



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

**PROYECTO TÉCNICO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

TEMA:

**“DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE UN GENERADOR DE ENERGÍA LIMPIA
A PARTIR DE LA ALEACIÓN NÍQUEL-TITANIO EN LOS
LABORATORIOS DE LA FICM”**

AUTOR: David Natanael Velasco Alvarez

TUTOR: Ing. Mauricio Carrillo Mg.

AMBATO – ECUADOR

2019

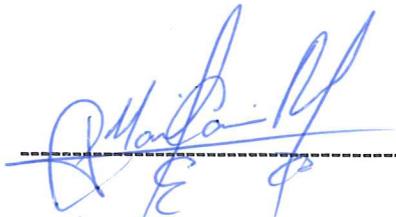
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Certifico: En mi calidad de tutor del proyecto técnico, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, con el tema “**DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE UN GENERADOR DE ENERGÍA LIMPIA A PARTIR DE LA ALEACIÓN NÍQUEL-TITANIO EN LOS LABORATORIOS DE LA FICM**” elaborado por el Sr. David Natanael Velasco Alvarez portador de la cédula de ciudadanía: 1600679250, y egresado de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecánica.

Certifico:

- ✓ El presente proyecto de investigación es original de su autor
- ✓ Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes
- ✓ Esta concluido en su totalidad

Ambato, Julio 2019



Ing. Mg. Carlos Mauricio Carrillo Rosero

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO

Yo, David Natanael Velasco Alvarez con CI. 1600679250, declaro que los criterios emitidos en este proyecto técnico con el tema: “**DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE UN GENERADOR DE ENERGÍA LIMPIA A PARTIR DE LA ALEACIÓN NÍQUEL-TITANIO EN LOS LABORATORIOS DE LA FICM**”, así como contenidos, cálculos realizados, resultados obtenidos, conclusiones y recomendaciones descritas en el proyecto técnico son de exclusiva responsabilidad de mi autoría.

Ambato, Julio 2019



David Natanael Velasco Alvarez

CI: 1600679250

Autor

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato para que haga este Proyecto Técnico o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación según las normas de la institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi Proyecto Técnico con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este trabajo experimental dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando ésta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, Julio 2019



David Natanael Velasco Alvarez

CI: 1600679250

Autor

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

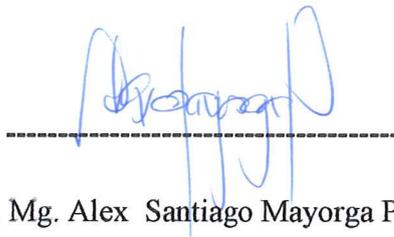
Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Proyecto Técnico realizado por el estudiante David Natanael Velasco Alvarez de la Carrera de Ingeniería Mecánica, bajo el tema: "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GENERADOR DE ENERGÍA LIMPIA A PARTIR DE LA ALEACIÓN NÍQUEL . TITANIO EN LOS LABORATORIOS DE LA FICM"

Ambato, Julio 2019

Para constancia firman:



Ing. Mg. Santiago Paul Cabrera Anda



Ing. Mg. Alex Santiago Mayorga Pardo

DEDICATORIA

A Dios quien ha sido mi guía, fortaleza y su mano de fidelidad y amor han estado conmigo hasta el día de hoy. A mis padres David y Emérita quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades porque Dios está conmigo siempre. A mis hermanos Mariela y Alex por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento gracias. A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas. Finalmente quiero dedicar esta tesis a todas mis amigos, por apoyarme cuando más las necesito, por extender su mano en momentos difíciles y por el amor brindado cada día, de verdad mil gracias hermanitos, siempre los llevo en mi corazón.

AGRADECIMIENTO

A Dios por la fuerza, sabiduría e inteligencia que me da cada día para ser una mejor persona y cumplir cada una de las metas planteadas en mi vida.

A mi familia y a todas las personas quienes me apoyaron guiándome siempre y permitiendo ser mejor cada día, durante este camino que hoy exitosamente culmino.

A los ingenieros de la Carrera de Ingeniería Mecánica, por formarme profesionalmente compartiendo sus conocimientos, enseñanzas y experiencias de vida durante el proceso de formación profesional.

A mi tutor Ing. Mg. Mauricio Carrillo por su paciencia y dedicación, por haberme brindado su apoyo incondicional e impartir sus conocimientos durante el desarrollo de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO

CAPÍTULO I	1
1.1 Antecedentes Investigativos.....	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Determinar parámetros del alambre nitinol aplicables a una máquina térmica de generación eléctrica.....	2
• Historia del nitinol.....	2
• Principio de funcionamiento	2
• Fases de funcionamiento del Nitinol	3
• Ventajas y desventajas del nitinol	4
• Datos técnicos del alambre nitinol	5
• Selección del alambre de nitinol	5
• Soldaduras aplicables al alambre NiTi	6
• Selección de soldadura	8
1.2.2 Construir la máquina térmica.....	8
• Clasificación de los motores térmicos SMA	8
• Selección de motor térmico.....	11
• Relación de transmisión	12
• Velocidad lineal.....	12
• Fuerza centrípeta	12
• Longitud de correa de alambre de nitinol.....	12
• Cálculos de la potencia y eficiencia del sistema	13
• Eje de transmisión	14
• Rodamientos	15
• Fabricación de piezas en impresora 3D.....	17
• Acople de transmisión	18

• Tanque de almacenamiento	19
• Soldado en frío del alambre.....	20
1.2.3 Determinar voltaje y amperaje	20
• Arduino Mega 2560.....	20
• Sensor de temperatura DS1820	21
• Módulo Relé 4CH 5VDC	22
• Encoder FC-03	23
• Resistencia o Niquelina	23
CAPÍTULO II	24
2.1 Materiales.....	24
2.2 Métodos.....	28
• Método de información bibliográfica.....	28
• Método deductivo.....	28
• Método de ensayo y error.....	29
• Método de recolección y análisis de resultados	30
CAPÍTULO III	32
3.1 Análisis y discusión de los resultados.....	32
• Prueba 1	32
• Prueba 2	33
• Prueba 3.....	34
• Prueba 4.....	36
• Prueba 5.....	37
• Consideraciones.....	38
• Cálculo de relación de transmisión	39
• Masa de poleas	39
• Calculo del número de canales	39

• Longitud de correa de alambre de nitinol.....	40
• Cálculos de la potencia y eficiencia del sistema	41
• Diseño del eje de transmisión.....	42
• Cálculo de rodamientos	47
• Selección de Rodamientos.....	48
3.2 RESULTADOS.....	51
• Voltaje vs Rpm.....	52
• Amperaje vs Rpm.....	52
• Error de medición.....	53
• Potencia del generador	54
• Arreglo.....	54
CAPÍTULO IV	56
4.1 Conclusiones	56
BIBLIOGRAFÍA.....	57
ANEXOS	
PLANOS	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Efecto de memoria de forma modo flexión	3
Figura 2. Histéresis de temperatura del Nitinol	4
Figura 3. Patentes de motores de manivela.....	9
Figura 4. Motor térmico tipo cigüeñal	9
Figura 5. Vista del motor doble manivela.....	10
Figura 6. Patentes de motores de poleas no sincronizadas.....	10
Figura 7. Patentes de motores de poleas sincronizadas.....	11
Figura 8. Patente de motores de campo	11
Figura 9. Representación de las fuerzas aplicadas	14
Figura 10. Impresora 3D	18
Figura 11. Matrimonio de ejes	18
Figura 12. Dimensión de tanque de agua	19
Figura 13. Soldado en frío en alambre de 0,5mm de diámetro	20
Figura 14. Configuración de circuito integrado del sensor	21
Figura 15. Diagrama de conexión	22
Figura 16. Tarjeta de relés conexión a arduino	22
Figura 17. Tarjeta de relés conexión a niquelina	22
Figura 18. Principales partes del Encoder.....	23
Figura 19. Prototipo 1	33
Figura 20. Prototipo 2	34
Figura 21. Prueba 3.1	35
Figura 22. Prueba 3.2	36
Figura 23. Prueba 4	37
Figura 24. Prueba 5	38
Figura 25. Longitud de bucle de nitinol	40
Figura 26. Representación de las fuerzas aplicadas	43
Figura 27. Representación de las fuerzas sobre el eje 2 (medidas en mm).....	43
Figura 28. Momento máximo eje 2	44
Figura 29. Representación de las fuerzas sobre el eje 1.....	45
Figura 30. Momento máximo eje 1	46
Figura 31. Voltaje Vs Rpm	52
Figura 32. Amperaje Vs Rpm	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Materiales.....	24
Tabla 2. Resultados prueba 4	37
Tabla 3. Selección de rodamientos.....	51
Tabla 4. Errores de mediciones	54

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

“DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE UN GENERADOR DE ENERGÍA LIMPIA A PARTIR DE LA ALEACIÓN NÍQUEL-TITANIO EN LOS LABORATORIOS DE LA FICM”

Autor: David Natanael Velasco Alvarez

Tutor: Ing. Mauricio Carrillo, Mg.

RESUMEN EJECUTIVO

Para este proyecto se evaluó el comportamiento de la aleación níquel con titanio como una banda para un generador de energía limpia. Las especificaciones del alambre utilizado son de diámetro de 0.5mm y temperatura de transición de 80°C, para la cual se consideró una relación de transmisión de 5:2. Una vez establecido la relación, se inició el diseño de las poleas obteniendo las masas en un software CAD para ser utilizadas en la obtención de la fuerza lineal del movimiento circular. Para la selección del número de canales a utilizar, se considera la fuerza de enfriamiento del alambre de nitinol proporcionada por la fábrica Dinalloy, para ser comparado con la fuerza lineal obtenida por cada canal sumado.

Una vez diseñado el generador se procedió a utilizar la impresión en 3D para la construcción de poleas, bases, protectores y soportes, se trabajó con el polímero PLA. Terminada la construcción se realizan las pruebas necesarias para la obtención de revoluciones generadas por el sistema de poleas, voltaje y amperaje del sistema, por lo cual, se realizó la conexión del eje de la polea grande el cual daba mayor torque mediante un acople de transmisión al eje del motor generador. Y se obtuvo mediciones a través de un PID (Proporcional, Integral y Derivativa) en la polea grande de 50 a 60 rpm a una temperatura alta de 80°C y una temperatura de enfriamiento que varía entre 15°C a 30°C para dar un voltaje de 1.12 V.

MECHANICAL ENGINEERING CAREER

“DESIGN AND CONSTRUCTION OF A CLEAN ENERGY GENERATOR FROM NICKEL-TITANIUM ALLOY IN THE FICM LABORATORIES”

Author: David Natanael Velasco Alvarez

Tutor: Ing. Mauricio Carrillo, Mg.

EXECUTIVE SUMMARY

For this project, the behavior of nickel with titanium production was evaluated as a band for a clean energy generator. The cable specifications used are 0.5 mm in diameter and 80°C transition temperature, for the quality a transmission ratio of 5: 2 is considered. Once the relationship was established, the design of the pulleys was obtained obtaining the masses in a CAD software to be used to obtain the linear force of the circular movement. For the selection of the number of channels to be used, consider the transmission force of the nitinol wire through the Dinalloy factory, to be compared with the linear force obtained for each channel added.

Once the generator is designed, 3D printing will be processed and used for the construction of pulleys, bases, protectors and supports, it will be used with PLA polymers. Once the construction is finished, the necessary tests will be carried out to obtain revolutions generated by the pulley system, voltage and amperage of the system, therefore, the connection of the large pulley shaft was made, which gave greater torque through a transmission coupling to the generator motor shaft. And measurements were obtained through a PID (Proportional, Integral and Derivative) in the large pulley of 50 to 60 rpm at a high temperature of 80 ° C and a compression temperature that was modified between 15 ° C to 30 ° C for a voltage of 1.12 V.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes Investigativos

En investigaciones previas se analiza que según [1] utiliza resortes helicoidales de nitinol como elemento impulsor de fuerza al sincronizar cigüeñales paralelos para girar en la misma dirección su motor. Contiene parámetros importantes para considerar en el diseño, entre ellos: variación de temperaturas en el tanque de agua, el espesor del alambre, voltajes resultantes.

Según [2] describe que los SMA son materiales que memorizan su forma en temperaturas específicas. A bajas temperaturas, son fáciles de deformar, pero a mayor temperatura ejercen grandes fuerzas al intentar recuperar su forma original. Contiene datos de poleas, mecanismos utilizados para el diseño del motor de nitinol e información sobre los diámetros del alambre.

En [3] analiza que mediante una serie de ensayos mecánicos de tensión en alambres de nitinol, utilizando variables de temperatura, velocidad frecuencia de deformación, logra porcentajes de deformación y experimentalmente determina la relación de temperatura y tensión del alambre, dando así rangos de deformación y temperaturas dependiendo del diámetro del alambre.

Según [4] nos indica que la eficiencia real del motor de nitinol es inversamente proporcional al gradiente de temperatura del baño de la polea motriz, mostrando un diseño óptimo para el generador de energía con alambre nitinol.

En la tesis doctoral [5] nos muestra varias aplicaciones que se le puede dar al alambre de nitinol aplicadas a la arquitectura mediante cálculos y simulaciones en ANSYS, éstos experimento se induce corriente para calentarlo y obtener un actuador controlado, proporcionando datos técnicos aplicables a nuestro proyecto.

1.2 Objetivos

1.2.1 Determinar parámetros del alambre nitinol aplicables a una máquina térmica de generación eléctrica.

- **Historia del nitinol [4]**

El nombre de NITINOL es un acrónimo que viene dado por Níquel (Ni), Titanio (Ti) y Naval Ordnance Laboratory (N.O.L.), siendo el lugar donde fue creado en el año de 1961, mientras se hacía un estudio investigativo de aleaciones resistentes a la corrosión para embarcaciones dirigidas por William Beuhler, encontraron este efecto en la aleación de Níquel con Titanio. A raíz de este descubrimiento se inició la comercialización de éste material en forma de láminas, alambre, cintas, discos, y es allí donde empezaron a crear un sin fin de aplicaciones comerciales.

- **Principio de funcionamiento [6]**

El principio del Nitinol, siendo uno de los diferentes tipos de aleaciones metálicas dentro del grupo de las aleaciones con memoria de forma SMA (Shape Memory Alloy), se basa fundamentalmente en ser sometido a un proceso térmico adecuado y pueda regresar a su forma original.

La base de funcionamiento resulta por el cambio de microestructura que sufre la aleación al ser sometida a una variación de temperatura puede ser por conducción, convección o radiación. En los SMA la propiedad que lo hace inteligente se hace posible mediante las fases de Austenita y Martensita presentados en la aleación al ser sometidos a diferentes rangos de temperatura.

En la figura 1 se puede observar que ésta aleación sufre una transformación de estado sólido desde la fase de alta temperatura (austenita) y la fase de baja temperatura (martensita). A ésta transición se la conoce como transformación martensítica, siendo el material maleable, deformable. Para recuperar sus dimensiones iniciales y propiedades del alambre se debe calentar el alambre por encima de la temperatura crítica de transición.

El alambre regresa a su forma inicial recta como se ve en la figura 1 debido a que su estructura cristalina se transforma en austenita, siendo dura y resistente.

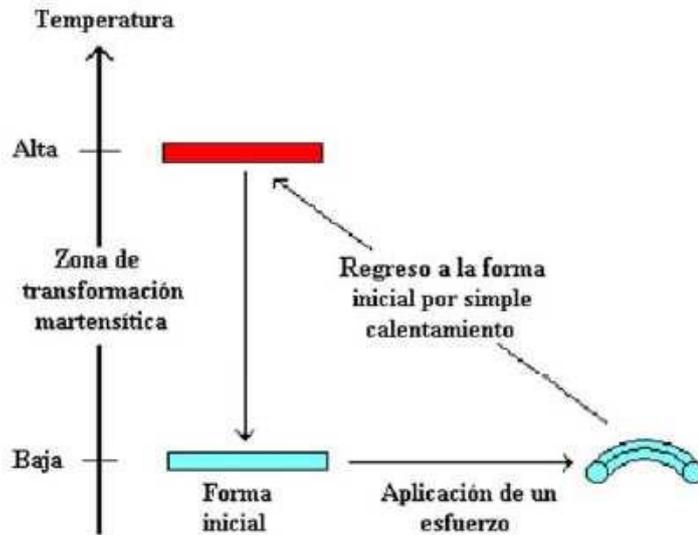


Figura 1. Efecto de memoria de forma modo flexión
Fuente. [6]

- **Fases de funcionamiento del Nitinol [7]**

Las fases del comportamiento del nitinol dependen específicamente de la variación de temperatura de transformación. Las temperaturas de funcionamiento según la figura 2 son las siguientes:

- Inicio de la fase martensita (M_s): Se transforma de austenita a martensita. Se parte de un material con un 100% de austenita.
- Final de la fase de martensita (M_f): Finaliza la transformación de la austenita en martensita. Material 100% martensita. Puede ser moldeado manualmente.
- Inicio de la fase austenita (A_s): Comienza la transformación de martensita en austenita. Se parte de un material 100% martensita.
- Final de la fase de austenita (A_f): Finaliza la transformación de martensita en austenita. Material 100% austenita. No es posible realizar dobleces, recupera su memoria de forma.

Este cambio de fase se produce por el movimiento de un gran número de átomos sufriendo pequeños desplazamientos de su forma de equilibrio normal, llamadas transformación martensítica y puede alcanzar la velocidad del sonido.

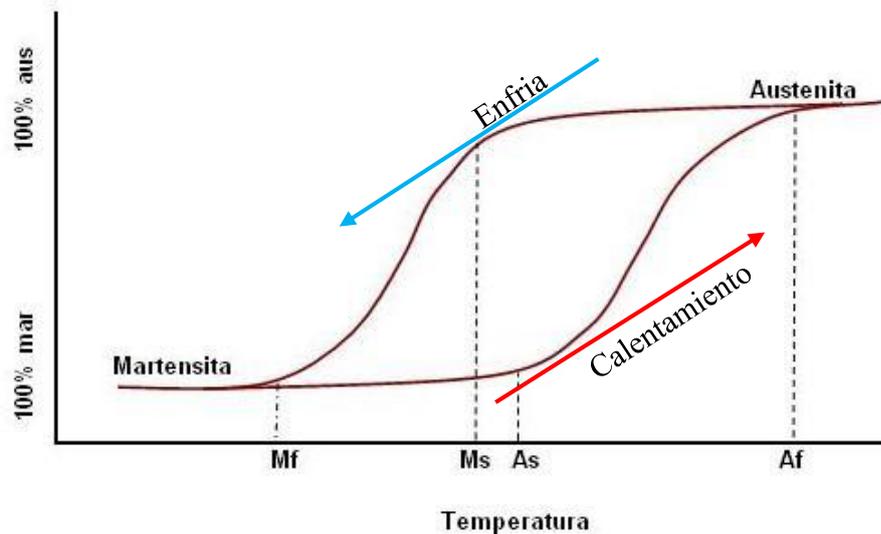


Figura 2. Histéresis de temperatura del Nitinol
Fuente. [7]

- **Ventajas y desventajas del nitinol**

Desde la creación del alambre nitinol se ha ido desarrollando de a poco en la industria, debido a sus altos precios y planes de marketing adecuados. En la actualidad se aplican en industrias tales como en medicina, telecomunicaciones, automática, ingeniería aeroespacial y productos de consumo. Las aplicaciones se deben a sus diferentes ventajas, tales como:

Ventajas

- ✓ Fácil manejo de sus propiedades elásticas.
- ✓ Su forma es recuperable a la determinada inicialmente.
- ✓ Resistente a la corrosión siendo comparado a los aceros inoxidable serie 300.
- ✓ Buena ductilidad.
- ✓ Biocompatibilidad, funciona de manera segura en contacto directo con el tejido vivo.
- ✓ Resistencia a la corrosión producida por elementos ambientales.
- ✓ Son estables térmicamente, lo que le ayuda a tener un mejor margen de temperaturas en el cambio de fases.

- ✓ Tiene fuerzas óptimas y constantes
- ✓ Una buena capacidad de ser eléctricamente climatizada para su recuperación de la forma.

Desventajas

- ✓ En comparación a las otras aleaciones el nitinol tiene mayor valor económico.
- ✓ No es modificable, debido a que su forma original fabricada es recta y sigue siendo recta.
- ✓ La liberación de níquel puede proporcionar alergias

• **Datos técnicos del alambre nitinol [8]**

En el anexo A1 se muestra datos proporcionados directamente de la fábrica de nitinol llamada Dinalloy, Inc. siendo los fabricantes de aleaciones dinámicas a nivel mundial, donde se expresa las características técnicas aproximadas de diferentes diámetros de alambre. Siendo la tensión una variable importante para estimar la vida de funcionamiento del alambre obtenemos que:

- A mayor tensión es probable que la memoria disminuya lentamente y se puede obtener de cientos o pocos miles de ciclos.
- A menor tensión el cable puede durar decenas de millones de ciclos.
- Si la temperatura es demasiado alta producirá una tensión permanente.

• **Selección del alambre de nitinol**

El generador de energía libre tiene como principal característica el alambre de nitinol en forma de correa, que servirá como transmisión de potencia, ejerciendo una fuerza de fricción y a su vez suministrando energía, gracias a las propiedades del nitinol. Del anexo A1 se selecciona un alambre de nitinol con las siguientes características:

Dónde:

d_0 : Diámetro de alambre (0,5mm)

F_t : Fuerza de tracción de calefacción (7,85lbf)

F_d : Fuerza de deformación de enfriamiento (3,14lbf)

M_f : Temperatura de enfriamiento (15°C) Anexo A2

A_f : Temperatura de calentamiento (80°C) Anexo A2

Para el enfriamiento del alambre se pretende que sea a temperatura ambiente, específicamente en la sierra de 15°C a 22°C.

- **Soldaduras aplicables al alambre NiTi [9]**

1. Soldadura por láser

Mediante el uso del láser en la zona de fusión, no agrega ningún tipo de contaminante evitando la fragilidad del alambre soldado. Otra razón que ésta soldadura es apta para unir alambres de nitinol es porque se puede controlar la temperatura del calor agregado al material. Controlar ésta temperatura es extremadamente importante para que el alambre al ser soldado no se cristalice o sea quebradizo la zona soldada, debido a que la reestructuración dada por el calor altera las propiedades del nitinol. El láser minimiza la zona fundida dando como resultado mayor elasticidad y propiedades del nitinol. En otro tipo de soldadura intervienen contaminantes al realizar el arco.

2. Láser de onda pulsada vs onda continua

Según la manera de administrar la luz los láseres se subdividen en dos tipos:

- ✓ EL primero es por onda pulsada que su función es emitir un haz de luz continuo, siendo muy bueno al soldar por puntos.
- ✓ El láser de onda continua tiene aplicaciones industriales en línea teniendo una buena protección contra el impacto, vibración, polvo y variación de temperaturas.

3. Fuentes de luz

- ✓ Láser alimentado con CO₂ que tienen una mayor calidad de luz y una disponibilidad del haz. Su limitación es el control de dos ejes, son utilizados para accesorios de alta resistencia en el campo de producción e investigación.
- ✓ Láser Nd:YAG tienen más facilidad de control a comparación de los de CO₂. Utilizados mayormente para prototipos realizados en los laboratorios debido que funcionan en modo de onda pulsada y continua.

- ✓ La fuente de luz del láser de fibra se transmite a través de fibras ópticas hasta el punto a soldarse. Para el control de la luz se utiliza robots debido a su complejidad. La debilidad es que tiene menor calidad de haz a comparación de las demás, pero le compensa las grandes capacidades de control.

4. Material de relleno

En el charco de fusión solo si es necesario se agrega material de relleno para agregar una fuerza adicional, tapando los espacios. Existen varios materiales utilizados para el relleno los cuales pueden controlar el comportamiento de la zona a fundirse. La soldadura para el alambre nitinol es mejor hacerla sin material de relleno debido que también es un gran contaminante.

5. Pegamento epóxico de alta tensión [10]

Este pegamento siendo su marca comercial pegatanke, es desarrollado para diferentes aplicaciones industriales, navales, eléctricas, construcción, automotrices. Este pegamento soporta grandes temperaturas extremas y es capaz de exponerse a elementos químicos y solventes, aun así, no le afecta. A continuación, se presenta sus propiedades.

- ✓ Tiempo de curado: Es para lugares donde la temperatura ambiente este entre los 25°C a 40°C, se lo deja bajo sombra de 1 hora a 2 horas.
- ✓ 30 min al sol. En países donde la temperatura ambiente este alrededor de 25 °C a 40°C. Bajo sombra 1:30 h a 2:00 h. De variar dichas condiciones ambientales, el tiempo de curado puede aumentar o disminuir.
- ✓ Dureza: 25-27 psi, a este nivel de presión se deforma.
- ✓ Tensión: 580 psi, a esta tensión revienta.
- ✓ Presión: 100-120 psi de trabajo, en hoyos de hasta 5mm de diámetro.
- ✓ Peso muerto: 250 kg. Para 46 g de pegamento.
- ✓ Vacío: -28 psi, de trabajo, en hoyos de hasta 5mm de diámetro. No tenemos pruebas para un vacío mayor.

- ✓ Temperatura: Mayores a 300 °C, ya sea por radiación o por transmisión de contacto, no por llama directa.
- ✓ Temperatura bajo cero: -30 °C, no tenemos pruebas por debajo de esta temperatura bajo cero.
- ✓ Secado bajo el agua: Se obtiene un curado completo en aproximadamente 10 horas. (Dependiendo de la temperatura en el agua este tiempo puede disminuir o aumentar).

- **Selección de soldadura**

Se opta por utilizar el pegamento epoxi de alta tensión, debido a su fácil uso y adquisición. A más de eso sus propiedades de soldadura cumplen con nuestra expectativa de conservar las propiedades del nitinol al unir el alambre en sus dos extremos. Otra de las características de ésta soldadura es que soporta temperaturas de trabajo de 300°C, en la selección de alambre tenemos una temperatura alta de 80°C donde cumple las propiedades del pegatanke para realizar la soldadura. La tensión, presión, dureza detallada anteriormente son más que suficientes parámetros para el uso de ésta soldadura.

1.2.2 Construir la máquina térmica

- **Clasificación de los motores térmicos SMA [1]**

Usando el material de aleación de memoria de forma, los motores térmicos SMA son los que se encargan en convertir la energía térmica en energía mecánica. El principio de funcionamiento de los motores SMA, han sido logrados mediante patentes publicadas en los Estados Unidos emitidos entre 1968 y enero de 2002. Según [11] sugieren que los conceptos de motor se pueden dividir en cuatro categorías: motores de manivela desplazada, motores de turbina, motores de campo y motores diversos.

1. Motores Crank

El funcionamiento de éstos motores es obtener un movimiento giratorio continuo mediante el movimiento lineal alternativo. El alambre de nitinol tiene forma de resorte adaptado a un volante de cada polea se acciona la manivela y da giro a los mecanismos del motor. Véase en la figura 3.

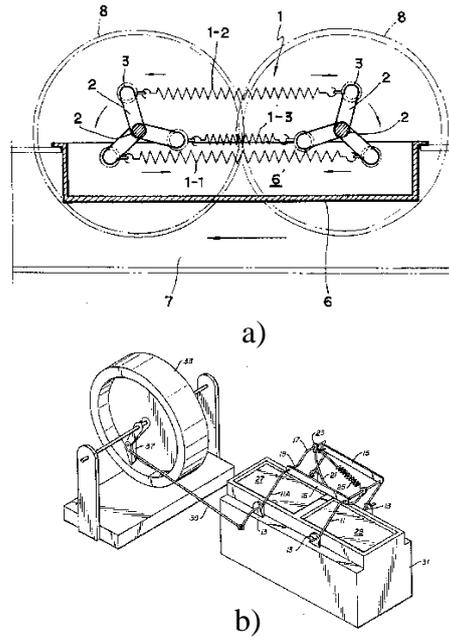


Figura 3. Patentes de motores de manivela
Fuente. a) [12] b) [13]

2. Motor térmico tipo cigüeñal

Los dos árboles de cigüeñal se encuentran simétricamente entre sí, y están sumergidos a un tanque de agua caliente. La potencia se da debido al alambre de nitinol en forma de resorte montado en los cigüeñales con sujetadores deslizantes. Esta conexión hace que se dé un movimiento verticalmente en paralelo con la superficie del agua caliente en el tanque, véase la figura 4.

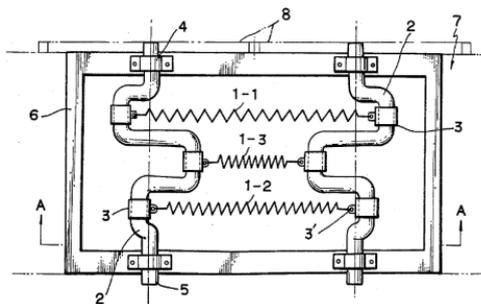


Figura 4. Motor térmico tipo cigüeñal
Fuente. [12]

En la figura 5, para que pueda funcionar debe estar sobre encima de la temperatura Af, mientras que la temperatura Mf se enfría. Gracias a las propiedades del nitinol en los cigüeñales se adquiere la fuerza necesaria para el funcionamiento del motor.

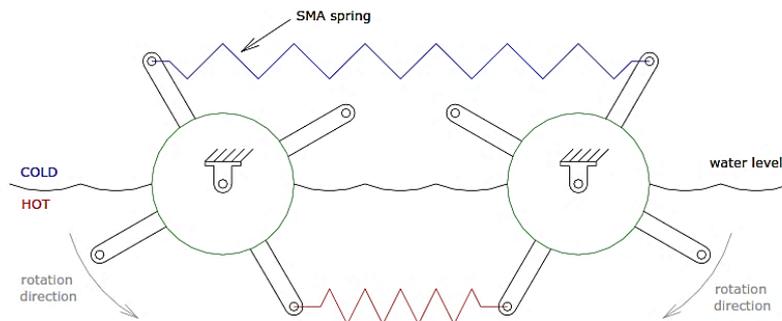


Figura 5. Vista del motor doble manivela
Fuente. [1]

3. Motores de Polea

Para accionar a este tipo de motores se utiliza al alambre de nitinol como elemento de enlace entre las dos poleas como mecanismo de accionamiento. Estos motores son sincronizados y no sincronizados.

✓ Motores no Sincronizados

Estos motores trabajan a flexión siendo libres de girar independientemente. Su funcionamiento se debe al cambio de temperatura entre el tanque de agua caliente y el ambiente o realizando un control de su baja temperatura. En la figura 6 se muestra motores no sincronizados, pueden ser q canal y varios canales.

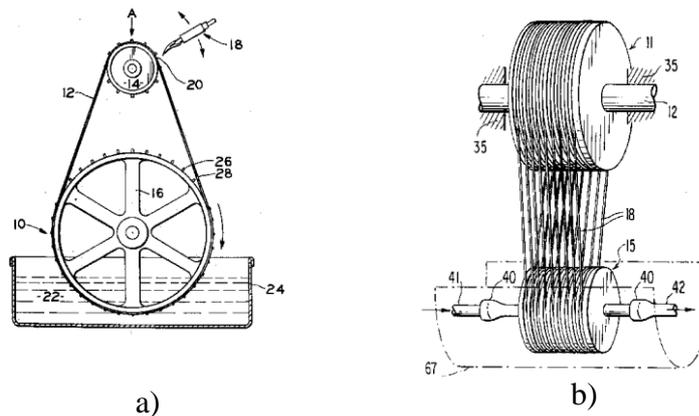


Figura 6. Patentes de motores de poleas no sincronizadas
Fuente. a) [14] b) [15]

✓ Motores Sincronizados

El resultado de la sincronización de estos motores es que giran en una relación fija y sus dos ejes tienen la misma velocidad también mantiene la tensión que realiza el alambre de nitinol. Este tipo de motores son propensos a la pérdida

de energía entre el alambre y el canal de las poleas por deslizamiento siendo motores centrados a fricción en vez de una conexión positiva. Se puede visualizar en la figura 7 ejemplos de motores sincronizados.

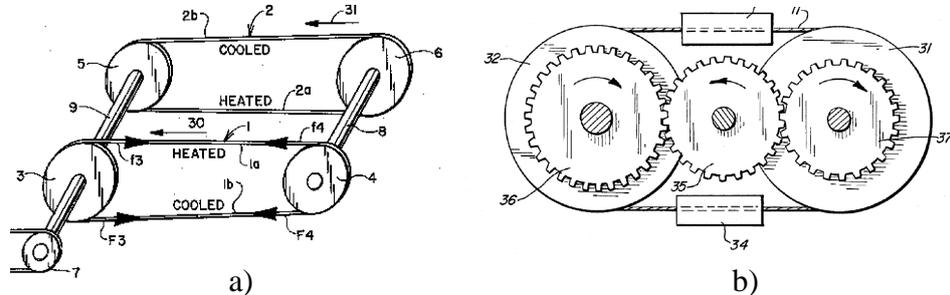


Figura 7. Patentes de motores de poleas sincronizadas
Fuente. a) [16] b) [17]

4. Motores de Campo

El funcionamiento de este motor se debe a la fuerza de recuperación de cada uno de los radios, que se encuentran sujetos por un resorte en una rueda giratoria. El alambre de nitinol actúa contrayendo los segmentos al calentarse y al enfriarse se separan, como se ve en la figura 8 el mecanismo es a 1 solo eje.

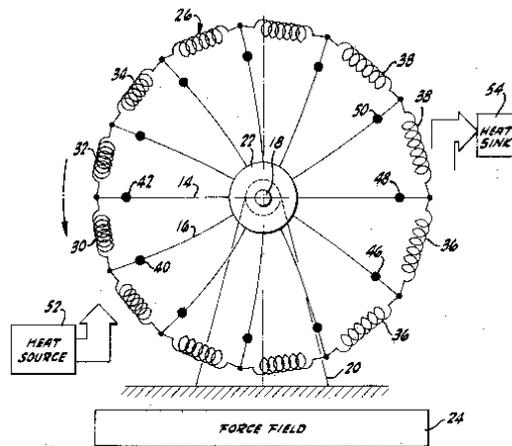


Figura 8. Patente de motores de campo
Fuente. [18]

- **Selección de motor térmico**

Se determina como alternativa el generador de energía basado en la patente de la figura 6 (b) inventado por [15] pero con la consideración de cambios de diámetros, canales, tanques, temperaturas de trabajo, tipo de alambre con diferentes medidas y canales no especificados en la patente.

- **Relación de transmisión**

Siendo la relación entre las velocidades de rotación de las dos poleas conectadas mediante el alambre de nitinol.

$$i = \frac{D_1}{D_2} \quad (1)$$

Donde:

D_1 : Diámetro de la polea pequeña [mm]

D_2 : Diámetro de la polea grande [mm]

- **Velocidad lineal**

La velocidad lineal es directamente proporcional a la velocidad angular teniendo en cuenta la constante de proporcionalidad el radio de giro.

$$v = \omega * R \quad (2)$$

Donde:

v : Velocidad lineal [m/s]

ω : Velocidad angular [rad/s]

R : Radio de la polea [m]

- **Fuerza centrípeta**

Esta fuerza F tiene la dirección al radio R y va orientada hacia el centro de la trayectoria, puede ser el peso o la tensión de una cuerda o en este caso el alambre de nitinol.

$$F = \frac{m * v^2}{R} * (\text{número de canales}) \quad (3)$$

Donde:

F : Fuerza centrípeta [N]

- **Longitud de correa de alambre de nitinol**

$$L_b = 2C + \frac{\pi}{2}(D_2 + D_1) + \frac{(D_2 - D_1)^2}{4C} \quad (4)$$

Donde:

L_b : Longitud de bucle de nitinol [mm]

C : Distancia entre centros [mm]

- **Cálculos de la potencia y eficiencia del sistema [4]**

- ✓ Estimación de potencia generada

$$W = (\sigma_o + \sigma_1 * \sqrt{v}) * S_a * \Delta T \quad (5)$$

Donde:

σ_o : Conductividad térmica del nitinol [$W/m^2 * ^\circ K$]

σ_1 : Conductividad por unidad de velocidad [$(W/m^2 * ^\circ K) * (m/s)^{-1/2}$]

S_a : Sección de alambre en contacto con el agua caliente

ΔT : Gradiente de temperatura del agua

v : Velocidad lineal [m/s]

- ✓ Sección del alambre en contacto con el agua caliente

$$S_a = n * 2\pi * r_o * l_b \quad (6)$$

Donde:

n : Número de poleas

r_o : Radio del alambre de nitinol [m]

l_b : Longitud de alambre de nitinol [m]

- ✓ Potencia desarrollada por el generador

$$W = W_Q + W_A \quad (7)$$

Donde:

W_Q : Calor consumido para el calentamiento del alambre de nitinol [W]

W_A : Potencia estimada desarrollada por el generador [W]

W : Potencia generada por el sistema [W]

- ✓ Calor transferido al alambre

$$Q = \dot{v} * C_p * \Delta T \quad (8)$$

Donde:

\dot{v} : Flujo volumétrico [m^3/s]

C_p : Calor específico del nitinol [$\frac{J}{m^3 * ^\circ K}$]

- ✓ Flujo volumétrico

$$\dot{v} = \pi * r_o^2 * v \quad (9)$$

- ✓ Eficiencia del sistema

Es la relación entre la potencia que se necesita para calentar el alambre de nitinol y la potencia generada por el sistema

$$\eta = \frac{W_A}{Q} \quad (10)$$

- Eje de transmisión [19]

En la figura 9 se muestra la simbología a utilizar en el eje de transmisión.

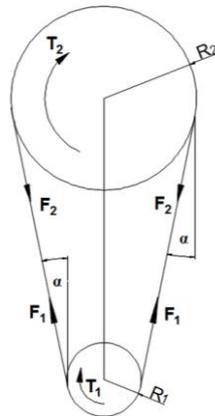


Figura 9. Representación de las fuerzas aplicadas
Fuente. Autor

- ✓ Torque establecido por el alambre

$$T = F * d \quad (11)$$

Donde:

d : Distancia del radio de la polea [mm]

- ✓ Esfuerzo producido por las cargas aplicadas

$$\sigma_x = \frac{M}{S} \quad (12)$$

Donde:

σ_x : Esfuerzo normal

M : Momento máximo sobre el eje

S : Sección transversal del eje

- ✓ Módulo de sección

$$S = \frac{\pi * d^3}{32} \quad (13)$$

Donde:

d : Diámetro del eje [mm]

- ✓ Factor de seguridad del eje

$$\eta_s = \frac{S_y}{\sigma_x} \quad (14)$$

Donde:

S_y : Límite elástico del nitinol [MPa]

- **Rodamientos [20]**

Para la selección la selección de rodamientos se plantea las ecuaciones.

- ✓ Factor de esfuerzos dinámicos

$$L_h = f_L^p * 500 \quad (15)$$

Dónde:

L_h : Vida nominal estimada del rodamiento [h]

p : Exponente de vida

f_L : Factor de esfuerzos dinámicos

- ✓ Capacidad de carga dinámica equivalente del rodamiento

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a \quad (16)$$

Dónde:

P : Carga dinámica equivalente [kN]

X : Factor radial

F_r : Carga radial [kN]

F_a : Carga axial [kN]

- ✓ Capacidad de carga dinámica

$$C = P * \sqrt[p]{\frac{L_h * n * 60}{a_1 * a_{23} * 10^6}} \quad (17)$$

Donde:

C : Capacidad de carga dinámica [kN]

n : Revoluciones [rpm]

a_1 : Factor de probabilidad de fallo

a_{23} : Factor para el material y las condiciones de servicio

Comprobación

- ✓ Capacidad de carga estática y factor de cálculo del rodamiento

$$\frac{f_o F_a}{C_o} \quad (18)$$

Dónde:

f_o : Factor de cálculo

C_o : Capacidad de carga estática

- ✓ Diámetro medio del rodamiento

$$dm = \frac{d + D}{2} \quad (19)$$

Dónde:

d : Diámetro interior del rodamiento seleccionado [mm]

D : Diámetro exterior del rodamiento seleccionado [mm]

dm : Diámetro medio [mm]

- ✓ Carga equivalente

$$P_o = X_o \cdot F_r + Y_o \cdot F_a \quad (20)$$

Dónde:

P_o : Carga estática equivalente del rodamiento [kN]

F_r : Carga real radial del rodamiento [kN]

F_a : Carga axial real del rodamiento [kN]

X_o : Factor de carga radial del rodamiento

Y_o : Factor de carga axial del rodamiento

- ✓ Factor de esfuerzos estáticos

$$f_s^* = \frac{C_o}{P_o} \quad (21)$$

Donde:

f_s^* : Factor de esfuerzos estáticos

- ✓ Viscosidad relativa del lubricante

$$v_1 = \frac{a * 4500}{\sqrt{dm * n}} \quad (22)$$

Dónde:

v_1 : Diámetro interior del rodamiento seleccionado [mm]

D : Diámetro exterior del rodamiento seleccionado [mm]

- ✓ Temperatura de trabajo

$$T_t = T_a + \Delta T \quad (23)$$

Dónde:

T_t : Temperatura de trabajo[°C]

T_a : Temperatura ambiente[°C]

ΔT : Variación de temperatura[°C]

- ✓ Ratio de viscosidad

$$\kappa = \frac{\nu}{\nu_1} \quad (24)$$

Dónde:

κ : Ratio de viscosidad

ν : Viscosidad de servicio del lubricante [mm^2/s]

ν_1 : Viscosidad relativa [mm^2/s]

- ✓ Factor del material y las condiciones de servicio

$$a_{23} = a_{23II} * S \quad (25)$$

Dónde:

a_{23II} : Valor básico

S : Factor de limpieza

- ✓ Cálculo de la vida nominal real del rodamiento

$$L_{hr} = a_1 * a_{23} * \left(\frac{C}{P}\right)^p * \frac{10^6}{n * 60} \quad (26)$$

Dónde:

L_{hr} : Vida nominal del rodamiento [h]

• Fabricación de piezas en impresora 3D

Es una máquina que sirve para el modelado de piezas en 3 dimensiones para diseño industrial. El tipo de tecnología que utiliza este tipo de impresora es el FDM o también conocido por modelado por deposición fundida, se utiliza para producción de prototipos a pequeña escala, el proceso de creación de la pieza se da capa por capa desde abajo hacia arriba, el material se encuentra en forma de filamentos en un rollo, éste material entra a una boquilla y es fundido a una temperatura sobre la fusión del material oscila entre 170°C y 240°C, saliendo así hilos muy finos solidificando la pieza

a realizarse. El material a utilizar son polímeros tales como PLA, ABS entre otros. Para el diseño de piezas se realiza en un software CAD y se exporta en formato .STL logrando así la obtención de elementos para el generador. En la figura 16 se observa la impresora 3D en la que se realiza el trabajo. El material a utilizar para la construcción de las poleas y soportes es el PLA (Poliácido Láctico), debido a su fácil impresión y adherencia de sus filamentos entre capas.

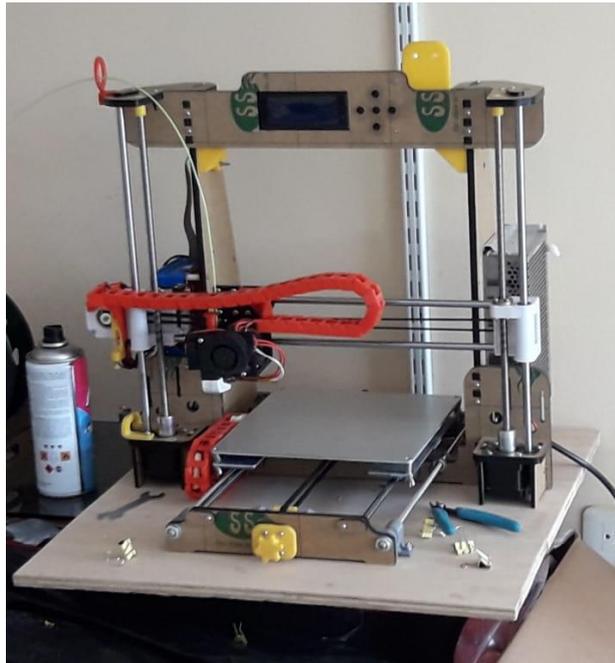


Figura 10. Impresora 3D
Fuente. Autor

- **Acople de transmisión**

El acople del eje de transmisión al eje del motor generador viene dado con un eje de nylon torneado, por un lado, se realiza la rosca con machuelo M5 para que ingrese al eje de transmisión y por el otro lado un agujero de 8mm donde entra a presión al eje del motor de 12V. Se muestra el diseño en la figura 11.

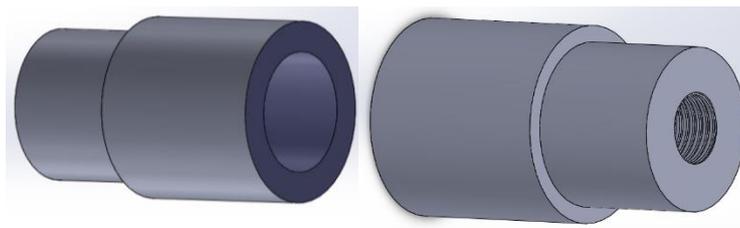


Figura 11. Matrimonio de ejes
Fuente. Autor

- **Tanque de almacenamiento**

Para el funcionamiento de la aleación se someterá al alambre de nitinol en un tanque lleno de agua caliente, llegando así a temperaturas de cambio de fase del alambre de nitinol para lograr el movimiento entre las poleas. En la figura 12 se detalla el diseño del tanque, siendo de material de acero inoxidable para evitar corrosión y sus dimensiones se tienen como altura de 0,73 m, ancho de 0,108 m, largo de 0,20 m y altura de agua de trabajo de 0,70 m.

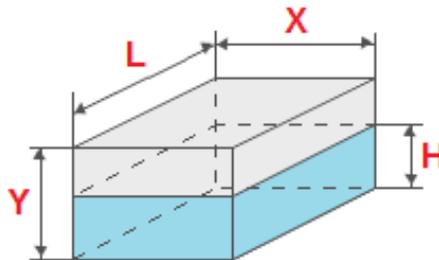


Figura 12. Dimensión de tanque de agua
Fuente. Autor

- ✓ Cálculo de volumen total de llenado del tanque

Según las dimensiones en la figura 12 tenemos que:

$$VT = Y * L * X * 1000 \quad (27)$$

Donde:

Y = Altura [m]

L = Largo [m]

X = Ancho [m]

VT = Volumen total [litros]

Entonces,

$$VT = 0,73 * 0,20 * 0,108 * 1000$$

$$VT = 1,58 \text{ litros}$$

Se necesita el volumen de llenado real para calentar el agua y quede su superficie a 7mm de la polea pequeña desde abajo. Este volumen será constante a una altura de 0,7

Donde:

VR = Volumen real de trabajo [litros]

$$VR = 0,069 * 0,20 * 0,108 * 1000$$

$$VR = 1,49 \text{ litros}$$

- **Soldado en frío del alambre**

En la figura 13 se muestra la unión de las dos puntas para formar la correa, se ha enrollado un hilo de alambre de cobre para mejor sujeción y por encima de ésta unión se aplicó la soldadura en frío con el epoxi de alta tensión y así dejándolo enfriar por 2 horas.

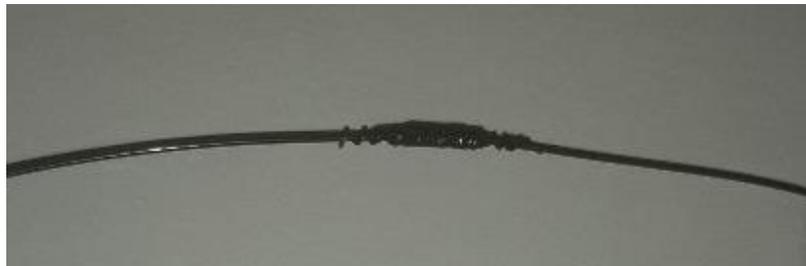


Figura 13. Soldado en frío en alambre de 0,5mm de diámetro
Fuente. Autor

Para obtener la fuerza electromotriz se basa mediante la transformación energía térmica, que se obtiene al calentar el agua a 80°C y de la energía mecánica mediante el accionamiento de las poleas con el alambre de nitinol para transformarla en energía eléctrica conectándola a un generador eléctrico.

1.2.3 Determinar voltaje y amperaje

- **Arduino Mega 2560**

Es una placa programable de pruebas. Su potencial es que puede leer datos de sensores, interruptores y controlar infinidad de luces, actuadores, motores y entre otros. Un parámetro importante es que se puede comunicar con programas de la computadora en especial para éste proyecto Microsoft office Excel. Su conexión es a través de un cable USB o también a una fuente de alimentación externa.

Esta tarjeta tiene 54 pines que funcionan como entradas y salidas, donde 14 de ellas se puede usar como salidas PWM (Pulse-width modulation) que es para la modulación

de anchura de pulso. Tiene 16 entradas analógicas y su conexión es por medio de USB (Universal Serial Bus) simplemente se conecta al ordenador.

- **Sensor de temperatura DS1820 [21]**

Es un instrumento que realiza lecturas de temperaturas precisas en el ambiente al que se encuentre en un rango de -55°C a 125°C . La técnica más utilizada es RTD (Resistance Temperature Detector) detector de temperatura resistivo, esto es que se basa en la variación de la resistencia del conductor con la temperatura. El sensor DS1820 es un sensor didáctico para éste tipo de propósito, debido a su fácil instalación y alta precisión.

En la figura 14 se muestra el circuito integrado del sensor, siendo el circuito encargado de digitar un numero analógico convertido a digital para poder leer la temperatura.

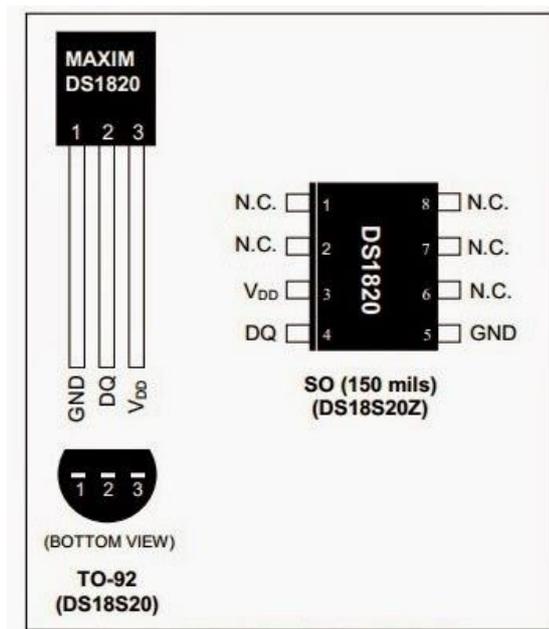


Figura 14. Configuración de circuito integrado del sensor
Fuente. [21]

La forma de conectar los pines que se observan en la figura 15 es:

- ✓ El pin VDD (Pin de alimentación real) conectado a 5 o 3,3 Voltios a tensión positiva.
- ✓ El pin GND (Ground) conectado a masa 0 Volt.
- ✓ El pin de datos DQ conectado a una resistencia de $4,7\text{K}\Omega$.

- ✓ El pin del micro controlador lee la temperatura dada por el sensor.

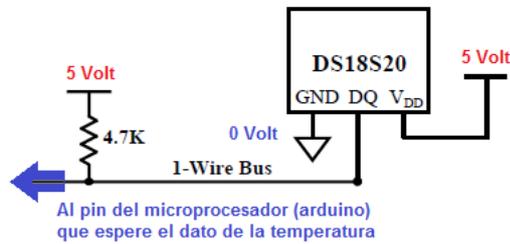


Figura 15. Diagrama de conexión
Fuente. [21]

- **Módulo Relé 4CH 5VDC [22]**

Comprende de 4 relés que manejan cargas de 250V/10A. Cada canal tiene un led indicador de estado esto se debe a un opto acoplador con aislamiento eléctrico. Cuando recibe 0 V ó un “0” lógico se activa y se desactiva la salida con 5V ó “1” lógico. Se utiliza para controlar el encendido y apagado de la niquelina para calentar el agua dentro del tanque.

En la figura 16 se une desde el pin de alimentación del arduino de 5V en su pin de VCC para alimentar a la tarjeta y la otra conexión es a GND o tierra, se hace, para que reciban la señal de los pins abiertos del arduino (OUTPUT). Mediante ésta tarjeta se logra controlar 4 circuitos diferentes, pero para éste caso se controlaría la resistencia que calienta el agua del tanque con un solo relé.



Figura 16. Tarjeta de relés conexión a arduino
Fuente. Autor

Para el control de la niquelina en la figura 17 se utiliza una entrada IN1 del relé, se tiene 3 entradas con 3 posibles conexiones, común (COM) entrada del medio, normalmente abierto (NA) solo se cierra el circuito con corriente alterna, normalmente cerrado (NC) el circuito de corriente alterna se encuentra cerrado a menos que pase corriente continua.



Figura 17. Tarjeta de relés conexión a niquelina
Fuente. Autor

- **Encoder FC-03 [23]**

Un encoder se compone básicamente de un disco conectado a un eje giratorio. El disco está hecho de vidrio o plástico y se encuentra codificado con unas partes transparentes y otras opacas que bloquean el paso de la luz emitida por la fuente de luz (típicamente emisores infrarrojos). En la mayoría de los casos, estas áreas bloqueadas (codificadas) están arregladas en forma radial.

A medida que el eje rota, el emisor infrarrojo emite luz que es recibida por el sensor óptico (o foto-transistor) generando los pulsos digitales a medida que la luz cruza a través del disco o es bloqueada en diferentes secciones de este. Esto produce una secuencia que puede ser usada para controlar el radio de giro, la dirección del movimiento e incluso la velocidad.

El funcionamiento comprende si al pasar cualquier elemento dentro de la ranura del sensor, éste emite un pulso digital en el pin D0, puede ser de 0V a 5V siendo una señal digital TTL. En la figura 18 se detalla los pines de conexión, tales como, VCC es la alimentación que va de un rango de 3.3V a 12V, GND conexión a tierra, D0 es la señal digital de los pulsos de salida, A0 es una señal analógica de salida en un tiempo real.

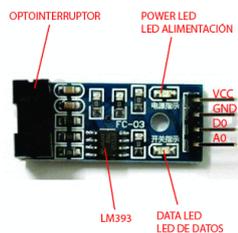


Figura 18. Principales partes del Encoder
Fuente. [23]

- **Resistencia o Niquelina**

Sirve para aumentar la temperatura del agua en el tanque, siendo una resistencia eléctrica que genera calor basado básicamente en el efecto Joule que nos dice que todo elemento posee una cierta resistencia eléctrica y a su vez emite calor que depende únicamente del tipo del material para que circule a través del mismo. Para el proyecto se adquiere una resistencia comercial y económica, no se realiza ninguna selección.

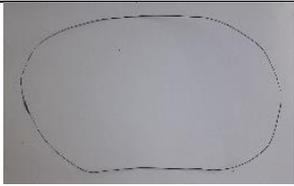
CAPÍTULO II

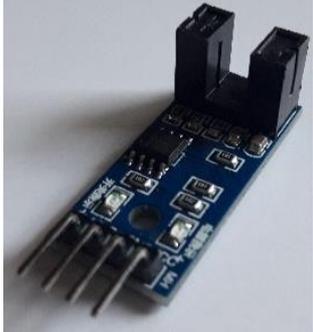
METODOLOGÍA

2.1 Materiales

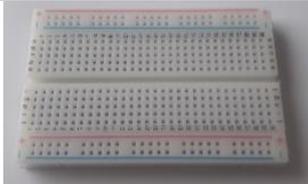
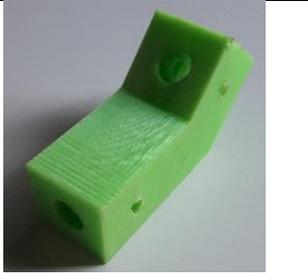
A continuación se detallan los materiales utilizados en la prueba final.

Tabla 1. Materiales

DENOMINACIÓN	ESPECIFICACIÓN	MATERIAL	CANTIDAD	COSTO	FOTOGRAFÍA
Alambre	*Diámetro: 0,5mm *Largo: 56,1cm *Temperatura final Ms: 15°C *Temperatura final Af: 50°C	Nitinol	2.50m	100,00	
Polea grande	*Diámetro: 10cm *Espesor: 6mm	PLA	3	7,50	
Polea pequeña	*Diámetro: 4cm *Espesor: 6mm	PLA	3	4,00	
Eje separador de poleas	*Diámetro: 8mm *Largo: 80mm *Material: Acero Inóx.	Acero Inóx.	1	1,00	
Soporte inferior	*Incluye rosca para 2 tornillos para regular la distancia entre ejes. *Incluye 2 roscas para tornillos ajustables a la base.	PLA	1	5,25	

DENOMINACIÓN	ESPECIFICACIÓN	MATERIAL	CANTIDAD	COSTO	FOTOGRAFÍA
Soporte superior	*Incluye 2 roscas para tornillos ajustables del eje separador de poleas	PLA	1	4,25	
Sensor	*Sensor de control de temperatura DS1820 *Rango de temperatura: -55 a 125°C *Resolución: de 9 a 12 bits (configurable) *Interfaz 1-Wire (Puede funcionar con un solo pin) *Identificador interno único de 64 bits *Múltiples sensores pueden compartir el mismo pin *Precisión: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (de -10°C a $+85^{\circ}\text{C}$) *Tiempo de captura inferior a 750ms *Alimentación: 3.0V a 5.5V	Varios	2	6,50	
Encoder FC-03	*Voltaje de Operación: 3.3V - 5V DC *Salidas: Analógica y Digital TTL *Sensor: MOCH22A *Modelo Placa: FC-03 / FZ0888 *Tipo de emisor: Fotodiodo IR *Tipo de detector: fototransistor *Longitud de onda del emisor: 950 nm (infrarrojo) *Peso: 8 gramos *Dimensiones: 3.2*1.4*0.7 cm *Ranura de 5mm *Comparador Opamp: LM393 *Led indicador de alimentación *Led indicador de pulso *Salida TTL ON: Sensor bloqueado *Salida TTL OFF: Sensor sin bloquear	Varios	1	2,50	

DENOMINACIÓN	ESPECIFICACIÓN	MATERIAL	CANTIDAD	COSTO	FOTOGRAFÍA
2 Pernos	*Diámetro: M5 *Largo: 10cm	Acero Galvanizado	2	0,50	
Tuerca	*Tuerca M5	Acero Galvanizado	19	1,50	
Rodamiento	Diámetro exterior: 13mm Diámetro interior: 5mm	Acero al cromo-carbono	4	8,00	
Matrimonio	Adaptador de tornillo M5 a eje de motor de 12V	Nylon	1	1,50	
Arduino Mega	*Microcontrolador: ATmega2560 *Voltaje Operativo: 5V *Voltaje de Entrada: 7-12V *Voltaje de Entrada(límites): 20V *Pines digitales de Entrada/Salida: 54 (de los cuales 15 proveen salida PWM) *Pines análogos de entrada: 16 *Corriente DC por cada Pin *Entrada/Salida: 40 mA *Corriente DC entregada en el Pin 3.3V: 50 mA *Memoria Flash: 256 KB (8KB usados por el bootloader) *SRAM: 8KB *EEPROM: 4KB *Clock Speed: 16 MHz	Varios	1	20,00	
Tanque de Agua	*Ancho: 108mm *Largo: 200mm *Altura: 73mm	Acero Inóx.	1	25,00	

DENOMINACIÓN	ESPECIFICACIÓN	MATERIAL	CANTIDAD	COSTO	FOTOGRAFÍA
Módulo Relay 4CH 5VDC	*Voltaje de Operación: 5V DC *Señal de Control: TTL (3.3V o 5V) *N° de Relays (canales): 4 CH *Modelo Relay: SRD-05VDC-SL-C *Capacidad máx: 10A/250VAC, 10A/30VDC *Corriente máx: 10A (NO), 5A (NC) *Tiempo de acción: 10 ms / 5 ms *Para activar salida NO: 0 Voltios *Entradas Opto acopladas *Indicadores LED de activación	Varios	1	7,00	
Calentador de agua	*Resistencia o niquelina de loza para calentar el agua *Voltaje: 110V	Varios	1	1,75	
Protoboard	*Protoboard pequeña de 2 canales 400 puntos	Varios	1	3,00	
Soporte superior de motor	*Incluye 2 roscas para tornillos ajustables al eje de separación entre soportes del motor.	PLA	1	2,20	
Soporte inferior de motor	*Incluye 2 roscas para tornillos ajustables al eje de separación entre soportes del motor.	PLA	1	1,90	
Perno	Tornillo M5 punta de broca	Acero Galvanizado	4	0,20	

DENOMINACIÓN	ESPECIFICACIÓN	MATERIAL	CANTIDAD	COSTO	FOTOGRAFÍA
Brujita	*Resistente al agua *Pega en segundos *Resiste cargas pesadas *Seca transparente *Abre fácil, tapa auto perforable y anti obstrucción	Varios	1	1,50	
Eje soporte de motor	Largo: 66mm	Acero Inóx.	1	0,50	
Perno	*Tornillo M5 Largo: 15mm	Acero Galvanizado	10	0,50	
Total				206,05	

Fuente. Autor

2.2 Métodos

- **Método de información bibliográfica**

Este tipo de investigación comprende en recopilar información de tesis, artículos técnicos, documentos electrónicos, libros y bibliotecas, donde se selecciona y analiza el procedimiento y resultados relacionados a un generador de energía mediante el uso de un bucle de nitinol. Mediante ésta información se establecen bases de diseño del proyecto, parámetros que se deben respetar tales como las condiciones de temperatura de funcionamiento del alambre de nitinol.

Las referencias bibliográficas son las que sustentan el proyecto, siendo seleccionadas minuciosamente por su calidad de contenido. Se obtiene el funcionamiento del alambre de nitinol a sus diferentes tipos de diámetros, por lo tanto, la información adquirida sirve como base para la realización de cálculos de rpm, relación de transmisión y dimensionamiento del proyecto.

- **Método deductivo**

Para plantear nuestra problemática del proyecto, se aplica el método deductivo que comprende de partir de la teoría investigada para llegar a la realidad, argumentando lo general a lo específico. El tema central de interés del estudio es diseñar y construir un

generador de energía limpia a partir de la aleación de níquel titanio en los laboratorios de la FICM.

Dado que la información bibliográfica nos aclara que mediante el uso de dos poleas y un bucle de nitinol el sistema logra su movimiento entre poleas, logrando así el mayor número de rpm necesarias para generar energía. Para que el sistema funcione como la teoría aclara, se debe analizar diferentes parámetros tales como: variación de temperatura, diámetro de alambre, peso de poleas, largo de alambre para el bucle de nitinol y el torque del motor generador, por ende, al aplicar distintos tipos de procedimientos y operaciones de control debería proporcionarnos información real, logrando el mayor número de rpm y torque para el proyecto.

Según [4] nos indica que la eficiencia real del motor de nitinol es inversamente proporcional al gradiente de temperatura del baño de la polea motriz, mostrando un diseño óptimo para el generador de energía con alambre nitinol.

- **Método de ensayo y error**

Según el problema planteado en el método deductivo tenemos que los parámetros a trabajar mediante prueba y error sean resultados reales y confiables para lograr repotenciar el diseño con cada prueba que se realice logrando así resolver el problema de la medición de voltaje y amperaje.

El método de prueba y error consiste:

1. Elegir un valor posible para lograr generar movimiento entre poleas.
2. Imponer condiciones que se deben respetar para lograr el objetivo, en este caso respetar las temperaturas de funcionamiento del alambre de nitinol, tanto la temperatura alta como la baja.
3. Probar y analizar los resultados obtenidos.

Si el resultado adquirido no es el esperado se debe repetir el proceso con otro valor posible hasta lograr el objetivo deseado. Para lograr el movimiento entre poleas se modificó el diseño varias veces, esto se debe a que el peso de la polea debe ser menos que la fuerza de recuperación del alambre de nitinol.

Se adquirieron otros tipos de alambre de nitinol debido a que el sobredimensionamiento de los primeros prototipos no realizaba ningún movimiento entre poleas, esto se puede visualizar en análisis y discusión de resultados las pruebas experimentadas. Se obtienen datos concretos por cada prueba realizada logrando el movimiento entre poleas gracias al redimensionamiento de todo el sistema.

Se trabaja a temperatura ambiente especialmente en la sierra central del Ecuador, esto se debe a que se realizan ensayos en climas cálidos donde el alambre de nitinol no logra alcanzar su temperatura M_f y lograr girar las poleas.

Una vez que se logra las rpm requeridas se ensaya el torque dado por el generador por medio de un matrimonio de eje a eje al dínamo y generar energía eléctrica. Los inconvenientes es que el torque dado por el sistema de poleas debe ser mayor que el mismo. Se obtiene como dato real y variable para generar más voltaje dos opciones:

1. Aumentar el torque entre poleas, esto se logra aumentando el número de poleas y canales del sistema.
2. Colocar un motor generador con un torque más bajo que el torque generado por el sistema con bucles de nitinol.

- **Método de recolección y análisis de resultados**

Se recopila y se obtienen los datos mediante el uso de sensores implementados en el sistema de generación de energía, tales como:

1. Para obtención de variación de temperaturas, se implementa dos sensores dentro del tanque de agua y otro fuera cerca de la polea grande. Obteniendo dos tipos de temperatura.
2. Para obtener los rpm, se dispone de un encoder digital.
3. Para el voltaje se conecta el eje del sistema desde la polea grande a el eje de un dínamo o motor generador.
4. Para el amperaje mediante una resistencia y el cálculo matemático de voltaje multiplicado por resistencia es igual al amperaje.

Para recopilar todos los datos obtenidos por cada uno de los sensores se utiliza un control PID y se tabula en tablas en un rango de 20 a 25 datos por minuto.

Para analizar los datos tabulados se utiliza una media resultante por cada minuto de datos para cada una de las variables a graficar.

Procedimiento:

1. Se llena el tanque con 1.49 litros, teniendo en referencia sobrepasar 7mm del perfil de la polea pequeña.
2. Calibrar la distancia entre ejes de la polea pequeña y grande a 153mm.
3. Colocar los 3 bucles de nitinol entre los canales de las poleas, primero se coloca entre la polea pequeña.
4. Activar el controlador de agua a través de la niquelina que llegue a un rango de 79°C a 81°C, siendo la temperatura Af de 80°C.
5. Esperar a que el sistema de poleas arranque solo, teniendo en cuenta que el sentido de giro hacia la derecha es positivo.
6. Verificar que el contador de rpm especialmente el rodete no tenga roses con el encoder.
7. Conectar la placa arduino al computador, correr el programa de arduino para recibir datos de los sensores en una tabla.
8. Analizar los datos de las tablas, observar y eliminar valores que no se encuentren dentro de los rangos normales de medición.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis y discusión de los resultados

Para la prueba 1, 2 y 3.1 se trabaja con alambre de nitinol de diámetro de 1mm con temperaturas de funcionamiento de $Mf = 20^{\circ}C$ y $Af = 40^{\circ}C$. Para la prueba 3.2 se realizaron con cable de diámetro de 1mm y $Mf = 15^{\circ}C$ y $Af = 80^{\circ}C$.

Para la prueba 4 y 5 se trabaja con un alambre de nitinol de diámetro de 0,5 mm y temperaturas de funcionamiento de $Mf = 15^{\circ}C$ y $Af = 80^{\circ}C$.

- **Prueba 1**

La primera prueba se realiza aplicando el método de prueba y error, sin especificaciones técnicas para la construcción, se impone dimensiones para el diseño. Se realiza con un sistema de poleas de diámetros $D_1 = 40mm$ y $D_2 = 100mm$ no sincronizado de material nylon, se tornea con 5 canales y el peso total de poleas y ejes es de 1153 gramos. Para el bucle de nitinol se adquiere un alambre de 1mm y largo de 660cm para realizar los 5 bucles. Para la estructura se utiliza 4 ejes de acero inoxidable y una base de acero A36, los soportes de los ejes de las poleas se realiza con bocines de nylon y soportes de acero.

Resultados 1: Según en la figura 19 siendo el primer diseño realizado, se tiene como resultados los siguientes:

- ✓ No se logró el movimiento entre las dos poleas debido a que el sistema está sobredimensionado.
- ✓ El peso de las poleas influye mucho para que la fuerza de recuperación del alambre realice el movimiento, la cual se cuenta con más de 1 kilo en pesos de poleas.

- ✓ Se realizó los soportes para los ejes mediante bocines de nylon, la cual resultó demasiada fricción entre los ejes para lograr el movimiento.



Figura 19. Prototipo 1
Fuente. Autor

- **Prueba 2**

Es necesario bajar el peso considerablemente para lograr el movimiento. Se obtuvo de la prueba A que el problema es el sobredimensionamiento del sistema, por lo tanto, se aplicó se cambia las poleas en su totalidad. Para la polea grande se utiliza una llanta de bicicleta torneada con 3 canales de diámetro de 26cm y ancho de 3cm. Para la polea pequeña se utiliza un eje de nylon con 3 canales de diámetro de 8cm. Se implementa un control de temperatura mediante una niquelina dentro del tanque de agua. En la figura 20 se observan los cambios realizados para esta prueba 2.

Resultados 2: Se realizó el cambio de poleas reduciendo el peso en un 40% y el número de canales se redujo a 3. Se obtuvo problemas de fricción en los bocines en la prueba 1, por lo cual, se implementó rodamientos obteniendo los siguientes resultados:

- ✓ Se logró el movimiento y se obtuvo 1 revolución en el sistema, se deduce que el problema es que no se cumple la temperatura de funcionamiento M_f de 20°C.

- ✓ Para realizar el bucle de alambre de nitinol, se procedió a soldarlo con soldadura TIG, para las cuales el alambre en la zona soldada era muy frágil y quebradizo.
- ✓ El principal inconveniente de los 3 bucles de nitinol es que se salta el alambre de canal a canal dando como resultado la ruptura en la unión soldada.



Figura 20. Prototipo 2
Fuente. Autor

- **Prueba 3**

En la anterior prueba se tiene una separación entre poleas de 45cm dando como resultado que el alambre de nitinol no lograba enfriarse y el funcionamiento era pobre. Para ésta prueba se tenía que descartar la variable de control de temperatura de enfriamiento.

Se realizó 2 tipos de mediciones:

1. Se trabaja con una distancia entre ejes de poleas a 125cm, las propiedades del alambre de nitinol siguen siendo las mismas de las pruebas 1 y 2. En la figura 21 se observa la medición manual.

Resultados 3.1

- ✓ Se obtuvo 3 ciclos por minuto, de los cuales el alambre no lograba enfriarse completamente y el sistema se paraba.
- ✓ Se pudo observar que era necesario llegar a la temperatura M_f de enfriamiento. El alambre al realizar una revolución seguía frío.
- ✓ Se concluye que el diámetro del alambre de nitinol influye mucho para que se enfríe, en este caso se trabaja con 1mm.



Figura 21. Prueba 3.1
Fuente. Autor

2. Se trabaja con una distancia entre ejes de poleas de 230 cm. En la figura 21 se observa una mayor distancia entre ejes. Se adquiere un alambre de 457cm de largo con una temperatura de enfriamiento de 15°C. Se obtienen resultados medidos por observación.

Resultados 3.2

- ✓ A una distancia entre ejes de 218 cm como se observa en la figura 22, el generador entre poleas empieza a tener un movimiento constante. Se obtuvo 2 ciclos permanentes por minuto. El alambre logra enfriarse dando como resultado un funcionamiento continuo.

- ✓ A raíz de ésta prueba se concreta que es necesario el enfriamiento del alambre a menor tiempo.
- ✓ Al observar éstas pruebas es necesario cambiar el diámetro del alambre de nitinol y realizar pruebas con un diámetro más pequeño.

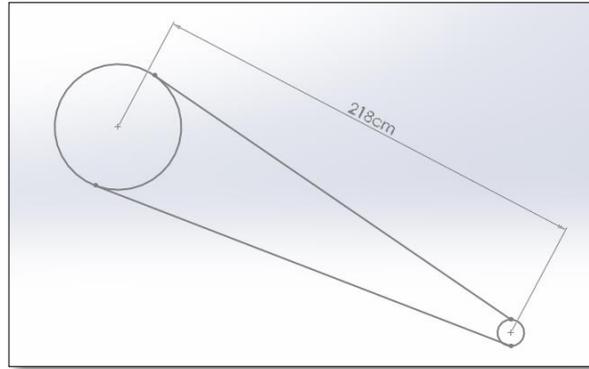


Figura 22. Prueba 3.2
Fuente. Autor

- **Prueba 4**

Se procede a cambiar en su totalidad el diseño del generador. Los materiales y especificaciones técnicas para esta prueba se detallan en la tabla 2, con la diferencia que en ésta prueba se aplica solo 2 poleas para el funcionamiento del generador. Las variables a controlar son: la temperatura de enfriamiento y el peso de las poleas y el sistema en general. En las anteriores pruebas se obtuvieron problemas al soldar el bucle de nitinol con la suelda TIG, se perdían las propiedades del alambre, para ésta prueba se utiliza la suelda con pegatanke uniendo las dos puntas y dejándolas secar en 2 horas solo así no se pierden las propiedades del nitinol y se obtiene los 3 bucles de la misma dimensión.

Resultados 4

En la tabla 2 se describe los resultados obtenidos del modelo y el conteo de la velocidad angular en la polea pequeña, se obtiene los siguientes resultados de ésta prueba.

- ✓ Mediante el uso de un alambre de nitinol de diámetro de 0.5mm se logra obtener 424 rpm en la polea pequeña con un tacómetro, por lo tanto, se cumplió el objetivo del movimiento entre poleas para generar energía.

- ✓ Al conectar un motor de 3V al eje de la polea pequeña se obtiene 0,1V, siendo una cantidad muy pequeña para obtener amperaje. Como se puede visualizar en la tabla 2 a detalle los resultados.
- ✓ Al colocar un motor de 12V al eje de la polea pequeña, no se logra el movimiento, esto se debe a que el torque necesario para que el eje del motor gire es muy alto a comparación del torque producido por el sistema de poleas.

Tabla 2. Resultados prueba 4

Especificaciones del alambre de Nitinol	$Mf = 15^{\circ}C$ $Af = 80^{\circ}C$ $Diámetro = 1mm$
Diámetro Polea 1	$D_1 = 40mm$
Diámetro Polea 2	$D_2 = 100mm$
Distancia entre ejes	$C = 153mm$
Velocidad angular polea pequeña	$n_1 = 424rpm$
Voltaje	$V = 0,2v$

Fuente. Autor

En la figura 23 se observa el funcionamiento del sistema acoplado a un motor de 3V. Comprende de 1 solo canal dando como resultado una velocidad angular de 424.2 rpm.



Figura 23. Prueba 4

Fuente. Autor

- **Prueba 5**

La prueba final, para aumentar el voltaje se requiere de dos variables muy importantes. La primera obtener un motor generador o dínamo con un torque más bajo que el torque de los ejes de nuestro sistema y pueda generar más voltaje. La segunda aumentar el torque del generador aumentando el número de canales y poleas y así lograr el funcionamiento del motor generador.

En este caso se opta por la opción 2 de aumentar el torque del sistema como se muestra en la figura 24, se tiene 3 canales. El bucle de nitinol a utilizar es el mismo de la prueba 4 a diferencia que se construye 2 bucles más para los dos canales que se aumentan.



Figura 24. Prueba 5
Fuente. Autor

Para la obtención de voltaje se conecta el eje de 2 de la polea grande al eje del dínamo por medio de un matrimonio, se realiza la conexión electrónica a la tarjeta arduino mega para recibir el voltaje generado del generador térmico.

El amperaje se obtiene según [24] por medio de la fórmula $I = V * R$ siendo el voltaje multiplicado por una resistencia de 1 ohmio se obtiene el amperaje. Para el control de temperaturas se implementa dos sensores de temperatura colocados uno dentro del tanque de agua y el otro en el soporte superior de la polea grande.

Para calentar el agua se tiene una niquelina conectada a 110V controlada con el sensor de temperatura colocado dentro del tanque de agua, esto se realiza debido a que el sistema no es autosustentable y se toman datos solo del mecanismo de poleas.

Para el conteo de rpm se tiene un encoder digital colocado al extremo del dínamo, se encuentra ajustado con un rodete con una entrada tipo canal.

- **Consideraciones**

Mediante los análisis de cada ensayo y error se parte de los siguientes datos para el cálculo de canales, eje de transmisión y rodamientos.

D_1 : Diámetro de polea pequeña asumido [40 mm]
 D_2 : Diámetro de polea grande asumido [100 mm]
 ω : Velocidad angular asumido [$N_2=200 \text{ rpm}$]

- **Cálculo de relación de transmisión**

Utilizando la ecuación (1) se obtiene:

$$i = \frac{40}{100} = \frac{2}{5}$$

$$N_1 = \frac{N_2 * 5}{2}$$

$$N_1 = 500 \text{ rpm}$$

- **Masa de poleas**

Para el diseño del canal de la pulea se toma en cuenta el diámetro del alambre de nitinol que 0,5 mm por lo tanto se realiza el canal en “V” a punto cero. Mediante un software CAD se obtiene la masa de las poleas para realizar los cálculos $m_1 = 15,1g$ y $m_2 = 58,48g$.

- **Calculo del número de canales [24]**

Para obtener el número de canales del sistema se realiza el cálculo en la pulea 2, debido a que se obtiene mayor torque para vencer el torque del motor generador.

De la ecuación (2) la velocidad lineal es:

$$v = 200 \frac{\text{rev}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} * \frac{2\pi}{1 \text{ rev}} * 0,050 \text{ m}$$

$$v = 1,05 \text{ m/s}$$

Para obtener la fuerza de resistencia de la ecuación (3) se tiene:

$$F = \frac{(58,48/1000) * 1,05^2}{0,05}$$

$$F = 1,28 \text{ N}$$

Para aumentar la fuerza en el sistema se conecta cables en paralelo. Con la finalidad de multiplicar la fuerza. Del anexo A1 se obtiene la fuerza de deformación de

enfriamiento $F_{d=}$ 3,14 lbf [13,97 N]; esta es; la fuerza que ejerce el alambre para vencer la resistencia del sistema. A continuación en la tabla 3, se muestra la variación de la fuerza de resistencia multiplicada por el número de canales.

Tabla 3. Fuerza centrípeta por canales a 200 rpm

Nº Canales	Masa [g]	Fuerza de resistencia de las poleas [N]
1	58,48	1,28
2	116,96	5,13
3	175,44	11,54
4	233,92	20,52
5	292,4	32,07

Fuente. **Autor**

$$F_d > F$$

Con 3 canales se tiene 11,54N, por lo tanto, comparando la fuerza de deformación de enfriamiento el sistema logra su movimiento.

- **Longitud de correa de alambre de nitinol**

Por medio de prueba y error descrito en el apartado 3.1 se ha determinado que el largo nominal del bucle de nitinol es de 561mm y por lo tanto la distancia entre centros tiene un rango de ajuste entre 150 a 160mm. Tomando en consideración, que si el bucle de nitinol se encuentra muy tensado el sistema no funciona.

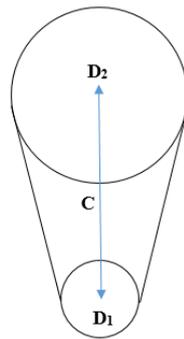


Figura 25. Longitud de bucle de nitinol

Fuente. **Autor**

De la ecuación (4) se obtiene:

$$Lb = 2 * 153 + \frac{\pi}{2} (100 + 40) + \frac{(100 - 40)^2}{4 * 153}$$

$$L_b = 532 \text{ mm}$$

La longitud del bucle de nitinol calculada entre poleas es 532 mm, ésta medida es solo si la correa del alambre de nitinol se encuentra bien tensionada, pero para lograr el movimiento entre poleas, el alambre debe recordar su memoria de forma recta. Al sumergir la polea pequeña al tanque se necesita que la correa de alambre de nitinol sea más larga para que tenga espacio para enderezarse a su forma recta y lograr un tirón, dando como resultado el movimiento entre poleas.

- **Cálculos de la potencia y eficiencia del sistema [4]**

El alambre de nitinol se alimenta por energía calorífica proporcionada por el tanque de agua a $T_1 = 80^\circ\text{C}$ y su temperatura baja de $T_2 = 20^\circ\text{C}$.

Por lo tanto de la ecuación (6) se tiene la sección del alambre que se encuentra en contacto con el agua caliente, entonces:

$$S_a = 1 * 2\pi * (0,5 \times 10^{-3} \text{ m}) * 0,561 \text{ m}$$

$$S_a = 1,762 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Se realiza la variación de la temperatura alta y baja:

$$\Delta T = T_1 - T_2$$

$$\Delta T = 80^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 60^\circ\text{C}$$

De la ecuación (5), se tiene la estimación de la potencia generada del alambre:

$$W = \left(350 \frac{W}{\text{m}^2 * ^\circ\text{K}} + 2100 \frac{W}{\text{m}^2 * ^\circ\text{K}} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^{-1/2} * \sqrt{1,05 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \right) * (1,762 \times 10^{-3} \text{ m}^2) * (60^\circ\text{K})$$

$$W = 264,50 \text{ W}$$

Utilizando la ecuación (7) y considerando que W_A es la potencia desarrollada por el generador y W_Q es la potencia absorbida por el alambre para producir la energía necesaria para mover el generador, entonces: $W_Q = W_A$

$$W = W_Q + W_A$$

$$W_A = \frac{W}{2}$$

$$W_A = \frac{264,50W}{2}$$

$$W_A = 132,25 W$$

El flujo volumétrico, a través de la ecuación (9) es:

$$\dot{v} = \pi * (0,5 \times 10^{-3} m)^2 * \left(1,05 \frac{m}{s}\right)$$

$$\dot{v} = 8,247 \times 10^{-7} \frac{m^3}{s}$$

Por definición de eficiencia térmica, la relación de calor generado (W_A) y la cantidad de calor transferido al cable (del agua caliente) por unidad de tiempo (Q), siendo el calor que se produce por el calentamiento del alambre de nitinol, según la ecuación (8) es:

$$Q = \left(8,247 \times 10^{-7} \frac{m^3}{s}\right) * \left(5,2 \times 10^6 \frac{J}{m^3 * ^\circ K}\right) * (60^\circ K)$$

$$Q = 257,3 W$$

De la ecuación (10) se obtiene, la relación entre la potencia que se necesita para calentar el alambre de nitinol y la potencia generada por el sistema.

$$\eta = \frac{132,25 W}{257,3 W}$$

$$\eta = 0,48 = 48\%$$

- **Diseño del eje de transmisión**

Para el cálculo de los esfuerzos sobre el eje se impone un diámetro de 5mm, debido a la disponibilidad en el mercado.

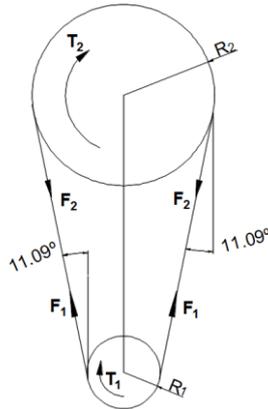


Figura 26. Representación de las fuerzas aplicadas
Fuente. Autor

Del anexo A1, se tiene la fuerza de recuperación que tiene el alambre de nitinol a calefacción, teniendo un valor de 7,85 lbf.

Para el eje 2:

Para el cálculo del torque ejercido por el alambre de la ecuación (12) se tiene:

$$T = F * d$$

$$T_2 = 3,14 \text{ lbf} * \frac{4,448 \text{ N}}{1 \text{ lbf}} * 0,05 \text{ m}$$

$T_2 = 0,698 \text{ N} \cdot \text{m}$ Torque de la fuerza de recuperación del alambre de nitinol.

$F_{2y} = F_2 * \cos 11,09$ De la figura 26 se toma el ángulo de $\alpha = 11,09$

$$F_{2y} = 3,14 \text{ lbf} * \frac{4,448 \text{ N}}{1 \text{ lbf}} * \cos 11,09$$

$$F_{2y} = 13,07 \text{ N}$$

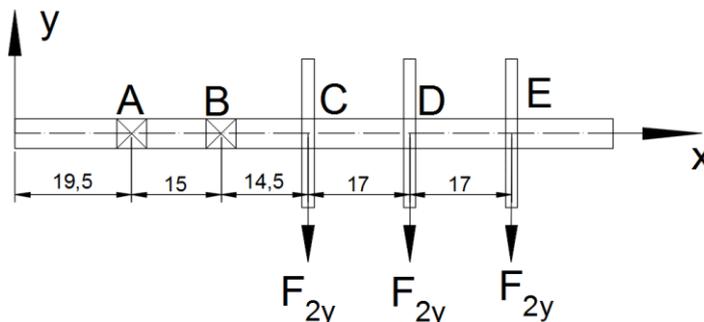


Figura 27. Representación de las fuerzas sobre el eje 2 (medidas en mm)
Fuente. Autor

Cálculo de las reacciones producidas en los soportes A y B.

$$\sum M_A = 0$$

$$15 * R_B - 29,5 * 13,07 - 46,5 * 13,07 - 63,5 * 13,07 = 0$$

$$R_B = 121,55 \text{ N}$$

$$\sum F_y = 0$$

$$-R_A + R_B - 3 * 13,07 = 0$$

$$R_A = 82,34 \text{ N}$$

Cálculo de momento en el eje 2

Momento máximo= -1237,52 N.mm

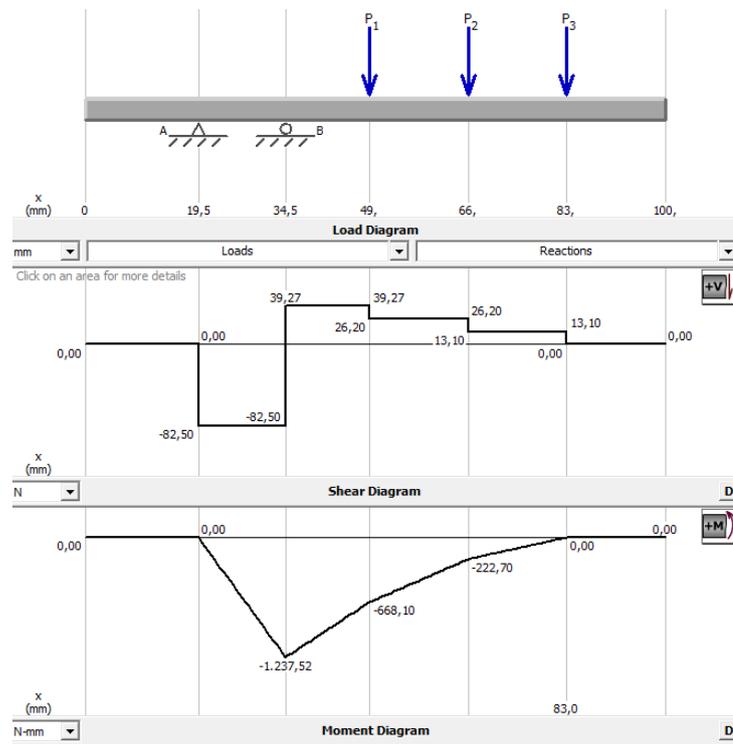


Figura 28. Momento máximo eje 2

Fuente. Autor

Esfuerzo producido por las cargas aplicadas

De la ecuación (13) y (14) se obtienen:

$$S = \frac{\pi * (5 \text{ mm})^3}{32}$$

$$S = 25,54 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_x = \frac{1237,52 \text{ N} \cdot \text{mm}}{25,57 \text{ mm}^3}$$

$$\sigma_x = 100,84 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad del eje 2

De la ecuación (14), aplicando que el límite elástico del nitinol es de 257Mpa se calcula:

$$\eta_s = \frac{275 \text{ MPa}}{100,84 \text{ MPa}}$$

$$\eta_s = 2,73$$

Para el eje 1

Asumiendo, que no existen pérdidas por fricción en los contactos de la polea y el alambre de nitinol, es decir, el torque en el eje 2 es igual torque 1. Sin embargo, la fuerza que actúa sobre el eje 1 tiene diferente magnitud por el ángulo que formada entre la polea y el alambre de nitinol.

$$F_{1y} = F_1 * \sin 83$$

$$F_{1y} = 7,85 \text{ lbf} * \frac{4,448 \text{ N}}{1 \text{ lbf}} * \cos 11,09$$

$$F_{1y} = 34,05 \text{ N}$$

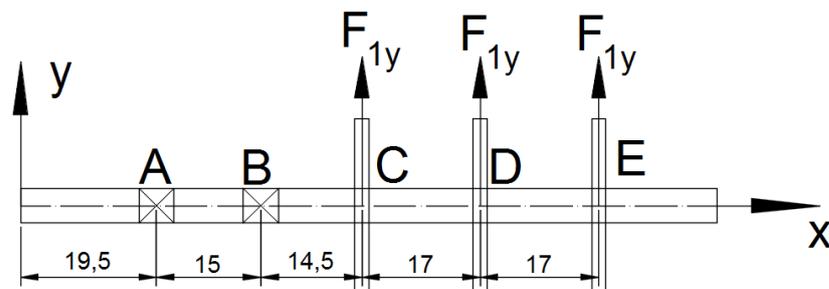


Figura 29. Representación de las fuerzas sobre el eje 1

Fuente. Autor

Cálculo de las reacciones producidas en los soportes A y B.

$$\sum M_A = 0$$

$$15 * R_B - 29,5 * 34,05 - 46,5 * 34,05 - 63,5 * 34,05 = 0$$

$$R_B = 316,67 \text{ N}$$

$$\sum F_y = 0$$

$$-R_A + R_B - 3 * 34,05 = 0$$

$$R_A = 248,57 \text{ N}$$

Cálculo de momento en el eje 1

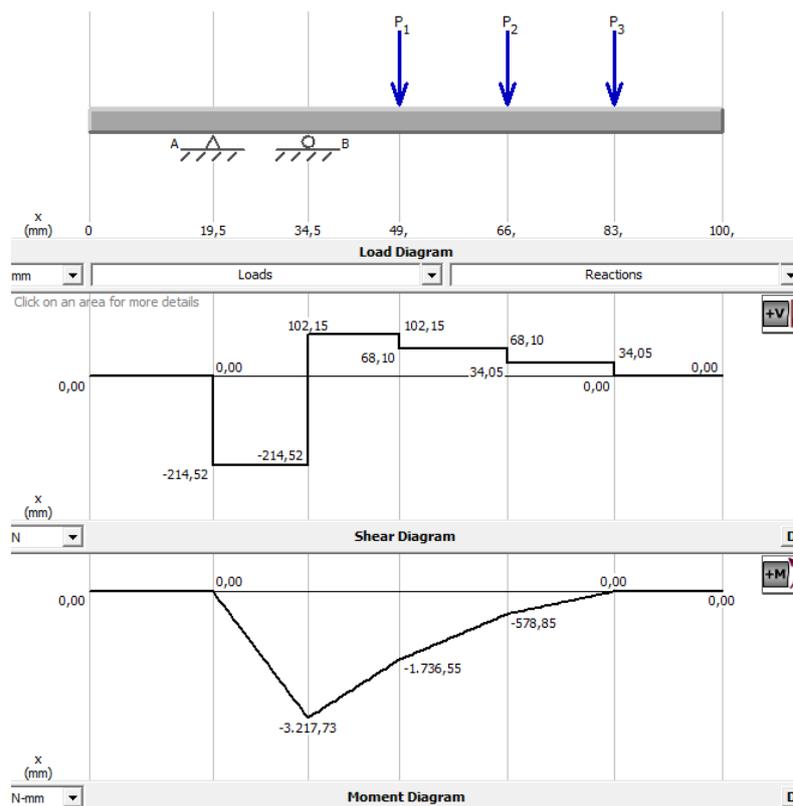


Figura 30. Momento máximo eje 1
Fuente. Autor

Momento máximo= -3217,73 N.mm

Esfuerzo producido por las cargas aplicadas

Aplicando la ecuación (13) y (14) se obtiene:

$$S = \frac{\pi * (5 \text{ mm})^3}{32}$$

$$S = 24,54 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_x = \frac{3217,73 \text{ N} \cdot \text{mm}}{24,54 \text{ mm}^3}$$

$$\sigma_x = 131,12 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad del eje

De la ecuación (15), aplicando que el límite elástico del nitinol es de 257 MPa se calcula:

$$\eta_s = \frac{275 \text{ MPa}}{131,12 \text{ MPa}}$$

$$\eta_s = 2,09$$

Selección: El material seleccionado del eje es acero galvanizado en caliente M5 y de largo de 10 cm, porque la principal función de la galvanización es evitar la corrosión y oxidación que puedan afectar al eje. Otro de los beneficios es que los ejes están sometidos a un ambiente de vapor entre 60°C y 80°C, con lo que se garantiza soportar y evitar la corrosión debido a que el proceso de galvanización se realiza a 450°C. Según los cálculos realizados anteriormente se tienen un factor de seguridad de 2,73 para el eje de la polea grande y 2,09 para el eje de la polea pequeña, $\eta_s > 1$ entonces el diseño es adecuado para este sistema.

- **Cálculo de rodamientos [20]**

Para eje 1 soporte A

Datos de diseño

Carga radial (F_r) = 0,25 kN

Carga axial (F_a) = 0 kN

n=500 rpm

Factor de fiabilidad (R) = 95% Anexo B2

Juego normal

Transmisión de máquina general

Considerando un factor de esfuerzos dinámicos (f_L) de entre 2 – 3. Aplicando a la ecuación (15).

Dónde:

L_h : vida nominal estimada del rodamiento

p : exponente de vida ($p=3$ para rodamiento de bolas)

$f_L = 2$

$$L_h = (2)^3 * 500$$

$$L_h = 4000 \text{ horas}$$

Capacidad de carga dinámica equivalente del rodamiento, aplicando la ecuación (16).

$$\frac{F_a}{F_r} = \frac{0}{0,25 \text{ kN}} = 0 < e$$

Del anexo B1 se tiene, $X = 1$, y $Y = 0$

$$P = 1 * 0,25 + 0 * 0$$

$$P = 0,25 \text{ kN}$$

Realizando consideraciones de fiabilidad de 95%, entonces $a_1 = 0,62$ y $a_{23} = 1$ (ver anexo B2).

Capacidad de carga dinámica

Utilizando la ecuación (17) se tiene:

$$C = (0,25)^3 \sqrt[3]{\frac{4000 * 500 * 60}{0,62 * 1 * 10^6}}$$

$$C = 1,45 \text{ kN}$$

• Selección de Rodamientos

Del anexo B3, se ha seleccionado el rodamiento FAG-635.

Comprobación

Del anexo B3, se determina los siguientes factores como: la capacidad de carga estática

y el factor de cálculo para el rodamiento seleccionado. De la ecuación (18).

Dónde:

f_o :Factor de cálculo ($f_o = 13$) del Anexo B3

C_o :Capacidad de carga estática ($C_o = 1,04 \text{ kN}$) del anexo B3

$$\frac{f_o F_a}{C_o} = \frac{13 * (0)}{1,04 \text{ kN}} = 0$$

$$\frac{F_a}{F_r} = \frac{0}{0,25 \text{ kN}} = 0 < e$$

Del Anexo B1 se tiene, $X = 1$, y $Y = 0$

$$P = 1 * 0,25 + 0 * 0$$

$$P = 0,25 \text{ kN}$$

$$a = \left(\frac{1000}{n} \right)^{1/3}$$
$$a = \left(\frac{1000}{500} \right)^{1/3} = 1,26$$

Diámetro medio del rodamiento

Para determinar el diámetro medio se establecen datos como: el diámetro mayor y el diámetro menor del rodamiento seleccionado (Anexo B3). De la ecuación (19).

$$dm = \frac{5 \text{ mm} + 19 \text{ mm}}{2} = 12 \text{ mm}$$

Carga equivalente

De la ecuación (20) se obtiene:

$$X_o = 1, \text{ y } Y_o = 0$$

$$P_o = 0,25 \text{ kN}$$

Factor de esfuerzos estáticos

De la ecuación (21) se tiene:

$$f_s^* = \frac{1,04 \text{ kN}}{0,25 \text{ kN}}$$

$$f_s^* = 4,16$$

Viscosidad relativa del lubricante

A través de la ecuación (22) se obtiene:

$$v_1 = \frac{4,14 * 4500}{\sqrt{12 * 500}} = 241,67 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$$

Temperatura de trabajo

De la ecuación (23), donde la T_a es la temperatura ambiente y se considera un $\Delta T = 30^\circ\text{C}$

$$T_t = 20 + 30 = 50^\circ\text{C}$$

Del anexo B4 con el diámetro medio y el número de rpm del sistema se estima el rango de la viscosidad relativa del lubricante.

$$v_{40^\circ\text{C}} = [50 - 100] \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$$

Del anexo B5, con la viscosidad teórica del lubricante ISO a 40°C ($v_{40^\circ\text{C}} = 68 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$), y la temperatura de trabajo se estima la viscosidad de servicio del lubricante.

$$v_{50^\circ\text{C}} = 42 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$$

Ratio de viscosidad

De la ecuación (24) se tiene:

$$\kappa = \frac{42 \text{ mm}^2/\text{s}}{241,67 \text{ mm}^2/\text{s}} = 0,10$$

Entonces,

$$K = K_1 + K_2$$

Del anexo B6, se determina el factor $K_1 = 0$ y el factor $K_2 = 7$ del anexo B7. Entonces:

$$K = 0 + 7 = 7$$

Factor del material y las condiciones de servicio

Del anexo B8, se determina el factor valor básico $a_{23II} = 0,15$ y el factor de condiciones de servicio $S = 0,8$, entonces de la ecuación (25):

$$a_{23} = 0,15 * 0,80 = 0,12$$

Cálculo de la vida nominal real del rodamiento

De la ecuación (26) se tiene:

$$L_{hr} = 0,62 * 0,12 * \left(\frac{1,45}{0,25}\right)^3 * \frac{10^6}{500 * 60}$$

$$L_{hr} = 483,87 \text{ horas}$$

El rodamiento seleccionado ha sido FAG-635, y con un lubricante con una viscosidad cinemática de ISO 68 tendrá una vida útil de aproximadamente 420 horas.

Siguiendo la misma metodología de selección del rodamiento del soporte A del eje 1, se obtienen los resultados en la tabla 2 para el soporte B del eje 1 y los soportes A y B del eje 2.

Tabla 3. Selección de rodamientos

Rodamiento	Selección	Lubricante	Vida útil (h)	D _{Interior} (mm)	D _{Exterior} (mm)
Eje 1 soporte A	FAG-635	ISO 68	483	5	19
Eje 1 soporte B	FAG-635	ISO 68	620	5	19
Eje 2 soporte A	FAG-625	ISO 150	1490	5	16
Eje 2 soporte B	FAG-625	ISO 150	1110	5	16

Fuente. Autor

3.2 RESULTADOS

En el anexo C1 se tiene la tabla general, en las figuras 31 y 32 se muestran los , son datos obtenidos por los sensores de temperaturas, velocidad angular, voltaje y amperaje.

- **Voltaje vs Rpm**

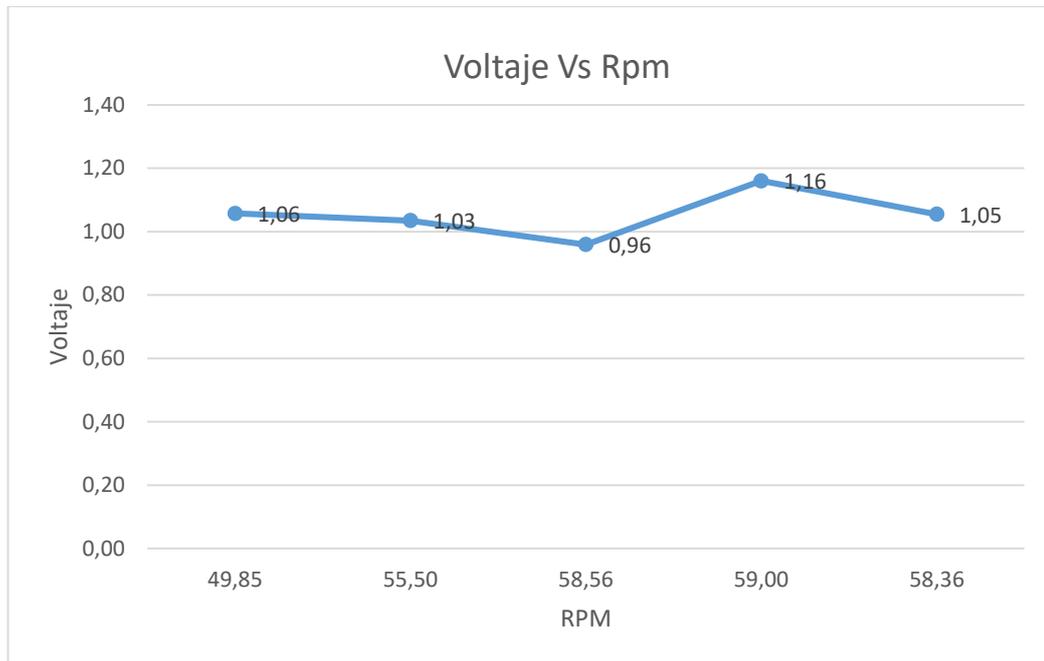


Figura 31. Voltaje Vs Rpm
Fuente. Autor

Análisis 1

- ✓ Como se puede observar durante un largo periodo de tiempo se mantiene la velocidad angular entre 49 y 59 rpm.
- ✓ De los promedios se puede observar que a mayor rpm se obtiene mayor voltaje del motor generador, se puede visualizar que a 59 rpm se obtiene 1,18V.
- ✓ Debido al PID programado con $\pm 1^{\circ}C$ se nota la pequeña variación del voltaje. Es mínima y gracias a este control se obtiene una temperatura constante de calentamiento.

- **Amperaje vs Rpm**

Análisis 2

- ✓ El amperaje se encuentra en un rango entre 0.9 a 0.12 amperios.
- ✓ Los resultados están en función del número de rpm, a mayor número de rpm se obtiene mayor amperaje.
- ✓ Se trabajó con una resistencia de 10 ohmios, pero se podría utilizar una resistencia de 1 ohmio por lo cual la intensidad debería aumentar.

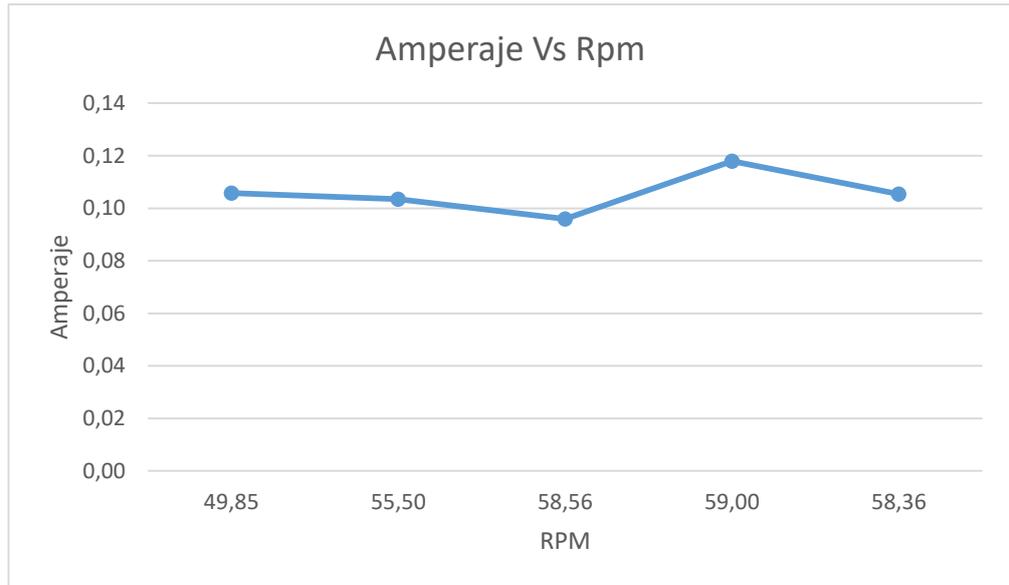


Figura 32. Amperaje Vs Rpm
Fuente. Autor

- **Error de medición**

Análisis 3

Para el porcentaje de error absoluto se toma los datos de voltaje y amperaje del anexo

C1, los valores de cada medición son el valor aproximado y el valor real es el promedio de todos los datos sea para voltaje o amperaje.

Datos

r : Valor real

p : Valor aproximado

n : Total de mediciones tomadas

e : Error absoluto

$$e = \frac{|r - p_1| + |r - p_2| + |r - p_n|}{N} \quad (29)$$

Para el error relativo se toma el resultado del valor real entre el valor absoluto.

Datos

e_r : Error absoluto

$$e_r = \frac{r}{e} \quad (30)$$

Realizando los cálculos para el voltaje y amperaje los resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Errores de mediciones

Unidades	Error Absoluto	Error Relativo
Voltaje	0,08	7,93%
Amperaje	0,008	7,86%

Fuente. Autor

- **Potencia del generador**

La potencia generada por el sistema viene dada por la multiplicación del voltaje medio y el amperaje medio de la tabla de resultados del anexo C1.

Datos para potencia

V: Voltaje medio [V] = 1,06

I: Amperaje medio [A] = 0,11

$$P = V * I \quad (31)$$

$$P = 1,06 * 0,11$$

$$P = 0,117 \text{ W}$$

- **Arreglo**

1. Se puede utilizar este tipo de generador de energía limpia en las termas, lugares naturales de agua caliente. Según estudios en Ecuador, se encuentra en el cinturón de fuego del pacífico debido a que se cuenta con una gran actividad volcánica, por lo tanto se tiene los mejores lugares en cuanto a fuentes de agua termal y mineral. Las aguas termales se las puedes clasificar de la siguiente manera: aguas termales frías menos de 20°C, hipotermas de 20 a 35°C, mesotermas de 35 a 45°C, hipotermas de 45 a 100°C y aguas supertermales de 100°C en adelante. Esta información de termas hace al proyecto aplicable y autosustentable porque se estaría cumpliendo la temperatura Af de 80°.
2. Para aumentar el voltaje a 5V y amperaje de 1 A, se realiza mediante la conexión de varias máquinas en una conexión mixta.

Resultados

V: Voltaje medio [V] = 1,06

I: Amperaje medio [A] = 0,11

P: Potencia[W] = 0,117

De los resultados del proyecto se tiene como arreglo lo siguiente:

Circuito en Serie

El voltaje se suma para una conexión en serie. Mientras que el amperaje es el mismo.

$$V_t = V1 + V2 + V3 + V4 + V5 \quad (32)$$

$$I_t = I1 = I2 = I3 = I4 = I5 \quad (33)$$

Circuito en Paralelo

El amperaje se suma en este tipo de circuito y el voltaje es el mismo.

$$I_t = I1 + I2 + I3 + I4 + I5$$

$$V_t = V1 = V2 = V3 = V4 = V5$$

Por lo tanto, se necesita 5 máquinas conectadas en serie para obtener 5 voltios y para obtener un 1 A y se necesita 9 máquinas conectadas en paralelo para obtener 1 amperio. Aplicando las ecuaciones (32) y (33) se tienen como resultado 5,3V y 1,053A.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES

4.1 Conclusiones

- Para la fabricación de las poleas de potencia se utilizó la impresión en 3D, mediante la cual, se obtuvo el menor peso entre poleas para lograr vencer la fuerza de recuperación del alambre de nitinol y obtener una mayor velocidad angular, se obtuvo una medición de 55 a 60 rpm en la polea grande del generador, utilizando un encoder y un rodete de medición por cada ciclo dado por el motor generador de voltaje, descrito en el apartado 1.2.
- El cable funciona entre los 75 a 85°C pasada esta temperatura la propiedades del nitinol ya no tiene memoria de forma recta. Mientras que la temperatura de enfriamiento puede ir de 15 a 35°C, lo que afectando al número de revoluciones; con una mayor velocidad de enfriamiento en el alambre de nitinol aumentará más revoluciones.
- Para obtener una mayor voltaje y amperaje se necesita conectar 9 máquinas térmicas en paralelo y 5 en serie, para los resultados de la conexión en paralelo se dan mediante la conexión de todos sus polos positivos y sus polos negativos, de ésta manera se mantiene el voltaje mientras que se suma la intensidad. Para la conexión en serie, sus voltajes se suman, manteniendo su intensidad.
- Aprovechar la energía geotérmica que tiene Ecuador a través de sus aguas termales y transformándola en energía eléctrica, mediante este proyecto, se obtiene temperaturas para la transformación de martensita a austenita del alambre de nitinol entre 60°C y 80°C, obteniendo como resultados un generador auto sustentable para la generación de energía limpia y ecológica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. H. Schiller, *Heat Engine Driven by Shape Memory Alloys*, Blacksburg, 2002.
- [2] J. F. Wakjira, "Diseño de motor con la memoria de la forma VT1 aleación de calor," Blacksburg, 2001.
- [3] H. Soul, "Aleaciones con memoria de forma, propiedades mecánicas y microestructura. Desarrollo de sistemas de amortiguamiento basados en el efecto superelástico," Bariloche, 2011.
- [4] P. Vyavahare y C. Karthikeyan, "Shape memory effect and performance of a nitinol engine," India, 2017.
- [5] M. A. Callejas Ortego, "Análisis y estudio metodológico de las aplicaciones de los materiales con memoria de forma y superelasticidad en arquitectura y urbanismo," Sevilla, 2015.
- [6] D. S. Herranz Moreiro, "Control de posición de un material con memoria de forma SMA," Madrid, 2011.
- [7] D. S. Herranz Moreiro, "Control de posición de un material con memoria de forma (SMA)," de *Universidad Carlos III de Madrid*, España, 2011.
- [8] Dinalloy, "Dinalloy, Inc. Makers of Dynamic Alloys," [En línea]. Available: <http://www.dynalloy.com>. [Último acceso: 04 Mayo 2019].
- [9] K. R. Labs, "Kellogg's Research Labs," [En línea]. Available: <https://www.kelloggsresearchlabs.com/services/laser-welding/>. [Último acceso: 05 Junio 2019].
- [10] Impopernos, "Importadora de pernos," [En línea]. Available: <http://www.imporpernos.com/blog/propiedades-pegatanke>. [Último acceso: 05 Junio 2019].

- [11] J. J. Zhu, N. Lian, K. Liew y W. Huang, "Energy Conversion in Shape Memory Alloy Heat Engine Part I," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 12, pp. 127-132, 2001.
- [12] M. C. Shin, S. K. Chil, H. C. Young y K. J. Kwang, "Twin-crank type heat engine". Korea Patente US4683721A, 12 09 1985.
- [13] R. Banks, "Vertically oscillating heat engine". EE.UU Patente US4691518A, 12 11 1986.
- [14] D. J. Sandoval, "Thermal motor", United States Patente US4010612A, 08 03 1977.
- [15] F. E. Wang, "Energy conversion system", United States Patente US4275561A, 30 Junio 1981.
- [16] J. J. Pachter, "Engine", United States Patente US4150544A, 24 Abril 1979.
- [17] C. M. Wayman, "Solid state thermal engine", United States Patente US4246754A, 27 Junio 1981.
- [18] A. D. J. F. Kirkpatrick, "Field effect memory alloy heat engine", United States Patente US4281513A, 04 Agosto 1981.
- [19] R. Budynas y J. Nisbett, *Diseño de ingeniería mecánica de Shigley's*, Décima ed., vol. I, Nueva York: McGraw-Hill Education, 2015, p. 1105.
- [20] G. SKF, Rodamientos SKF, P U B B U / P 1 10000/ 2 E S, EEUU, 2015.
- [21] C. Veloso, "Electrontools," 09 Marzo 2016. [En línea]. Available: <https://www.electrontools.com/Home/WP/2016/03/09/sensor-de-temperatura-ds1820/>. [Último acceso: 2019 Junio 20].

- [22] F. Maocho, "Felixmaocho," 14 Febrero 2013. [En línea]. Available: <https://felixmaocho.wordpress.com/2013/02/15/arduino-uso-de-la-tarjeta-de-reles/>. [Último acceso: 21 Junio 2019].
- [23] A. robot, "Andromina robot V.2.0," 09 Julio 2016. [En línea]. Available: <http://androminarobot.blogspot.com/2016/07/en-este-tutorial-mostramos-como-usar-el.html>. [Último acceso: 21 Junio 2019].
- [24] Z. Vallejo, Física vectorial, Ecuador: Rodin, 2010.
- [25] DYNALLOY, Inc., Technical Characteristics of Nitinol, California, 2015.
- [26] FAG, Rodamientos FAG, España, 2000.