades por lo que se realiza una tabla comparativa para seleccionar el modelo más adecuado.

Tabla 7: Tipos de motores que cumplen con las características del sistema.

Tipo de motor	Características
Motorreductor coaxial de engranajes con reductor epicicloidal	<ul style="list-style-type: none"> • Par: 90 Nm • Potencia: 44 W • Velocidad: 0,7 : 1400 rpm • Modelo: PAE165M3 • Tensión Vac: 230 V

	<ul style="list-style-type: none"> • Costo: \$620
Reductor planetario	<ul style="list-style-type: none"> • Relación de reducción: 51 : 1 • Par: 92.3 Nm • Velocidad: 0 : 3000 rpm • Potencia: 740 W • Costo: \$ 550,03 • Tensión Vcc: 24 V • Modelo: GP 81 A
Motorreductores de ejes coaxiales	<ul style="list-style-type: none"> • Par: 2540 Nm • Potencia: 220 W • Velocidad: 0,62 rpm • Modelo: D.108-Z38-LA71C4 • Costo: \$620
Motor – reductor DC Sin Escobillas Brushless	<ul style="list-style-type: none"> • Par: 35 Nm • Velocidad: 0,4 : 50 rpm • Tensión: 24 V CC • Modelo: Serie FBB T3 • Costo: \$ 150

Fuente: Autores

En base a la tabla 7 se selecciona el modelo de la serie FBB T3 debido a que no se puede utilizar motores de corriente alterna, dichos motores cumplen con las bajas revoluciones requeridas a diferencia del motor escogido, por lo que para bajar aún más la velocidad de salida, se propone un sistema de transmisión de engranes de dientes rectos para que se adapte mejor a lo que se necesita mediante lo calculado, de igual manera, mecánicamente es de gran importancia para la seguridad del diseño para el seguidor, ya que sirve como un sistema de frenado para que el soporte no corra riesgo de caerse cuando el motor deje de funcionar. Por último, al realizar una comparación de costos con los diferentes modelos de la tabla, tenemos que es el más económico.

1.14.5 Cálculos para los engranes de diente rectos.

Los engranes del mecanismo son de gran importancia debido a que se encargan de

transmitir el movimiento generado por el motor reductor a cada uno de los ejes, permitiendo que la base del panel obtenga su movimiento en los cuatro ejes cardinales respectivamente a lo largo del día. Por lo tanto, se plantea utilizar engranes de dientes rectos ya que comúnmente se utilizan para ejes de transmisión.

Según (Budynas & Nisbett, 2018) “los engranes diente recto tienen dientes paralelos al eje de rotación y se emplean para transmitir movimiento de un eje a otro eje paralelo” (p. 640), y es empleado por su sencillez y fácil fabricación. A continuación, se realizará los cálculos respectivos para los engranes.

Se propone una transmisión de engranajes 2:1 debido a que la velocidad con la que rota el seguidor es muy baja, por lo tanto, mediante la relación de transmisión, se busca aumentar la velocidad que va a requerir el motor, así mismo se considera el tamaño donde van a estar ubicados para que no afecten el correcto funcionamiento.

1.14.5.1 Rueda conductora

Para el diseño de la rueda, se considera el acero ASSAB 7210 bonificado, debido a que este acero se utiliza para transmitir bajas revoluciones y un elevado torque. Este tipo de material se utiliza en la construcción de maquinarias, contando con un núcleo de alta resistencia (AXXECOL, 2020). Se realiza el cálculo de los parámetros requeridos para el diseño y construcción de la rueda. Como datos de entrada se tiene el diámetro primitivo $d_p = 220$ mm debido a que se busca ocupar poco espacio en la parte estructural del diseño, como dato se tiene un módulo $m = 11$. Con estos valores se obtiene los parámetros necesarios para el diseño y fabricación de la rueda, mostrados a continuación:

Numero de dientes.

$$N = \frac{d_p}{m} \quad (5)$$

$$N = \frac{220}{11}$$

$$N = 20$$

Diámetro exterior:

$$d_e = d_p + 2m \quad (6)$$

$$d_e = 220 + 2(11)$$

$$d_e = 242 \text{ mm}$$

Altura de diente:

$$h = 2.25 * m \quad (7)$$

$$h = 2.25 * 11$$

$$h = 24.75 \text{ mm}$$

Paso:

$$p = 3.1416 * m \quad (8)$$

$$p = 3.1416 * 11$$

$$p = 34.56 \text{ mm}$$

Diámetro Interior:

$$d_i = d_e - 2h \quad (9)$$

$$d_i = 242 - 2(23.837)$$

$$d_i = 194.326 \text{ mm}$$

Espesor del diente:

$$e = \frac{P}{2} \quad (10)$$

$$e = \frac{34.56}{2}$$

$$e = 17.279 \text{ mm}$$

Addendum

$$a = m \quad (11)$$

$$a = 11 \text{ mm}$$

Dedendum

$$d = m * 1.25 \quad (12)$$

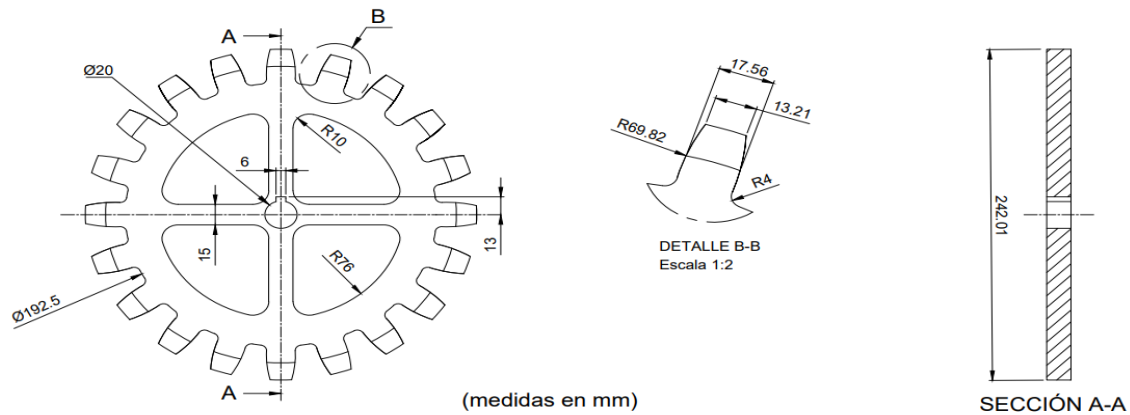
$$d = 11 * 1.25$$

$$d = 13.75 \text{ mm}$$

Se puede visualizar en la figura 18 la propuesta de diseño que se ha planteado para la rueda

del engranaje la cual permitirá reducir la velocidad de giro del motor hacia el eje.

Figura 18: Diseño de la rueda conductora.



Fuente: Autores

1.14.5.2 Cálculo del Piñón

Con los datos obtenidos previamente en los cálculos de la rueda se puede obtener las dimensiones requeridas para el diseño del piñón, se parte de un punto en común que es el módulo $m = 11$ el cual debe ser el mismo para la rueda conducida y el piñón conductor. De igual manera se considera un diámetro primitivo de 121mm debido a que se busca tener un sistema de engranes pequeño A continuación, se puede apreciar las diferentes fórmulas que se emplearon para este análisis. Posteriormente en la figura 19 se puede divisar el diseño propuesto para el piñón del engranaje con las medidas correspondientes.

Numero de dientes:

$$N = \frac{d_p}{m}$$

$$N = \frac{121}{11}$$

$$N = 11$$

Diámetro exterior:

$$d_e = d_p + 2m$$

$$d_e = 121 + 2(11)$$

$$d_e = 143 \text{ mm}$$

Altura de diente:

$$h = 2.167 * m$$

$$h = 2.167 * 11$$

$$h = 23.837 \text{ mm}$$

Paso:

$$p = 3.1416 * m$$

$$p = 3.1416 * 11$$

$$p = 34.56 \text{ mm}$$

Diámetro Interior:

$$d_i = d_e - 2h$$

$$d_i = 143 - 2(23.837)$$

$$d_i = 95.32 \text{ mm}$$

Espesor del diente:

$$e = \frac{p}{2}$$

$$e = \frac{34.56}{2}$$

$$e = 17.279 \text{ mm}$$

Addendum

$$a = m$$

$$a = 11 \text{ mm}$$

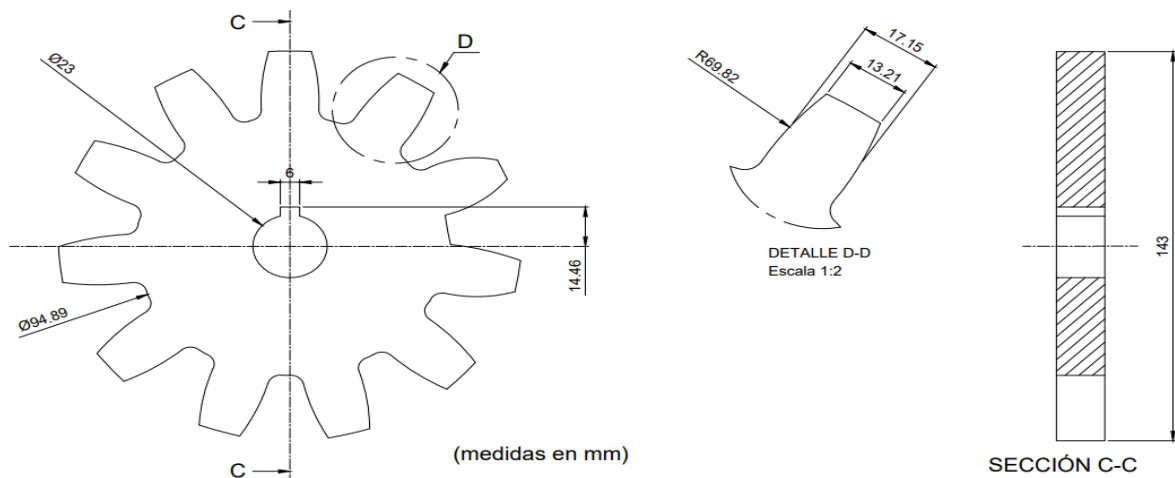
Dedendum

$$d = m * 1.25$$

$$d = 11 * 1.25$$

$$d = 13.75 \text{ mm}$$

Figura 19: Diseño del piñón.

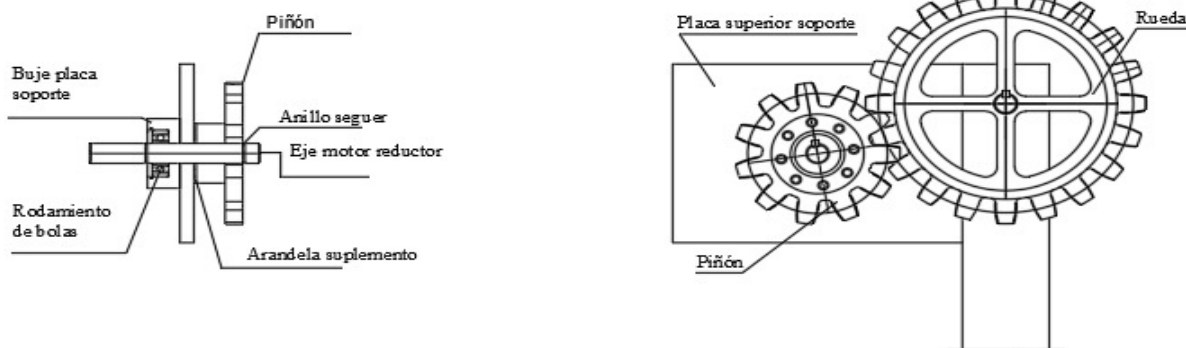


Fuente: Autores.

Debido a que el seguidor solar tiene dos ejes de transmisión, el sistema de engranes se repite

para cada uno de ellos. Esto es posible ya que no es necesario recalcular los parámetros de diseño para un nuevo sistema de engranajes puesto a que no varían de manera considerable, modificando únicamente las dimensiones del eje por las diferentes cargas que soportan. En la siguiente figura se muestra los elementos que contiene el sistema de transmisión de engranajes rectos que se utilizarán para el montaje y sujeción de los engranes. Así mismo la tabla 8 muestra los resultados obtenidos para el diseño del engrane, con esta información se puede manufacturar mediante procesos de mecanizado.

Figura 20: Elementos que conforman el ensamble de los engranes.



Fuente: Autores.

Tabla 8: Datos calculados para la elaboración de la rueda conductora.

Denominación	Rueda conductora (mm)	Piñón (mm)
Diámetro primitivo: d	220,00	121,00
Modulo: m	11,00	11,00
Addendum: a	11,00	11,00
Deddendum: d	13,75	13,75
Profundidad diente: h	24,75	24,75
Paso circular diente: p	34,56	34,56
Espesor diente: e	17,28	17,28
Numero dientes: z	20,00	11,00
Diámetro exterior: d_e	242,00	143,00
Diámetro interior: d_i	194.326	95.32

Fuente: Autores

1.14.6 Calculo eje de transmisión

El eje es el elemento de igual forma es parte esencial, para el diseño y funcionamiento del seguidor solar. Se debe indicar que, el eje es el elemento que permite la transmisión del movimiento mediante un sistema de engranajes conectados a un motor encargado de generar la rotación, en este caso el eje que se contempla como la parte más crítica de la estructura debido que soporta el peso de los paneles.

Para poder conseguir una adecuada optimización del diseño del eje, se determina el diámetro menor que soporte la carga. Tal como lo presenta Norton R. (2011) “presenta el método estándar ANSI/ASME para el diseño de ejes de transmisión el cual se publicó con el código B106.1M-1985. Este presenta un procedimiento simplificado para el diseño de ejes, donde supone que la carga es de ciclo de flexión invertida (componente media de la flexión igual a cero) y torque constante (componente del torque alternante igual a cero) a un nivel que genera esfuerzos por debajo de la resistencia a la fluencia por torsión del material” (pag. 419). Donde para obtener el diámetro mínimo requerido para un eje sometido a torsión continua y flexión se utiliza la siguiente ecuación:

$$d = \left[\frac{32N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t M_a}{S'_n}\right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T}{S_y}\right)^2} \right]^{1/3} \quad (13)$$

Donde:

d : Diámetro mínimo requerido

N : Factor de diseño

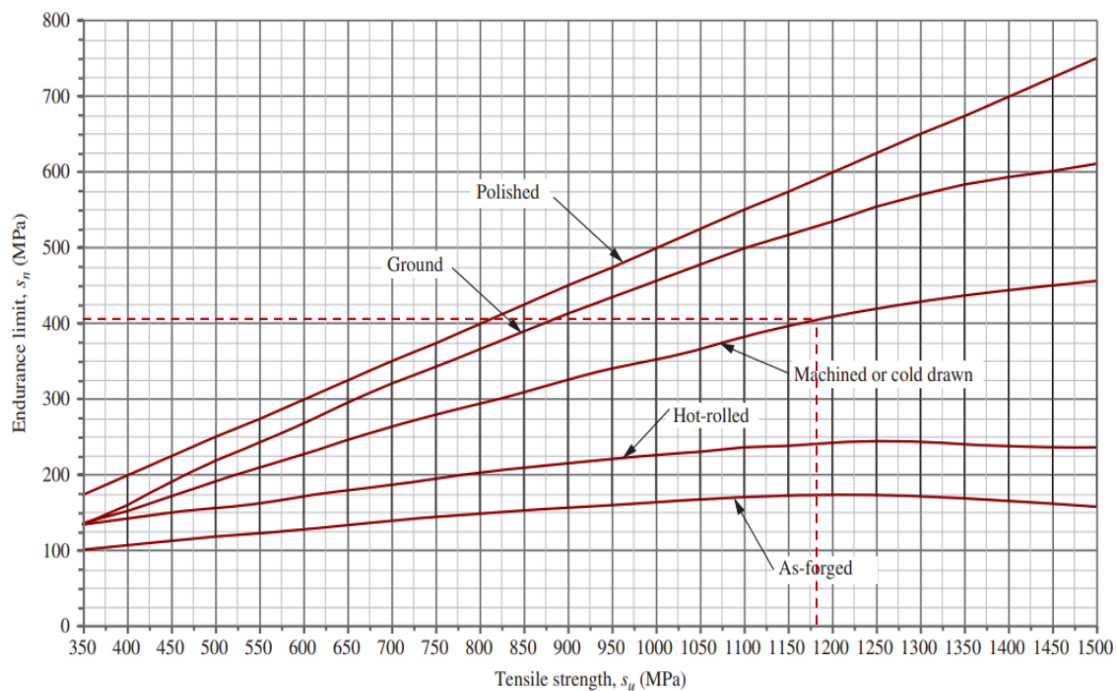
K_t : factor de concentración de esfuerzos

M_a : momento flexionante combinado

S'_n : resistencia a la fatiga
 T : par torsional
 S_y : resistencia a la fluencia

Al mismo tiempo se propone utilizar el material acero AISI 4340 OQT 1000 debido a que es comúnmente utilizado para la manufactura de ejes de transmisión, brazo de dirección, ejes de bombas, etc. Según el catálogo del anexo B este acero tiene una resistencia a la fluencia y a la tensión de $S_y = 1090$ MPa y $S_u = 1180$ MPa respectivamente. También posee un porcentaje de elongación igual al 16%. Quiere decir que el material tiene buena ductilidad. Se procede a obtener la resistencia a la fatiga (S_n) en función a la resistencia última del material, figura 21.

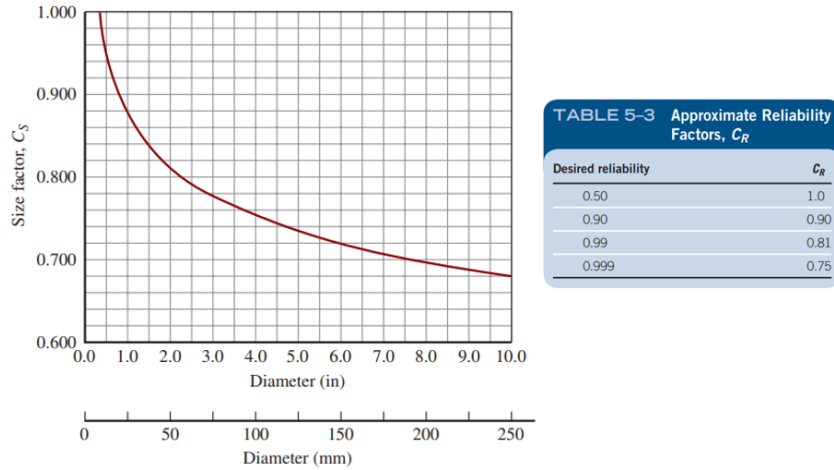
Figura 21: Resistencia a la fatiga S_n en función de la resistencia a la tensión, para acero forjado con varias condiciones de superficie.



Fuente: (Mott R. , 2018)

Se obtuvo un valor de $S_n = 410$ MPa. De igual manera el factor por tamaño (C_s) y el factor de confiabilidad o decisión de diseño (C_r) se toma de la figura 22, donde se estima que $C_s = 0.75$ y $C_r = 0.8$.

Figura 22: Factor por tamaño.



Fuente: (Mott R. , 2018)

Con los datos obtenidos anteriormente se procede a calcular la resistencia a la fatiga modificada S'_n :

$$S'_n = S_n C_s C_r = (410 \text{ MPa})(0.75)(0.81) = 249.075 \text{ Mpa}$$

Según Mott (2018) “Para determinar el factor de diseño N en materiales dúctiles se debe tomar en cuenta los siguientes lineamientos:

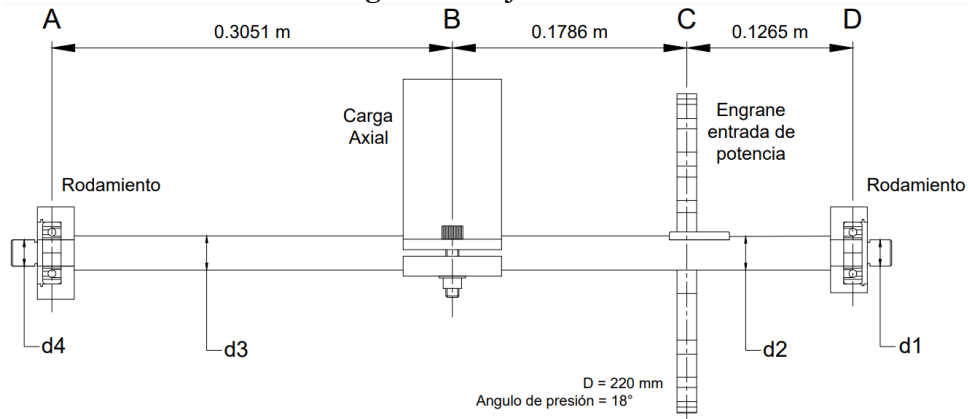
1. **N = 1.25 a 2.0.** El diseño de estructuras bajo cargas estáticas, para las que haya un alto grado de confianza en todos los datos del diseño.
2. **N = 2.0 a 2.5.** Diseño de elementos de máquina bajo cargas dinámicas con una confianza promedio en todos los datos de diseño. Es la que se suele emplear en la

solución de los problemas de este libro.

3. **N = 2.5 a 4.0.** Diseño de estructuras estáticas o elementos de máquina bajo cargas dinámicas con incertidumbre acerca de las cargas, propiedades de los materiales, análisis de esfuerzos o el ambiente.
4. **N = 4.0 o más.** Diseño de estructuras estáticas o elementos de máquinas bajo cargas dinámicas, con incertidumbre en cuanto a alguna combinación de cargas, propiedades del material, análisis de esfuerzos o el ambiente. El deseo de dar una seguridad adicional a componentes críticos puede justificar también el empleo de estos valores (pag. 185).

También Mott (2018) menciona en su texto de diseño de elementos de máquinas que “los valores recomendados para el factor de diseño es $N=2.0$ para ejes, donde hay una confianza promedio en los datos de resistencia del material y de las cargas” (pag. 546). Posteriormente se realiza un diagrama del eje mostrado en la figura 23, donde se puede ver cada sección entre los puntos A, B, C y D. En cada sección el diámetro puede variar dependiendo de las cargas aplicadas. Por lo que se procede a obtener el diámetro de cada sección.

Figura 23: Eje de transmisión.

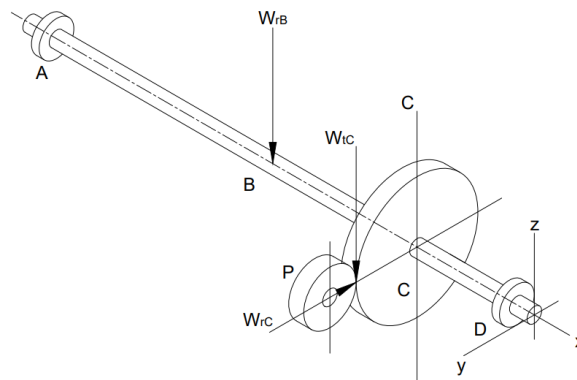


Fuente: Autores

1.14.6.1 Dimensionamiento del eje 1

Luego de alcanzar los datos anteriormente calculados, se procede a ejecutar un análisis estático del eje 1 para establecer las reacciones en los puntos de apoyo y las fuerzas aplicadas (Ver figura 24). Donde W_{rb} es el peso de la estructura y de los paneles que soporta el primer eje, W_{rc} es la fuerza radial del piñón, W_{tc} es la fuerza tangencial de la rueda, por último, A y D son los apoyos con rodamientos.

Figura 24: Cargas aplicadas en el eje 1.



Fuente: Autores

Para obtener el peso total que soporta el primer eje (W_{rb}), se utiliza el valor de la sumatoria

total de elementos considerados en la tabla 6 con un peso equivalente a 460.57 N, adicionalmente se agrega la carga ejercida por el peso del panel, cuyo modelo se propuso anteriormente con un valor unitario de 223.668 N y se propone la utilización de dos paneles. Entonces la sumatoria se presenta a continuación:

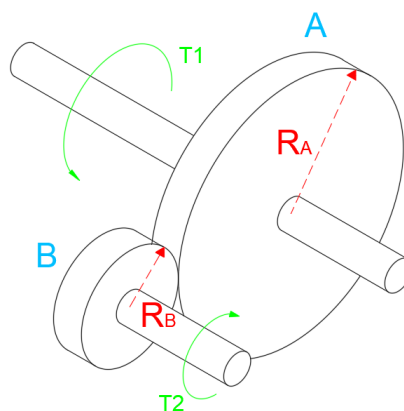
$$W_{rb} = \text{peso estructura} + 2 \cdot (\text{peso panel})$$

$$W_{rb} = 460.57 \text{ N} + 2 \cdot (223.668) \text{ N}$$

$$W_{rb} = 907.906 \text{ N}$$

Mediante la relación de transmisión que se observa en la figura 25 de los engranes de dientes rectos se halla el torque de entrada que requiere el motor reductor para que el sistema funcione adecuadamente, para ello se utilizan los valores donde la rueda tiene un diámetro primitivo de 220mm y el piñón 121mm y el valor del torque que requiere el sistema que previamente se calculó obteniendo un resultado de 53.23 Nm, reemplazando en la ecuación (14) tenemos:

Figura 25: Diagrama de la transmisión del eje al engrane



Fuente: Autores

$$T_1 = F \cdot R_A \quad (14)$$

$$T_2 = F \cdot R_B$$

$$\frac{T_1}{R_A} = \frac{T_2}{R_B}$$

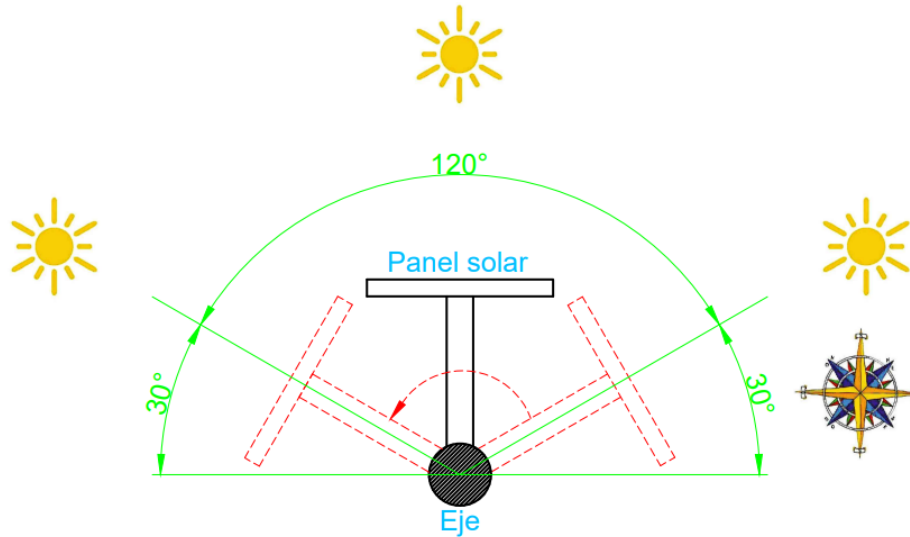
$$T_2 = \frac{T_1 \cdot R_B}{R_A}$$

$$T_2 = \frac{53.23 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot 60.5}{121}$$

$$T_2 = 26.81 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Así mismo se calcula la velocidad a la que rota el eje del seguidor, para ello se analiza el recorrido que debe realizar los paneles solares durante el día. El panel solar deberá mantenerse perpendicular a los rayos del sol (Ver figura 26), teniendo un Angulo de trabajo que inicia desde los 30° hasta los 150° vistos desde la horizontal 0°, con un recorrido total para su giro de 120°; es decir, cuando llegue la noche y no exista luminosidad para ser captada por los sensores, entonces el panel retorna desde su posición final (120°) a su posición inicial (0°) durante un periodo de 60 segundos, así mismo si el panel requiere rotar 60° para ubicar al sol entonces lo realizara en mismo periodo. Por lo que se obtiene la velocidad angular mediante la ecuación (15).

Figura 26: Posicionamiento del panel solar con respecto al eje.



Fuente: Autores

$$\omega = \frac{\theta}{t} \quad (15)$$

Donde:

- θ : es la posición angular y
- t : es el tiempo.

Transformando de grados a radianes se tiene:

$$120^\circ \frac{\pi}{180^\circ} = \frac{2}{3} \pi \text{ rad}$$

Al remplazar los datos obtenemos:

$$\omega = \frac{\frac{2}{3} \pi \text{ rad}}{60s}$$

$$\omega = \frac{\pi \text{ rad}}{90 \text{ s}} = 0.0349 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Posteriormente a través de la conversión de unidades se transforma la velocidad angular a

revoluciones por minuto debido a que en las especificaciones técnicas de los motores la velocidad generalmente se mide en estas unidades.

$$\frac{\pi \text{ rad}}{90 \text{ s}} \cdot \frac{1 \text{ rev}}{2\pi \text{ rad}} \cdot \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 0.33 \frac{\text{rev}}{\text{min}}$$

Debido a que las revoluciones por minuto que necesita el eje son muy bajas se propone el uso de engranajes rectos para aumentar las revoluciones y facilitar la selección de un motor adecuado. De este modo, la velocidad obtenida se comparte con el engrane de transmisión como se observa en la figura 25. Por lo que, para calcular la velocidad de entrada que requiere el eje se realiza una relación de transmisión como se aprecia a continuación:

$$N_A \cdot Z_A = N_B \cdot Z_B \quad (16)$$

$$0.33 \text{ rpm} \cdot 20 = N_B \cdot 11$$

$$N_B = 0.6 \text{ rpm}$$

En base al torque calculado de 26.61 Nm y la velocidad que requiere el Piñón que es 0,6 rpm, se tiene que el motor propuesto modelo FBB T3 que corresponde a la marca MELLOR (ver figura 27), cuenta con un par máximo de 35 N · m, el cual puede variar porque su velocidad es controlable mediante señales de impulso PWM. De igual manera la velocidad se puede ajustar a la requerida por el sistema que es de 0.6 rpm, ya que cuenta con un rango entre 0.4 a 50 rpm. Debido a que es difícil encontrar motores con revoluciones muy bajas y torques elevados, este tipo de motor reductor propuesto es el ideal y se considera debido a que el torque es un dato importante para iniciar con los cálculos para el dimensionamiento de los ejes. A continuación, se tiene las características técnicas:

Figura 27: Serie FBB T3 motor – reductor DC sin escobillas



Fuente: (Mellor, 2019)

- Tensión Nominal 24 V CC
- Bidireccional
- Control de velocidad por PWM
- Resolución de señal de velocidad: seis pulsos por revolución
- Niveles excepcionalmente bajos de ruido
- Larga vida
- Rango de velocidad: 0,4 - 50 rpm
- Par máximo: 35 Nm
- Potencia 2.52 Watts
- Corriente 0.105 A

Este mismo cuenta con un motor Brushless de corriente continua sin escobillas que presenta un rotor interior con electrónica integrada para un control de la velocidad suave y sin saltos, su funcionamiento es excepcionalmente silencioso con una vida más larga que la de los motores de escobillas. Estos motores BLDC de alta eficiencia son adecuados para un funcionamiento continuo y son suministrados solos o montados en cajas de engranajes - de motor-reductora serie FBB T3 y serie UBB T6 para rangos de velocidad de salida y par, este a su vez cuenta con las siguientes características técnicas dadas por el fabricante:

- Tensión Nominal 24 V CC
- Bidireccional
- Control de velocidad por PWM
- Resolución de señal de velocidad: seis pulsos por revolución
- Protección de bloqueo rotor
- Niveles excepcionalmente bajos de ruido
- Vida hasta 10.000 horas dependiendo del uso
- 125 +/- 15°C temperatura de trabajo del protector térmico

Luego de seleccionar el motor se procede a determinar cuanta potencia precisa, para mover el eje utilizando la siguiente ecuación:

$$P = M \cdot \omega \quad (17)$$

Donde:

P : potencia requerida

M : Par torsional del motor

ω : Velocidad en rad/s

Reemplazando los datos ya obtenidos con anterioridad se tiene:

$$P = 35 \text{ Nm} \cdot 0.0349 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$P = 1.22 \text{ W}$$

A continuación, se va a determinar las fuerzas sobre el engrane B que se aprecia en la figura 23 mediante la ecuación (18), para esto utilizamos el torque máximo que nos da el motor reductor que es de 35 Nm y se divide para el diámetro del piñón que es 121mm.

$$T_1 = \frac{T_2 \cdot R_A}{R_B}$$

$$T_1 = \frac{35 \cdot 121}{60.5}$$

$$T_1 = 70 \cdot Nm$$

$$W_{tc} = \frac{2T}{D} \quad (18)$$

$$W_{tc} = \frac{2(70 N \cdot m)}{0.121 m} = 1157.024 N$$

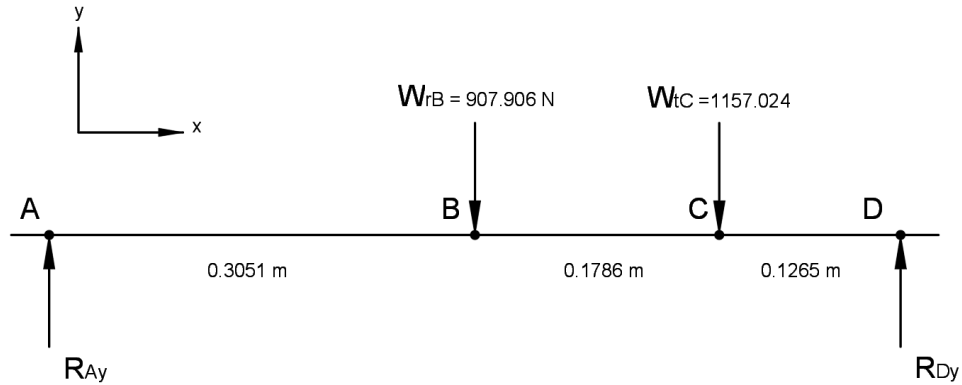
Para proceder a calcular la fuerza radial del engran  W_{rc} se aplica la ecuación (19), Para ejecutar esta acción se requiere conocer el ángulo de presión. Por ende, Budynas & Nisbett (2018) mencionan que “el valor para engranes rectos puede variar entre 20 y 25  por lo regular” (p.659). En este caso se ha escogido un valor de 20  para la realización del cálculo de la fuerza radial.

$$W_{rc} = W_{tc}(\tan \phi) \quad (19)$$

$$W_{rc} = 1157.024 N(\tan 20^\circ) = 421.12 N$$

Al mismo tiempo se establece un análisis est tico en el eje **Y** para encontrar las reacciones en los apoyos que en este caso son en los puntos **A** y **D**, donde van ubicados los rodamientos. (figura 28)

Figura 28: Diagrama de cuerpo libre del eje 1 en dirección Y.



Fuente: Autores.

A continuación, se realiza una sumatoria de fuerzas en el eje Y:

$$\sum F_y = 0$$

$$R_{Ay} + R_{Dy} - W_{rB} - W_{tc} = 0$$

$$R_{Ay} = -R_{Dy} + W_{rB} + W_{tc}$$

De igual manera para encontrar el valor de las reacciones en **D** se realiza sumatoria de momentos en el punto **A**.

$$\sum M_A = 0$$

$$R_{Dy}(0.6102 \text{ m}) - W_{rB}(0.3051 \text{ m}) - W_{tc}(0.4837 \text{ m}) = 0$$

$$R_{Dy}(0.6102 \text{ m}) - 907.906\text{N}(0.3051 \text{ m}) - 1157.024\text{N}(0.4837 \text{ m}) = 0$$

$$R_{Dy} = 1371.11 \text{ N}$$

Si reemplazamos la ecuación anterior obtendremos el valor de R_{Ay} :

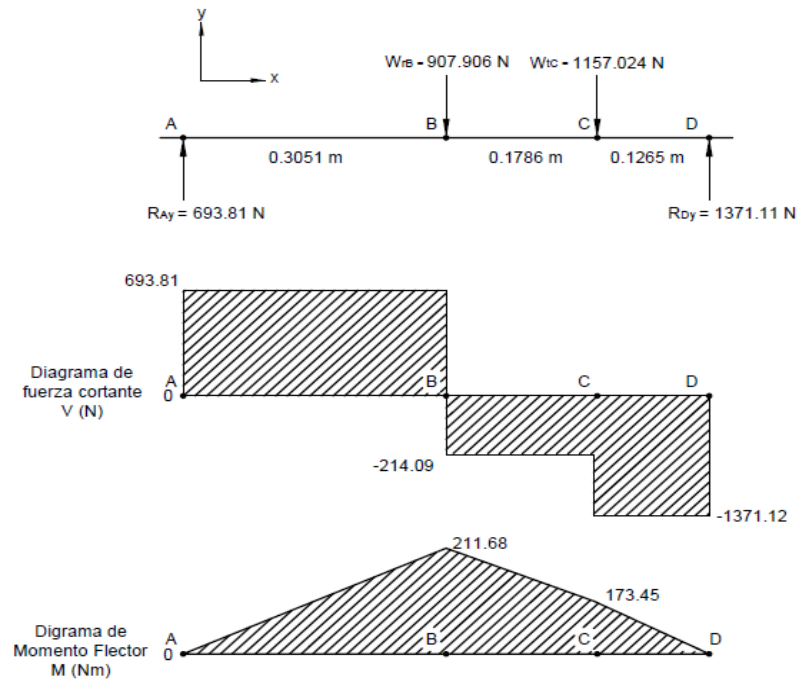
$$R_{Ay} = -R_{Dy} + W_{rB} + W_{tc}$$

$$R_{Ay} = -1371.11 N + 907.906 N + 1157.024 N$$

$$R_{Ay} = 693.82 N$$

Por consiguiente, se muestran los diagramas de momento flector y fuerza cortante, obteniendo los resultados mostrados en la figura 29.

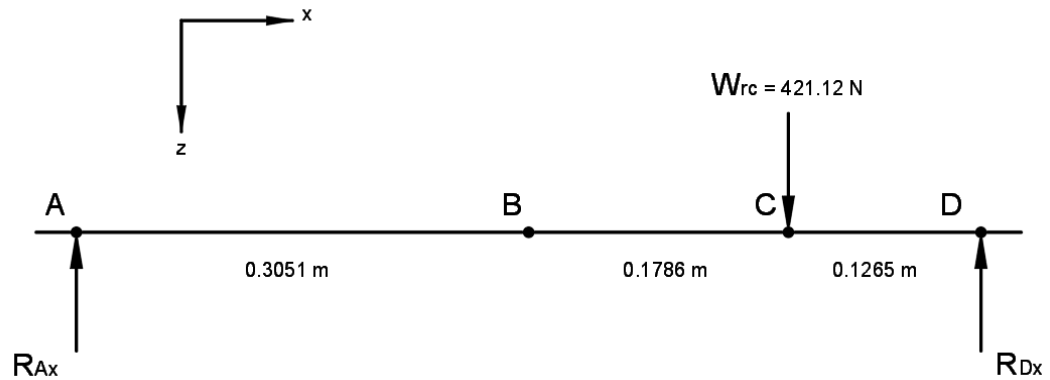
Figura 29: Diagramas de fuerza cortante y momento flector en el eje 1 en dirección Y.



Fuente: Autores

A continuación, se plasma un diagrama de fuerzas en el eje X para determinar las reacciones en los apoyos presentados en la figura 30.

Figura 30: Diagrama de cuerpo libre del eje 1 en dirección X.



Fuente: Autores.

Se procede a realizar una sumatoria de fuerzas en el eje X:

$$\sum F_x = 0$$

$$R_{Ax} + R_{Dx} - W_{rc} = 0$$

$$R_{Ax} = -R_{Dx} + W_{rc}$$

Nuevamente se efectúa la sumatoria de momentos en el punto A para hallar las reacciones.

$$\sum M_A = 0$$

$$R_{Dx}(0.6102 \text{ m}) - W_{rc}(0.4837 \text{ m}) = 0$$

$$R_{Dx}(0.6102 \text{ m}) - 421.12 \text{ N}(0.4837 \text{ m}) = 0$$

$$R_{Dx} = 333.82 \text{ N}$$

Se obtiene el valor de R_{Ax} :

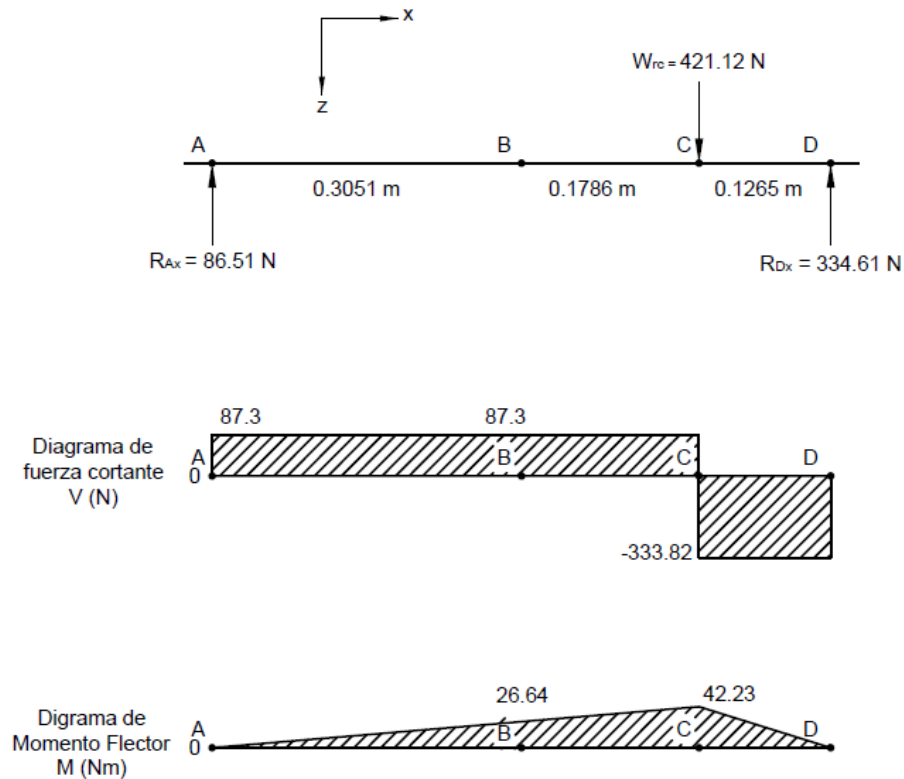
$$R_{Ax} = -R_{Dx} + W_{rc}$$

$$R_{Ax} = -333.82N + 421.12 N$$

$$R_{Ax} = 87.31N$$

Por consiguiente, se plasman los momentos de momento flector y fuerza cortante obteniendo los resultados mostrados en la figura 31.

Figura 31: Diagrama de esfuerzo cortante y momento flector del eje 1 en dirección X.



Fuente: Autores.

Con los datos obtenidos en los diagramas de fuerza cortante y momento flector se procede a realizar los cálculos para los diámetros requeridos en cada eje de transmisión.

- **Diámetro d1**

En donde se considera que, en el punto D no existe momentos torsores ni flectores. Mas, sin

embargo, existe una fuerza cortante vertical, igual a la reacción en el rodamiento. Lo que con lleva a que se calcula la fuerza cortante V con el diámetro d_1 por medio de las reacciones en los planos X y. Donde el factor de seguridad N es 2, mientras que K_t es el factor de concentración, siendo este de 2.5, debido a que se tendrá un chaflán agudo: $V_D = \sqrt{(1371.11 N)^2 + (334.11 N)^2} = 1411.34 N$

$$d_1 = \sqrt{\frac{2.94(V_D)(N)(K_t)}{S'_n}}$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{2.94(1411.34 N)(2)(2.5)}{249.075 MPa}} = 0.009126 m = 9.126 mm$$

- **Diámetro d_2**

Debido a que esta sección del eje contiene el engrane entonces la concentración de esfuerzos K_t es 2.0 por el chavetero que tiene.

$$M_C = \sqrt{(42.23 N \cdot m)^2 + (173.45 N \cdot m)^2} = 178.516 N \cdot m$$

$$d_2 = \left[\frac{32N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t M_C}{S'_n}\right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T}{S_y}\right)^2} \right]^{1/3}$$

$$d_2 = \left[\frac{32(2)}{\pi} \sqrt{\left(\frac{2(178.516 N \cdot m)}{249.075 MPa}\right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{70 N \cdot m}{1090 MPa}\right)^2} \right]^{1/3}$$

$$d_2 = 0.03080 m = 30.80 mm$$

- **Diámetro d3**

Para calcular el diámetro d3 se aplica d3 aplicamos la ecuación (20). En donde el punto B está sometido a una carga axial por ende no existe par torsional, ya que no hay motor. Por consiguiente, se considera que la concentración de esfuerzos de K_t es de 2.0 por el chavetero.

$$M_C = \sqrt{(26.64 N \cdot m)^2 + (211.68 N \cdot m)^2} = 213.349 N \cdot m$$

$$d = \left[\frac{32N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t M}{S'_n}\right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T}{S_y}\right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (20)$$

$$d_3 = \left[\frac{32N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t M}{S'_n}\right)^2} \right]^{1/3}$$

$$d_3 = \left[\frac{32(2)}{\pi} \sqrt{\left(\frac{2(213.349 N \cdot m)}{249.075 MPa}\right)^2} \right]^{1/3}$$

$$d_3 = 0.03267m = 32.67 mm$$

- **Diámetro d4**

Con respecto al diámetro d4 se hace un análisis. Este parte desde el punto A y se realiza un cálculo en el rodamiento, en donde se genera una fuerza cortante vertical. Lo que con lleva a calcular la fuerza cortante V con el diámetro d4 por medio de las reacciones en los planos X y Y. Considerando al factor de seguridad N como 2, mientras que K_t es el factor de concentración, este es de 2.5 debido a que tendrá un chaflán agudo. A continuación, se visualiza el cálculo.:

$$V_A = \sqrt{(86.51 \text{ N})^2 + (693.81 \text{ N})^2} = 699.18 \text{ N}$$

$$d_4 = \sqrt{\frac{2.94(V)(N)(K_t)}{S'_n}}$$

$$d_4 = \sqrt{\frac{2.94(699.18 \text{ N})(2)(2.5)}{249.075 \text{ MPa}}} = 0.006423 \text{ m} = 6.42 \text{ mm}$$

Para obtener el esfuerzo máximo se ejecuta la ecuación (21).

$$\sigma_m = \frac{|M|c}{I} \quad (21)$$

Donde $|M|$ representa el módulo del momento resultante en el punto B y c representa el radio del eje donde se aplica la fuerza W_{rB} , es decir que $c = \frac{d^3}{2}$. Por otro lado, para obtener la inercia I se utiliza la ecuación (22). Donde r de igual manera representa el radio del eje donde se produce el momento, por lo que $r = c$.

$$I = \frac{\pi}{4} r^4 \quad (22)$$

$$I = \frac{\pi}{4} 0.01633^4$$

$$I = 5.58 \times 10^{-8} \text{ m}^4$$

Si reemplazando los datos obtenidos en la ecuación (21) se tendrá:

$$\sigma_m = \frac{|213.349|0.01633 \text{ m}}{5.58 \times 10^{-8} \text{ m}^4}$$

$$\sigma_m = 62.379 \text{ Mpa}$$

Adicional al cálculo se agrega un factor de seguridad de 1.5 para encontrar el esfuerzo último soportado por el eje utilizando la siguiente ecuación (23). En la tabla 9 se podrá visualizar de manera compacta los resultados obtenidos de los cálculos para cada uno de los diámetros.

$$FS = \frac{\sigma_u}{\sigma_m} \tag{23}$$

$$\sigma_u = FS \cdot \sigma_m$$

$$\sigma_u = 62.379 \cdot 2$$

$$\sigma_u = 124.759 \text{ MPa}$$

Tabla 9: Diámetros calculados para cada sección respectiva del eje 1 sometido bajo una carga a 0°.

Diámetros calculados para el eje 1	
d1	9.126 mm
d2	30.80 mm
d3	32.67 mm
d4	6.42 mm

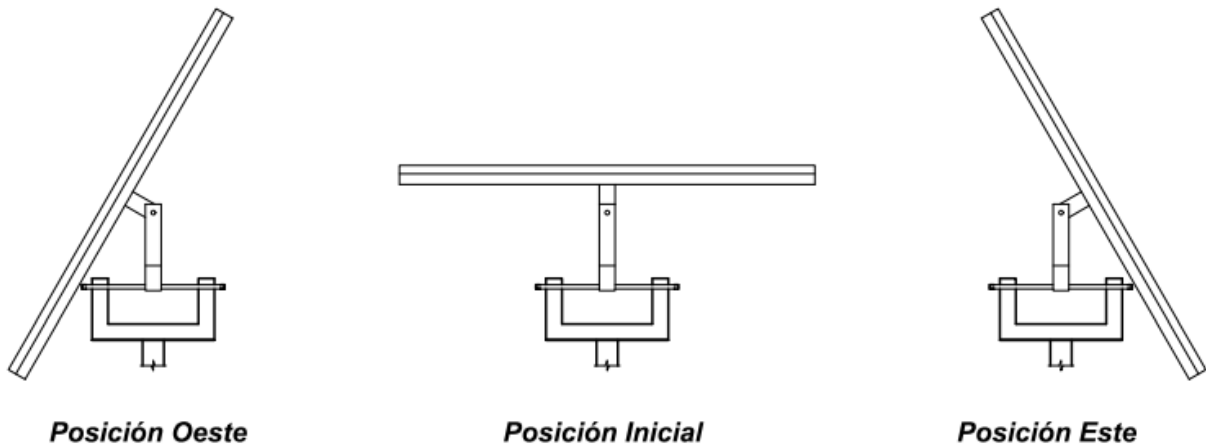
Fuente: Autores

1.14.6.2 Dimensionamiento del eje 1 rotado 60°

Para calcular el dimensionamiento del eje 1, se toma en cuenta que va a rotar un máximo de 60° en dirección Este – Oeste. Considerando al eje 1 el de mayor grado de rotación y el elemento más crítico de la estructura. Estos movimientos incrementan la carga aplicada en el eje. Por lo que se debe emplear los cálculos correspondientes para obtener un diseño acorde a lo planeado, rigiéndose en los diámetros óptimos para el sistema. En el siguiente grafico se puede contemplar más detalladamente como se produce estos movimientos. (Figura 32). En cambio, en la imagen 33

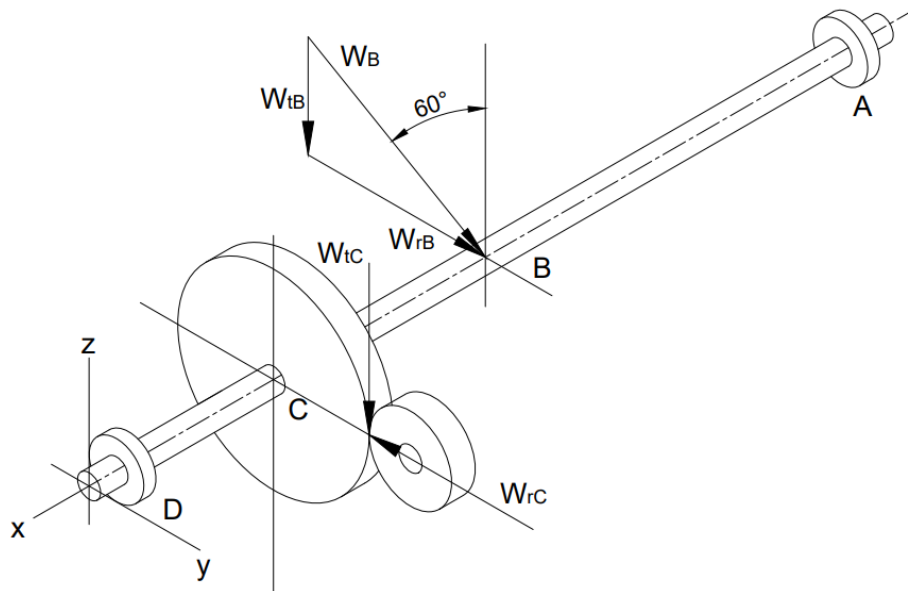
se revela el diagrama de cuerpo libre del segundo eje con sus respectivas cargas y reacciones, este tiene una rotación de 60°

Figura 32: Posicionamiento del eje 1.



Fuente: Autores

Figura 33: Diagrama de cuerpo libre del eje 1 bajo una carga aplicada en dirección 60° .



Fuente: Autores

Se obtiene la componente W_{rB} de la carga aplicada en el punto B, donde W_{tB} es el peso de

los componentes de la parte superior del eje, siendo equivalente a 906.907 N.

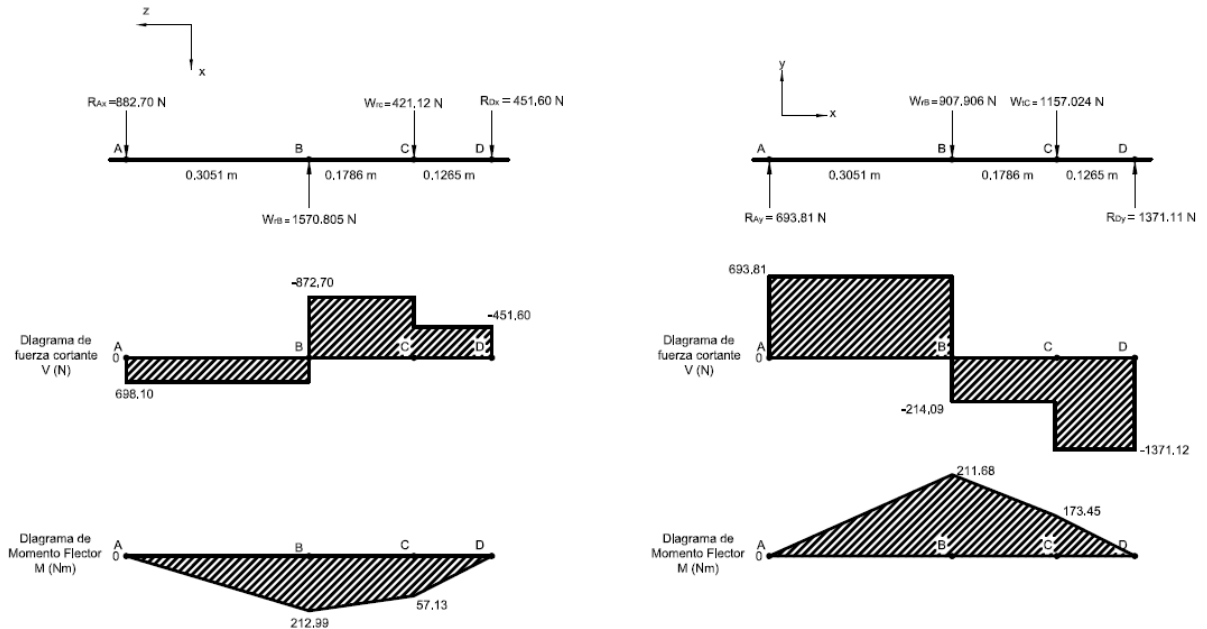
$$\tan(60^\circ) = \frac{W_{rB}}{W_{tB}}$$

$$W_{rB} = W_{tB}(\tan(60^\circ))$$

$$W_{rB} = 906.907(\tan(60^\circ)) = \mathbf{1570.809N}$$

Se consigue asimismo las reacciones en los rodamientos ubicados en los puntos A y D y los diagramas de esfuerzo cortante y momento flector (Ver figura 34).

Figura 34: Diagramas de esfuerzo cortante y momento flector del eje 1 en dirección X y Y.



Fuente: Autores

Para alcanzar los diámetros correspondientes para cada sección del eje, se aplica los mismos miramientos, expuestos anteriormente. A continuación, se presenta cada una de las ecuaciones empleadas en los diferentes diámetros.

Diámetro d1

$$V_D = \sqrt{(451.60 \text{ N})^2 + (1371.11 \text{ N})^2} = 1443.56 \text{ N}$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{2.94(V_D)(N)(K_t)}{S'_n}}$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{2.94(1443.56 \text{ N})(2)(2.5)}{249.075 \text{ MPa}}} = 0.00923 \text{ m} = 9.23 \text{ mm}$$

- Diámetro d2

$$M_C = \sqrt{(57.13 \text{ N} \cdot \text{m})^2 + (173.45 \text{ N} \cdot \text{m})^2} = 182.61 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$d_2 = \left[\frac{32N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t M_C}{S'_n}\right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T}{S_y}\right)^2} \right]^{1/3}$$

$$d_2 = \left[\frac{32(2)}{\pi} \sqrt{\left(\frac{2(182.61 \text{ N} \cdot \text{m})}{249.075 \text{ MPa}}\right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{70 \text{ N} \cdot \text{m}}{1090 \text{ MPa}}\right)^2} \right]^{1/3}$$

$$d_2 = 0.0310 \text{ m} = 31 \text{ mm}$$

- Diámetro d3

$$M_C = \sqrt{(212.99 \text{ N} \cdot \text{m})^2 + (211.68 \text{ N} \cdot \text{m})^2} = 300.28 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$d = \left[\frac{32N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t M}{S'_n}\right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T}{S_y}\right)^2} \right]^{1/3} \quad (24)$$

$$d_3 = \left[\frac{32N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t M}{S'_n}\right)^2} \right]^{1/3}$$

$$d_3 = \left[\frac{32(2)}{\pi} \sqrt{\left(\frac{2(300.28 \text{ N} \cdot \text{m})}{249.075 \text{ MPa}}\right)^2} \right]^{1/3}$$

$$d_3 = 0.0366 \text{ m} = 36.6 \text{ mm}$$

- **Diámetro d4**

$$V_A = \sqrt{(698.10 \text{ N})^2 + (693.81 \text{ N})^2} = 984.23 \text{ N}$$

$$d_4 = \sqrt{\frac{2.94(V)(N)(K_t)}{S'_n}}$$

$$d_4 = \sqrt{\frac{2.94(984.23 \text{ N})(2)(2.5)}{249.075 \text{ MPa}}} = 0.00762 \text{ m} = 7.62 \text{ mm}$$

Por último, mediante la ecuación se realiza el cálculo del esfuerzo máximo que soportara el eje con los diámetros previamente diseñados

Esfuerzo Máximo

$$\sigma_m = \frac{|M|c}{I}$$

Donde el valor de la inercia corresponde a:

Inercia

$$I = \frac{\pi}{4} r^4$$

$$I = \frac{\pi}{4} 0.01812^4$$

$$I = 8.46 \times 10^{-8} m^4$$

Reemplazando en la ecuación anterior tenemos:

$$\sigma_m = \frac{|300.28| 0.01812 m}{8.46 \times 10^{-8} m^4}$$

$$\sigma_m = 64.26 \text{ Mpa}$$

Adicional al cálculo se agrega un factor de seguridad de 1.5 para halla el esfuerzo ultimo soportado por el eje.

Esfuerzo ultimo

$$FS = \frac{\sigma_u}{\sigma_m}$$

$$\sigma_u = 64.26 \cdot 2$$

$$\sigma_u = 128.5 \text{ Mpa}$$

En la tabla 10 se muestra de manera compacta los resultados obtenidos de los cálculos para cada uno de los diámetros.

Tabla 10: Diámetros calculados para cada sección del eje sometido a una carga con una inclinación a 60°.

Dimensionamiento del eje 1	
d1	9.054 mm
d2	31 mm
d3	36.6 mm
d4	7.62 mm

Fuente: Autores

1.14.6.3 Dimensionamiento del eje 2

El eje 2 mantiene la misma distribución de fuerzas y reacciones que el eje 1 con la única diferencia que a este se le añade el peso de los componentes del soporte abatible donde se considera algunos elementos mostrados en la tabla 11 que para más información se presenta en el diseño en el anexo E.

Tabla 11: Peso de los componentes que conforman el ensamblaje del eje 2.

Descripción	Cantidad	Peso Unitario kg	Peso total kg	Peso total N
Soporte "U"	1	6.52	6.52	63.96
Cartela superior refuerzo	2	0.32	0.64	6.28
Columna central	1	1.76	1.76	17.27
Placa superior soporte	1	4.24	4.24	41.59
Buje placa soporte	1	1.1	1.1	10.79
Buje "U"	2	0.85	1.7	16.68
Cojinete bolas	3	0.11	0.33	3.24
Pernos Allen	4	0.005	0.02	0.20
		TOTAL	16.31	160.00

Fuente: Autores

De igual manera que para el eje 1, se transforma la velocidad angular calculada previamente en el cálculo de la energía que requiere el soporte del panel de 0.14 rad/s, se transforma a revoluciones por minuto debido a que en las especificaciones técnicas de los motores la velocidad generalmente se mide en estas unidades.

$$\frac{\pi \text{ rad}}{30 \text{ s}} \cdot \frac{1 \text{ rev}}{2\pi \text{ rad}} \cdot \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 1 \frac{\text{rev}}{\text{min}}$$

Ya que las revoluciones por minuto que necesita el eje son muy bajas se propone el uso de engranajes rectos para aumentar las revoluciones y facilitar la selección de un motor adecuado. De este modo, la velocidad obtenida se comparte con el engrane de transmisión como se observa en

la figura 25. De igual manera, para calcular la velocidad de entrada que requiere el eje se realiza una relación de transmisión como se aprecia a continuación:

$$N_A \cdot Z_A = N_B \cdot Z_B$$

$$1 \text{ rpm} \cdot 20 = N_B \cdot 11$$

$$N_B = 1.81 \text{ rpm}$$

Se agrega el torque calculado con la energía requerida de 53.23 Nm

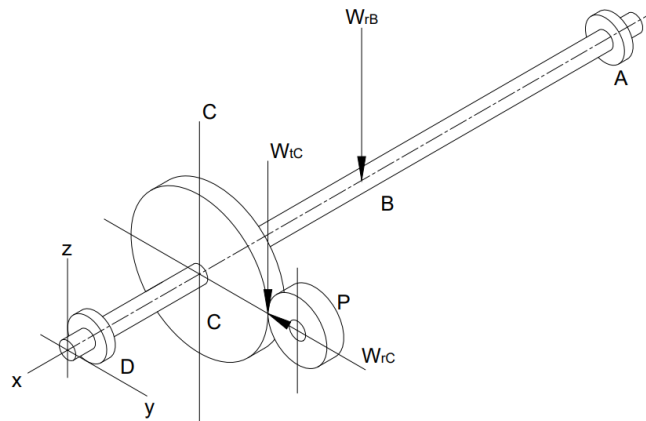
$$T_2 = \frac{T_1 \cdot R_B}{R_A}$$

$$T_2 = \frac{53.23 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot 60.5}{121}$$

$$T_2 = 26.61 \text{ N} \cdot \text{m}$$

En base al torque calculado de 26.61Nm y la velocidad que requiere el Piñón que es 1.81 rpm, se selecciona el actuador que cumpla con estas características en el catálogo, en este caso el mismo motor reductor de la marca Mellor, cuyo par máximo que puede alcanzar es de 35 N · m. Por lo tanto, se realiza un análisis de fuerzas aplicadas al eje figura 35 donde cambia la carga en el punto B.

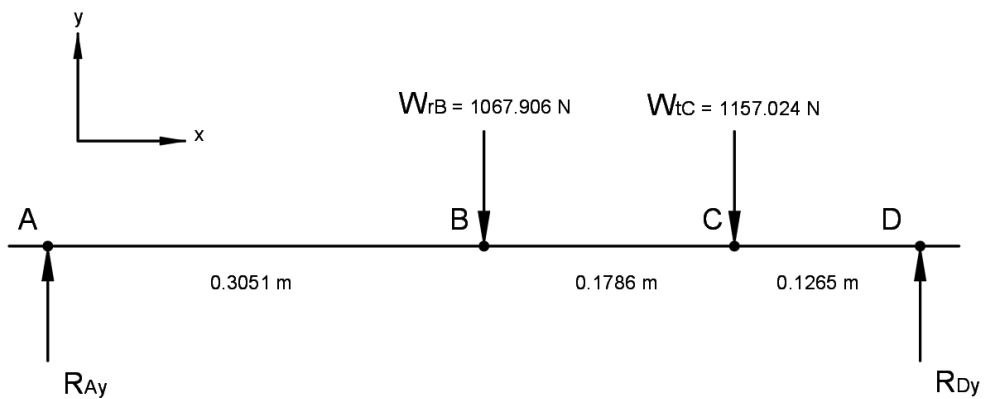
Figura 35: Diagrama de cuerpo libre del eje 2 en 3D.



Fuente: Autores.

Se tiene la componente W_{rB} de la carga aplicada en el punto B, donde W_{rB} es el peso de los componentes de la parte superior del eje, adicional de los demás componentes, obteniendo 1067.906 N. De igual manera se realiza un diagrama de cuerpo libre del eje para obtener las reacciones en los rodamientos en el eje Y (Ver figura 36).

Figura 36: Diagrama de cuerpo libre del eje 2 con respecto al eje Y.



Fuente: Autores

Realizando una sumatoria de fuerzas en y se tiene:

$$\sum F_y = 0$$

$$R_{Ay} + R_{Dy} - W_{rB} - W_{tc} = 0$$

$$R_{Ay} = -R_{Dy} + W_{rB} + W_{tc}$$

Se aplica también sumatoria de momentos en el punto A.

$$\sum M_A = 0$$

$$R_{Dy}(0.6102 \text{ m}) - W_{rB}(0.3051 \text{ m}) - W_{tc}(0.4837 \text{ m}) = 0$$

$$R_{Dy}(0.6102 \text{ m}) - 1067.906N(0.3051 \text{ m}) - 1157.024N(0.4837 \text{ m}) = 0$$

$$R_{Dy} = 1451.115 \text{ N}$$

Reemplazando en la ecuación anterior obtenemos el valor de R_{Ay} :

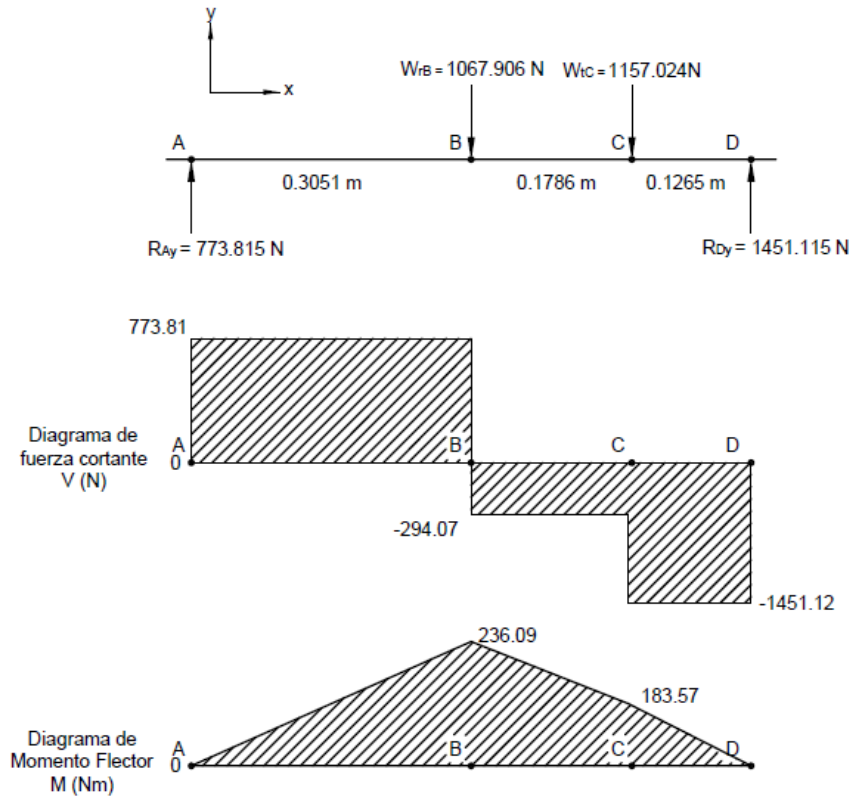
$$R_{Ay} = -R_{Dy} + W_{rB} + W_{tc}$$

$$R_{Ay} = -1451.115 \text{ N} + 1067.906 \text{ N} + 1157.024 \text{ N}$$

$$R_{Ay} = 773.815 \text{ N}$$

Se obtienen también los diagramas de momento flector y fuerza cortante como se muestra en la figura 37.

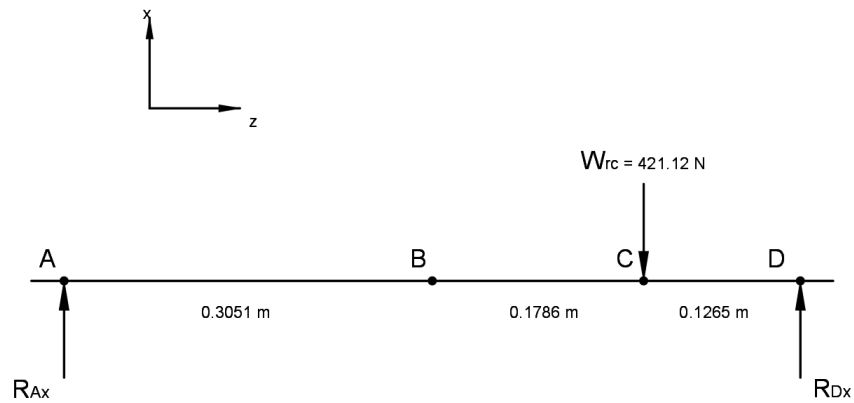
Figura 37: Diagrama de esfuerzo cortante y momento flector del eje 2 con respecto al eje Y.



Fuente: Autores

A continuación, se realiza un diagrama de fuerzas en x para determinar las reacciones en los apoyos presentados en la figura 38.

Figura 38: Diagrama de cuerpo libre del eje 2 con respecto al eje X.



Fuente: Autores.

Se procede a realizar una sumatoria de fuerzas en x:

$$\sum F_x = 0$$

$$R_{Ax} + R_{Dx} - W_{rc} = 0$$

$$R_{Ax} = -R_{Dx} + W_{rc}$$

Nuevamente se realiza la sumatoria de momentos en el punto A para encontrar las reacciones.

$$\sum M_A = 0$$

$$R_{Dx}(0.6102 \text{ m}) - W_{rc}(0.4837 \text{ m}) = 0$$

$$R_{Dx}(0.6102 \text{ m}) - 421.12 \text{ N}(0.4837 \text{ m}) = 0$$

$$R_{Dx} = 333.81 \text{ N}$$

Se obtiene el valor de R_{Ax} :

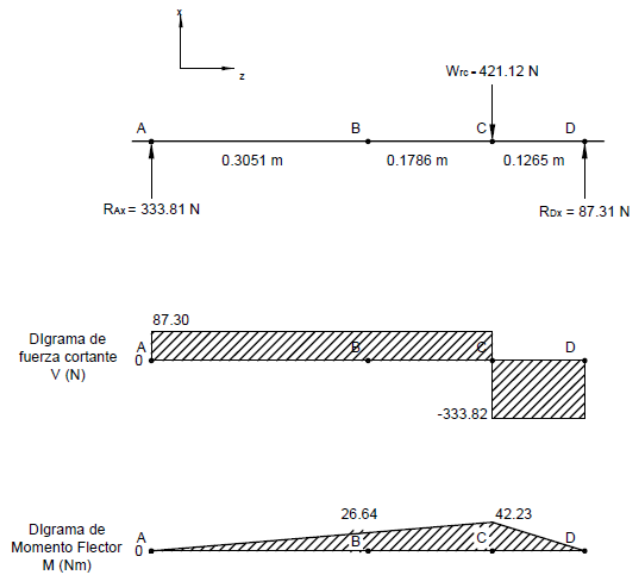
$$R_{Ax} = -R_{Dx} + W_{rc}$$

$$R_{Ax} = -333.81 \text{ N} + 421.12 \text{ N}$$

$$R_{Ax} = 87.31 \text{ N}$$

Luego se procede a obtener los diagramas de momento flector y fuerza cortante obteniendo los resultados mostrados en la figura 39.

Figura 39: Diagrama de esfuerzo cortante y momento flector del eje 2 con respecto al eje X.



Fuente: Autores.

- **Diámetro d1**

$$V_D = \sqrt{(87.31 \text{ N})^2 + (1451.11 \text{ N})^2} = 1453.739 \text{ N}$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{2.94(V_D)(N)(K_t)}{S'_n}}$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{2.94(1453.739 \text{ N})(2)(2.5)}{249.075 \text{ MPa}}} = 0.00763 \text{ m} = 7.639 \text{ mm}$$

- **Diámetro d2**

$$M_C = \sqrt{(42.23 \text{ N} \cdot \text{m})^2 + (421.23 \text{ N} \cdot \text{m})^2} = 423.23 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$d_2 = \left[\frac{32N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t M_C}{S'_n}\right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T}{S_y}\right)^2} \right]^{1/3}$$

$$d_2 = \left[\frac{32(2)}{\pi} \sqrt{\left(\frac{2(423.23 \text{ N} \cdot \text{m})}{249.075 \text{ MPa}}\right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{70 \text{ N} \cdot \text{m}}{1090 \text{ MPa}}\right)^2} \right]^{1/3}$$

$$d_2 = 0.04106 \text{ m} = 41.06 \text{ mm}$$

- **Diámetro d3**

$$M_C = \sqrt{(26.09 \text{ N} \cdot \text{m})^2 + (236.09 \text{ N} \cdot \text{m})^2} = 237.58 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$d = \left[\frac{32N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t M}{S'_n}\right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T}{S_y}\right)^2} \right]^{1/3}$$

$$d_3 = \left[\frac{32N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t M}{S'_n}\right)^2} \right]^{1/3}$$

$$d_3 = \left[\frac{32(2)}{\pi} \sqrt{\left(\frac{2(237.58 \text{ N} \cdot \text{m})}{249.075 \text{ MPa}}\right)^2} \right]^{1/3}$$

$$d_3 = 0.03387 \text{ m} = 33.87 \text{ mm}$$

- **Diámetro d4**

$$V_A = \sqrt{(698.10 \text{ N})^2 + (693.81 \text{ N})^2} = 984.23 \text{ N}$$

$$d_4 = \sqrt{\frac{2.94(V)(N)(K_t)}{S'_n}}$$

$$d_4 = \sqrt{\frac{2.94(984.23\text{N})(2)(2.5)}{249.075 \text{ MPa}}} = 0.00762\text{m} = 7.62 \text{ mm}$$

Esfuerzo Máximo

$$\sigma_m = \frac{|M|c}{I}$$

Inercia

$$I = \frac{\pi}{4}r^4$$

$$I = \frac{\pi}{4}0.0205^4$$

$$I = 1.395 \times 10^{-7} \text{ m}^4$$

Reemplazando en la ecuación anterior tenemos:

$$\sigma_m = \frac{|423.23|0.0205\text{m}}{1.395 \times 10^{-7} \text{ m}^4}$$

$$\sigma_m = 62.18 \text{ Mpa}$$

Esfuerzo ultimo

$$FS = \frac{\sigma_u}{\sigma_m}$$

$$\sigma_u = FS \cdot \sigma_m$$

$$\sigma_u = 62.18 \cdot 2$$

$$\sigma_u = 124.36 \text{ MPa}$$

En la siguiente tabla se muestran los diámetros calculados para el eje.

Tabla 12: Diámetros calculados para cada sección del eje 2 bajo una carga aplicada en dirección 0°.

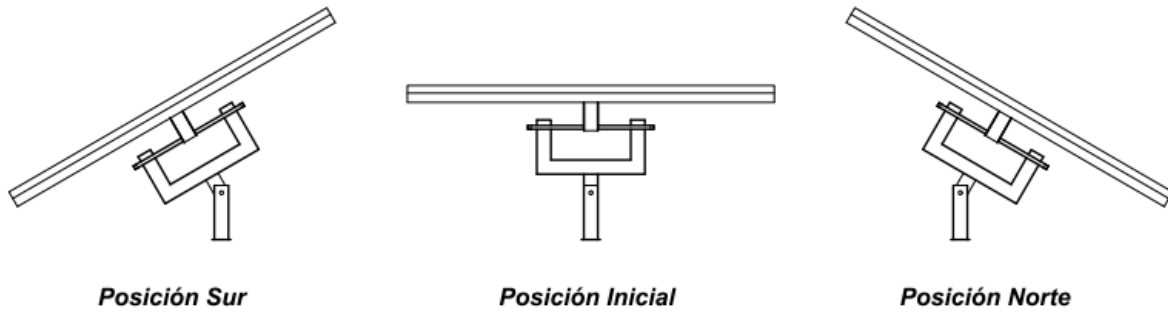
Dimensionamiento del eje 2	
d1	7.639 mm
d2	41.06 mm
d3	33.87 mm
d4	7.62 mm

Fuente: Autores

1.14.6.4 Dimensionamiento del eje 2 rotado 30°

El eje 2 va a rotar un máximo de 30° en dirección norte – sur, con la finalidad de orientar los paneles solares perpendicularmente a los rayos del sol (Ver figura 40). Como en el caso del eje 1 esta inclinación aumenta la carga aplicada del peso, por lo que se procede a realizar los análisis correspondientes para obtener el diámetro mínimo requerido en cada sección.

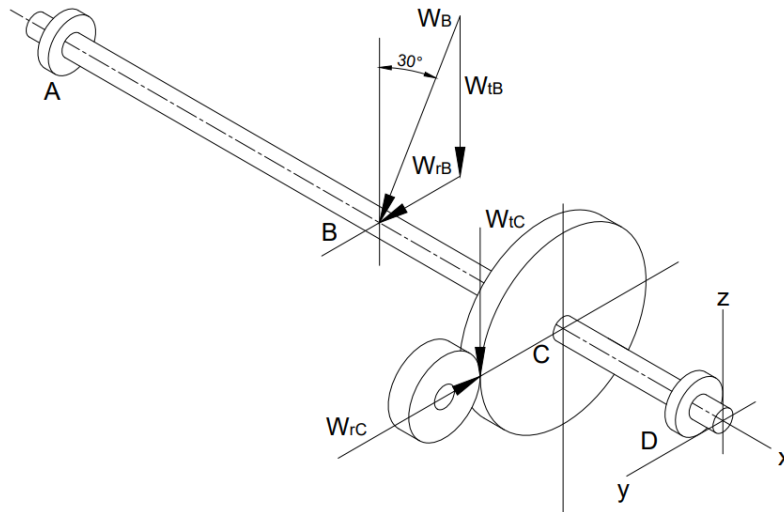
Figura 40: Movimiento del eje 2.



Fuente: Autores

En la figura 41 se muestra el diagrama de cuerpo libre del eje con sus respectivas cargas y reacciones, cuando este gira 30°.

Figura 41: Diagrama de cuerpo libre en 3D del eje 2 con la carga aplicada a 30°



Fuente: Autores.

Se obtiene la componente W_{rB} de la carga aplicada en el punto B, sabiendo que $W_{tB} = 1067.906 \text{ N}$.

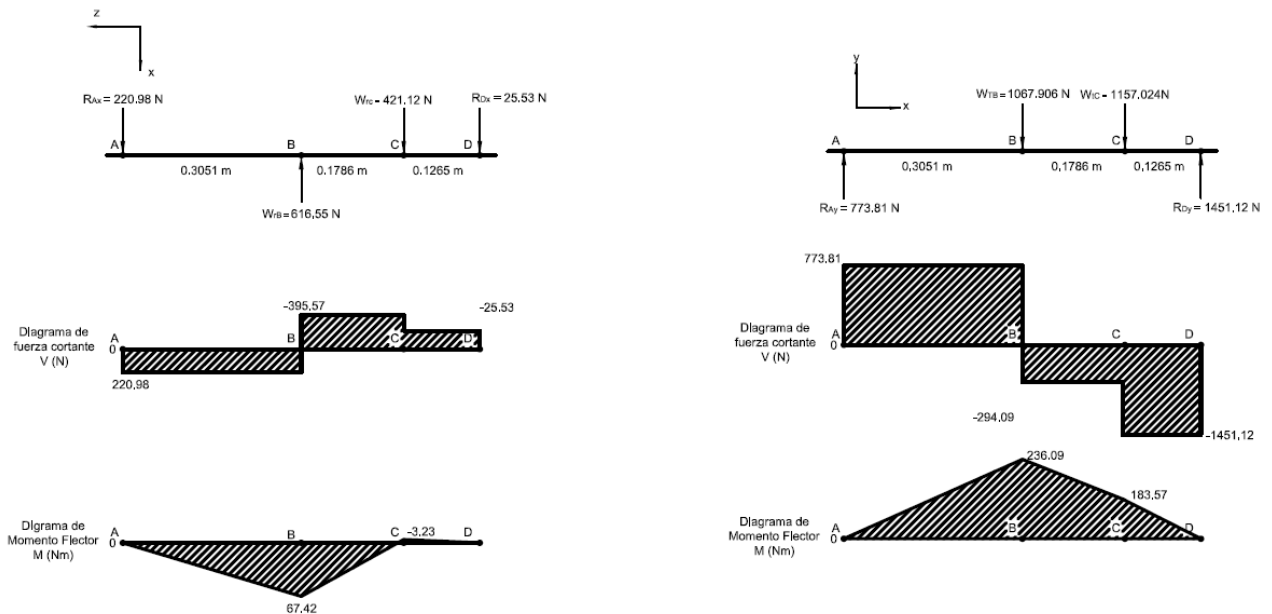
$$\tan(30^\circ) = \frac{W_{rB}}{W_{tB}}$$

$$W_{rB} = W_{tB}(\tan(30^\circ))$$

$$W_{rB} = 1067.906 N(\tan(30^\circ)) = 616.55 N$$

Otro aspecto a considerar es la distancia a la cual se encuentra ubicada la carga W_{tB} , ya que esta representa el peso total de la estructura y los paneles solares, y produce un par sobre el eje en el punto B. Debido a que la estructura tiene complejidad en su geometría, dificulta la obtención de ciertos parámetros como lo es el centroide en donde se localiza la carga W_{tB} , Por otro lado, el movimiento de norte a sur del primer eje es paulatino, esto se debe a la trayectoria del sol durante el día. Por tales motivos se analiza solamente 30° de rotación en ambas direcciones siendo estos los ángulos más críticos donde el peso aumenta y el eje se encuentra sometido a mayor esfuerzo. Nuevamente, aplicando el mismo método para la obtención de las reacciones en los rodamientos ubicados en los puntos A y D se obtiene los diagramas de esfuerzo cortante y momento flector (Ver figura 42).

Figura 42: Diagramas de esfuerzo cortante y momento flector del eje 2 bajo la carga a 30° de inclinación.



Fuente: Autores

Luego se obtienen los diámetros correspondientes para cada sección del eje.

- **Diámetro d1**

$$V_D = \sqrt{(25.53 \text{ N})^2 + (1451.11\text{N})^2} = 1451.34 \text{ N}$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{2.94(V_D)(N)(K_t)}{S'_n}}$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{2.94(1451.34 \text{ N})(2)(2.5)}{249.075 \text{ MPa}}} = 0.00924\text{m} = 9.24 \text{ mm}$$

- **Diámetro d2**

$$M_C = \sqrt{(182.57 \text{ N} \cdot \text{m})^2 + (-3.23 \text{ N} \cdot \text{m})^2} = 182.59 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$d_2 = \left[\frac{32N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t M_C}{S'_n}\right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T}{S_y}\right)^2} \right]^{1/3}$$

$$d_2 = \left[\frac{32(2)}{\pi} \sqrt{\left(\frac{2(182.59 \text{ N} \cdot \text{m})}{249.075 \text{ MPa}}\right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{70 \text{ N} \cdot \text{m}}{1090 \text{ MPa}}\right)^2} \right]^{1/3}$$

$$d_2 = 0.03103 \text{ m} = 31.03\text{mm}$$

- **Diámetro d3**

$$M_C = \sqrt{(67.42\text{N} \cdot \text{m})^2 + (236.09 \text{ N} \cdot \text{m})^2} = 245.52\text{N} \cdot \text{m}$$

$$d = \left[\frac{32N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t M}{S'_n}\right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T}{S_y}\right)^2} \right]^{1/3}$$

$$d_3 = \left[\frac{32N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t M}{S'_n}\right)^2} \right]^{1/3}$$

$$d_3 = \left[\frac{32(2)}{\pi} \sqrt{\left(\frac{2(245.52 \text{ N} \cdot \text{m})}{249.075 \text{ MPa}}\right)^2} \right]^{1/3}$$

$$d_3 = 0.0342\text{m} = 34.2 \text{ mm}$$

- **Diámetro d4**

$$V_A = \sqrt{(773.81 \text{ N})^2 + (220.98 \text{ N})^2} = 804.74\text{N}$$

$$d_4 = \sqrt{\frac{2.94(V)(N)(K_t)}{S'_n}}$$

$$d_4 = \sqrt{\frac{2.94(804.74\text{N})(2)(2.5)}{249.075 \text{ MPa}}} = 0.00688\text{m} = 6.88 \text{ mm}$$

En la tabla 13 se muestra de manera compacta los resultados obtenidos de los cálculos para cada uno de los diámetros.

Tabla 13: Diámetros calculados para cada sección respectiva del eje 1 sometido bajo una carga a 30°.

Diámetros calculados para el eje 2 rotado 30°	
d1	9.72 mm
d2	31.03 mm
d3	34.2 mm
d4	6.88 mm

Fuente: Autores.

Esfuerzo Máximo

$$\sigma_m = \frac{|M|c}{I}$$

Inercia

$$I = \frac{\pi}{4} r^4$$

$$I = \frac{\pi}{4} 0.0171^4$$

$$I = 6.715 \times 10^{-8} m^4$$

Reemplazando en la ecuación anterior tenemos:

$$\sigma_m = \frac{|245.52|0.0171m}{6.715 \times 10^{-8} m^4}$$

$$\sigma_m = 62.51 \text{ Mpa}$$

Adicional al cálculo se agrega un factor de seguridad de 1.5 para halla el esfuerzo ultimo soportado por el eje.

Esfuerzo ultimo

$$FS = \frac{\sigma_u}{\sigma_m}$$

$$\sigma_u = FS \cdot \sigma_m$$

$$\sigma_u = 62.51 \cdot 2$$

$$\sigma_u = 125.03 \text{ MPa}$$

Calculados los diámetros tanto para su posición horizontal, así como para su posición máxima de inclinación, se procede a escoger los diámetros mayores, considerando que las medidas de los ejes van a variar según el tipo de rodamiento que se utilice según el catálogo skf que se aprecia a continuación.

Figura 43: Catálogo KF de rodamientos.

Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidades nominales		Masa	Designaciones	
d	D	B	dinámica C	estática C ₀	P _u	Velocidad de referencia	Velocidad límite ¹⁾		Rodamiento abierto o tapado en ambos lados	tapado en un lado ¹⁾
mm			kN		kN	r. p. m.		kg	-	
3	10	4	0,54	0,18	0,007	130 000	80 000	0,0015	▶ 623	-
	10	4	0,54	0,18	0,007	-	40 000	0,0015	▶ 623-2RS1	623-RS1
	10	4	0,54	0,18	0,007	130 000	60 000	0,0015	▶ 623-2Z	623-Z
4	9	2,5	0,423	0,116	0,005	140 000	85 000	0,0007	618/4	-
	9	3,5	0,54	0,18	0,07	140 000	70 000	0,001	628/4-2Z	-
	9	4	0,54	0,18	0,07	140 000	70 000	0,0013	638/4-2Z	-
	11	4	0,624	0,18	0,008	130 000	63 000	0,0017	619/4-2Z	-
	11	4	0,624	0,18	0,008	130 000	80 000	0,0017	619/4	-
	12	4	0,806	0,28	0,012	120 000	75 000	0,0021	604	-
	12	4	0,806	0,28	0,012	120 000	60 000	0,0021	▶ 604-2Z	604-Z
	13	5	0,936	0,29	0,012	110 000	67 000	0,0031	▶ 624	-
	13	5	0,936	0,29	0,012	110 000	53 000	0,0031	▶ 624-2Z	624-Z
	16	5	1,11	0,38	0,016	95 000	60 000	0,0054	634	-
	16	5	1,11	0,38	0,016	-	28 000	0,0054	634-2RS1	634-RS1
	16	5	1,11	0,38	0,016	95 000	48 000	0,0054	634-2RZ	634-RZ
	5	11	3	0,468	0,143	0,006	120 000	75 000	0,0012	618/5
11		4	0,64	0,26	0,011	120 000	60 000	0,0014	628/5-2Z	-
11		5	0,64	0,26	0,011	120 000	60 000	0,0016	638/5-2Z	-
13		4	0,884	0,335	0,014	110 000	50 000	0,0025	619/5-2Z	-
13		4	0,884	0,335	0,014	110 000	70 000	0,0025	619/5	-
16		5	1,14	0,38	0,016	95 000	60 000	0,005	▶ 625	-
16		5	1,14	0,38	0,016	95 000	48 000	0,005	▶ 625-2Z	625-Z
19		6	2,34	0,95	0,04	80 000	50 000	0,0085	635	-
19		6	2,34	0,95	0,04	-	24 000	0,009	635-2RS1	635-RS1
19		6	2,34	0,95	0,04	80 000	40 000	0,009	635-2RZ	635-RZ
19		6	2,34	0,95	0,04	80 000	40 000	0,0093	▶ 635-2Z	635-Z

Fuente: (skf, 2020)

Los rodamientos se van a colocar en los puntos A y D (Ver figura 43), por lo que se toma en cuenta el dimensionamiento de los diámetros d1 y d4, los cuales se deberán ajustar al diámetro normalizado de los rodamientos. Por tal motivo se escoge el modelo 623 del catálogo debido a que

tiene un diámetro de 10mm. Posterior a ello se ajusta el dimensionamiento de los diámetros d1 y d4 para los dos ejes obteniendo que ahora $d1 = d4 = 10\text{mm}$.

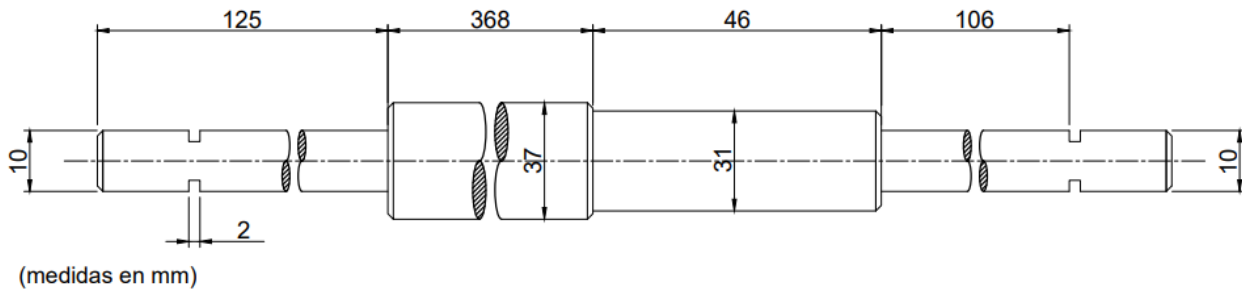
Por otro lado, en la siguiente tabla se muestran las características de los ejes de transmisión una vez considerado los diámetros para cada sección. Como se puede apreciar se obtuvo el peso específico, el tipo de material y la densidad para cada eje. La siguiente figura 44 y 45 se puede apreciar los resultados dimensiones para cada sección, previamente calculados para el eje 1 como del eje 2 y establecidas bajo el criterio de diseño que soportarán las cargas correspondientes.

Tabla 14: Características generales de los ejes de transmisión.

Características del eje	
Material	Acero AISI 4340 OQT 1000
Densidad	7.85 g/cm ³
Peso específico eje 1	1.33 kg
Peso específico eje 2	2.09 kg

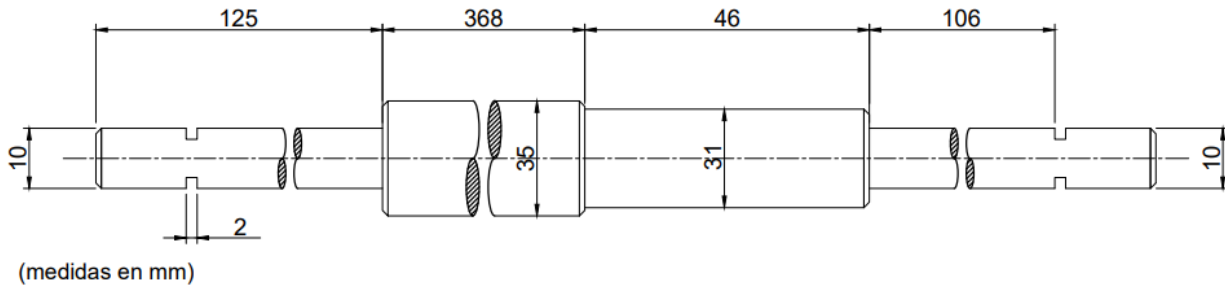
Fuente: Autores.

Figura 44: Resultados del dimensionamiento del eje 1.



Fuente: Autores.

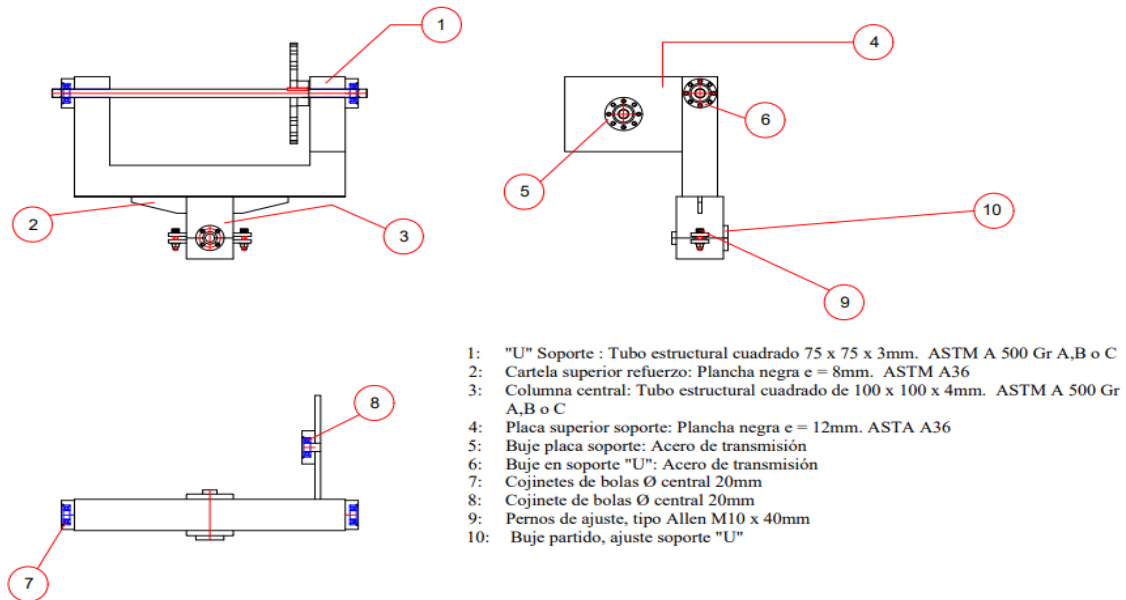
Figura 45: Resultados del dimensionamiento del eje 2.



Fuente: Autores.

Por último, en la figura 46, se presenta dónde va a ir ubicado el eje y sus diferentes elementos que corresponden a la parte de transmisión, dicho diseño se puede apreciar de mejor manera en los planos del anexo E.

Figura 46: Montaje del eje 1.



Fuente: Autores

1.14.7 Cálculo de la columna central

La columna central es uno de los elementos críticos del seguidor, ya que soporta en gran

parte el peso de la estructura incluyendo los paneles solares y los accesorios que se incluirán para su funcionamiento. Soporta de igual manera el peso que se genera al momento de rotar los ejes y de otros elementos como los motores, ejes, engranes, etc.

Se ha considerado un tubo cuadrado de 100 x 100 x 4mm. ASTM A-500, donde al utilizar la relación de esbeltez se pudo determinar si dicha columna es corta o larga, con la finalidad de encontrar la carga crítica y comprobar si está sometida al pandeo. Al tomar en cuenta que la columna se somete a una carga se debe analizar que no ocurra una inestabilidad estática es decir que la columna no debe colapsar con el peso de la estructura y el panel solar, por lo que se utilizará la ecuación de Euler (Mott R. L., 2009) para determinar si la columna se considera larga.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (25)$$

Donde:

- P_{cr} = Carga axial máxima o crítica en la columna justo antes de someterse a una carga. Esta no debe causar que el esfuerzo en la columna supere el límite proporcional.
- E = Módulo de elasticidad del material.
- I = Momento de inercia para el área transversal de la columna.
- L = Longitud sin soporte de la columna, cuyos extremos están articulados.

O de igual manera la fórmula para la carga crítica que plantea Johnson (Mott R. L., 2009) el cual nos permite determinar si la columna es corta:

$$P_{cr} = A s_y \left[1 - \frac{s_y (L/r)^2}{4\pi^2 E} \right] \quad (26)$$

Donde:

- s_y : Resistencia a la cedencia.
- A : Área transversal de la columna.

La columna se puede determinar si es corta o larga mediante la relación de esbeltez efectiva denominada también como constante de columna, C_c , (Mott R. L., 2009) que se expresa de la siguiente manera:

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{S_y}} \quad (27)$$

Se sabe entonces que si el valor de la relación de esbeltez efectiva (SR) sobrepasa el valor de la constante de columna (C_c), esta se considera larga y se procede a utilizar la ecuación de Euler, en tanto que, si la relación de esbeltez es menor a la constante de columna, esta se considera corta, para lo cual se utiliza la ecuación de J. B. Johnson, reglamentos especiales o la fórmula de esfuerzo de compresión directa (Mott R. L., 2009). Según la ecuación (28), la relación de esbeltez está definida como:

$$SR = \frac{L_e}{r} = \frac{KL}{r} \quad (28)$$

Donde:

- L : Longitud real de la columna.
- K : Factor de fijación de los extremos.
- L_e : Longitud efectiva de la columna.
- r : Radio de giro de la sección transversal de la columna.

Para el diseño del seguidor solar se consideró utilizar un tubo cuadrado de acero estructural

bajo la norma ASTM A-500 el cual posee una resistencia a la cedencia de 345 Mpa. Y al sustituir los valores en la ecuación (27). obtenemos el constante de columna:

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{S_y}} = \sqrt{\frac{2 * \pi^2 * 200 \times 10^9}{345 \times 10^6}} = 106,972$$

Para encontrar el valor de la relación de esbeltez de la columna central se ha considerado una longitud real de 1.862 metros. También se debe obtener el valor del radio de giro (r) que es un dato necesario para determinar el valor de SR . Dicho valor de r se determina mediante la ecuación (29).

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (29)$$

Donde:

- I : Momento de inercia de la sección transversal de la columna.
- A : Área de la sección transversal.

Se obtiene el momento de inercia mediante la ecuación (30), debido a que el tubo es hueco.

De este modo se tiene que:

$$I = \frac{1}{12}bh^3 - \frac{1}{12}b'h'^3 \quad (30)$$

$$I = \frac{1}{12}(0.1)(0.1)^3 - \frac{1}{12}(0.1 - 0.008)(0.1 - 0.008)^3 = 2.363 \times 10^{-6}m^4$$

Posteriormente se procede a obtener el valor del área de la sección transversal de la

columna mediante la ecuación (31):

$$A = bh - b'h' \quad (31)$$

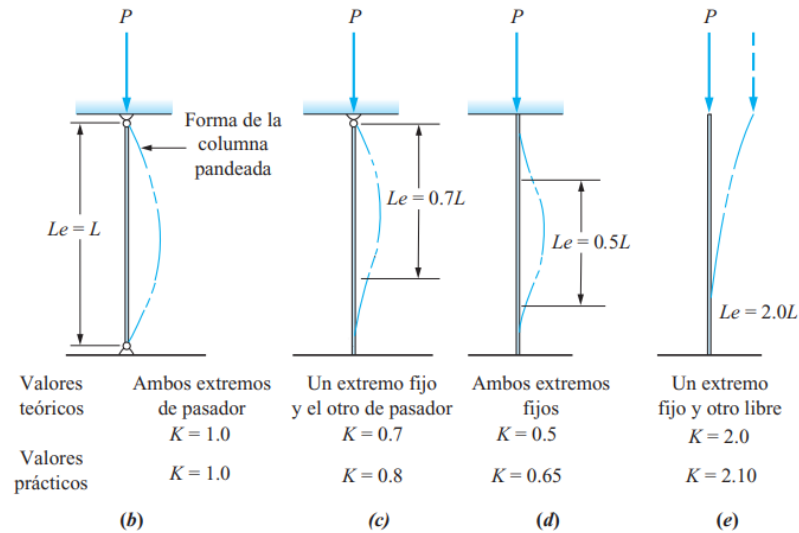
$$A = (0.1)(0.1) - (0.1 - 0.008)(0.1 - 0.008) = 1.536 \times 10^{-3} m^2$$

Finalmente obtenemos el valor de r sustituyendo los datos obtenidos en la ecuación (29).

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{2.363 \times 10^{-6}}{1.536 \times 10^{-3}}} = 0.0392m$$

Ahora, para obtener el factor de fijación de los extremos K , se observa en la Figura 47 donde se indican los distintos tipos de fijaciones para las columnas.

Figura 47: Longitud Efectiva K .



Fuente: (Mott R. L., 2009).

Tomando en cuenta que la columna central tiene un extremo libre y el otro fijo se toma el valor de $K = 2.10$. Reemplazando en la ecuación (28), se tiene:

$$SR = \frac{L}{r} = \frac{KL}{r} = \frac{(2.10)(1.862)}{0.0392} = 99.75$$

Se tiene que $SR < C_c$, ($99.75 < 106,972$) lo cual sugiere que la columna se considera corta, es decir que la ecuación a utilizar para encontrar la carga crítica de la columna debe ser mediante la fórmula de J. B. Johnson, por lo que, al reemplazar los valores en la ecuación (26) obtenemos que:

$$P_{cr} = A_s y \left[1 - \frac{s_y(L/r)^2}{4\pi^2 E} \right]$$

$$P_{cr} = (1.536 \times 10^{-3})(345 \times 10^6) \left[1 - \frac{(345 \times 10^6) \left(\frac{1.862}{0.0392} \right)^2}{4\pi^2 (200 \times 10^9)} \right]$$

$$P_{cr} = 477.677 \text{KN}$$

Luego de encontrar la carga crítica de la columna se determinó la carga admisible (P_a) mediante la ecuación (32) considerando un factor de seguridad de $N=3$.

$$P_a = \frac{P_{cr}}{N} \tag{32}$$

$$P_a = \frac{477.677}{3} = 159.22 \text{kN}$$

Teniendo también en cuenta que la columna va a soportar el peso total de la estructura junto con los paneles solares y demás accesorios, se tiene que analizar la carga total.

$$P_{total} = (P_{paneles} + P_{estructura}) \tag{33}$$

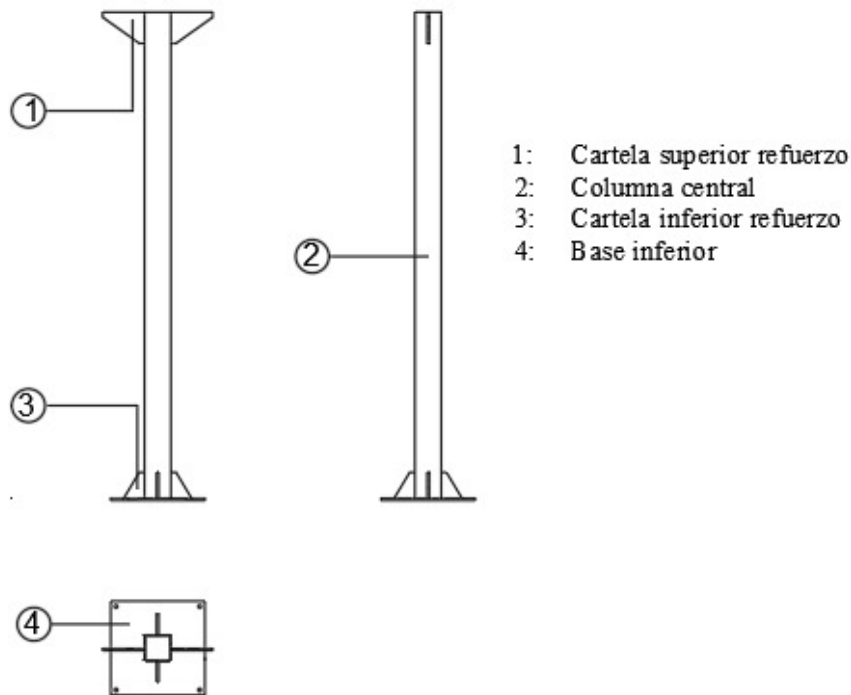
$$P_{total} = [(447.336 N + 1121.135)] = 1568.471 N$$

Adicionado el 30% del peso total, el cual equivale a 470.54 N tenemos un peso total de:

$$P_{total} = 1568.471 N + 470.54 N = 2.039 KN$$

Por lo tanto, se tiene que $P_{total} < P_a$ ($2.039 KN < 159.22kN$), lo cual comprueba que la columna central del seguidor no va a estar sometido al fenómeno de pandeo, es decir que no va a colapsar debido al peso de la estructura y el panel solar. En la figura 48 se muestra un esquema de la columna central, donde se añade elementos de apoyo como la placa base y cartelas de refuerzo los cuales permiten mejorar la sujeción entre elementos. Se puede apreciar mejor en los planos del anexo E.

Figura 48: Columna central y elementos de apoyo.

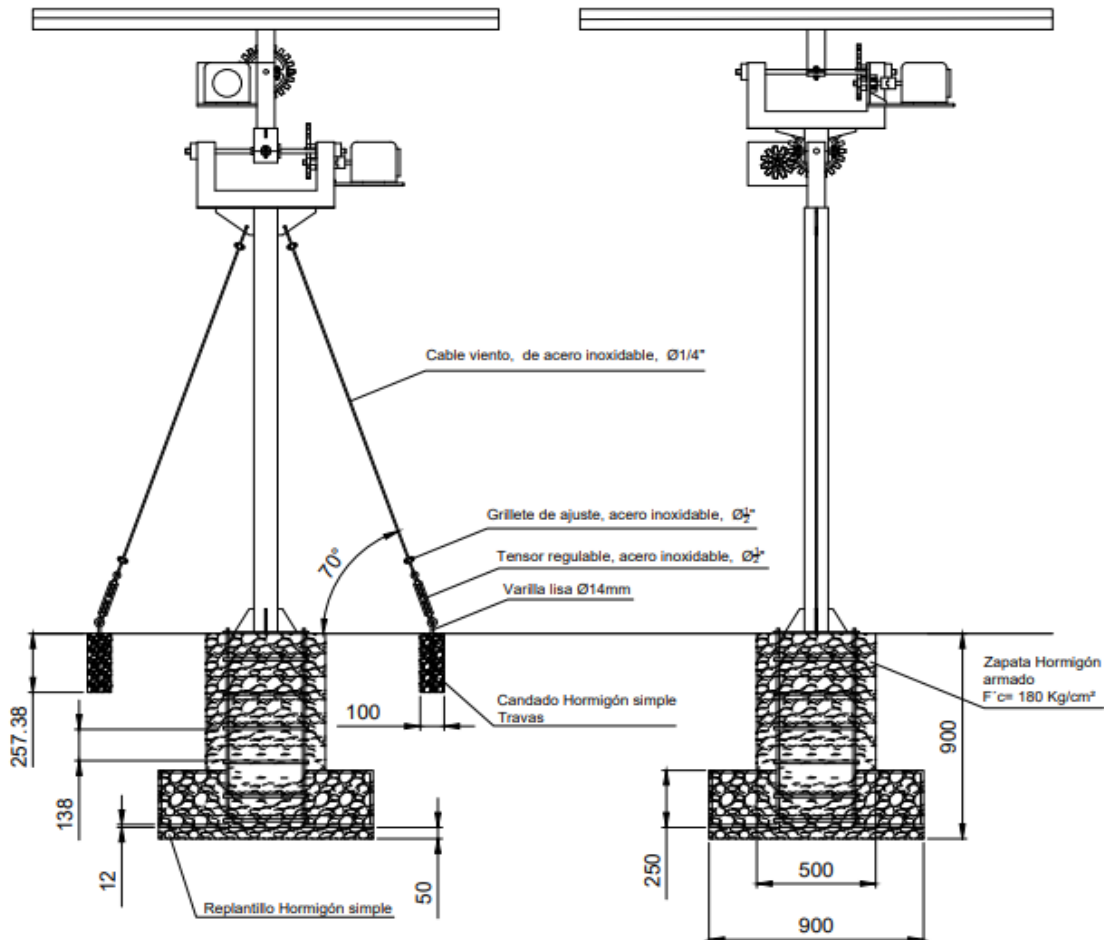


Fuente: Autores.

1.14.8 Diseño ensamblado del seguidor solar

En la figura 49 se puede observar un diagrama completo de la estructura donde se añaden tensores los cuales mediante cables de viento y grilletes permiten mantener el sistema firme en casos de sismos fuertes. Estos son colocados a un ángulo de 70° con respecto al suelo sujetos a una varilla lisa de 14 mm de diámetro. La cimentación de igual manera es una parte importante que se considera utilizar para mejorar la sujeción de la estructura en el suelo permitiendo que el sistema se mantenga firme.

Figura 49: Diseño de la cimentación del seguidor solar de doble eje con medidas en mm.



Fuente: Autores.

Por último, en la siguiente figura se muestra la estructura del seguidor solar de doble eje en 3D, obtenido en el software de simulación, el cual consta de materiales semejantes a los propuestos. Así mismo el dimensionamiento es el mismo para cada uno de los elementos que lo conforman. De este modo se puede tener una visión real de cómo se vería el sistema de seguimiento solar al momento de su implementación en la comunidad de Yaapi.

Figura 50: Estructura en 3D del seguidor solar de doble eje.



Fuente: Autores

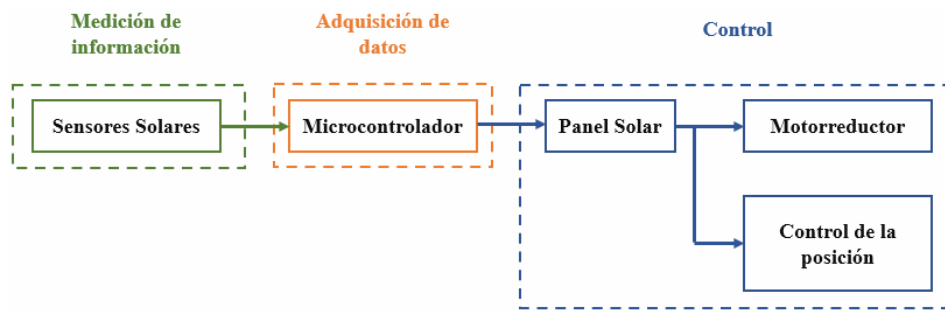
1.15 Diseño eléctrico y electrónico.

Para el diseño electrónico se busca la utilización de sensores y actuadores que controlen la orientación de los paneles solares. Debido a que ya se ha considerado el tipo de actuador más adecuado para el sistema en anteriores apartados, se propone ahora el uso de sensores de luminosidad y radiación que se adecuen de mejor manera al sistema y de esa manera captar mayor

energía solar, controlando el movimiento del mecanismo acorde a los requerimientos del sistema.

Por otro lado, en la siguiente figura 51 se muestra el diagrama de bloques que permite entender el funcionamiento del sistema de seguidor solar, el cual presenta tres etapas, una de medición de información mediante el uso de sensores solares, la segunda etapa contiene la programación en microcontroladores y finalmente la tercera etapa contiene un algoritmo de control que permite orientar los paneles solares mediante los actuadores.

Figura 51: Diagrama de bloques del funcionamiento del sistema.





Fuente: Autores

1.15.1 Propuesta de sensores de luminosidad.

Con el uso de sensores se puede posicionar los paneles del seguidor solar durante el día en un estado que permita aprovechar al máximo la energía del sol. Esto permite tener datos de entrada en función de los cambios de luz y procesar dicha información en un sistema de control que compara estos datos y permite el movimiento del motor y a su vez el posicionamiento de los paneles. En este caso se proponen los sensores mostrados en la tabla 15, puesto que son ideales para captar radiación del sol y que comúnmente se utilizan en sistemas de seguimiento solar

Tabla 15: Sensores de radiación solar industriales.

Empresa	Descripción	Precio	Figura
SEGER	<p>“El módulo MLD mide constantemente la intensidad y el ángulo de los rayos solares recibidos y orienta la instalación con los módulos solares. Incluye sistema de control y accionamiento.”^a Modelo: 1503-Mld Control.</p>	\$ 468,58	
SENSOVANT	<p>“DR03 es un sensor de radiación solar que se aplica en la medición de alta precisión de la radiación solar recibida por una superficie plana de un campo de 5° ángulo de visión completo.”^b Modelo Sensor DR03</p>	\$ 30.000,00	
SAT CONTROL	<p>“Sensor óptico para el ajuste fino de seguidores solares para aplicaciones de concentrador con una precisión mejor que 0,1°.”^c Modelo SOS0C1</p>	\$ 200,00	
RIKA	<p>“RK200-03 piranómetro se produce con base en el principio termoelectrico; Los elementos de detección están hechos con termopilas chapados en bobinado con múltiples contactos. Su superficie está recubierta con recubrimiento negro con alta tasa de absorción.”^d Modelo: RK200-03</p>	\$ 398,11	

SERVERSCH ECK	“Sensor de nivel de luz, informa la luminosidad en luxes y realiza un monitoreo de 0 a 65000 lux con una resolución de 1 lux.” ^e	\$ 240	
SOLARMEMS	“Es un sensor solar de dos ejes para un seguimiento solar, el dispositivo mide el ángulo de incidencia de un rayo de sol en dos ejes ortogonales, proporcionando una alta sensibilidad en función de las dimensiones geométricas del diseño.” ^f Modelo: Nano-SSOC-A60	\$ 2.540,00	

Fuente: ^a (degeriberica, 2021). ^b (sensovant, 2014). ^c (solar-motors, 2018). ^d (rikasensor, 2019). ^e (serverscheck, 2019) ^f (MRH, 2016).





El sensor que se ha escogido para la propuesta del diseño es el sensor de luminosidad de tipo industrial de la marca SERVERSCHECK, debido a que se necesita una buena precisión en la detección de luz solar, lo cual ayuda que el sistema de seguimiento tenga una respuesta rápida y precisa a la hora de posicionar los paneles solares de manera perpendicular a los rayos del sol. Por otro lado, el sensor tiene un rango de medición de 0 a 65000 luxes, el cual es dato a considerar para el control de movimiento, por lo que cumple con todas las características.

Este sensor en comparación con los otros mostrados en la tabla 15, nos permite obtener una señal de salida en Luxes dependiendo de la variación de luz en el entorno. Este dato se puede convertir en señal digital siendo controlable mediante un algoritmo de programación adecuado. También posee un tiempo de respuesta relativamente corto brindando mayor confiabilidad a la hora de tomar datos. Por otro lado, tiene un voltaje de entrada de 5 V el cual se adapta al microcontrolador propuesto y cuenta con un tamaño ajustable al diseño de la estructura del sistema.

1.15.2 Propuesta de microcontroladores.

Los microcontroladores son dispositivos electrónicos que permiten realizar tareas mediante un lenguaje de programación. Por tal motivo se busca seleccionar un dispositivo que permita de manera eficiente y confiable controlar el funcionamiento del seguidor. En la siguiente tabla se muestra los microcontroladores comúnmente utilizados para programación en sistemas fotovoltaicos.

Tabla 16: Microcontroladores comúnmente utilizados en la industria.

Características	NodeMCU	Raspberry Pi	UDOO	Curiosity HPC
Descripción	 “Integra un módulo ESP-12E con un microprocesador de 32 bits.” ^a	 “Integra un modelo 2GB de RAM, posee soporte 4K, con salida doble, micro-HDMI, WiFi Dual.” ^b	 “Es una computadora de placa compatible con el sistema operativo Android o Linux, e integra un microcontrolador compatible con Arduino.” ^c	 “Esta placa Curiosity es compatible con MCU PIC® de 8 bits de 28 y posee 40 pines de Microchip.” ^d
Modelo	Esp 32	3B	Quad	DM164136
Costo	\$ 20	\$ 80	\$ 89	\$ 80
Tensión	2,3 - 3,6 V	5V - 2.5A DC Micro USB/GPIO	6 - 15 V	3.3 - 5 V
RAM	520 kb	1GB	1 GB	1024 B
Entradas y salidas digitales	32	40	76	11
Entradas Analógicas	18	40	12	13

Fuente: ^a (Xuky, 2020). ^b (PASTOR, 2018). ^c (udoo, 2020). ^d (Inc., 2016).




Según la tabla 16, el microcontrolador más adecuado para este sistema de seguimiento solar

es el UDOO debido a que presenta un sistema operativo compatible con Android y Linux, lo cual permite un mejor aprovechamiento de programación mediante librerías y software libre. Por esta razón se plantea el uso de este dispositivo y su interfaz para la programación del algoritmo de control.

1.15.3 Propuesta de reloj digital en tiempo real

Para que el seguidor solar se pueda controlar en un horario determinado se necesita el uso de dispositivos como relojes digitales los cuales permiten conocer la fecha y la hora en un tiempo real. Esta característica es importante debido a que el seguidor puede trabajar en el día tomando en consideración las horas de luz y poder generar un algoritmo que permita posicionar los paneles solares en función de estos parámetros. En la Tabla 17 se muestran los relojes digitales que comúnmente se utilizan en casos parecidos.

Tabla 17. Relojes digitales utilizados para la medición de datos en tiempo real.

Características	Reloj en tiempo real	Reloj en tiempo real	Reloj en tiempo real
Descripción	 “Reloj digital de precisión y de bajo costo con oscilador de cristal compensado por sensor de temperatura.” ^a	 “Se comunica con un microprocesador a través de una interfaz serial simple. El RTC proporciona información exacta.” ^a	 “Es un reloj/calendario decimal codificado en binario (BCD) de baja potencia más 56 bytes de NV SRAM. La dirección y los datos se transfieren en serie a través de un bus bidireccional I2 C.” ^b
Modelo	DS3232	DS1302	DS1307
Costo	\$ 5	\$ 3	\$ 5
Tensión	3,5 - 5 V	2 – 5 V	3.3 - 5V

Frecuencia de funcionamiento	400 KHz	32 kHz	32 kHz
Memoria	EEPROM	RAM	RAM

Fuente: ^a (*uelectronics, 2016*). ^b (*naylampmechatronics, 2015*).

Se propone que el Reloj digital en tiempo real más adecuado para el sistema de seguimiento solar es el modelo DS3232, puesto que tiene un sensor de temperatura que permite conocer las condiciones del lugar donde se va a utilizar. Este dispositivo permite conocer la hora y fecha con una precisión de 172ms/d, además realizan comunicación I2C por lo que es sencillo obtener estos datos y controlar el movimiento de los paneles solares. Por otro lado, la frecuencia de funcionamiento es mayor a los otros dispositivos de la tabla y el costo es accesible. Debido a esto se considera como el mejor dispositivo para implementar en el sistema.

1.15.4 Circuito electrónico y circuito de potencia.

En este apartado se procede a realizar un circuito electrónico que integre los elementos seleccionados con anterioridad como son los sensores, el microcontrolador, los actuadores y otros elementos adicionales para que el circuito pueda funcionar acorde a los requerimientos del sistema. Este circuito posee también la parte de potencia para evitar daños en los motores, por lo que se propone utilizar una unidad de control.

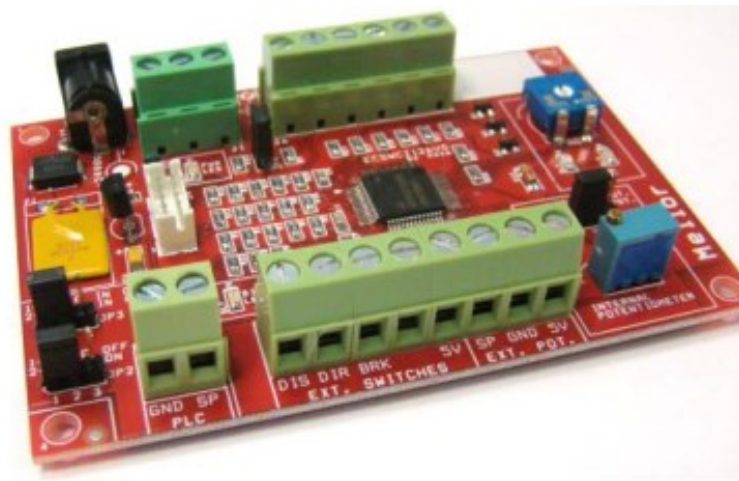
1.15.5 Unidad de control de motor CC sin escobillas

Para la parte de potencia se utiliza el controlador Starter Kit BDC D1 está diseñado para motores de CC sin escobillas de la misma marca del motor reductore MELLOR. El dispositivo requiere 24 voltios CC externos. A través del microcontrolador se puede configurar el ajuste de velocidad, dirección cambio y frenado. El sistema BDC D1 incluye varios modos de control: proporcional interno o externo control (10K Ohm lineal potenciómetro) o entrada externa, 0-10 V

o PWM, seleccionable, con la que se puede configurar la velocidad de rotación por un dispositivo externo. La entrada de control se puede seleccionar a través de algunos puentes. (MOTORS, 2016)

- Corriente de reposo aprox. 10mA
- Tensión de alimentación 24 Vcc
- Límite de corriente 500 mA
- Tensión de mando 0-10V
- Potenciómetro de control 0-10K
- Dimensiones 67x98x15mm
- Peso aproximado. 50 gramos

Figura 52: Starter Kit BDC D1.



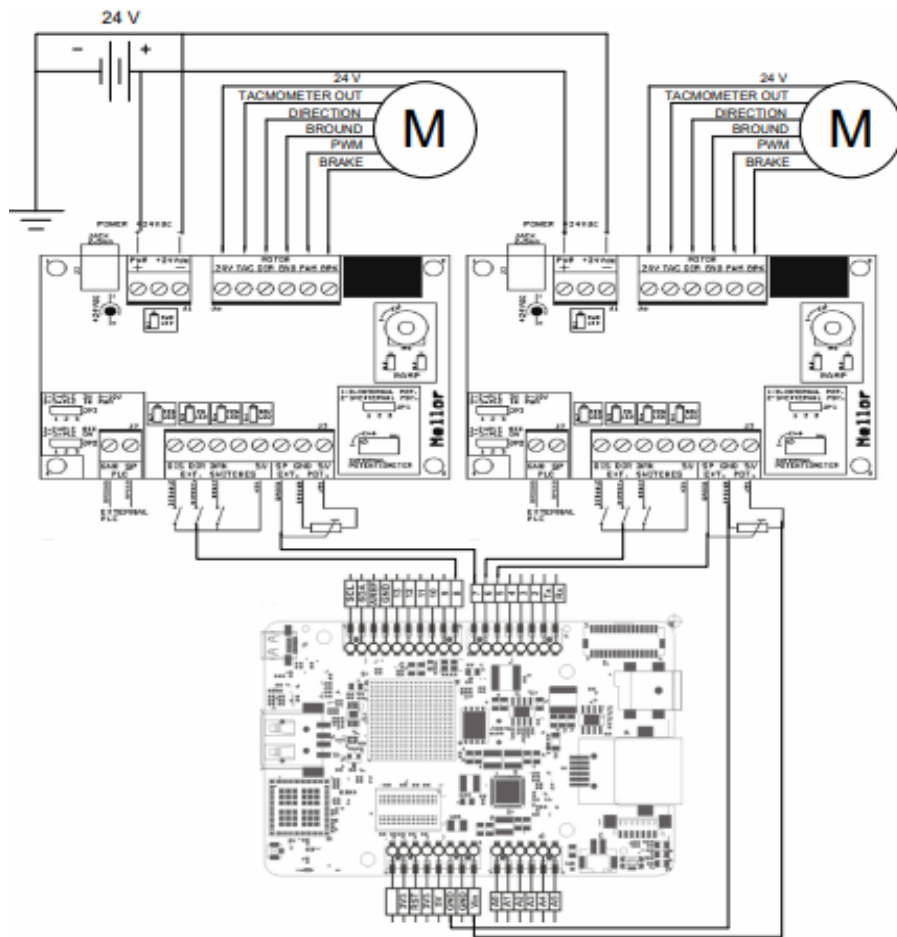
Fuente: (MOTORS, 2016)

CARACTERÍSTICAS:

- Salida monofásica
- Cambio de dirección
- Sistema de frenos
- Transductor Hall
- Límite de velocidad ajustable
- Conducción directa o de frecuencia
- Alta eficiencia
- Fusible reiniciable incorporado
- Base de montaje en riel disponible

El circuito de potencia (Figura 53), está conectado por dos motores reductores de la Serie FBB T3, y dos Starter Kit BDC D1 respectivamente para cada uno, debido a que el controlador nos entrega una salida de 5 voltios, no se emplea el uso de un regulador de voltaje, estos mismos son controlados por el microcontrolador UDOO para la dirección e inversión de giro del motor.

Figura 53: Circuito de potencia para motores.

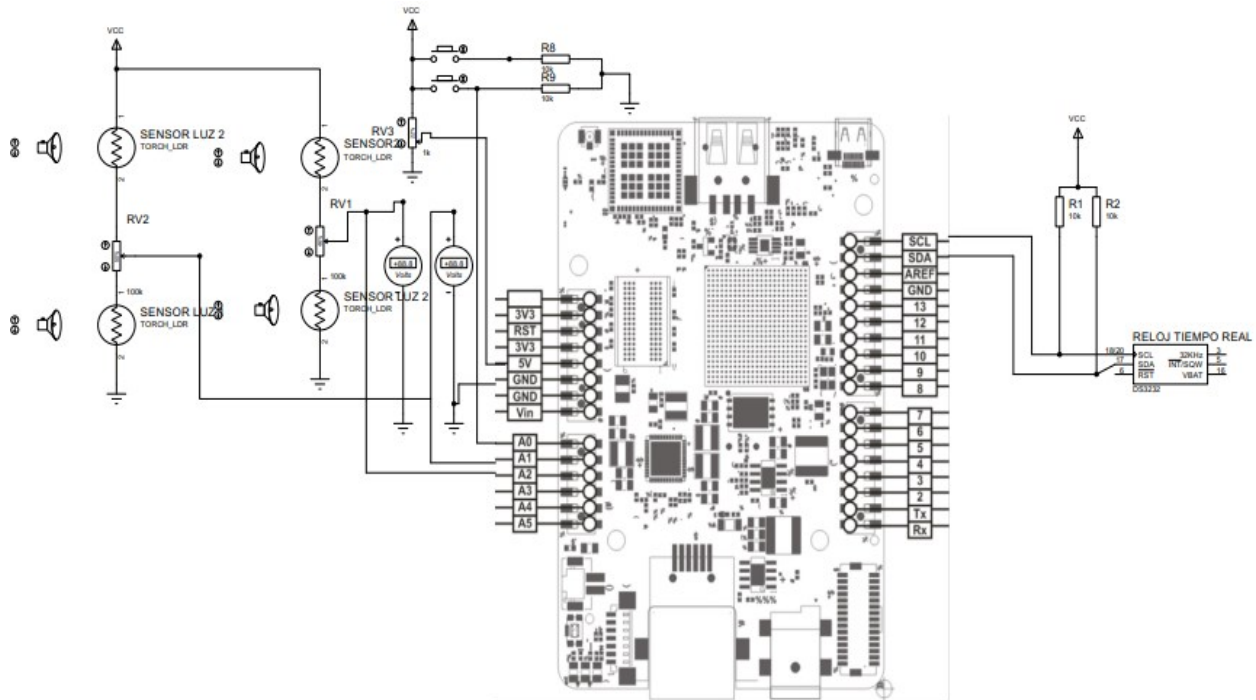


Fuente: Autores

El circuito de control (Figura 54), cuenta con 4 sensores de luminosidad, un reloj en tiempo real y dos pulsantes que sirven para calibrar la posición de los motorreductores conectados con cable de timbre al microcontrolador UDOO, todo este circuito mostrado en las figuras 53 y 54 va

ubicado en el interior de una caja de control para su protección contra factores externos.

Figura 54: Circuito de control.



Fuente: Autores

A continuación, en la tabla 18 se muestran los materiales utilizados para el circuito electrónico. Estos son elementos comerciales, es decir que se pueden adquirir en tiendas de la zona para posterior a ellos armar el circuito para su respectiva implementación en el seguidor. Por lo que se tomó en cuenta elementos de bajo costo y más comunes comercialmente para evitar cualquier imprevisto.

Tabla 18. Elementos que conforman el circuito electrónico.

Elementos electrónicos	Cantidad
Resistencias 10K Ω	4
Placa UDOO	1
Sensores de Luz	4
Motor reductor	2
Potenciómetros 100 K Ω	2

Potenciómetros 1 K Ω	1
Starter Kit BDC D1	2
Reloj digital	1
Batería de 24 V	1
Pulsantes	2

Fuente: Autores

1.16 Diseño de Control

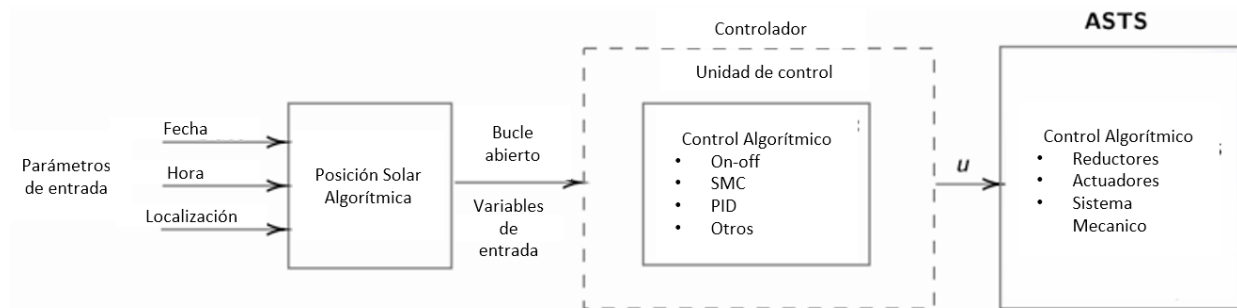
1.16.1 Algoritmos

Los algoritmos de control comunes que se suelen utilizar en sistemas de seguimiento solar son: On-off, lazo abierto, lazo cerrado y lazo híbrido, donde la implementación del On-off en trabajos de investigación es de 67,55%, un 28,95% para el algoritmo en lazo abierto, 54,39% para el lazo cerrado y un 16,67% para el algoritmo en lazo híbrido (R. Fuentes, et all, 2020).

1.16.1.1 Algoritmo lazo abierto

Este tipo de algoritmo no suele tener retroalimentación de control mediante sensores, por lo que emplea un algoritmo que se basa en las coordenadas del sol para localizar geográficamente su posición con respecto a la tierra (Ver figura 55).

Figura 55: Diagrama de bloques de lazo abierto.



Fuente: (R, fuentes, et all, 2020).

Generalmente es programado en una computadora, Arduino, microcontrolador y PLC,

donde una vez que calcula los ángulos de azimut y cenit se procesa la información para obtener la posición angular los cuales permiten comandar los actuadores del sistema. Estos ángulos de posición son ordenados mediante un sistema de control que permite alinear el panel solar donde exista mayor concentración de los rayos del sol.

Las ventajas de este algoritmo son (R. Fuentes, et all, 2020):

- No necesita un sensor de luz solar.
- Su implementación es fácil y de bajo costo.
- Su funcionamiento no depende de alteraciones meteorológicas.

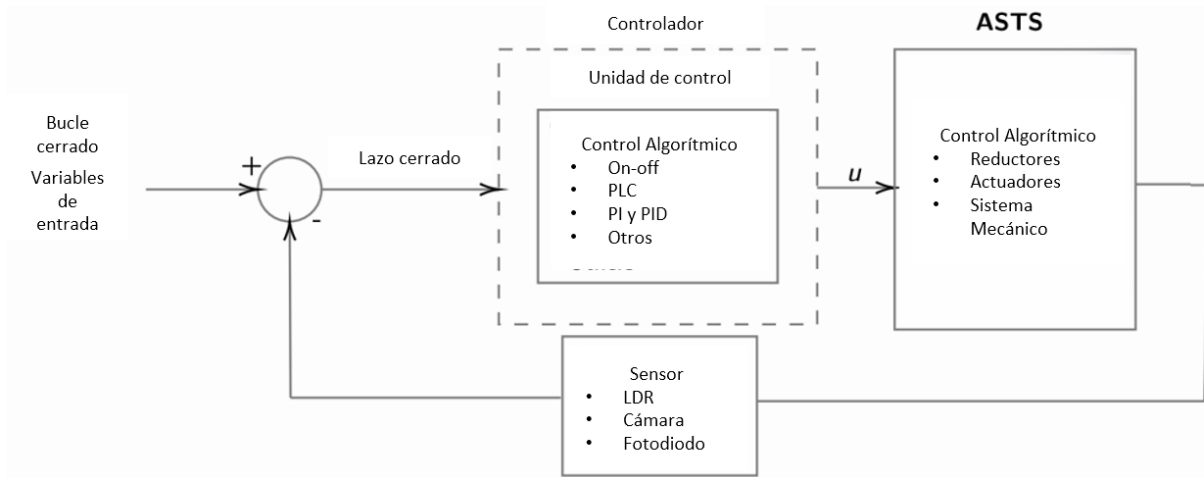
Las desventajas son:

- Baja precisión de seguimiento.
- Requiere un algoritmo con datos geográficos y el tiempo de funcionamiento.
- Requiere un sensor para detectar el error de seguimiento solar.
- Su calibración debe ser constante.
- Presenta inestabilidad ante perturbaciones eléctricas o mecánicas.

1.16.1.2 Algoritmo lazo cerrado

Este algoritmo cuenta con retroalimentación debido al uso de sensores solares. El diagrama de bloques se muestra en la figura 56. Se suele utilizar inicialmente un punto de ajuste de circuito cerrado igual a 0 si se emplean matrices de fotodiodos.

Figura 56: Diagrama de bloques de lazo cerrado.



Fuente: (R, fuentes, et all, 2020).

Las ventajas de un algoritmo en lazo cerrado son:

- No requiere un algoritmo de posición solar.
- Alcanza una mayor precisión.
- No es restringido por la ubicación geográfica.

Las desventajas son:

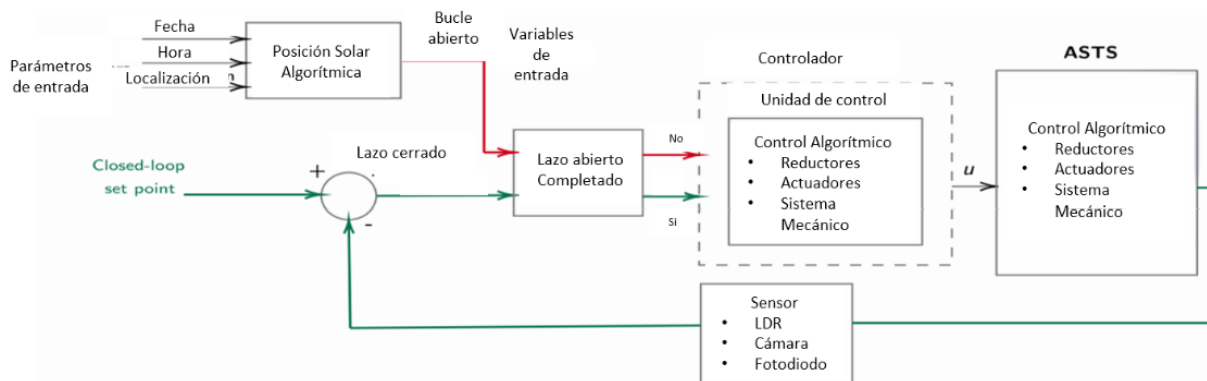
- Necesita de sensores solares.
- Su funcionamiento depende de los factores climáticos como la nubosidad o radiación difusa.
- El campo de visión del sensor limita la ubicación solar.
- Implementación compleja y costos elevados a comparación del lazo abierto.
- El uso de sensores de baja precisión puede reducir la exactitud del seguimiento solar.
- Varios tipos de fotosensores empleados en seguidores solares no tienen una respuesta lineal con respecto al cambio de temperatura y radiación.

1.16.1.3 Algoritmo lazo abierto y cerrado (Híbrido)

Este tipo de algoritmo se basa en el uso de dos lazos de control: un control robusto en lazo abierto y un control fino en lazo cerrado. Generalmente ambos lazos no suelen activarse de manera

simultánea a menos que se utilicen algoritmos de ponderación entre lazos para obtener una señal de control de seguimiento solar. En la figura 57 se muestra la consigna del diseño de control, en lazo abierto (línea roja) y lazo cerrado (línea verde).

Figura 57: Diagrama de bloques en lazo híbrido.



Fuente: (R, fuentes, et all, 2020).

Las principales ventajas de este algoritmo son:

- Posee alta precisión y exactitud.
- El seguimiento del sol se puede realizar incluso con nubosidad.
- No requiere de una calibración constante.

Las desventajas son:

- Requiere de datos geográficos y del tiempo para su orientación.
- En comparación con los algoritmos de lazo cerrado y abierto, su implementación es más costosa y compleja.
- Requiere de un algoritmo de posición solar.
- Requiere del uso de sensores solares.

Finalmente se busca que el sistema de seguimiento solar sea lo más preciso posible, por lo que se propone el uso de un algoritmo en lazo híbrido ya que cuenta con retroalimentación proporcionado por las señales enviadas de los sensores y un algoritmo en lazo abierto que no depende de las condiciones meteorológicas del entorno, es decir que exista factores que afecten a

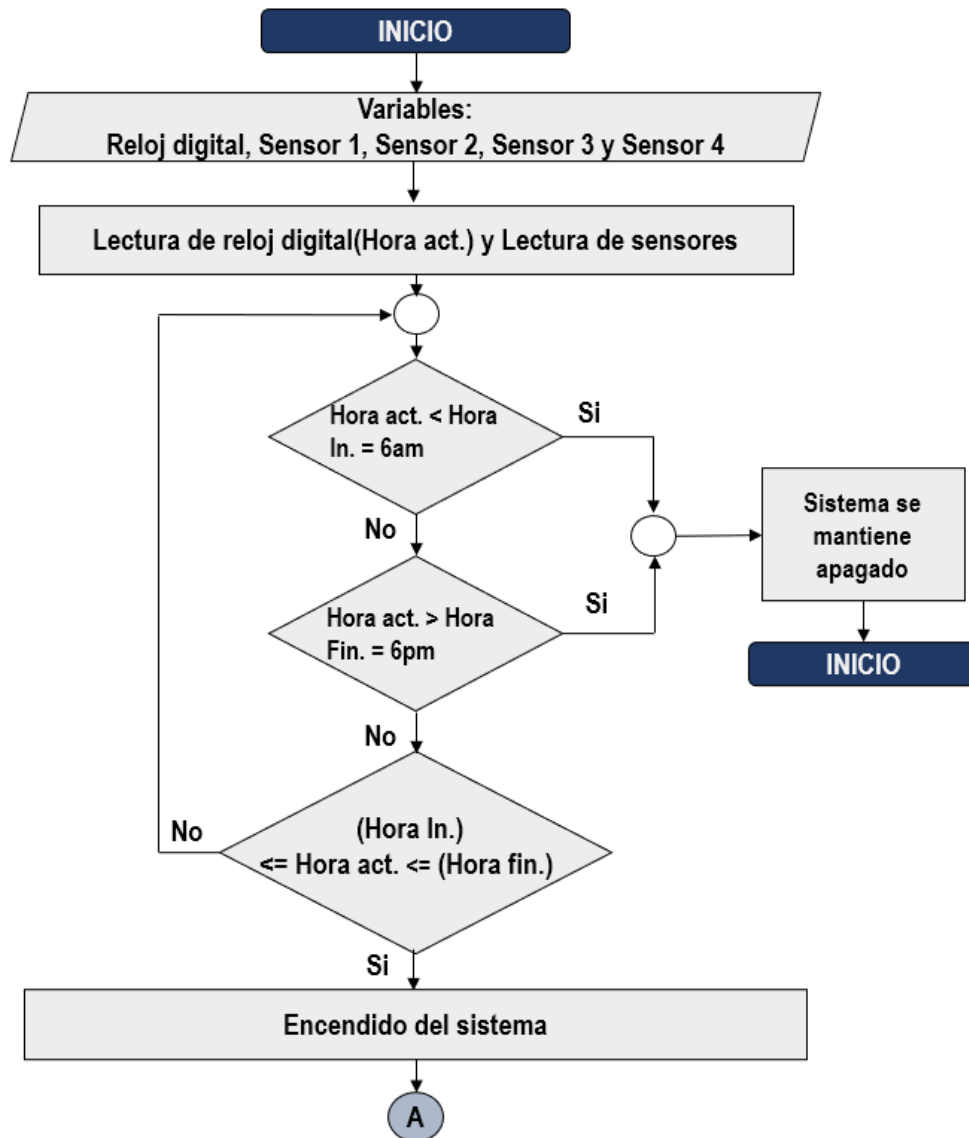
la lectura de los sensores. Por lo que el sistema de seguimiento solar tiene una mayor precisión y exactitud en el aprovechamiento de energía solar.

1.16.1.4 Diagrama de flujo del funcionamiento del seguidor solar.

En la siguiente figura se muestra el funcionamiento del sistema donde se requiere la fecha y hora exacta del día, para evitar que el sistema trabaje en horas donde no existe un aprovechamiento óptimo de la radiación solar, es decir en la noche. Posterior a ello se detecta la radiación solar en el lugar por medio de los sensores propuestos anteriormente, para mediante el uso de estos datos controlar el movimiento de los motores reductores y a efecto de esto, posicionar los paneles solares perpendicular a los rayos del sol. El sistema funciona de manera continua en un periodo de 12 horas iniciando a las 6:00 am y culminando a las 18:00 pm, por lo que no trabaja mientras no se encuentre en horas de funcionamiento.

Primero se declaran las siguientes variables de entrada, como el reloj digital donde se tiene: la hora actual (hora act.), la hora de inicio de funcionamiento (Hora In.) y la hora final (Hora fin.) y así mismo los datos entregados por los sensores de luz (sensor 1, sensor 2, sensor 3 y sensor 4).

Figura 58: Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema.

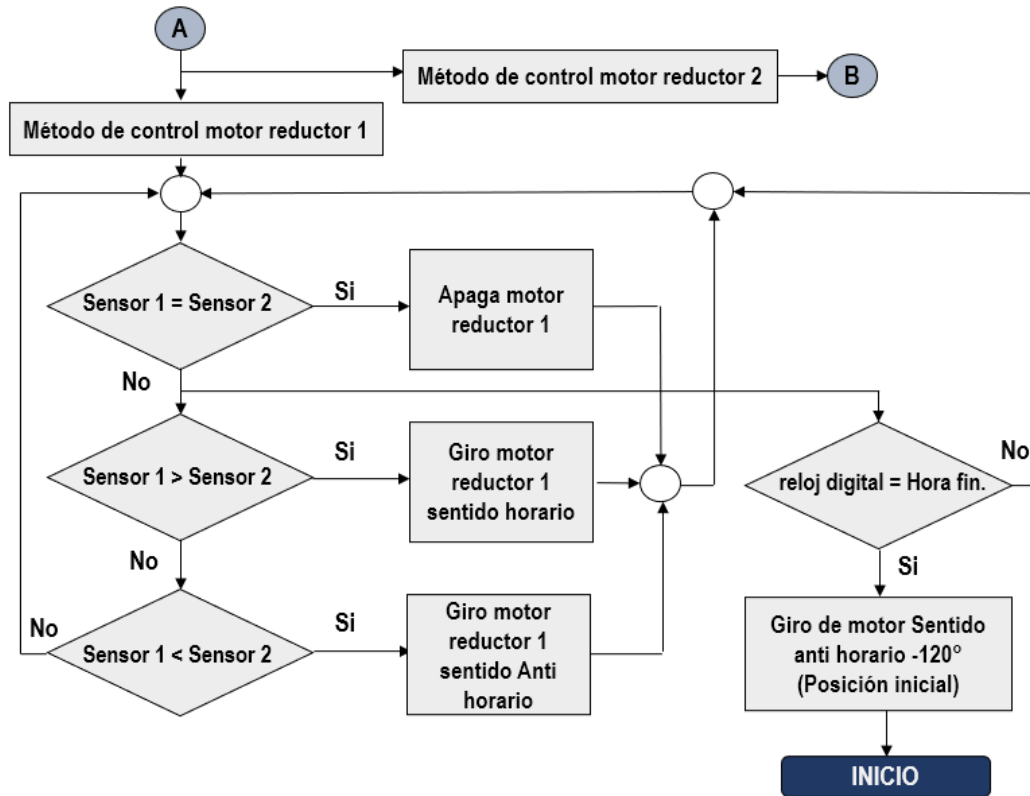


Fuente: Autores.

Una vez que el sistema se encienda, se procede a realizar una serie de condiciones para controlar el giro de los motores (Ver figura 59), donde se compara los valores tomados del sensor 1 y el sensor 2. Si el valor tomado del sensor 1 es mayor al sensor 2 el motor reductor gira en sentido horario mientras que si el sensor 1 es menor al sensor 2 cambia el sentido de giro del motor reductor 1 de manera antihoraria. Lo que se busca al realizar este tipo de condiciones es que cuando

sean similares los valores de los sensores 1 y 2 el giro del motor será nulo, manteniendo los paneles de manera perpendicular al sol.

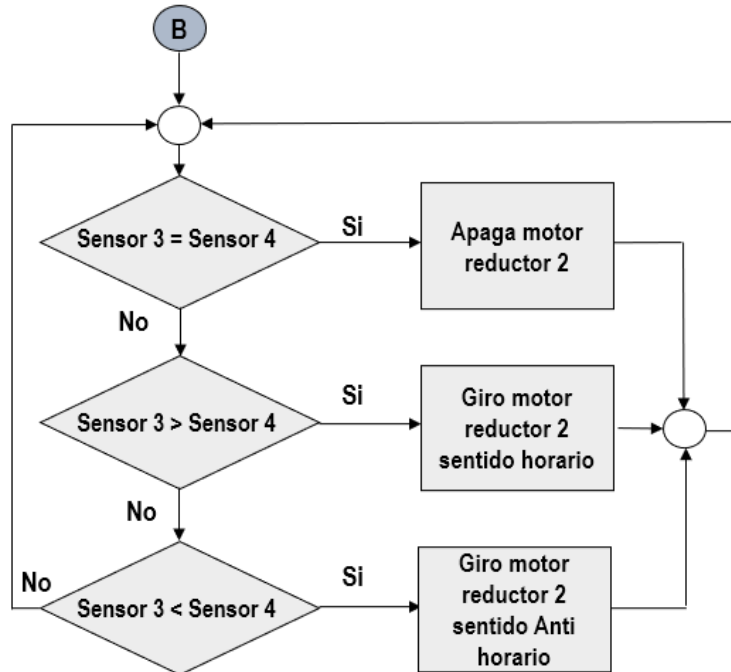
Figura 59: Diagrama de flujo del motor reductor 1.



Fuente: Autores.

De la misma manera se busca controlar el motor reductor 2 que mueve los paneles solares en dirección norte – sur, el cual tiene el mismo principio de funcionamiento que el motor reductor 1, cuya diferencia radica en que no gira 120° ya que la trayectoria del sol en este sentido varia poco. De igual forma se generan las mismas condiciones para controlar el motor reductor 2 obteniendo así un sistema más eficiente a la hora de captar energía solar (Ver figura 60).

Figura 60: Diagrama de flujo del motor reductor 2.



Fuente: Autores.

1.17 Simulación de verificación de las partes críticas.

1.17.1 Simulación de cargas aplicadas en los ejes del seguidor solar.

Mediante el diseño propuesto previamente calculado se realiza un análisis de simulación mediante el software de elementos finitos aplicando todas las propiedades físicas y elásticas de los materiales previamente mencionados sobre los elementos más críticos que son los ejes, se establecen las sujeciones de elementos para agregar las cargas puntuales que principalmente son: el peso de los paneles, peso de los engranes y los motores reductores respectivamente. Garantizando que el mecanismo no se encuentre sometido a pandeos ni deformaciones. Obteniendo un diseño confiable, seguro, con una prolongada vida útil y evitando el

sobredimensionamiento.

1.17.1.1 Selección de las características físicas del eje de transmisión

Con respecto a las características físicas del material escogido, se utilizó un acero con parámetros similares al propuesto, los cuales vienen predefinidos en el software, como se muestra en la tabla 19. Estos datos al ser semejantes al material escogido (acero SAE 4340) permiten que los resultados de la simulación sean semejantes.

Tabla 19: Características físicas del acero implementadas en el software.

Características del acero	Magnitud
Material	Steel
Densidad de masa	7,85 g/cm ³
Límite elástico	207 MPa
Resistencia a la tracción	345 MPa
El módulo de Young	210 GPa
El coeficiente de Poisson	0,3 ul
Módulo de corte	80,7692 GPa

Fuente: Autores

1.17.1.2 Simulación grafica del eje de transmisión

El eje de transmisión 1 que se muestra en la figura 61 se simuló mediante el software Inventor, donde como primer paso se utilizan las dimensiones para cada diámetro que se obtuvo con anterioridad en los cálculos entre ellos diámetro, ancho y el largo del eje, para luego seleccionar el material similar y obtener un diseño en 3D.

Figura 61: Simulación del eje de transmisión.

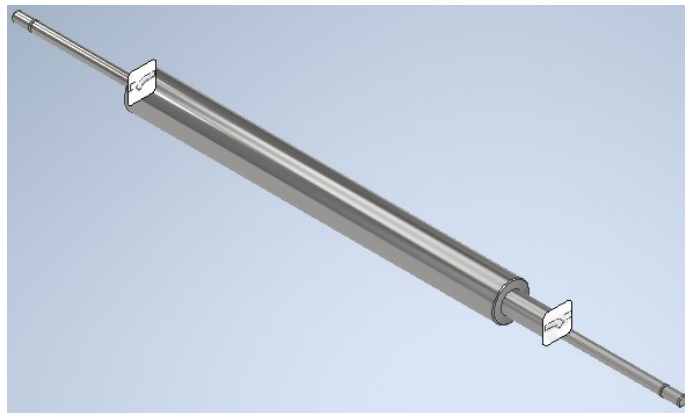


Fuente: Autores.

1.17.1.3 Ubicación de los apoyos en los extremos

También se ubican los apoyos en los extremos del eje (Ver figura 62), en los puntos determinados considerando las secciones donde van a estar sujetas por los rodamientos de bolas, para que a continuación se aplique la carga en los puntos donde se encuentra concentrado el peso de los elementos para cada uno de los ejes.

Figura 62: Ubicación de los apoyos en los extremos del eje.

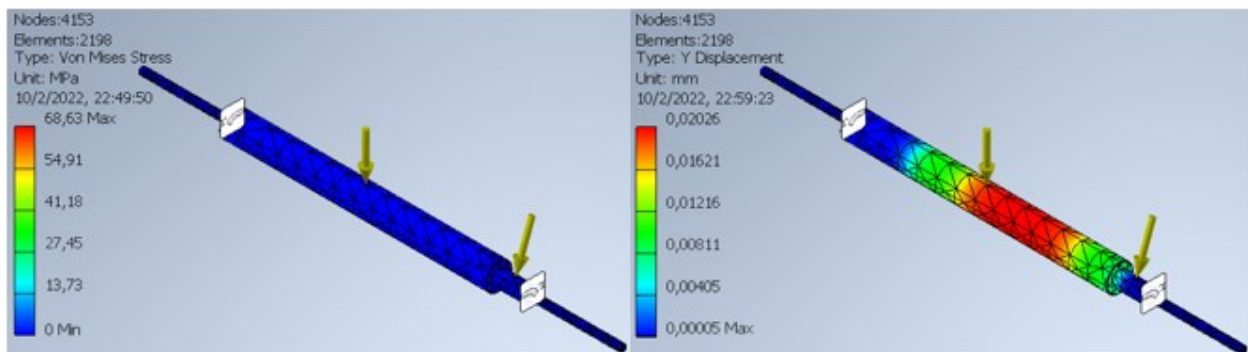


Fuente: Autores.

1.17.1.4 Análisis de elementos finitos para el eje 1 a 0°

Posteriormente se realiza un análisis de elementos finitos para determinar la resistencia del material y obtener la deformación y el esfuerzo máximo al aplicar una carga de 907.906 N sobre el centro del eje debido a que esa carga representa el peso de la estructura que soporta los paneles solares. También se considera la fuerza ejercida por el engrane calculada con anterioridad, el centro de gravedad del elemento y un enmallado generado por el mismo software. Como se puede observar en la figura 63 la carga aplicada en el centro se encuentra en dirección perpendicular al largo del eje, esto quiere decir que los paneles solares se encuentran horizontalmente a un ángulo de 0°.

Figura 63: Análisis de elementos finitos del eje 1 con una carga aplicada a 0° de inclinación.

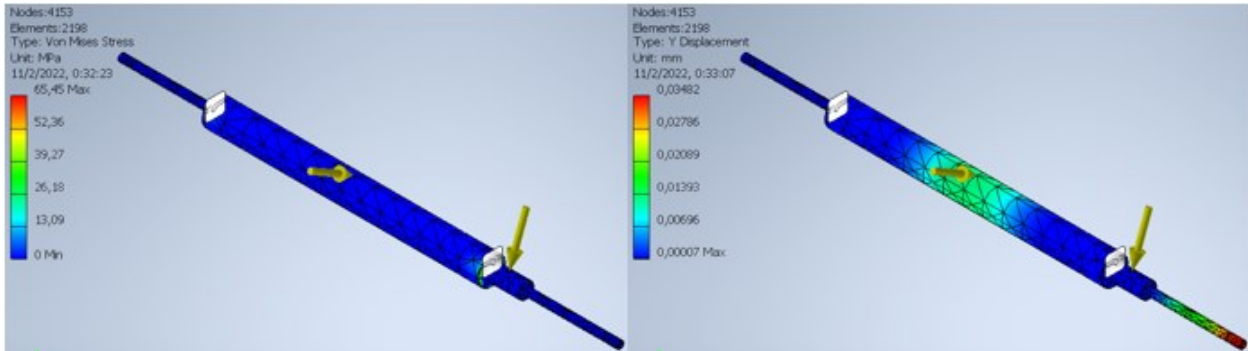


Fuente: Autores

1.17.1.5 Análisis de elementos finitos para el eje 1 a 60°

De igual manera en la figura 64 se realiza el mismo análisis para una inclinación máxima a la que llega los paneles solares que es de 60° tanto en su posición inicial como final. Por lo que el peso de la estructura genera mayor carga y se debe tomar en cuenta a la hora de simular este diseño para verificar que el eje soporte la carga bajo estas condiciones.

Figura 64: Análisis de elementos finitos del eje 1 con una carga aplicada a 60° de inclinación.

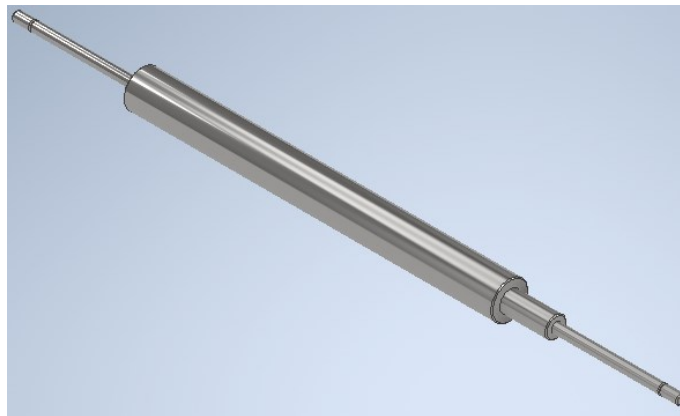


Fuente: Autores.

1.17.1.6 Análisis de elementos finitos para el eje 2 a 0°

Con respecto al segundo eje de transmisión (Ver figura 65), la carga aumenta debido a que la estructura sostiene el primer eje junto con sus componentes adicionales como son el motorreductor, los engranes, etc. Por lo que ahora la carga aplicada es de 1067.906 N lo cual produce un cambio en el dimensionamiento de eje 2 siendo mayor en comparación al eje 1.

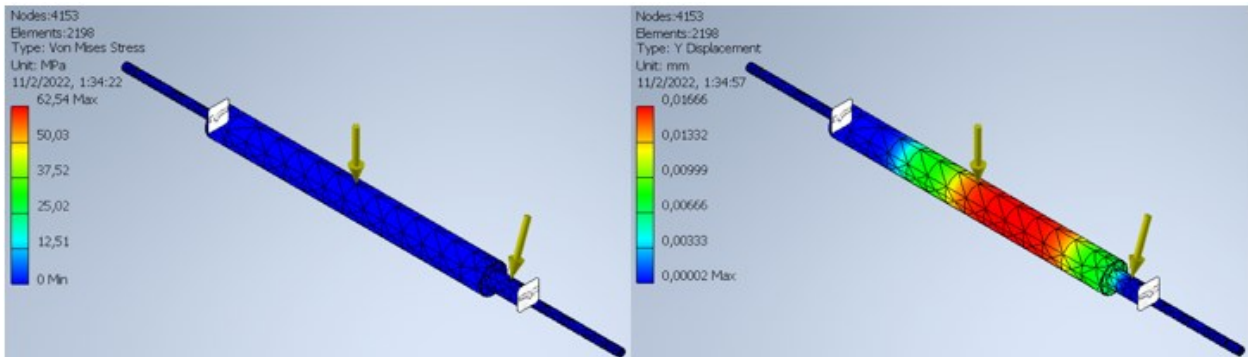
Figura 65: Simulación del eje 2.



Fuente: Autores.

De la misma manera que el eje 1 se realiza un análisis de elementos finitos aplicando la carga respectiva, se considera que los paneles solares estén a un ángulo de 0° (posición horizontal) como se muestra en la figura 66.

Figura 66: Análisis de elementos finitos del eje 2 con una carga aplicada a 0° de inclinación.

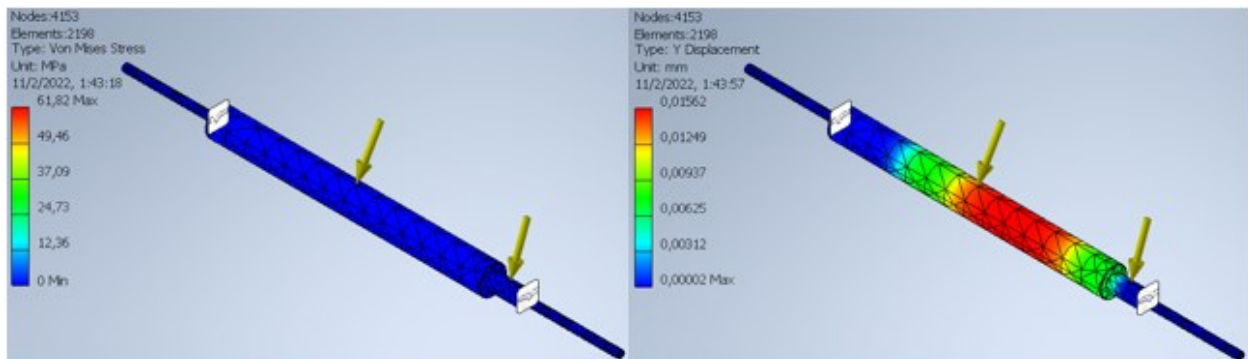


Fuente: Autores.

1.17.1.7 Análisis de elementos finitos para el eje 2 a 30°

La inclinación máxima que tiene el eje 2 es de 30° (Ver figura 67), tanto para su posición inicial como final debido a que el sistema también se mueve en dirección Norte – Sur. Aunque cabe mencionar que debido a las características geográficas de la zona el movimiento de rotación del eje 2 varía poco por lo que difícilmente alcanzará su posición máxima.

Figura 67: Análisis de elementos finitos del eje 2 con una carga aplicada a 30° de inclinación.



Fuente: Autores

Como se puede observar en las simulaciones los ejes están diseñados para soportar la carga de la estructura y el torque del motor y no presentar complicaciones debido a que el esfuerzo máximo de los ejes no sobrepasa el esfuerzo admisible del material que es de 1090MPa, así mismo las deformaciones no son significativas dando a entender que el diseño mecánico de los ejes es

óptimo.

1.17.2 Comparación de resultados de la simulación y los cálculos de las cargas aplicadas a los ejes del seguidor solar.

En la simulación se pudo comprobar que los resultados de los esfuerzos para cada eje sometidas a cargas en diferentes ángulos de rotación son menores al esfuerzo admisible que soporta el material equivalente a 1090 MPa. Por otro lado, los esfuerzos calculados analíticamente son similares a los valores obtenidos en el software, para el eje 1 sometido a la carga de 907.906 N en un ángulo de 60° el esfuerzo es de 65,45 MPa. Para el eje 2 sometido a la carga de 1067.906 N en un ángulo de 30° el esfuerzo en el simulador el esfuerzo es de 61,82 MPa. En la siguiente tabla se puede observar los demás resultados obtenidos en la simulación para cada uno de los ejes en diferentes posiciones y sus respectivos parámetros iniciales.

Tabla 20: Resultados obtenidos en el simulador para cada eje.

Datos del simulador	Eje 1 a 0°	Eje 1 a 60°	Eje 2 a 0°	Eje 2 a 30°
Material	Acero	Acero	Acero	Acero
Volumen	430867mm ³	430867 mm ³	430867mm ³	430867mm ³
Masa	3,38231kg	3,38231 kg	3,38231kg	3,38231kg
Simulados	68,6325MPa	65,4519 MPa	62,5376MPa	61,8208MPa
Calculados	62.37 MPa	64.26Mpa	62.18 MPa	62.51 Mpa

Fuente: Autores.

1.18 Presupuesto del diseño del seguidor solar del sistema de energía fotovoltaica.

La descripción de costos que se propone para el seguidor solar de doble eje en la comunidad de Yaapi debe ser detallado y concretizado para que el encargado de la obra pueda adquirir todos los componentes necesarios. A continuación, se detalla el valor aproximado para cada uno de los materiales que se deberán utilizar, el tipo de mecanizado a realizar, los insumos normalizados que

se utilizarán y los acabados superficiales que se tendrán que hacer para que el sistema funcione correctamente.

En la tabla 21 se tiene una lista de presupuestos de los materiales que se proponen para el ensamble de la estructura mecánica del seguidor. Estos materiales se pueden conseguir fácilmente en el Ecuador ya que son comúnmente utilizados para la elaboración de estructuras similares, lo cual beneficia al propietario de la obra optimizando el tiempo en adquirir dichos materiales.

Tabla 21: Presupuesto calculado para los materiales necesarios que requiere la construcción del seguidor solar de doble eje.

Materiales	Cantidad	Costo Unitario \$	Costo Total \$
Perfil estructural tubo cuadrado 100 x 100 x mm	23	1,89	44,79
Perfil estructural tubo cuadrado 75 x 75 x 3mm	13	1,89	24,65
Plancha negra comercial ASTM A 36 e = 8mm	10	2,10	23,06
Plancha negra comercial ASTM A 36 e = 12mm	26	2,10	55,61
Acero de transmisión Ø3 - 1/4"	8	4,67	40,16
Acero ASSAB 760 Bonificado	4	5,43	21,83
Acero ASSAB 7210 Grado maquinaria, Bonificado	7	5,70	42,75
Perfil estructural ángulo 40 x 40 x 3mm	11	1,89	21,64
Perfil Estructural tubo cuadrado 50 x 50 x 2mm	11	1,89	22,30
Plancha negra comercia ASTM A36 e = 3mm	8	2,10	18,14
Cable de acero inoxidable Ø1/4"	3	2,34	8,19
Grilletes de ajuste, acero inoxidable, Ø1/2"	8	2,67	21,36
Tensor regulable, acero inoxidable, Ø1/2"	2,00	3,46	6,92
Varilla lisa Ø14mm	1,00	3,78	3,78
Subtotal materiales			340,08

Fuente: Autores

Otro punto para tomar en cuenta para la elaboración del seguidor solar es el tipo de mecanizado que se ha de realizar en cada pieza, lo cual se especifica en la tabla 22. Cada uno de estos procesos se puede realizar en Morona Santiago, donde se disponen de talleres mecánicos, herramientas y maquinaria industrial.

Tabla 22: Presupuesto calculado para los procesos de mecanizado.

Mecanizados	Cantidad horas	Costo hora \$	Costo total \$	Observaciones
Tronzadora de metales	2	5,00	10,00	Corte perfiles
Soldadora Mig – Mag	10	25,00	250,00	Soldado de perfiles
Amoladora pequeña	4	3,00	12,00	Desbaste, pulido
Taladro de poste	4	10,00	40,00	Agujeros
Torno paralelo	14	35,00	490,00	Ejes, piñones, bujes
Fresadora Universal	6	30,00	180,00	Chaveteros
Fresadora dentadora	10	35,00	350,00	Piñones
Oxiacetilénica	3	15,00	45,00	Corte de planchas
Compresor de aire	3	12,00	36,00	Pintura de acabado
Subtotal mecanizados			1413,00	

Fuente: Autores

Por otro lado, existen insumos normalizados que se requerirán para que el sistema funcione correctamente, es decir que se debe tomar en cuenta elementos que permiten adecuar las funciones del dispositivo, como cojinetes, pernos arandelas, etc. Por lo que se proponen según los planos, adquirir los elementos que se listan en la tabla 23 debido a que cumplen con normativas, son ideales para ambientes externos ya que cumplen con certificación y son fáciles de adquirir en el mercado nacional.

Tabla 23: Presupuesto calculado para los insumos normalizados.

Insumos Normalizados	Cantidad	Costo unitario \$	Costo total \$	Observaciones
Cojinete de bolas	6	5,78	34,68	Normalizado
Pernos tipo ALLEN M5 x 40	48	0,97	46,56	Normalizado
Arandela	4	1,9	7,60	Mecanizada
Chavetas	8	2,56	20,48	Mecanizada
Anillo Seguer	10	0,38	3,80	Normalizado
Pernos tipo ALLEN M10 x 40	28	1,32	36,96	Normalizado
Pernos tipo ALLEN M10 x 50	6	1,67	10,02	Normalizado
Matrimonio Motorreductor	2	56,34	112,68	Normalizado
Motor reductor marca MELLOR	2	150	300	Corriente continua
Starter Kit BDC D1	2	100	200	Componente electrónico
Microcontrolador (Placa UDOO)	1	90,00	90,00	Componente electrónico
Sensor de luz	4	240,00	960,00	Componente electrónico

Panel solar	2	240	480	Normalizado
Subtotal Insumos Normalizados			2302.78	

Fuente: Autores.

También es importante que se den acabados en las superficies de la estructura, ya que de eso depende que el material resista a factores ambientales, como la lluvia, el sol, el viento, etc. Por lo que primero cada elemento deberá pasar por un proceso de lijado el cual elimina las imperfecciones del metal, unificando la superficie y provocando que este tenga un brillo y una resistencia adecuada. Segundo se deberá aplicar pintura anticorrosiva de fondo para que toda la estructura tome un color uniforme, seguido de esto se aplicará una segunda capa de pintura para reforzar la estructura la cual podrá proteger el metal de la corrosión aumentando su vida útil. Finalmente, en la siguiente tabla se muestra los acabados y el precio de cada uno, se tomó en cuenta el valor más económico de los elementos los cuales se pueden adquirir en tiendas locales y ferreterías de la zona.

Tabla 24: Presupuesto calculado para los acabados finales.

Acabados	Cantidad horas	Costo hora \$	Costo total \$	Observaciones
Pintura anticorrosiva fondo	1	22	22	Prepintado
Pintura anticorrosiva acabado	1	28	28	Pintado final
Disolvente	2	5	10	Limpieza, preparación
Lijas	4	0,56	2,24	Pulido
Silicon sellado juntas	1	4,67	4,67	Sellado
Subtotal acabados			66,91	

Fuente: Autores.

Otro proceso el cual se deberá tomar en cuenta para la implementación del seguidor solar es la cimentación, debido a que este proceso lleva una metodología, que se debe aplicar con la ayuda de personal capacitado en albañilería. Considerando el precio de la mano de obra en albañilería establecido en el Ecuador hoy en día y los distintos procesos que se muestran en la tabla

25 se tiene el precio total a considerar para la fijación de la estructura al suelo de la zona.

Tabla 25: Presupuestos calculados para los gastos en la cimentación.

Cimentación	Cantidad m³	Costo m³ \$	Costo total \$	Observaciones
Excavación a mano	1	32	32	Albañil - ayudante
Desalojo	1	12	12	Ayudante
Replanteo hormigón simple	0,05	100	5	Albañil - Ayudante
Encofrado	1	45,67	45,67	Albañil - Ayudante
Acero de refuerzo	27	2,34	63,18	Varilla corrugada
Hormigón fc= 180 Kg/cm ²	1,2	167	200,4	hormigón armado
Candado hormigón simple	0,005	100	0,5	hormigón simple
Desencofrado	1	12,34	12,34	Ayudante
Relleno	0,2	78,9	15,78	Albañil - Ayudante
Compactación	0,2	45,9	9,18	Albañil - Ayudante
Anclaje en sitio	1	65,78	65,78	Albañil - Ayudante
Subtotal cimentación			461,83	

Fuente: Autores.

Tomando en cuenta que la propuesta de implementación de este sistema de seguimiento solar se va a realizar en la comunidad de Yaapi, se considera también el precio del transporte que se deberá realizar para llevar el material desde comunidades más grandes donde existen ferreterías y tiendas, hacia el centro de salud, los cuales tienen un valor aproximado que se puede observar en la tabla 26, los cuales no son exactos, pero que se toman en cuenta para agregar al valor total de implementar el dispositivo. Debido a la cantidad de material que se necesita y que en las distintas comunidades de Morona Santiago se trabaja con camionetas cuyo valor ronda los 8 dólares por trayectoria recorrida hacia el centro de salud, se propone que se deberá realizar 4 viajes como máximo. De igual manera para el transporte de personal capacitado se considera unos 6 trayectos que pueden realizarse en buses o taxis.

Tabla 26: Presupuesto estimado para el transporte.

Transporte	Cantidad viajes	Costo por viaje \$	Costo total \$	Observaciones
Camioneta	4	8	32	Materiales
Taxis	6	2,50	15	Personal
Buses	6	0,30	1,8	Personal
Subtotal Transporte			48,8	

Fuente: Autores.

Por lo tanto, en cuanto al precio del transporte de material, el personal y al análisis establecido, se tiene un costo de aproximadamente 48 dólares, el cual puede reducirse dependiendo del horario y el lugar donde se consiga el personal y los materiales.

Al realizar la sumatoria de todos los precios anteriormente establecidos se tiene un total de 4632,60 dólares, los cuales serían un precio accesible teniendo en cuenta la calidad y el funcionamiento del sistema. Por otra parte, se pueden generar imprevistos o indirectos que pueden afectar el precio inicial propuesto, para lo cual se realiza un aumento del 10% del valor inicial.

Tabla 27: Valor total calculado para el seguidor solar.

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Costo final del sistema	4632,60	USD
IMPREVISTOS	463.26	USD
SUBTOTAL	5095.86	USD

Fuente: Autores.

Finalmente se añade el valor al impuesto agregado actual equivalente al 12% y se obtiene el valor total para la implementación del seguidor solar de doble eje en la comunidad de Yaapi.

Tabla 28: Costo total del seguidor solar añadido el valor al impuesto agregado.




DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
12% IVA	611.50	USD
TOTAL	5707.36	USD


Fuente: Autores.

1.18.1.1 Precio de seguidores solares existentes en el mercado internacional.

Para el siguiente estudio se tomó a consideración únicamente los seguidores solares de un eje y doble eje que se comercializan a nivel internacional, muchos de ellos son fabricados en China por lo que se venden en páginas como ALIBABA, EBAY, entre otros. En nuestro medio no existe producción local de este tipo de productos y para realizar una compra se debe considerar impuestos de importación y envíos, por tal motivo el precio puede aumentar considerablemente.

Tabla 29: Seguidores solares disponibles en el mercado.

Empresa	Descripción	Precio	Figura
WATTSUN	<p>“Sistema de seguimiento con un grado de libertad, transmisión por engranajes, proporciona 270° de rotación, soporta 6 módulos fotovoltaicos (no son incluidos).”^a</p> <p>Modelo: 014-AZ225</p>	\$9.187,00 USD	
FEiNA	<p>“Sistema de seguimiento a dos ejes, soporta dos módulos fotovoltaicos (no incluidos), aplicaciones solares que necesiten un buen método de apuntado dimensiones: 3x3m.”^b</p> <p>Modelo: FEiNA SF09</p>	\$3000,00 USD	
ALIBABA	<p>“Sistema de seguimiento a dos ejes, 25 años de vida útil, soporta dieciocho módulos fotovoltaicos (no incluidos).”^c</p> <p>Modelo: XPSZ- 5KW</p>	\$3.385,00 USD	

Wattneed	“Posicionamiento por hora a través de la calculadora de brillo, estructura de galvanizado caliente (no incluye panel solar).” ^d Modelo: Tracker FR 2018	\$10.280,00 USD	
-----------------	---	--------------------	---

Fuente: ^aTheSolarStore (2021). ^bSat – Control (2011). ^cALIBABA (2021). ^dWattneed (2018).

1.18.2 Comparación presupuestaria del sistema de seguidor solar

Se realiza una comparación entre el precio total de nuestro seguidor solar, con el precio de seguidores en el mercado internacional, para ello se tiene un costo total del sistema de \$5.707,36. Esto indica que el sistema de seguimiento solar de doble eje es relativamente costoso en comparación al modelo FEiNA SF09 el cual es de \$3000,00. Dicho modelo también cuenta con un Sistema de seguimiento a dos ejes que soporta dos módulos fotovoltaicos (no incluidos).

Por otro lado, también existen otros modelos de diferentes marcas cuyo coste es aún mayor, pero su principal diferencia es el número de paneles fotovoltaicos que soportan siendo mayores al número de paneles del diseño propuesto.

Conclusiones

En cuanto a lo abordado con anterioridad, el sistema de seguidor solar propuesto para la comunidad de Yaapi tiene dos ejes que mediante actuadores como el motor – reductor permite posicionar los paneles solares perpendiculares a los rayos solares permitiendo de esta manera captar la mayor energía solar posible. De igual manera, el seguidor está diseñado idealmente para adaptarse al clima de Morona Santiago donde se localiza dicha comunidad, la cual posee una radiación promedio de 4500 Wh/m². Por lo que existe la opción de implementar este sistema en

lugares cercanos que requieran de energía eléctrica mediante el uso de energías renovables. Por otro lado, el diseño del sistema cumple con los parámetros establecidos como es la resistencia al clima húmedo, la fuerza del viento, resistencia al agua, etc. Ya que cuenta con materiales como el acero galvanizado que brinda una mayor resistencia a los factores climáticos. De igual manera se consideró el uso de tensores para evitar que fuerzas mayores como el viento desestabilicen la base principal de la estructura.

En cuanto a los cálculos realizados para los elementos críticos de la estructura como los ejes de transmisión, engranes y columna principal se puede decir que con los resultados obtenidos en la simulación el eje 1 soporta un esfuerzo máximo de 65.45 Mpa y el eje 2 de 61.82 Mpa cuando se encuentran a un ángulo de inclinación máxima en comparación al calculado que es de 64.25 Mpa para el eje 1 y 62.51 Mpa para el eje 2, mientras que en la columna central del seguidor la carga total que soporta es menor a la carga crítica, siendo ($2.039 \text{ KN} < 159.22 \text{ KN}$), esto nos dice que este elemento no va a estar sometido a pandeo. Así mismo, los cálculos propuestos cumplen con las condiciones de diseño, por lo que el dimensionamiento de los elementos es el correcto. De igual manera los diámetros calculados son valores mínimos para considerar en la construcción de estos elementos, ya que estos resultados garantizan que el sistema funcione correctamente.

Se puede concluir también que, estos tipos de sistemas de seguimiento solar no requieren de un control complejo para su funcionamiento debido a que el tiempo de respuesta de los sensores no necesariamente tiene que ser inmediata. Por este motivo se ha utilizado un control en lazo abierto y cerrado para que el seguidor solar trabaje normalmente en condiciones de alta o baja luminosidad.

Por último, el costo total para el diseño propuesto analizado es de \$5707.36 en comparación

a los \$3000 del modelo FEiNA SF09, que cumple con características similares, por lo que por su precio no es factible construir este sistema de seguimiento solar teniendo en cuenta que existe un modelo similar en el mercado. Por otro lado, el aumento del costo es debido a que se tomó en cuenta los valores del mercado actual en Ecuador de los materiales, proceso de manufactura, transporte, mano de obra e imprevistos para el diseño del seguidor solar propuesto, a diferencia del modelo presentado por la marca FEiNA cuyo valor solo radica en el producto, donde no se toman en cuenta el precio de instalación, el tipo de panel solar, los procesos de mecanizado ni el precio de los aranceles establecidos en Ecuador.

Recomendaciones

No se recomienda realizar un seguidor solar de dos ejes debido a que el sistema está ubicado en la zona ecuatorial, por tal motivo el precio no justifica el uso de este tipo de sistema, por lo tanto, un seguidor de un solo eje sería lo más recomendable.

En cuanto al estudio realizado se recomienda calcular la potencia que consume el establecimiento, para mediante estos datos obtener con exactitud el número requerido de paneles solares y de esta manera implementar una cantidad determinada de sistemas de seguimiento solar que compensen la necesidad de este u otro centro de salud.

Antes de la implementación del sistema se recomienda también realizar un análisis previo de la cantidad de energía que producen los paneles solares elegidos para la estructura, debido a que el estudio realizado no propone un modelo específico de paneles, por lo que la cantidad de energía puede variar dependiendo del modelo que se utilice.

Por otro lado, se recomienda el uso de sensores que se muestran en la tabla 15, debido a

que estos elementos son diseñados específicamente para sistemas de seguimiento ya que brindan una mejor confiabilidad puesto que su sistema de control cuenta con módulos, algoritmos específicos para sensores de luz que cuentan con certificación de seguridad contra el agua y sistemas de seguridad para la sobrecarga de energía, aumentando así la vida útil del mecanismo.

Referencias

Abella, M.A. & Romero, F.C., 2009. *Sistemas de Bombeo Fotovoltaico*. CIEMAT.

ALIBABA. (2021). *ALIBABA*. Obtenido de Panel Solar PV módulo proveedor Taian Xinpeng Energy Technology Co., Ltd.: www.alibaba.com

Alonso Lorenzo, J. A. (2019). *SUNFIELDS*. Obtenido de SUNFIELDS: www.sfe-solar.com

Alonso Lorenzo, J. A. (2021). *sfe-solar*. Obtenido de Los paneles solares de mayor eficiencia (2019-2021): www.sfe-solar.com

Ávila Larrea, F. G. (2018). *Diseño y construcción de una estructura metálica para un seguidor solar de dos ejes para ser implementado en el campus Miguel de Cervantes de la UISEK Ecuador*. *Universidad Internacional SEK*.

Budynas , R., & Nisbett, J. (2018). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Ciudad de México: McGraw-Hill.

CONELEC. (29 de Julio de 2008). *biblioteca.olade*. Recuperado el 10 de Junio de 2021, de *ATLAS SOLAR DEL ECUADOR CON FINES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA*: <http://biblioteca.olade.org>

Control, S. . (2011). *solar - motors* . Obtenido de Catalog Turnkey systems and solutions for

photovoltaic power plants: www.solar-motors.com

CRISAFULLI, F. J. (2018). *Diseño sismorresistente de construcciones de acero*. Mendoza: Alacero.

degeriberica. (2021). *degeriberica*. Recuperado el 11 de Agosto de 2021, de MLD Sensor: www.degeriberica.com

Fausto García, A. K. (2018). *Renewable Energies Business Outlook 2050*. España: Springer .

Galvanizing, C. (03 de Marzo de 2020). *crossroadsgalvanizing*. Obtenido de Acero Galvanizado vs Acero Inoxidable: ¿Cuál es la Mejor Opción?: www.crossroadsgalvanizing.com

Groover, M. (2010). *FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA* (4ta edición ed.). Ciudad de México, México: Mc Graw Hil. Recuperado el 2021

Inc., M. T. (28 de Julio de 2016). *digkey*. Recuperado el 20 de Agosto de 2021, de Curiosity High Pin Count (HPC) Development Board User's Guide: <https://www.digkey.com/>

IPAC. (2019). *IPAC Duferco Group*. Obtenido de IPAC Duferco Group: <http://www.ipac-acero.com>

Jnablog. (28 de Diciembre de 2020). *Jnablog*. Obtenido de ¿Cuál Es Mejor? ¿El Acero Inoxidable O El Acero Galvanizado?: www.jnaceros.com

Mellor. (22 de Febreo de 2019). *AC & DC Motors & Geared Motors*. Obtenido de <http://www.mellorelectrics.co.uk/>

Messenger R., A. A. (2017). *Photovoltaic Systems*. London: CRC Press.

MOTORS, M. (03 de 23 de 2016). *Brushless DC Motor Control Unit*. Obtenido de mellor-

electrics-ltd.

Mott, R. (2018). *MACHINE ELEMENTS IN MECHANICAL DESIGN*. (6. edición, Ed.) New York, EEUU: Pearson. Recuperado el 2021

Mott, R. L. (2009). *Resistencia de materiales*. México: PEARSON EDUCACIÓN.

MRH. (23 de Mayo de 2016). *cubesatshop*. Recuperado el 11 de Agosto de 2021, de NanoSSOC-A60-Technical-Specifications.: <https://www.cubesatshop.com/>

naylampmechatronics. (12 de Marzo de 2015). *naylampmechatronics*. Recuperado el 09 de Febrero de 2022, de MÓDULO RTC DS1307 + EEPROM AT24C32 (I2C): <https://naylampmechatronics.com/>

OPAC COMPONENTS. (s.f.). *OPAC COMPONENTS* . Obtenido de OPAC COMPONENTS: www.opac.net

PASTOR, J. (25 de Abril de 2018). *xataka*. Recuperado el 20 de Agosto de 2021, de Raspberry Pi 3 Model B+, análisis: más potencia y mejor WiFi para un miniPC que sigue asombrando: <https://www.xataka.com/>

real, F. (01 de Marzo de 2021). *Fundición real SA de CV*. Obtenido de El aluminio en la industria Te decimos sus aplicaciones más comunes: www.fundicionreal.com

rikasensor. (11 de Marzo de 2019). *rikasensor*. Recuperado el 11 de Agosto de 2021, de RK200-03 Solar Pyranometer Radiation Sensor: <https://www.rikasensor.com/>

sensovant. (2014). *sensovant*. Recuperado el 11 de Agosto de 2021, de Sensor DR03 Pirheliómetro DR03 de radiación solar directa: <https://www.sensovant.com/>

serverscheck. (28 de Agosto de 2019). *serverscheck*. Recuperado el 13 de Febrero de 2022, de Digital Luminosity Sensor (SEC-LUX): <http://documents.serverscheck.com>

SIEMENS. (27 de Enero de 2009). *SIEMENS*. Recuperado el 05 de Febrero de 2022, de Motorreductores MOTOX Catálogo D87.1: <http://www.siemens.com/gearedmotors>

skf. (03 de Octubre de 2020). *skf*. Recuperado el 09 de Febrero de 2022, de Rodamientos: <https://www.skf.com/>

solar-motors. (26 de Septiembre de 2018). Recuperado el 11 de Agosto de 2021, de SOLAR OPTICAL SENSOR SOS0C1_R2 MR: <http://www.solar-motors.com/>

TAPIA CRUZ, R. A. (julio de 2018). DISEÑO ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SOPORTE MECÁNICO CON DOS GRADOS DE LIBERTAD PARA POSICIONAMIENTO PERPENDICULAR A LA LUZ DE UN PANEL FOTOVOLTAICO DE 100 W. 118. Recuperado el 05 de 02 de 2022

thesolarstore. (2021). *thesolarstore*. Obtenido de Wattsun AZ-225 Rastreador de panel solar fotovoltaico activo de doble eje con montaje de 190 pies cuadrados: www.thesolarstore.com

udoo. (29 de Octubre de 2020). *udoo*. Recuperado el 20 de Agosto de 2021, de Documentación UDOO Quad / Dual: <https://www.udoo.org/>

uelectronics. (01 de Marzo de 2016). *uelectronics*. Recuperado el 09 de Febrero de 2022, de Modulo DS3231 De Tiempo Real RTC Con Batería: <https://uelectronics.com>

Wattneed. (2018). *Wattneed*. Obtenido de Seguidor fotovoltaico 2 ejes 16 paneles:

www.Wattuneed.com

Xukyo. (10 de Octubre de 2020). *aranacorp*. Recuperado el 20 de Agosto de 2021, de Crear una interfaz web con NodeMCU ESP8266: <https://www.aranacorp.com/>

Yoshitake, J. (18 de Mayo de 2016). *britannica*. Obtenido de britannica: <https://www.britannica.com/technology/solar-tracker>

ANEXOS

ANEXO A



PVsyst V7.2.12
VCO, Simulation date:
24/02/22 14:09
with v7.2.12

Project: yaapi

Variant: Nueva variante de simulación

Project summary

Geographical Site Yaapi Ecuador	Situation Latitude -2.89 °S Longitude -77.92 °W Altitude 256 m Time zone UTC-5	Project settings Albedo 0.20
Meteo data yaapi Meteonorm 8.0 (2010-2014), Sat=100% - Sintético		

System summary

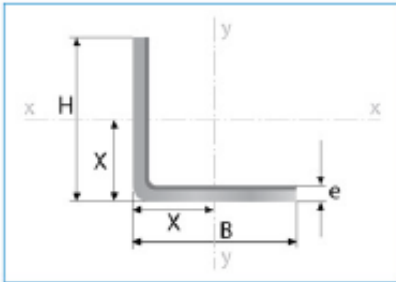
Stand alone system PV Field Orientation Tracking two axis, frame N-S	Stand alone system with batteries User's needs Dally household consumers Constant over the year Average 3.5 kWh/Day
System information PV Array Nb. of modules 3 units Pnom total 1200 Wp	Battery pack Technology Lithium-Ion, LFP Nb. of units 12 units Voltage 26 V Capacity 600 Ah

General parameters

Stand alone system	Stand alone system with batteries	
PV Field Orientation		
Orientation	Trackers configuration	Models used
Tracking two axis, frame N-S	No 3D scene defined	Transposition Perez
		Diffuse Perez, Meteonorm
		Circumsolar separate
User's needs		
Daily household consumers		
Constant over the year		
Average	3.5 kWh/Day	

PV Array Characteristics

PV module		Battery	
Manufacturer	Generic	Manufacturer	Generic
Model	GS-S-400-Platinum	Model	Adjustable L-Hon
(Original PVsyst database)		Technology	Lithium-Ion, LFP
Unit Nom. Power	400 Wp	Nb. of units	12 In parallel
Number of PV modules	3 units	Discharging min. SOC	10.0 %
Nominal (STC)	1200 Wp	Stored energy	13.3 kWh
Modules	3 Strings x 1 In series	Battery Pack Characteristics	
At operating cond. (50°C)		Voltage	26 V
Pmpp	1050 Wp	Nominal Capacity	600 Ah (C10)
U mpp	43 V	Temperature	Fixed 20 °C
I mpp	24 A		
Controller		Battery Management control	
Universal controller		Threshold commands as	SOC calculation
Technology	MPPT converter	Charging	SOC = 0.96 / 0.80
Temp coeff.	-5.0 mV/°C/Elem.	Discharging	SOC = 0.10 / 0.35
Converter			
Maxi and EURO efficiencies	97.0 / 95.0 %		
Total PV power			
Nominal (STC)	1 kWp		
Total	3 modules		
Module area	7.7 m ²		
Cell area	6.8 m ²		



Largo Normal:
6 metros
Recubrimiento:
Negro o Galvanizado
Calidad de Acero:
ASTM A36 / ASTM A572 Gr 50 /
ASTM A653
Norma de Fabricación:
NTE INEN 1623
Espesores:
Desde 1,50 a 6,00 mm
Observaciones:
Otras dimensiones y largos,
previa consulta

> Aplicaciones

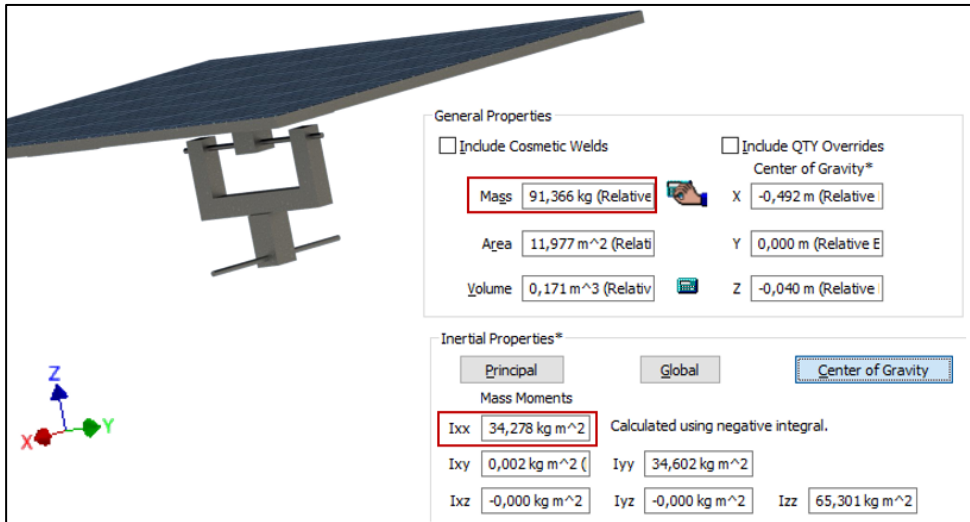
Designaciones	Esp.	Peso	Propiedades Estáticas								
			Eje x-x			Eje y-y			Distancia de eje x-y a superficie		
			Momento de inercia	Módulo de resistencia	Radio de giro	Momento de inercia	Módulo de resistencia	Radio de giro			
H	B	e	P	P	I	W	i	I	W	i	X=Y
mm	mm	mm	kg/m	kg/6m	cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ³	cm	cm
20	20	1,50	0,44	2,61	0,21	0,15	0,47	0,21	0,15	0,47	0,54
		2,00	0,58	3,46	0,28	0,20	0,62	0,28	0,20	0,62	0,59
		3,00	0,83	4,96	0,38	0,28	0,60	0,38	0,28	0,60	0,64
25	25	1,50	0,55	3,32	0,42	0,24	0,59	0,42	0,24	0,59	0,67
		2,00	0,73	4,38	0,56	0,32	0,78	0,56	0,32	0,78	0,72
		3,00	1,06	6,36	0,79	0,45	0,76	0,79	0,45	0,76	0,77
30	30	1,50	0,67	4,03	0,75	0,35	0,71	0,75	0,35	0,71	0,79
		2,00	0,89	5,34	1,00	0,46	0,94	1,00	0,46	0,94	0,84
		3,00	1,30	7,78	1,41	0,67	0,92	1,41	0,67	0,92	0,89
40	40	1,50	0,91	5,44	1,83	0,63	0,95	1,83	0,63	0,95	1,04
		2,00	1,21	7,23	2,44	0,84	1,26	2,44	0,84	1,26	1,09
		3,00	1,77	10,61	3,50	1,22	1,25	3,50	1,22	1,25	1,14
		4,00	2,31	13,83	4,46	1,58	1,23	4,46	1,58	1,23	1,19
		5,00	2,82	16,90	5,31	1,92	1,22	5,31	1,92	1,22	1,24

ANEXO B

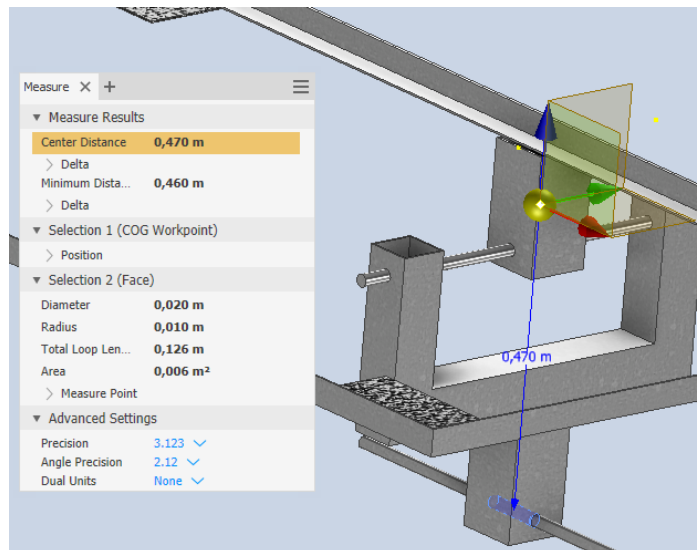
APPENDIX 3 (Continued)							
Material designation (SAE number)	Condition	Tensile strength		Yield strength		Ductility (percent elongation in 2 in)	Brinell hardness (HB)
		(ksi)	(MPa)	(ksi)	(MPa)		
4340 ¹	Annealed	108	745	68	469	22	217
4340	OQT 1300	140	965	120	827	23	280
4340	OQT 1000	171	1180	158	1090	16	363
4340	OQT 700	230	1590	206	1420	12	461
4340	OQT 400	283	1950	228	1570	11	555
5140	Annealed	83	572	42	290	29	167
5140	OQT 1300	104	717	83	572	27	207
5140	OQT 1000	145	1000	130	896	18	302
5140	OQT 700	220	1520	200	1380	11	429
5140	OQT 400	276	1900	226	1560	7	534
5150	Annealed	98	676	52	359	22	197
5150	OQT 1300	116	800	102	700	22	241
5150	OQT 1000	160	1100	149	1030	15	321
5150	OQT 700	240	1650	220	1520	10	461
5150	OQT 400	312	2150	250	1720	8	601
5160	Annealed	105	724	40	276	17	197
5160	OQT 1300	115	793	100	690	23	229
5160	OQT 1000	170	1170	151	1040	14	341
5160	OQT 700	263	1810	237	1630	9	514
5160	OQT 400	322	2220	260	1790	4	627
6150 ¹	Annealed	96	662	59	407	23	197
6150	OQT 1300	118	814	107	738	21	241
6150	OQT 1000	183	1260	173	1190	12	375
6150	OQT 700	247	1700	223	1540	10	495
6150	OQT 400	315	2170	270	1860	7	601
8650	Annealed	104	717	56	386	22	212
8650	OQT 1300	122	841	113	779	21	255
8650	OQT 1000	176	1210	155	1070	14	363
8650	OQT 700	240	1650	222	1530	12	495
8650	OQT 400	282	1940	250	1720	11	555
8740	Annealed	100	690	60	414	22	201
8740	OQT 1300	119	820	100	690	25	241
8740	OQT 1000	175	1210	167	1150	15	363
8740	OQT 700	228	1570	212	1460	12	461
8740	OQT 400	290	2000	240	1650	10	578

ANEXO C

El momento de inercia que se requiere para los cálculos tiene que ser con respecto al eje X debido a que su dirección coincide con la del eje 2 del seguidor.



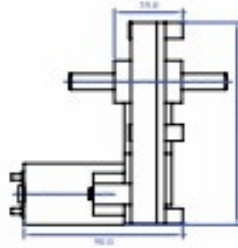
Mediante el software Inventor se encontró el centro de gravedad de la estructura y finalmente se obtuvo la distancia máxima que existe entre el centro de gravedad y el eje 2.





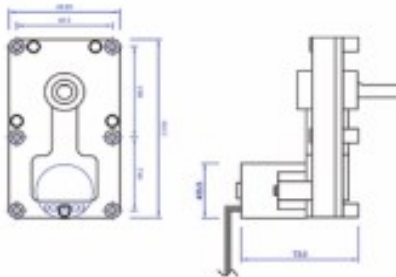
FBD - Motorreductor DC serie T3

- Disponible con el motor 5 o 7 de la serie FRS en DC
- Par de salida: Hasta 35Nm en función de la velocidad y tamaño de motor
- Rango de velocidad: 3.5 - 50rpm



Serie FBB T3 motorreductor DC sin escobillas

- Tensión nominal 24VDC
- Bidireccional
- Control de velocidad por PWM
- Resolución de señal de velocidad: seis pulsos por revolución
- Niveles excepcionalmente bajos de ruido
- Larga vida
- Rango de velocidad: 0,4 - 50 rpm
- Par máximo: 35 Nm



10

t: +44 (0)1254 53854
www.melloelectrics.co.uk

ANEXO E
Planos de diseño.