

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA
ELÉCTRICA CON TRACCIÓN HUMANA CON CAPACIDAD DE 600 VATIOS DE
POTENCIA ELÉCTRICA PARA ZONAS NO INTERCONECTADAS DE
COLOMBIA.

MARCELA ISABEL ROSADO POLO
JESUS FERNANDO ZABALA MAIGUA

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA MECATRÓNICA
BUCARAMANGA

2021

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA
ELÉCTRICA CON TRACCIÓN HUMANA CON CAPACIDAD DE 600 VATIOS DE
POTENCIA ELÉCTRICA PARA ZONAS NO INTERCONECTADAS DE
COLOMBIA.

MARCELA ISABEL ROSADO POLO
JESUS FERNANDO ZABALA MAIGUA

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL
TITULO DE:

INGENIERO MECATRÓNICO

MS.C. JOHAN BARRAGAN GOMEZ
DIRECTOR

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA MECATRÓNICA
BUCARAMANGA

2021

Nota de aceptación

Ms.C. Johan Barragán Gómez

Ms.C. Sergio Andrés Ardila Gómez

Ph.D. Carlos Julio Arizmendi Pereira

Bucaramanga, 14 de junio del 2021

TABLA DE CONTENIDO

1. OBJETIVOS.....	8
1.1. Objetivo general.....	8
1.2. Objetivos específicos.	8
2. JUSTIFICACIÓN	9
3. ESTADO DEL ARTE	10
4. MARCO TEORICO	12
4.1.1. Energía eléctrica.....	12
4.1.2. Energía mecánica	12
4.1.2.1. Potencia Mecánica	13
5. METODOLOGÍA	23
6. RESULTADOS	24
6.1. Diseño de mecanismo	24
6.1.1. Diseño de CAD.....	26
6.1.2. Cálculo de factor de seguridad	33
6.1.3. COEFICIENTES DE CORRECCION DE RESISTENCIA A LA FATIGA	33
6.3. Acondicionamiento de la onda trifásica generada.	39
6.4. Mediciones.....	42
6.4.1. Medición de la velocidad del rotor	42
6.4.2. Medición de la fuerza mecánica.	44
.....	46
7. CONCLUSIONES.....	54
8. BIBLIOGRAFIA.....	55
9. ANEXOS	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 . Distribución de imanes en un generador de flujo axial. [Autores]	15
Figura 2. Distribución de bobinas en un generador de flujo axial. [Autores]	16
Figura 3. Ergómetro de remo [26]	16
Figura 4. Ergómetro de remo [26]	17
Figura 5. Bicicleta de spinning [27]	17
Figura 6. Representación de una onda de una fase de un generador. [Autores]	18
Figura 7. Circuito de un puente rectificador de diodos. [Autores]	19
Figura 8. Onda completa rectificada. [Autores].....	19
Figura 9. Representación de un filtro RLC. [Autores].....	20
Figura 10. Onda completa rectificada y filtrada. [Autores]	20
Figura 11. Representación de una etapa de regulación. [Autores]	21
Figura 12. Onda regulada, DC. [Autores]	21
Figura 13. Metodología de diseño de ingeniera RFLP adaptada. [17]	23
Figura 14. Matriz QFD de Mecanismo de tracción para el generador [Autores].....	24
Figura 15. Mecanismo de tracción humana seleccionado [Autores].....	24
Figura 16. Gráfico de fuerza vs posición de pedal [11]	25
Figura 17. Propuesta inicial de diseño de generador [Autores]	25
Figura 18. Generador integrado a bicicleta [Autores]	26
Figura 19. Generador ensamblado [Autores]	26
Figura 20. Ensamble de generador de flujo axial [Autores].....	27
Figura 21. Eje del generador – Vista Isométrica [Autores]	27
Figura 22. Eje del generador – Puntos de interés sobre el eje [Autores]	28
Figura 23. Eje del generador – Geometría de ensamble [Autores]	28
Figura 24. Eje del generador. [Autores]	29
Figura 25. Fuerzas, momentos y reacciones aplicados sobre el eje [Autores]	31
Figura 26. Malla generada por SolidWorks para cálculo de esfuerzos de VonMises [Autores]	32
Figura 27. Análisis estático al eje con carga máxima [Autores]	32
Figura 28. Análisis estático a eje con carga mínima [Autores]	33
Figura 29. Factores de superficie para el acero [Autores]	34
Figura 30. Matriz QFD para selección de generador. [Autores]	38
Figura 31. Diagrama de conexión de bobinas. [WindGenKits]	39
Figura 32. Esquema de una etapa de transformación de corriente AC a DC. [Autores].....	40
Figura 33. Puente rectificador de 15 A. [Fuente: Artículo de mercado libre]	41
Figura 34. Condensador de 1000 uF. [Fuente: Artículo de mercado libre]	42
Figura 35. Esquema eléctrico del regulador de tensión diseñado. [Autores].....	42
Figura 36. Esquema de conexión de sensor de velocidad FC-03 [Autores]	43
Figura 37. Diagrama de flujo de sensor de velocidad FC-03 [Autores].....	43
Figura 38. Conexión de celda de carga [Autores]	44
Figura 39. Diagrama de flujo de celda de carga [Autores].....	44
Figura 40. Prototipo ensamblado (mecanismo-generador) [Autores]	45

Figura 41. Mecanismo de rotores [Autores]	46
Figura 42. Mecanismo de rotores completo [Autores].....	46
Figura 43. Bobinas conectadas [Autores]	47
Figura 44. Ensamble rotor-estator [Autores].....	47
Figura 45. Sensor de velocidad FC-03 ubicado en bicicleta [Autores]	48
Figura 46. Sensor de velocidad FC-03 ubicado en bicicleta [Autores].....	48
Figura 47. Voltaje generado vs Velocidad de pedaleo [Autores].....	49
Figura 48. Fuerza vs velocidad de pedaleo. [Autores].	50
Figura 49. Conexión de la celda de carga. [Autores].....	50
Figura 50. Celda de carga ubicada en puntera [Autores].....	51
Figura 51. Distribución tipo Y-Y de las cargas [Autores]	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de Bombillas comerciales [Autores].	22
Tabla 2. Factor de confiabilidad Kc. [28].....	35
Tabla 3. Tabla de constante de Nueber para aceros [28]	37
Tabla 4. Velocidad vs Voltaje generado. [Autores].....	49
Tabla 5. Velocidad vs Fuerza Sujeto A. [Autores]	51
Tabla 7. Velocidad vs Fuerza Sujeto B. [Autores].....	51
Tabla 6. Velocidad vs Fuerza Sujeto C. [Autores].....	51
Tabla 8. Velocidad vs Fuerza promedio. [Autores]	52
Tabla 9. Voltaje DC generado [Autores]	53

INTRODUCCIÓN

En este informe se presenta el resultado de la investigación desarrollada en el campo de la generación de energía, con el proyecto que lleva como título Diseño y construcción de un sistema de generación de energía eléctrica con tracción humana con capacidad de 600 vatios de energía eléctrica para zonas no interconectadas de Colombia.

Este proyecto nace debido a la necesidad identificada en zonas rurales de Colombia y está dirigido a una comunidad de las rancherías de la alta Guajira.

De acuerdo al área de estudio abarcada por este proyecto, se presentan el procedimiento para el diseño mediante fatiga y fabricación de un generador trifásico con imanes de neodimio y de tipo rotor fijo acoplado en una bicicleta estática, así como el diseño y construcción de la etapa reguladora de tensión desde corriente trifásica hasta corriente continua para ser almacenada en baterías, se detalla el método usado para la medición de potencia mecánica y el tratamiento de la señal para una comparación entre la potencia mecánica entregada y la potencia eléctrica generada, finalmente se presenta la puesta en funcionamiento de la bicicleta estática con todos los elementos descritos integrados.

Durante el desarrollo de este proyecto se identificaron posibles cambios que se dejaron planteados como oportunidades para la mejora, la cuales también se encuentran descritas en el presente informe.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo general.

Desarrollar una máquina de generación de energía eléctrica por tracción humana capaz de suministrar 600 vatios de potencia eléctrica.

1.2. Objetivos específicos.

- Seleccionar el mecanismo de tracción humana más adecuado para la generación de energía eléctrica.
- Diseñar un generador de energía eléctrica que se acople al mecanismo de transmisión mecánica.
- Simular la capacidad de generación de energía eléctrica de la máquina integrada por el mecanismo de tracción y el generador.
- Construir la máquina generadora de energía eléctrica por tracción humana.
- Validar el funcionamiento de la máquina realizando simulaciones y pruebas experimentales de potencia, rpm.

2. JUSTIFICACIÓN

En Colombia alrededor del 60% del territorio nacional carece de conexión a la red nacional de suministro [1]. Este porcentaje corresponde en su mayoría a las zonas apartadas del país en donde es difícil el acceso, lo cual hace costosa la instalación de una red de distribución local, además, muchas de estas zonas son consideradas parte de las reservas forestales del país por lo que se restringe la construcción industrial según la ley 2a de 1959 y Código de Recursos Naturales [2]. Hay comunidades que en horas de la noche no cuentan con la comodidad y seguridad de la luminosidad artificial que se consigue con bombillos alimentados con electricidad por lo que se parte desde este hecho para idear un sistema de generación de energía a baja escala.

Las comunidades a las cuales se dirige el proyecto no cuentan con las condiciones socioeconómicas para adquirir un servicio de energía eléctrica; los procedimientos para adquirir este servicio resultan invasivos y se restringe en caso de ser una reserva natural. Por otro lado, también se tienen en cuenta aquellas comunidades que adquirieron el servicio, pero este no es de buena calidad, es decir, se presentan cortes frecuentes y/o racionamientos no programados. Esto origina que los pobladores realicen conexiones que no cumplen con las normas establecidas, poniendo en riesgo la integridad de la comunidad [3].

La 6. es un departamento con una gran extensión rural y una población distribuida en una superficie de 20.848 [km²]. Éste es el departamento más septentrional de Colombia, dividido en tres zonas: baja, media y alta Guajira [4]. La media y alta Guajira es habitada por la etnia Wayuu (DANE 2006), quienes constituyen el 95,27% del total de los indígenas en la región (DANE 2009). Estas grandes extensiones del territorio demandan un alto nivel de desplazamiento de las personas, para poder gestionar la solución a sus necesidades básicas, donde su ubicación geográfica y falta de buena infraestructura vial no lo facilitan principalmente hacia el norte de la región.

El proyecto busca dar solución a la problemática descrita anteriormente, enfocado hacia la comunidad de la ranchería Majayütpana ubicada en el corregimiento de Jonjocito, en el municipio de Uribe - La Guajira, donde se realizará la instalación de la máquina en el colegio Majayütpana para abastecer de iluminación a los salones en horas de la noche.

Lo que se propone para mejorar esta problemática es realizar una máquina impulsada por tracción humana que pueda ser usada por la comunidad. La configuración geométrica de la máquina se seleccionará tomando como base sistemas de tracción humana que hayan demostrado su fiabilidad de funcionamiento como son los mecanismos de transmisión de bicicletas, ergómetros, elípticas, skierg. El mecanismo se hará solidario a un sistema de

generación de energía eléctrica para que el usuario al accionar los componentes del sistema mecánico active el sistema de conversión de energía mecánica a eléctrica. La energía eléctrica generada se acumulará en baterías que alimentarán luces led DC.

3. ESTADO DEL ARTE

En Colombia alrededor del 60% del territorio nacional carece de conexión a la red nacional de suministro [1]. Las zonas habitadas de la media y alta Guajira son de difícil acceso en su mayoría, lo cual es impedimento para la instalación de los servicios básicos a esta población [4]. Las múltiples soluciones para abastecer de energía eléctrica a estas personas incluyen energía fotovoltaica, eólica, y en casos recientes generación por fuerza humana. La generación de energía eléctrica más utilizada actualmente es de modo hidráulico, en la cual se aprovecha la energía cinética de grandes cantidades de agua que se dejan fluir controladamente para que muevan las aspas de un generador produciendo energía eléctrica. Análogamente, se tiene la generación de energía eléctrica eólica [5], donde las corrientes de vientos son las que impulsan las aspas de un aerogenerador para producir la energía.

A menor escala hay diferentes mecanismos con los cuales se genera energía cinética y son movidos por una persona en vez de agua o viento: las máquinas de hacer deporte como las bicicletas, ergómetros, elípticas, skierg, requieren que la persona que las utilice aplique su fuerza corporal y dicha energía puede ser utilizada para generar energía eléctrica [20]. En la bicicleta de tipo spinning, la fuerza para accionar el mecanismo es proporcionada por las piernas como en una bicicleta para andar en la calle, pero con la diferencia de que la bicicleta de spinning al ser estática no tiene ruedas, sino un volante de inercia en la parte delantera donde se acumula la energía cinética lo que da la sensación de estar manejando una bicicleta para andar. En el caso del ergómetro, con respecto al cual se pueden encontrar diferentes tipos como el de remo, de kayak, de canoa, etc, el esfuerzo es realizado principalmente con los brazos, en el caso del ergómetro de remo el esfuerzo se realiza con los brazos mientras sentado se suben y se extienden las rodillas. Para el caso del ergómetro de esquí nórdico, el esfuerzo es con los brazos mientras se está de pie en una plataforma. Las máquinas elípticas se utilizan para ejercitar las extremidades tanto inferiores como superiores.

En el 2016 RENEW GROUP PTE LTD realizó una solicitud de patente el trabajo realizado con título BICYCLE GENERATOR, consta de un sistema con un mecanismo para accionar un generador de energía eléctrica. El mecanismo es accionado por pedaleo y se conecta con los rotores del generador transmitiéndoles el movimiento y para cuando no sea posible pedalear se le adaptó al sistema un pistón neumático que también mueve los rotores. La energía generada se almacena en una batería

para su posterior uso, pero también se adaptó para ser utilizado para alimentar una bomba de agua en un sistema de purificación de agua. [21].

Considerando que el mecanismo no tiene como finalidad un entrenamiento atlético sino un aprovechamiento de la fuerza humana, se considera el esfuerzo y la fatiga que se va a experimentar el usuario. Para el remo de banco fijo los deportistas requieren realizar esfuerzo con las piernas y brazos, en cada palada realizada se aplican entre 25-35 Kg de peso de fuerza y un remero puede alcanzar hasta 350 W de fuerza media aplicada durante la regata [22].

En el caso de la maquina elíptica que es una máquina de bajo impacto que involucra diferentes músculos del cuerpo también ha sido utilizada para la generación de energía eléctrica, esta máquina cuenta con un volante de inercia que al ser reemplazado por un generador de imanes permanentes el cual aprovecha la energía cinética para mover rotor y producir energía eléctrica que posteriormente se almacena en una batería para su uso [23]. Un sistema similar se implementó para bicicletas estáticas, pero usando ruedas de fricción para transmitir la energía cinética de la máquina a un generador. [24].

Hay una gran variedad de máquinas para deporte de las cuales se puede aprovechar la energía entregada, en el caso de las personas con alguna discapacidad motriz dependiendo del tipo de limitación también pueden utilizar algunas de las maquinas anteriormente mencionadas en algunos casos con alguna modificación como en el caso del ergómetro del cual se propuso un diseño para deportistas en silla de rueda [26] y el cual tiene un volante de inercia que podría ser reemplazado por un generador como en los casos anteriores.

La generación de energía eléctrica por tracción humana se puede apoyar de otras formas de aprovechamiento energético como es el caso de la energía fotovoltaica en la cual se requiere la instalación de paneles solares [27].

Una parte importante de todo sistema de generación de energía eléctrica es el almacenamiento de dicha energía, para los sistemas de generación de energía eólicos, fotovoltaicos y por tracción humana es indispensable el uso de baterías. Actualmente, están en desarrollo ya que para las nuevas tecnologías como los autos eléctricos se requiere que sean más eficientes en cuanto a capacidad de almacenamiento y entrega de energía, así como la rentabilidad económica a la hora de adquirirlas y usarlas por un periodo determinado de tiempo. También se tienen en cuenta las consecuencias ambientales que implica producir dichas baterías y luego su posterior desecho al culminar su ciclo de vida. Por estas razones se tendrá especial cuidado al momento de la elección de baterías para la máquina propuesta en este proyecto.

4. MARCO TEORICO

4.1. Energía Eléctrica y Energía Mecánica.

4.1.1. Energía eléctrica

La energía eléctrica es una forma de energía que se deriva de la existencia en la materia de cargas eléctricas positivas y negativas que se neutralizan. La energía eléctrica puede transformarse en muchas formas de energía, tales como la de energía luminosa o luz, energía mecánica y térmica.

4.1.2. Energía mecánica

La energía mecánica a su vez es la energía propia de los cuerpos en un estado donde se encuentra influenciado por fuerzas, se determina a partir de la suma de la energía potencial, en cuyo caso el cuerpo se encuentra influenciado por la fuerza gravitacional; y la energía cinética, resultado de la aplicación de fuerzas que inducen al cuerpo a cambiar su estado de reposo a movimiento, estas fuerzas generan un trabajo para mover dicho cuerpo. A nivel general la energía mecánica se representa con la siguiente ecuación:

$$E_{mec} = K + U \quad (1)$$

Donde:

U Es energía potencial

K Es energía cinética

La energía que interesa para transportar un cuerpo de un punto 1 a un punto 2, se obtiene al aplicar el principio de trabajo y energía que relaciona el trabajo para mover un cuerpo con la energía cinética:

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

Por otro lado, la energía cinética para un cuerpo rígido en movimiento plano puede expresarse como:

$$T = \frac{1}{2}m\bar{v}^2 + \frac{1}{2}\bar{I}\omega^2 \quad (3)$$

Donde la expresión de energía cinética $\frac{1}{2}m\bar{v}^2$ se asocia al movimiento del centro de masa del cuerpo y la expresión $\frac{1}{2}\bar{I}\omega^2$ se asocia con la rotación del cuerpo en torno a su centro de masa.

4.1.2.1. Potencia Mecánica

Teniendo en cuenta lo anterior, se tiene que la tasa en el tiempo a la cual se efectúa el trabajo se representa como potencia mecánica:

$$P = \frac{dU}{dt} \quad (4)$$

Si se sustituye el trabajo dU por el producto escalar $F \cdot dr$ entonces la potencia se puede expresar como:

$$P = \frac{F \cdot dr}{dt} \quad (5)$$

Y teniendo en cuenta que $\frac{dr}{dt}$ es la velocidad \mathbf{v} del punto de aplicación de la fuerza \mathbf{F} , entonces la potencia finalmente se puede expresar como:

$$\mathbf{P} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v} \quad (6)$$

4.2. Generador de energía eléctrica.

Un generador es una máquina eléctrica que transforma la energía mecánica en energía eléctrica, funciona de manera contraria a los motores pero basándose en los mismos principios, a nivel general existen diferentes tipos de generadores según el tipo de energía que se transforma a energía eléctrica: fotovoltaicos, electroquímicos, geotérmicos electromecánicos, este proyecto se enfoca en los generadores electromecánicos dentro de los cuales se encuentra en generador de flujo axial utilizado en este proyecto por la ventaja de poder generar energía eléctrica a bajas velocidades.

Se considera que para generar energía eléctrica debe haber un flujo magnético, es decir un campo magnético en movimiento y entre mayor sea la velocidad mayor es la energía generada, con base a esto un generador se construye basándose en la ley de Faraday, voltaje inducido por un campo magnético variable:

$$e_{ind} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (7)$$

e_{ind} = Voltaje inducido en la bobina

N = Número de vueltas de alambre en la bobina

ϕ = Flujo que circula en la bobina

El signo menos se debe a que el voltaje generado se opone al flujo que lo genera según la ley de Lenz.

Dado que la generación de energía eléctrica solo se da cuando hay flujo magnético, es decir, el movimiento del campo magnético respecto a un conductor se tendrá en cuenta la ecuación de velocidad de un generador síncrono:

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad (8)$$

f_e = frecuencia eléctrica en Hz

n_m = velocidad mecánica del campo magnético en r/min

P = número de polos

De la ley de Biot y Savart se sabe que sobre todo conductor recorrido por una corriente crea un campo magnético, este campo a su vez crea una fuerza electromotriz que dado por:

$$F = B \cdot l \cdot i \cdot \text{sen } \alpha \quad (9)$$

Donde:

B la inducción en Teslas

l longitud del conductor bajo la acción del campo m

i intensidad de la corriente A

α ángulo formado por el conductor y la dirección del campo magnético

Si el conductor se halla sobre una superficie cilíndrica de radio r , como sucede en las máquinas eléctricas rotativas, el par de giro determinado por fuerza valdrá:

$$M = F \cdot r \quad (10)$$

Teniendo en cuenta lo anterior el par de giro se puede expresar como:

$$M = B \cdot l \cdot i \cdot r \quad (11)$$

El par debido a la totalidad de los conductores de la máquina que se hallen en condiciones análogas será la suma de todos los pares individuales, y recibe el nombre de par electromagnético interno del convertidor. El producto de este par por la velocidad angular de giro dará la potencia electromagnética interna de la máquina. [5]

$$P = M \cdot \omega \quad (12)$$

4.3. Partes de un generador de energía eléctrica de flujo axial.

Los generadores de flujo axial funcionan debido al campo magnético generado por imanes permanentes, que se orienta en la misma dirección del eje del rotor. Los magnetos se distribuyen simétricamente alrededor del disco del rotor alternando la forma en que se orientan los polos magnéticos Norte y sur, tal como se observa continuación:

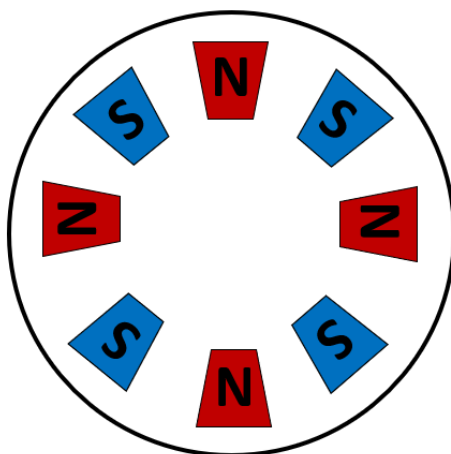


Figura 1 . Distribución de imanes en un generador de flujo axial. [Autores]

Como se describió anteriormente, la generación de energía eléctrica depende del flujo del campo magnético por lo que el disco en el que se sostiene los imanes que toma por nombre rotor, gira con respecto a los devanados que conforman el estator y se distribuyen como se muestra a continuación:

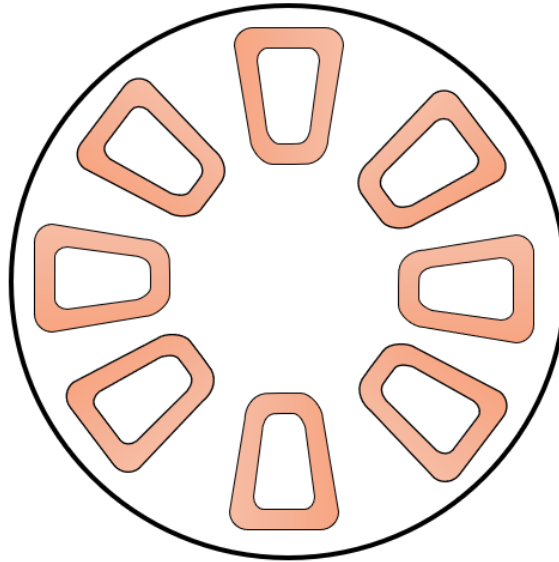


Figura 2. Distribución de bobinas en un generador de flujo axial. [Autores]

Adicionalmente, se tienen los componentes para el ensamblaje del estator y el rotor que dependen del diseño y son: el eje que soporta el ensamblaje, los rodamientos, elementos de separación y fijación del generador, mecanismo para la entrega de potencia mecánica al generador de los cuales algunos se describen a continuación:

4.4. Mecanismos de tracción humana.

4.4.1. Tipos de mecanismos.

Ergómetro de remo: Se pueden encontrar varios tipos de ergómetros: propiamente de remo, de kayak, de canoa, etc. El esfuerzo en este mecanismo es realizado principalmente con los brazos.



Figura 3. Ergómetro de remo [26]

Ergómetro para esquí nórdico: Se trata de una plataforma donde se posiciona el deportista y mediante unos cables en el extremo superior que simulan los esquís, se realiza el movimiento. La fuerza realizada es registrada por una serie de transductores que miden la fuerza lineal. La resistencia es proporcionada por freno

electromagnético. Este ergómetro permite que durante la prueba el sujeto esté “esquiando”.



Figura 4. Ergómetro de remo [26]

Bicicleta de spinning: Una bicicleta de este tipo es similar a una bicicleta de calle con la única diferencia de que una bicicleta de spinning no tiene ruedas, sino un volante de inercia en la parte delantera para un buen funcionamiento.



Figura 5. Bicicleta de spinning [27]

4.4.2. Transmisión de potencia mecánica

El fin de los sistemas de transmisión mecánica es transportar la enérgica mecánica hasta el punto de aplicación de lo que se desee aprovechar, ya sea fuerza o velocidad. Las formas habituales de transmisión mecánica son: Por poleas, por cadena, correa, engranaje, husillo y cardan.

- ❖ **Transmisión por Polea:** Consiste en discos conectados por cuerdas.
- ❖ **Transmisión por Cadena:** En ese caso se reemplaza el disco por el engranaje, el sistema más común que aplica este sistema es el sistema plato-cadena-piñón de las bicicletas.
- ❖ **Transmisión por correa:** Consta de una cinta colocada con tensión en dos poleas: una motriz y otra movida. Al moverse la cinta (correa) trasmite energía desde la polea motriz a la polea movida por medio del rozamiento que surge entre la correa y las poleas.

- ❖ **Transmisión por engranaje:** Un sistema de transmisión por engranajes está, formado básicamente por dos ruedas dentadas, que engrana entre sí y que, a su vez, van montadas en ejes que finalmente transmiten el movimiento a otro dispositivo o máquina.
- ❖ **Transmisión por husillo:** La transmisión por husillo, llamada sinfín, consiste en la transmisión de movimiento angular a lineal, esta a su vez se combina con otras formas básicas de transmisión para realizar sistemas más complejos.
- ❖ **Transmisión por Cardan:** Es una transferencia de movimiento giratorio a eje partido, independiente del ángulo que forman el generador del movimiento y el receptor, una aplicación de este tipo de transmisión son las juntas homocinéticas de los vehículos.

Una vez construida la máquina de generación de energía eléctrica y se esté generando una potencia eléctrica, se debe tener en cuenta que la onda trifásica que sale de los devanados del generador no es totalmente limpia, en forma general, la onda saliente de un generador se podría representar de la siguiente manera:

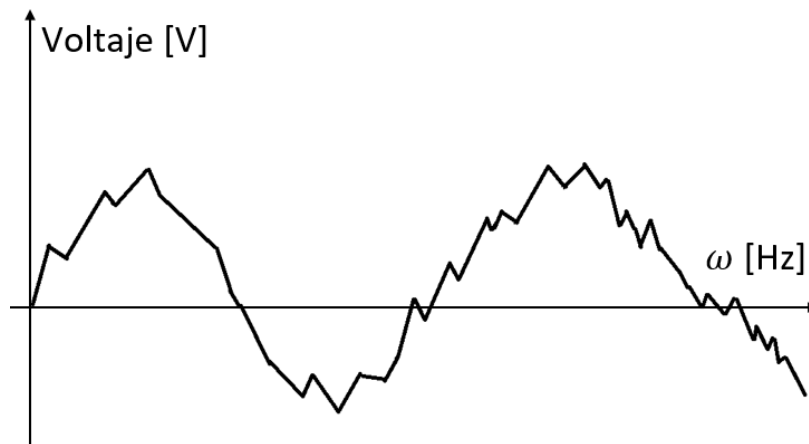


Figura 6. Representación de una onda de una fase de un generador. [Autores]

Esta energía debe ser corregida antes de suministrársela a la carga final, en este caso, las bombillas, por lo que a continuación se describe la etapa de rectificación, regulación y filtrado de la corriente de salida del generada.

4.5. Regulación, rectificación, filtración y almacenamiento de la energía generada.

4.5.1. Rectificación.

Existe una variedad de rectificadores en el mercado, dada la necesidad de convertir corriente alterna en corriente continua, la red de energía eléctrica disponible está

compuesta por una red trifásica que proporciona tensiones alternas senoidales a una frecuencia determinada, en este país a 60 Hz, pero existe un gran número de aplicaciones en las que se requiere una alimentación en forma de tensión continua, para ello se hace indispensable el uso de un rectificador. La función de estos dispositivos es convertir la corriente alterna que proviene del generador eléctrico en corriente continua, para que ésta pueda ser almacenada en las baterías. [10].

El rectificador está compuesto por diodos en una configuración determinada, para rectificar la corriente trifásica, se requieren 3 pares de diodos distribuidos de la siguiente forma:

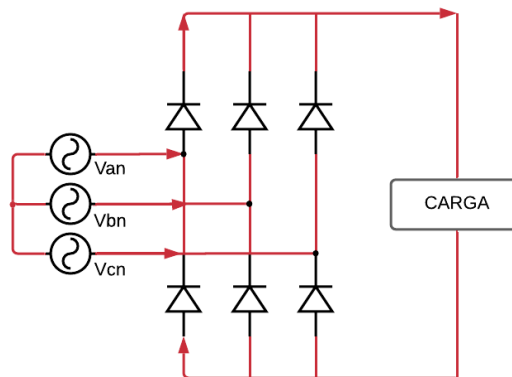


Figura 7. Circuito de un puente rectificador de diodos. [Autores]

4.5.2. Regulación.

El rectificador se encarga de distorsionar la senoidal de entrada para que su salida tenga una componente de continua. La señal de salida de un rectificador va en un solo sentido como la corriente continua, pero con aun en forma de onda como se representa en la siguiente figura:

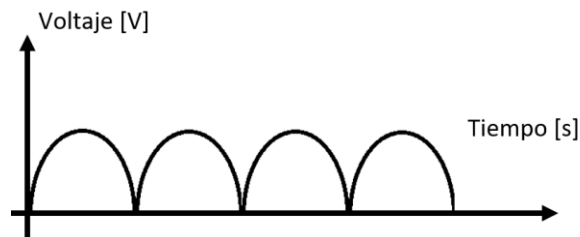


Figura 8. Onda completa rectificada. [Autores]

4.5.3. Filtro.

Normalmente la en la onda rectificada aún están presentes los armónicos propios de la señal, por lo que mediante un filtro se rechazan, sin embargo, suele permanecer una componente que se conoce como rizado o ripple. [12]. El filtro, puede ser de diferentes tipos según los componentes: RC, RL, LC, o RLC como el que se represente a continuación:

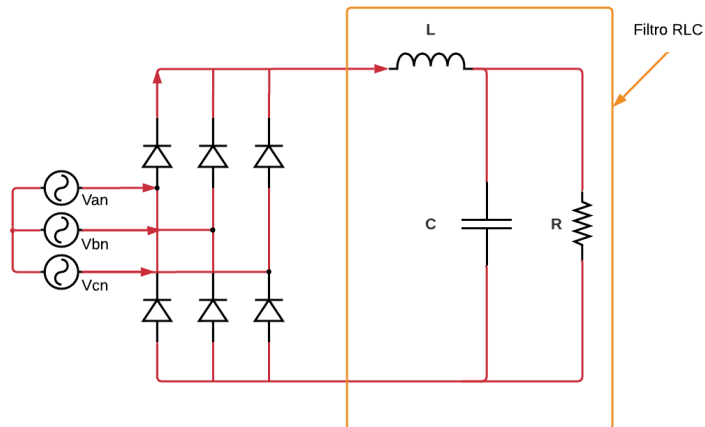


Figura 9. Representación de un filtro RLC. [Autores]

La onda saliente de un filtro normalmente es como la que se muestra a continuación, se nota que no es totalmente continua aun porque permanece un rizado o ripple el cual se puede corregir más adelante con otro filtro compuesto por condensadores para seguir a la siguiente etapa de procesamiento.

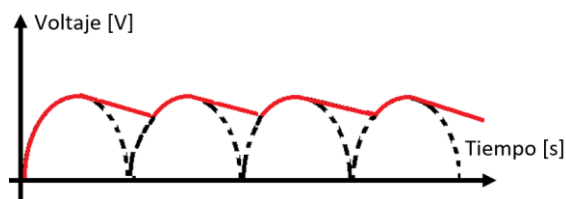


Figura 10. Onda completa rectificada y filtrada. [Autores]

4.5.4. Regulación.

Los reguladores de corriente son empleados comunmente con el fin de proteger la carga, ya que este toma los valores de voltaje provenientes de una fuente y los regula al valor de voltaje adecuado para la carga además de que filtra nuevamente la onda para eliminar el rizado.

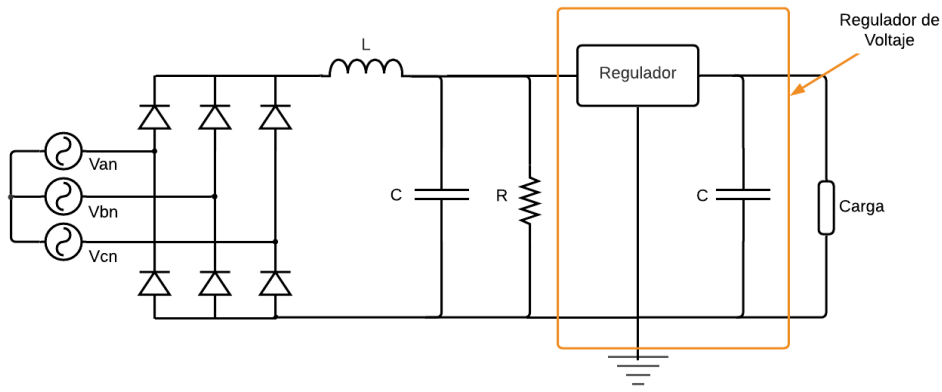


Figura 11. Representación de una etapa de regulación. [Autores]

La onda saliente de un filtro normalmente es como la que se muestra a continuación, es totalmente continua por lo que ya puede almacenarse para disponer de dicha energía.

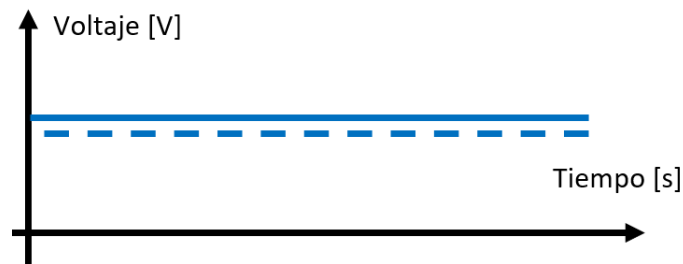


Figura 12. Onda regulada, DC. [Autores]

4.5.5. Sistema de baterías.

La tecnología más antigua y madura, entre las baterías, son las de plomo ácido. Su ánodo y cátodo consisten en plomo y dióxido de plomo respectivamente. Presentan eficiencias entre el 60% y el 80%. No presentan impacto medioambiental en su instalación y operación. Sin embargo, sus componentes son materiales tóxicos, lo que podría causar problemas al momento de dar de baja al equipo.

4.5.6. Bombillas LED.

LED (Light Emitting Diode) es un semiconductor inorgánico recubierto por una resina epóxica transparente, el cual está unido a dos terminales: cátodo y ánodo. Al momento de pasar la electricidad se produce el efecto de electroluminiscencia dando origen al fenómeno de la luz visible. Los diodos LED funcionan con energía eléctrica de corriente continua (CC), de modo que las lámparas deben incluir circuitos internos para poder funcionar alimentado por voltaje alterno estándar (CA). [15]

Tipo de bombilla	Potencia [W]
Incandescente	100
Bombilla LED	11
Ahorraadores	40
Bombilla LED	9
Tubo fluorescente	30
Tubo LED	9

Tabla 1. Tipos de Bombillas comerciales [Autores].

4.5.7. Almacenamiento de energía.

En esta etapa se tiene en cuenta que la carga es de 12 V y se desea garantizar una potencia de 600 vatios por lo que la corriente suministrada a la batería se determina por la siguiente ecuación:

$$I = \frac{Potencia_{carga}[W]}{12[V]} \quad (13)$$

La batería se escoge dependiendo del valor de voltaje de la carga y de la corriente que debe suministrar.

4.5.7.1. Control de carga

La función de un controlador de carga es regular la carga y descarga de las baterías o bancos de almacenamiento. Además de esta función los controladores de carga a menudo ofrecen otras características como, la medición y registros de datos. Así mismo, desconexión por bajo voltaje, encendido y apagado de luces durante la noche. Los controladores de carga se pueden encontrar en el comercio tamaños que van desde 4 hasta 80 amperios; Y tensiones nominales de 12, 24 y 48 VDC. [16]

4.6. Sistema de generación convencional Vs sistema de generación con tracción humana.

¿Qué beneficio tiene un sistema de generación a partir de tracción humana?

Se encuentran disponibles en el mercado generadores eléctricos de distintos modelos y diferentes marcas, igualmente capaces de proporcionar 1.000 W de potencia, pero con un costo elevado. En el costo siempre debe ser considerado el mantenimiento y el consumo de combustible, un generador eléctrico "Pulsar" tiene

una salida de 12 V con capacidad de proporcionar 8.3 Amperios dando así una potencia de 800 W, ahora bien, el funcionamiento de este es a combustible, el generador tiene una capacidad de tanque de combustible de 1.2 galones que le permite funcionar durante 8,5 horas con una capacidad de carga del 50%.

Haciendo una proyección a 20 años el costo de funcionamiento de esta máquina es aproximadamente \$ 19.636.926 esto haciendo proyecciones de 8 galones de gasolina por mes. Ahora bien, si se compara este tipo sistema de generación con el propuesto se observa una gran diferencia en el costo de funcionamiento, ya que el costo de mantenimiento de la máquina ronda cerca de \$3'900.000 pero claro está que hay una diferencia en la potencia generada de 600 W.

5. METODOLOGÍA

El proceso de diseño RFLP (Requeriments, Funtional, Logical, Physical) permite que la ingeniería concurrente coordine las actividades individuales y puntos de vista de equipos de diseño distribuidos. A continuación, se observa la metodología con sus respectivas actividades por etapas.

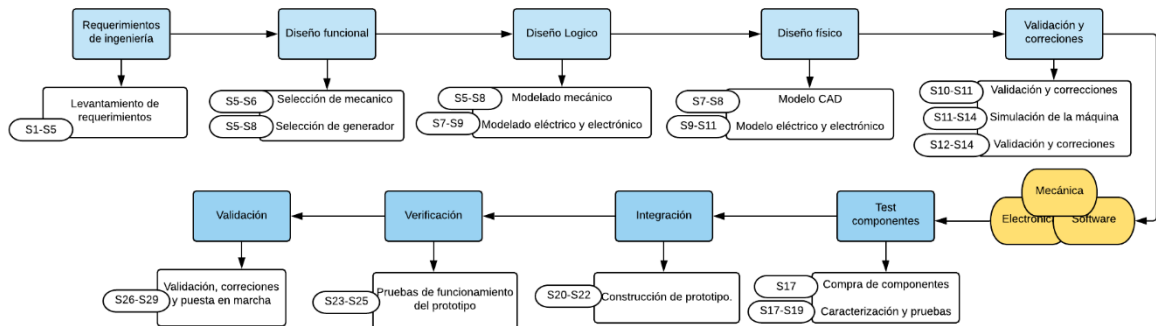


Figura 13. Metodología de diseño de ingeniería RFLP adaptada. [17]

6. RESULTADOS

6.1. Diseño de mecanismo

Para escoger el mecanismo más conveniente para generador se evaluaron ciertos parámetros que se muestran en la siguiente matriz QFD:

			Favorece a nivel alto	9					
			Favorece a nivel medio	3					
			Favorece a nivel bajo	1					
	¿Cómo?				Ergometro de remo	Ergometro para Esquí nordico	Bicicleta de spinning	Bicicleta Reclinada	Maquina eliptica
	Funciona de Servicio		Peso						
1	Fácil accionamiento		5	3	1	9	9	3	
2	Permitir modificación de talla		3	9	9	9	9	1	
3	Ergonomia		5	1	1	9	9	3	
4	Comodidad del usuario		4	1	1	9	9	1	
5	Ahorro de esfuerzo de accionamiento		4	1	1	3	9	3	
6	Ahorro en costo de construcción		3	3	3	9	1	1	
7	Facil Instalación		2	3	3	9	9	3	
8	Ahorro de espacio a ocupar		1	3	3	9	3	3	
				73	63	219	213	61	

Figura 14. Matriz QFD de Mecanismo de tracción para el generador [Autores]



Figura 15. Mecanismo de tracción humana seleccionado [Autores]

Para el diseño del mecanismo de accionamiento de generador es necesario contar con parámetros de entrada, como lo son la potencia aplicada por la persona en el pedaleo, así como la velocidad promedio a la cual esta accionará la bicicleta. Para ello en la figura 15. Se evidencia el comportamiento de la fuerza del usuario a medida que el pedal hace el recorrido de 360° correspondiente a un ciclo de pedaleo.

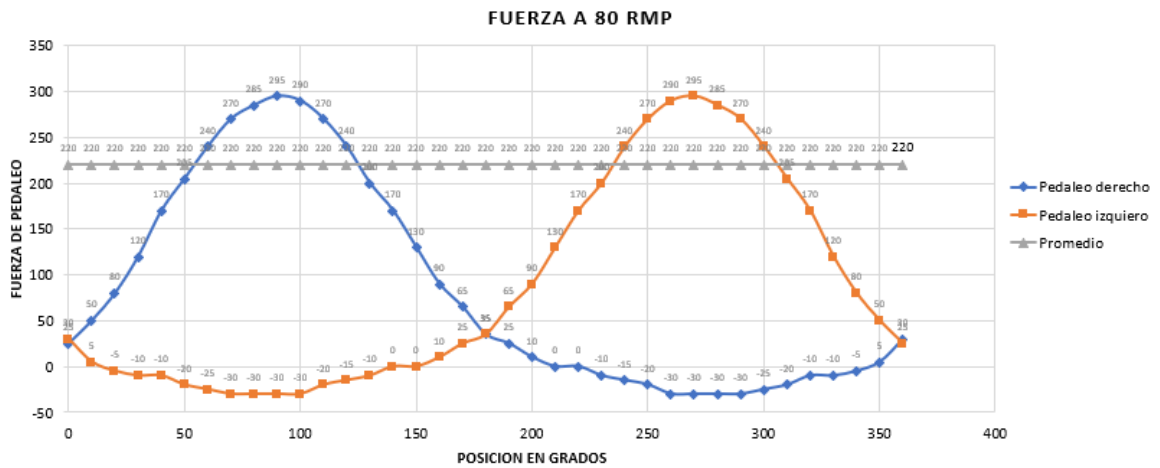


Figura 16. Gráfico de fuerza vs posición de pedal [11]

De lo anterior se puede calcular una potencia promedio generada a una velocidad de 80 RPM. Se debe tener en cuenta que en ciclismo y otros deportes se habla de fuerza y potencia como un mismo termino por lo que se hace la aclaración de que la fuerza que se muestra en la imagen es realmente la potencia en Watts por lo que se tiene que la potencia mecánica promedio es de:

$$P = 220 [W] \tag{14}$$

La transmisión de la potencia hacia el generador se realiza por medio de cadena haciendo girar el piñón que se encuentra ensamblado con el eje principal. Como se muestra en la figura 17.

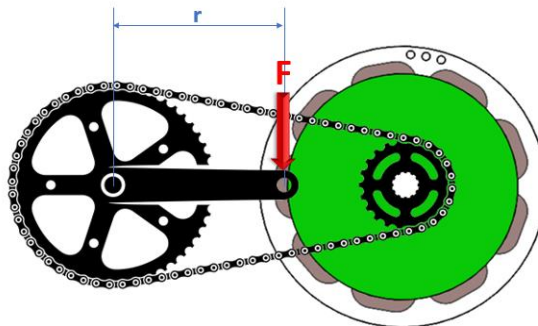


Figura 17. Propuesta inicial de diseño de generador [Autores]

6.1.1. Diseño de CAD



Figura 18. Generador integrado a bicicleta [Autores]

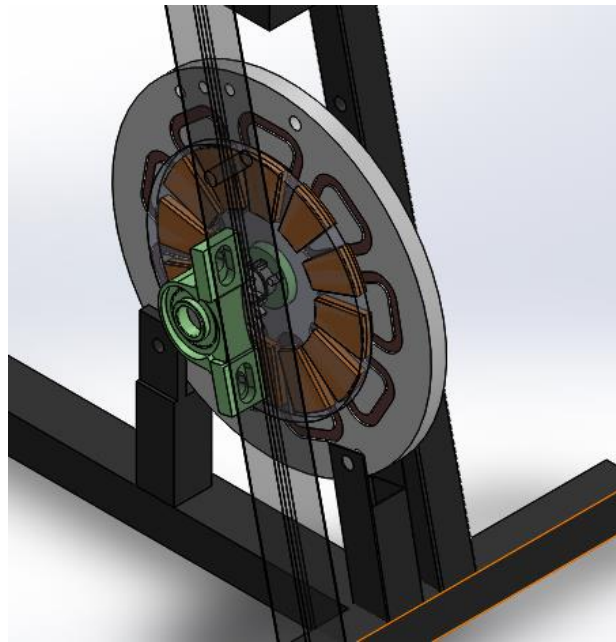


Figura 19. Generador ensamblado [Autores]

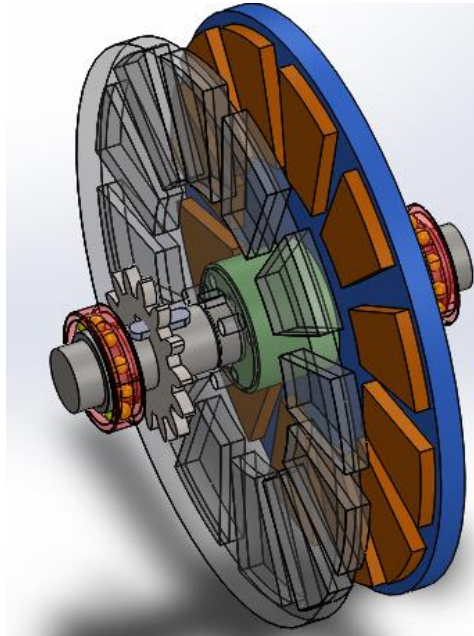


Figura 20. Ensamble de generador de flujo axial [Autores]

En el diseño del generador, el componente crítico a diseñar es el eje sobre el cual estará apoyado el mecanismo de rotor y estator. Para ello se diseña el eje y se calculan los esfuerzos a los cuales está sometido, con ello se hará un estudio para evaluar el diámetro nominal de 1”

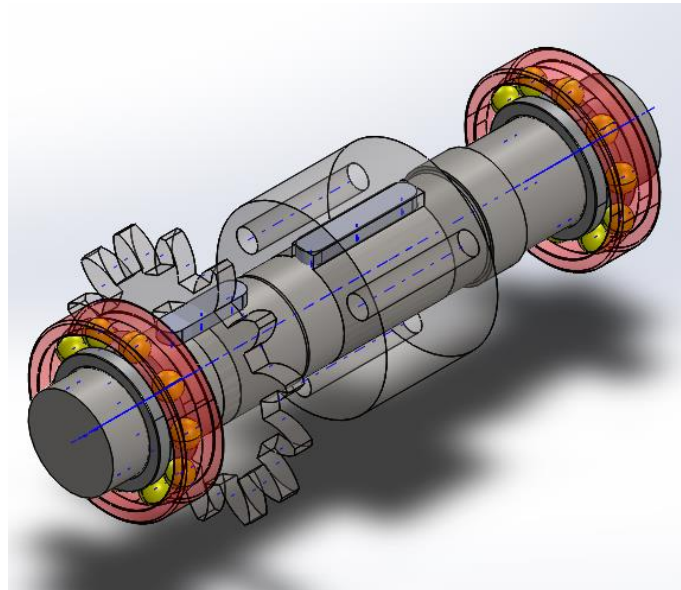


Figura 21. Eje del generador – Vista Isométrica [Autores]

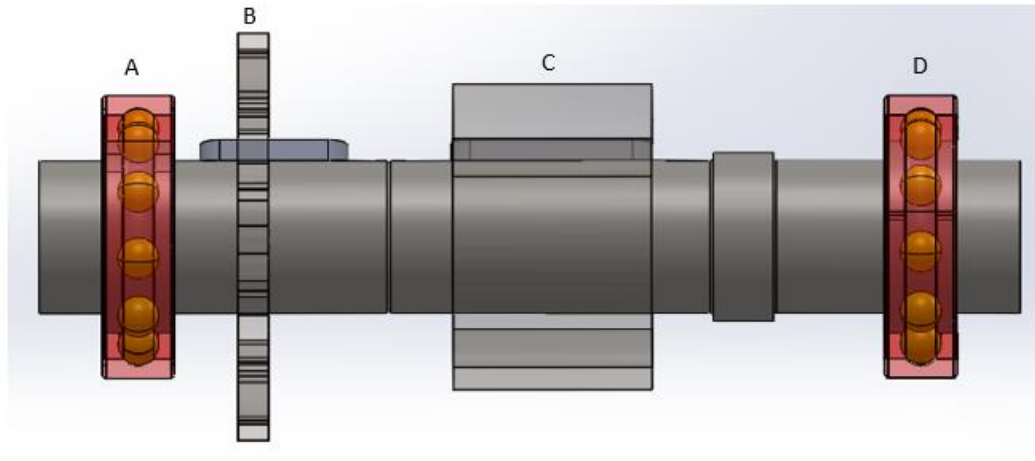


Figura 22. Eje del generador – Puntos de interés sobre el eje [Autores]

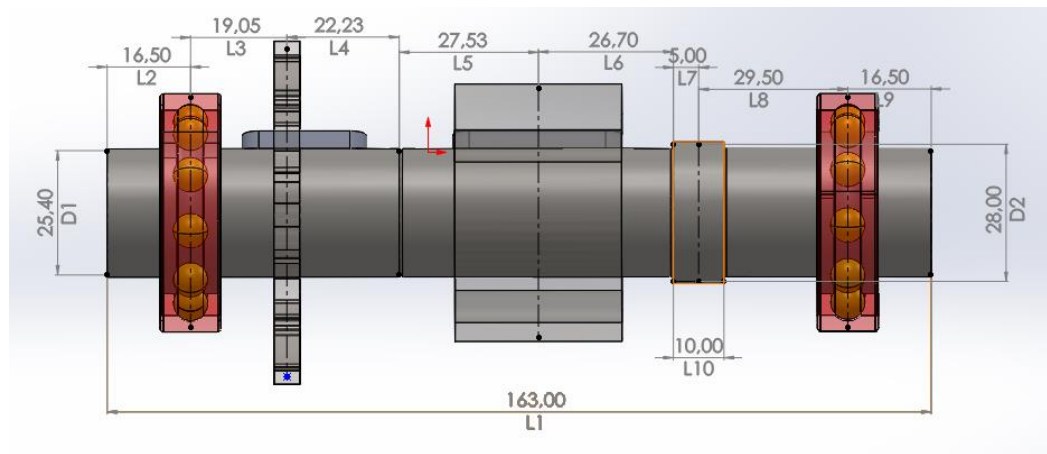


Figura 23. Eje del generador – Geometría de ensamblaje [Autores]

Diagrama de cuerpo libre del eje

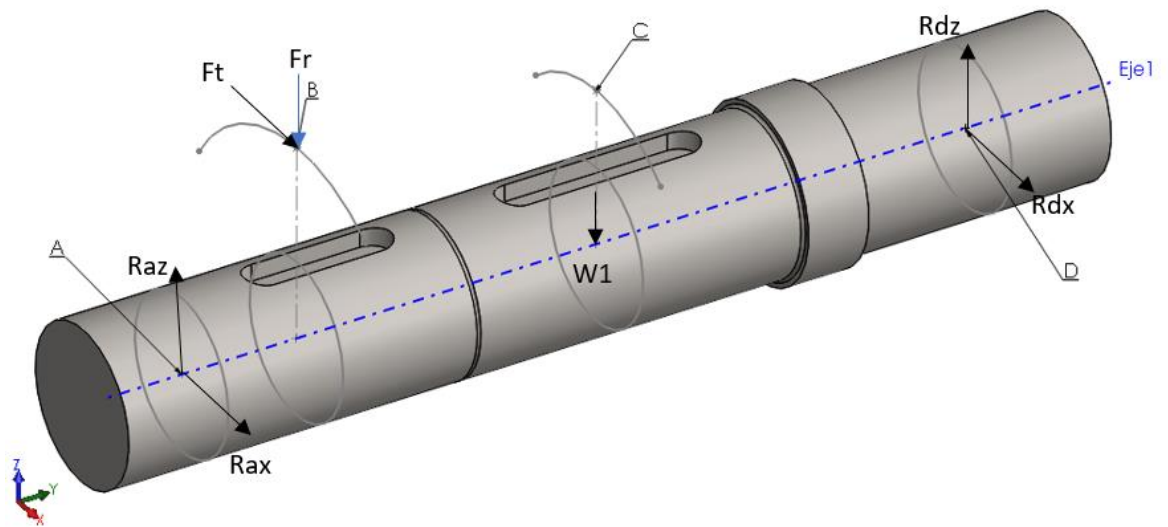


Figura 24. Eje del generador. [Autores]

El cálculo del eje implica siempre el uso del enfoque de esfuerzos combinados y se sugiere el método de la Teoría de la Falla por Energía de distorsión (Teoría de Von Mises).

$$\bullet T = 63000 * \left(\frac{P}{n}\right) \quad (21)$$

$$T = 63000 * \left(\frac{0.7584485683}{240}\right) = 199.09274917875 \text{ [lb - in]}$$

$$\bullet F_t = T * \left(\frac{DA}{2}\right) \quad (22)$$

$$F_t = 199.09 * \left(\frac{1}{2}\right) = 99.546374589375 \text{ lb}$$

$$F_t = 442.8 \text{ N}$$

$$\bullet F_r = F_t * \tan\phi \quad (23)$$

$$F_r = 99.546374589375 * \tan(20^\circ)$$

$$F_r = 36.231917279646 \text{ lb}$$

$$F_r = 161.17 \text{ N}$$

Fuerza generada por el peso de los rotores y el separador

$$\bullet W_1 = 5.45 \text{ kg} * 9.81 \frac{m}{s^2} = 53.46 \text{ N}$$

Se hallan reacciones

Plano Z-Y

$$\curvearrowright_+ \sum M_a = 0 \quad (24)$$

$$\curvearrowright_+ Ma = F_r * L_3 + W_1 * (L_3 + L_4 + L_5) - Rdz * (L_3 + L_4 + L_5 + L_6 + L_7 + L_8) = 0$$

$$Rdz = \frac{161.17 * 0.01905 + 53.46 * (0.06881)}{(0.13001)} = 51.91 \text{ N}$$

$$\uparrow + \sum F_y = 0 \quad (25)$$

$$\uparrow + \sum F_y = Raz - F_r - W_1 + Rdz = 0$$

$$Raz = -51.91 + 161.17 + 442.8 = 552.06 \text{ N}$$

Plano Y-X

$$\curvearrowright_+ \sum M_a = 0 \quad (26)$$

$$\curvearrowright_+ Ma = F_t * L_3 + Rdx * (L_3 + L_4 + L_5 + L_6 + L_7 + L_8) = 0 \quad (27)$$

$$-Rdx = \frac{442.8 * 0.01905}{(0.13001)} = 64.88 \text{ N} \leftarrow$$

$$\rightarrow + \sum F_x = Rax + F_t + Rdx = 0 \quad (28)$$

$$Rax = 64.88 - 442.8 = -377.92 \text{ N} \leftarrow$$

Cálculo del momento para el punto "B"

Plano Z-X

$$\curvearrowright_+ Mb = Ft * \frac{De}{2} \quad (29)$$

$$\curvearrowright_+ Mb = 442.8 * \frac{0.0632}{2}$$

$$\approx Mb = 13.99248 [Nm]$$

Cálculo del momento para el punto "C"

Plano Z-X

$$\approx_+ Mc = Raz * (L_3 + L_4 + L_5) - Fr * (L_4 + L_5) + Rdz * (L_6 + L_7 + L_8) \quad (30)$$

$$\approx_+ Mc = 552.06 * 0.01905 - 161.17 * (0.04976) + 51.91 * (0.0612)$$

$$\approx Mc = 5.6738158 [Nm]$$

Teniendo ya los datos de las fuerzas externas, reacciones y momentos que actúan sobre el eje, se procede a realizar un análisis estático en SolidWorks, hallando de esa forma un esfuerzo máximo cuando está con su carga máxima y un esfuerzo mínimo cuando no está actuando carga debido al piñón

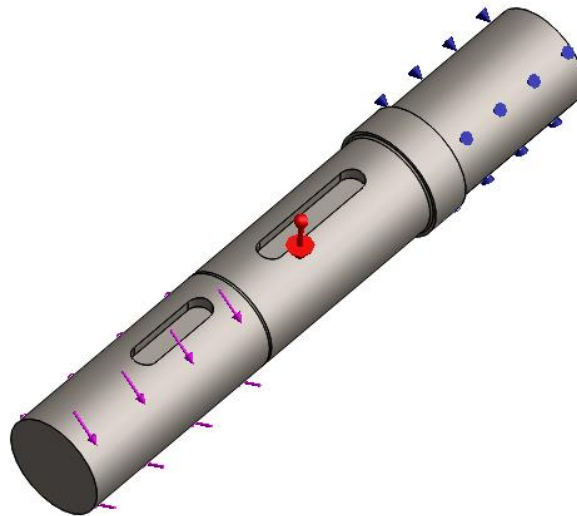


Figura 25. Fuerzas, momentos y reacciones aplicados sobre el eje [Autores]

A continuación, se muestra la malla generada para el análisis de esfuerzos la cual tiene 21185 elementos cuadráticos y 31812 nodos. El tamaño de cada elemento es de 3,104 mm. El material seleccionado para la simulación es Acero 1045.

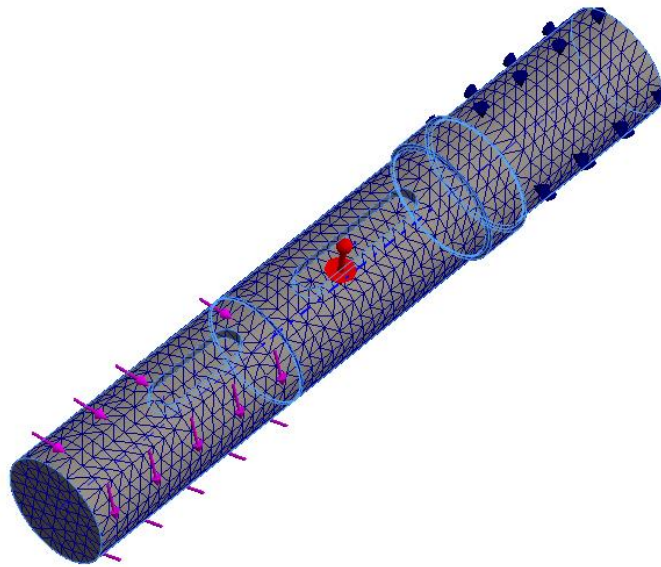


Figura 26. Malla generada por SolidWorks para cálculo de esfuerzos de VonMises [Autores]

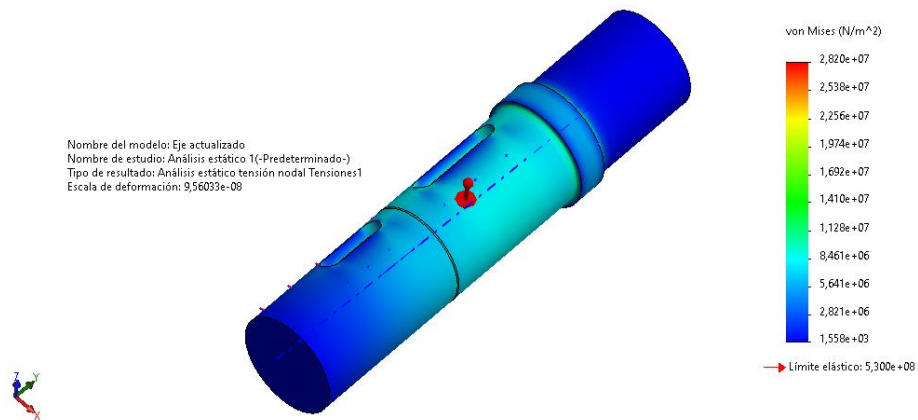


Figura 27. Análisis estático al eje con carga máxima [Autores]

Como se observa en la figura anterior el valor de esfuerzo máximo por el método de VonMises es $\sigma_{max} = 28,199112 \text{ Mpa}$

De igual manera, se realiza la simulación, pero sin carga debido a la fuerza aplicada por el piñón, es decir, el eje se encuentra en equilibrio estático.

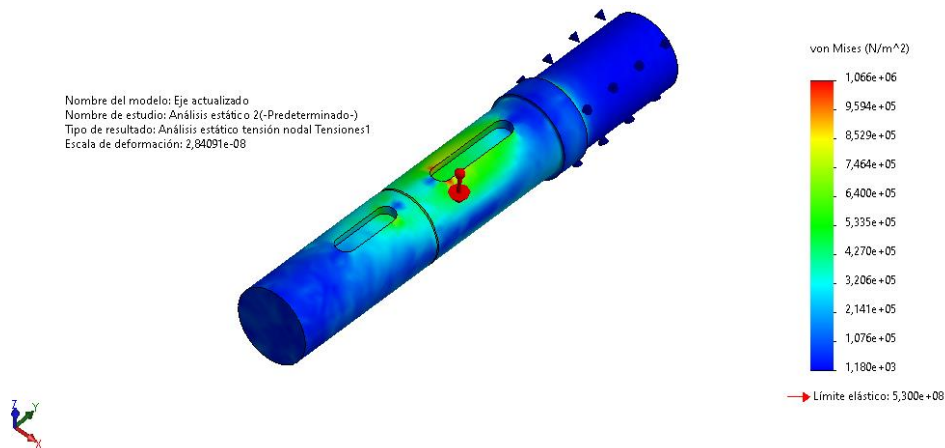


Figura 28. Análisis estático a eje con carga mínima [Autores]

Como se observa en la figura anterior el valor de esfuerzo mínimo por el método de VonMises es $\sigma_{max} = 1,0658155 \text{ Mpa}$

6.1.2. Cálculo de factor de seguridad

$$S'_e = 0.5 S_u \quad (31)$$

$$S'_e = 0.5 * (625 \text{ Mpa})$$

$$S'_e = 312.5 \text{ [Mpa]}$$

6.1.3. COEFICIENTES DE CORRECCION DE RESISTENCIA A LA FATIGA

$$K = K_a * K_b * K_c * K_d * K_{car} \quad (32)$$

K_a Factor de acabado superficial: Al eje se le realizará un mecanizado, el cual consiste en cilindrado para llegar a las dimensiones deseadas, obteniendo un coeficiente de acabado superficial teniendo en cuenta $S_u=625 \text{ [Mpa]}$, dando como resultado aproximado de $K_a = 0.77$

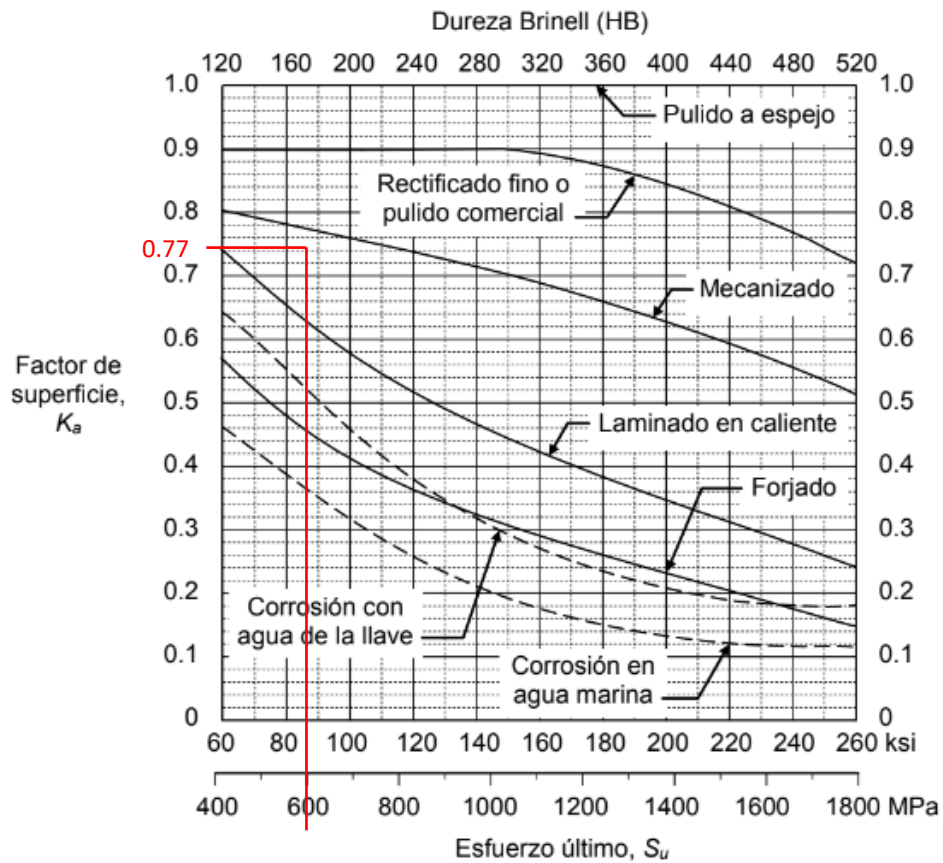


Figura 29. Factores de superficie para el acero [Autores]

K_b Factor de tamaño : El tamaño de la pieza en las secciones críticas reducen el valor de resistencia a la fatiga. En general, a mayor tamaño de la pieza menor es su resistencia. El valor del coeficiente se halla con la ecuación:

$$\left. \begin{array}{l} K_b = 1, \quad \text{si } d_e \leq 8 \text{ mm (0.3 in)} \\ K_b = 1.189d_e^{-0.097}, \quad \text{si } 8 \text{ mm} < d_e \leq 250 \text{ mm} \\ (K_b = 0.869d_e^{-0.097}, \quad \text{si } 0.3 \text{ in} < d_e \leq 10 \text{ in}) \\ K_b = 0.6, \quad \text{si } d_e > 250 \text{ mm (10 in),} \end{array} \right\} \text{Flexión o torsión} \quad (33)$$

Como se observa en la ecuación 1, el valor de K_b se define respecto a un rango de diámetro equivalente " d_e ", este diámetro depende del tipo de sección, a continuación, se obtiene el diámetro equivalente de algunas secciones típicas.

Flexión giratoria:	$d_e = d.$	
Flexión no giratoria ⁷ :	$d_e = 0.37d.$	(34)
Torsión:	$d_e = d.$	

Dado a que el eje de estudio estará sometido a una flexión giratoria el diámetro equivalente corresponde al diámetro de la sección transversal del eje.

$$d_e = d$$

$$d_e = 1 \text{ [in]} \text{ ó } 25.4 \text{ [mm]}$$

$$K_b = 1.189 * d_E^{-0.097} \tag{35}$$

$$K_b = 1.189 * (25.4)^{-0.097}$$

$$K_b = 0.8687$$

K_c Factor de confiabilidad : El factor de confiabilidad corrige la resistencia a la fatiga de tal manera que se tenga una mayor probabilidad del que el valor de real sea igual al valor corregido. Este factor se determina con la desviación estándar de la resistencia a la fatiga “8%”. Se tiene por estadística a la campana de gauss la siguiente tabla:

Confiabilidad (%)	50	90	99	99.9	99.99	99.999
K_c	1	0.897	0.814	0.753	0.702	0.659

Tabla 2. Factor de confiabilidad K_c . [28]

En el estudio del eje se utilizará una confiabilidad del 99 %, obteniendo así un valor de $K_c = 0.753$

K_d Factor de temperatura : Es bien sabido sobre la influencia de la temperatura en la resistencia de un material, por ejemplo, un acero puede fragilizarse al ser sometido a “bajas” temperaturas, y la resistencia a la fatiga puede reducirse notablemente a una temperatura de trabajo superior a los 500 °C (19. Resumen Vanegas). Por medio de resultados experimentales en los aceros, se puede decir que la resistencia permanece constante a temperatura “ambiente” hasta 450 °C, Para determinar el valor del factor de temperatura " K_d " se utiliza la siguiente ecuación hallada de forma empírica.

$$K_d = 1, \quad \text{si } T_{emp} \leq 450^\circ\text{C} \quad (36)$$

$$K_d = 1 - (0.0058/^\circ\text{C})(T_{emp} - 450^\circ\text{C}), \quad \text{si } 450^\circ\text{C} < T_{emp} \leq 550^\circ\text{C}$$

Como se mencionó anteriormente, el estudio es a temperatura ambiente "25-30 °C" la ecuación correspondiente es (Ecuación 7), es decir, el factor de temperatura corresponde a $K_d = 1$.

K_{car} Factor de carga : El comportamiento de un material correspondiente a la resistencia a la fatiga depende también del tipo de carga a la cual está sometido, la relación entre la resistencia a la fatiga y cada tipo de carga es la siguiente:

$$K_{car} = 1, \quad \text{para flexión.}$$

$$K_{car} = 0.7, \quad \text{para carga axial.} \quad (37)$$

$$K_{car} = 0.577, \quad \text{para torsión(y cortante)}$$

Como se evidencia en la (Ecuación 9) el factor de corrección por la carga a la cual está sometido el material es $K_{car} = 1$

K total =

$$K = K_a * K_b * K_c * K_d * K_{car} \quad (38)$$

$$K = 0.77 * 0.8687 * 0.753 * 1 * 1 = 0.503680947$$

q "índice de sensibilidad a la entalla" : Este coeficiente representa la sensibilidad del material a la discontinuidad de radio.

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}}$$

S_u		\sqrt{a}			
		Carga axial y flexión		Torsión	
(ksi)	(MPa)	(in ^{0.5})	(mm ^{0.5})	(in ^{0.5})	(mm ^{0.5})
50	345	0.130	0.66	0.093	0.47
55	380	0.118	0.59	0.087	0.44
60	415	0.108	0.54	0.080	0.40
70	485	0.093	0.47	0.070	0.35
80	550	0.080	0.40	0.062	0.31
90	620	0.070	0.35	0.055	0.28
100	690	0.062	0.31	0.049	0.25
110	760	0.055	0.28	0.044	0.22
120	825	0.049	0.25	0.039	0.20
130	895	0.044	0.22	0.035	0.18
140	965	0.039	0.20	0.031	0.16
160	1100	0.031	0.16	0.024	0.12
180	1240	0.024	0.12	0.018	0.09
200	1380	0.018	0.09	0.013	0.07
220	1515	0.013	0.07	0.009	0.05
240	1655	0.009	0.05		

Tabla 3. Tabla de constante de Nueber para aceros [28]

Radio de discontinuidad propuesto $r = 0.079$ in ó 2 mm

$$\sqrt{a} = 0.35^{0.5} \quad (40)$$

$$q = \frac{1}{1 + \frac{0.28 \text{ mm}^{0.5}}{\sqrt{2 \text{ mm}}}} = 0.72771$$

ECUACION DE GOODMAN MODIFICADA PARA MATERIALES DCTILES
“ESFUERZOS COMBINADOS”

$$\sigma_{max} = 28,199112 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{min} = 1,0658155 \text{ Mpa}$$

$$\frac{1}{N} = \frac{\sigma_{me}}{S_u} + \frac{\sigma_{ma}}{S_n} \quad (41)$$

$$\sigma_{me} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = \frac{28.199112 + 1.0658155}{2} = 14,63246375 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{ma} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = \frac{28.199112 - 1.0658155}{2} = 13,56664825 \text{ Mpa}$$

$$S_n = S'_e * K$$

$$S_n = 312.5 * 0.503680947 = 167,7529 \text{ Mpa}$$

$$\frac{1}{N} = \frac{14,63246375}{625} + \frac{13,56664825}{167,7529}$$

$$\frac{1}{N} = 0.10428 \rightarrow N = \frac{1}{0.10428}$$

$$N = 9.58$$

6.2. Generador eléctrico

Para hacer una correcta selección del tipo de generador a utilizar, de igual forma que se realizó para la elección del mecanismo, para este se realiza una matriz QFD la cual dio el siguiente resultado:

¿Cómo?		Favorece a nivel alto			
		9			
Funcion de servicio		Favorece a nivel medio			
		3			
Peso		Favorece a nivel bajo			
		1			
		savonius	darrieus	flujo axial	
1	Corriente de excitación	1	3	3	3
2	Perdida por rozamiento	3	1	3	9
3	Relacion potencia/tamaño	5	1	1	9
4	Refrigeracion	2	3	3	3
5	Instalacion	3	3	3	3
6	Costo de construccion	5	1	1	3
			31	37	105

Figura 30. Matriz QFD para selección de generador. [Autores]

De acuerdo con la selección obtenida como resultado de la matriz QFD que no da a conocer el tipo de generador más óptimo para este proyecto, a continuación, se observan las conexiones de las bobinas de este.

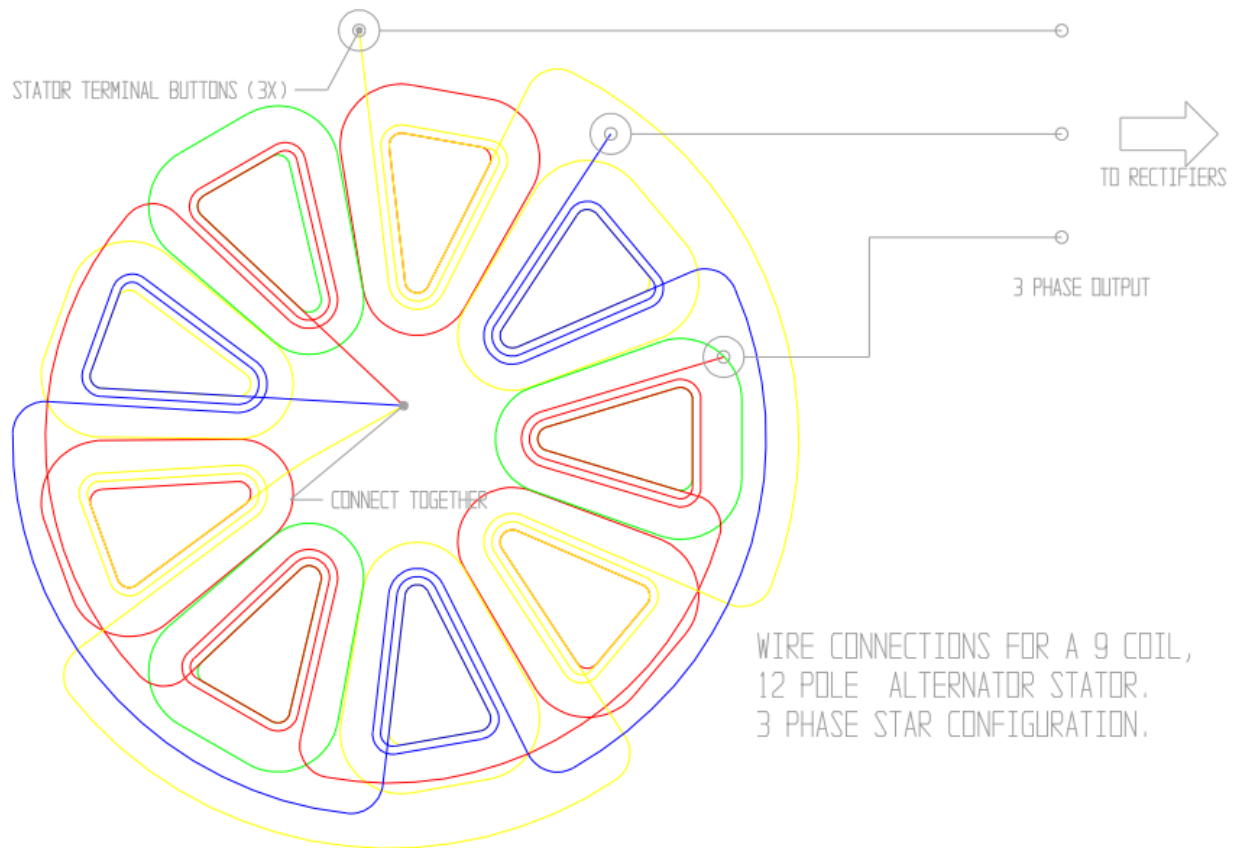


Figura 31. Diagrama de conexión de bobinas. [WindGenKits]

6.3. Acondicionamiento de la onda trifásica generada.

Para la regulación de la onda trifásica generada se tiene en cuenta la carga que se va a alimentar y por lo tanto la corriente que esta va a pedirle al sistema. El circuito de rectificador y regulador se representa en el siguiente esquema:

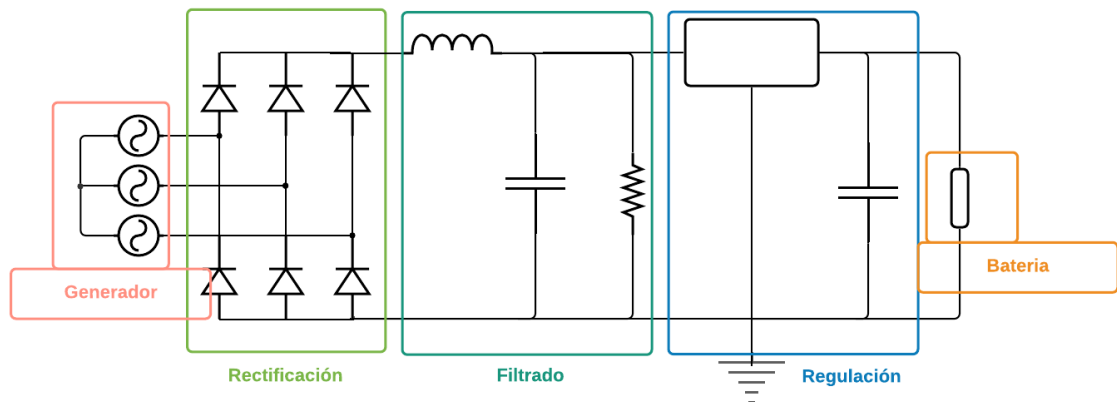


Figura 32. Esquema de una etapa de transformación de corriente AC a DC.
[Autores]

El generador de energía eléctrica se puede utilizar para diferentes fines ya que la energía será almacenada en una batería, sin embargo, este generador se diseñó específicamente para que solvete la necesidad de luminaria en la escuela de la ranchería Majayütpana, para esto se van a utilizar bombillos led de 12 W que pueden ser alimentados a 12 V-DC y se requiere que por lo menos estén encendidos por 5 horas.

El objetivo es alimentar tres bombillas de 40 [W] de 12 V con 600 Wh generados, entonces se considera que entre las tres necesitarán la siguiente cantidad de energía:

$$3 \times 40 [W] = 120 [W]$$

Por lo que será posible tenerlas encendidas durante las siguientes horas:

$$\frac{600 WH}{120W} = 5 \text{ Horas}$$

Entonces la corriente necesaria es de:

$$\frac{120 W}{12 V} = 10 A$$

- Energía generada: 600 Wh
- Carga: 3 Bombillas de 40 W y 12 V
- Tiempo de uso: 5 horas al día

Dado que la corriente requerida es máxima de 10 A se utilizará un puente rectificador de diodos de 15 A.



Figura 33. Puente rectificador de 15 A. [Fuente: Artículo de mercado libre]

Diseño del filtro.

Factor de ondulación para el diseño del filtro

$$\Delta V = 0.5 \text{ [V]}$$

$$\Delta V = \frac{I\Delta T}{C}$$

Donde:

I es la corriente que va a suministrar a la carga.

ΔT Medio periodo de la entrada trifásica

C capacitancia.

Entonces:

$$C = \frac{I\Delta T}{\Delta V} \rightarrow C = \frac{10 \times 0.05}{0.5}$$
$$C = 1000 \text{ [}\mu\text{F]}$$

Por lo que se adquiere el siguiente capacitor comercial de 1000 μF a 50 V electrolítico.



Figura 34. Condensador de 1000 μF . [Fuente: Artículo de mercado libre]

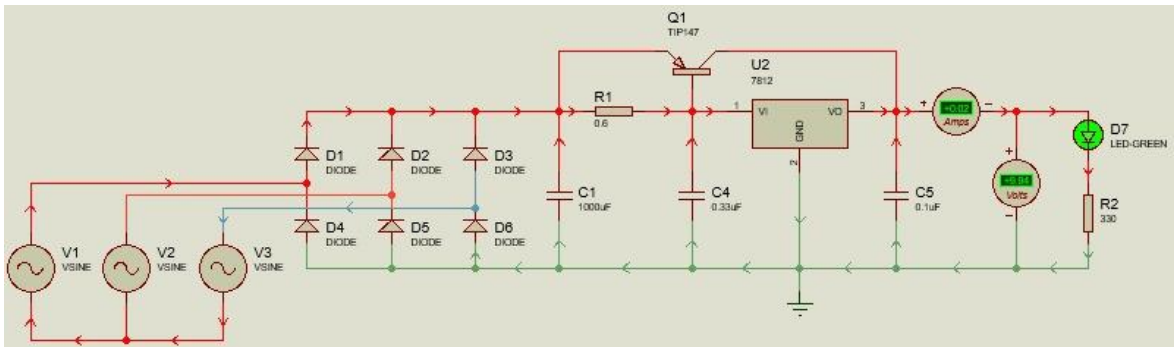


Figura 35. Esquema eléctrico del regulador de tensión diseñado. [Autores]

Los elementos escogidos para construcción del regulador son los siguientes:

- Filtro de la entrada de rectificación.
- Transistor TIP 32, para elevar la corriente
- Resistencia de colector-base del transistor
- Regulador de 12 V
- Filtro de rizado
- Filtro de salida regulada

6.4. Mediciones.

6.4.1. Medición de la velocidad del rotor

La medición de la velocidad del rotor del generador se realizó de manera indirecta utilizando la relación existente entre los platos del mecanismo por lo que la velocidad se midió utilizando el plato sin cadena unido a la biela. Se implemento el módulo sensor de velocidad tipo herradura fc 03.

La relación entre el plato donde se toma la medida de velocidad y el plato unido al eje del rotor es de 1:3,25 por lo que para determinar la velocidad del rotor se realiza la siguiente operación:

$$V_{rotor} = 3.25 * V_{medida} \quad (43)$$

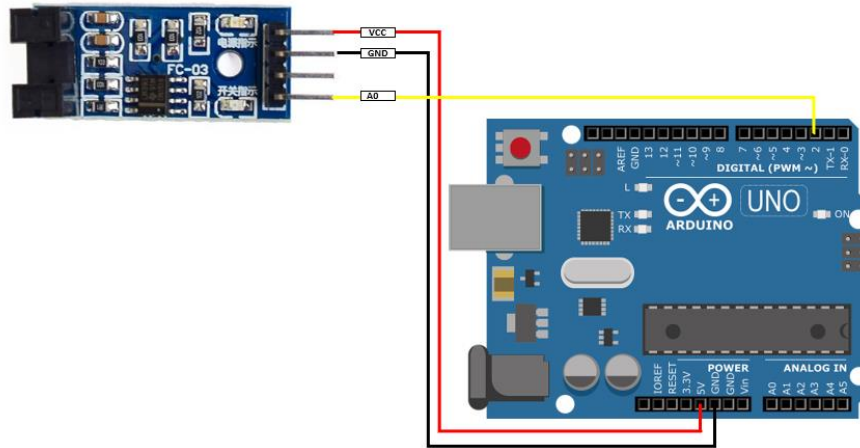


Figura 36. Esquema de conexión de sensor de velocidad FC-03 [Autores]

Para su respectiva implementación se aplicó el siguiente diagrama de flujo, el código en Arduino se encuentra en los anexos:

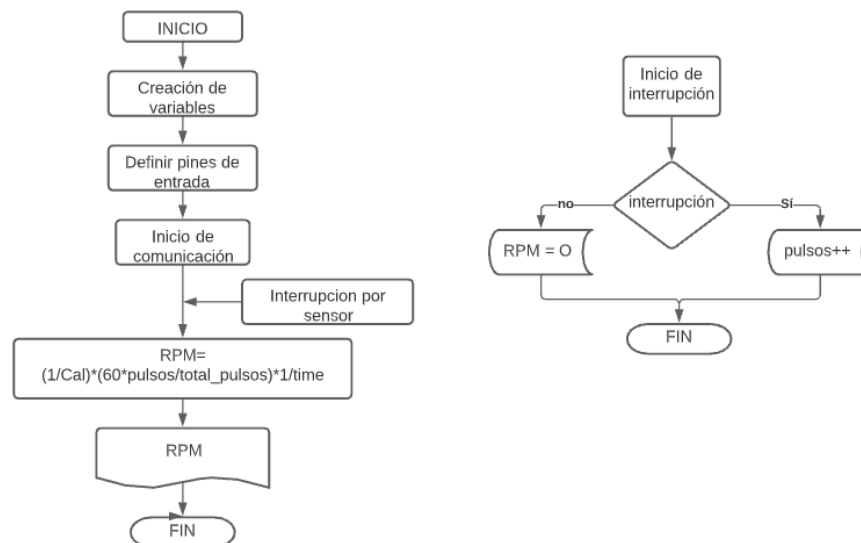


Figura 37. Diagrama de flujo de sensor de velocidad FC-03 [Autores]

6.4.2. Medición de la fuerza mecánica.

Para realizar la medición de la fuerza aplicada en el pedal, se utilizó una celda de carga de 50 Kg, con un módulo amplificador HX711 el cual se implementó como se muestra en el siguiente esquema:

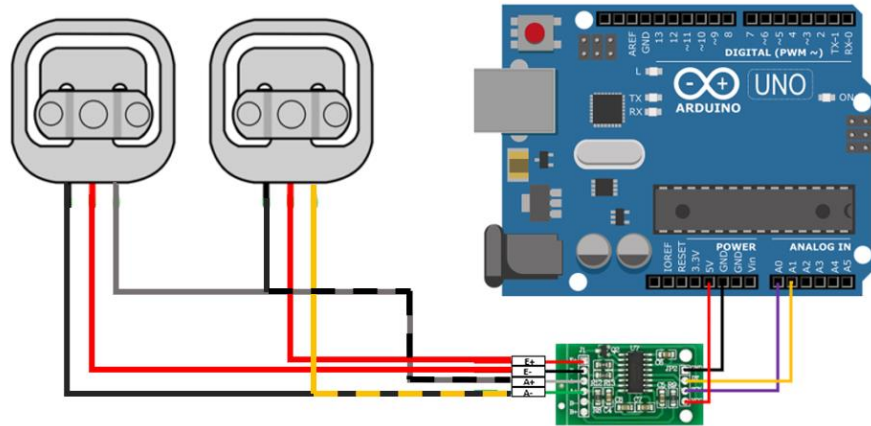


Figura 38. Conexión de celda de carga [Autores]

Para su respectiva implementación se aplicó el siguiente diagrama de flujo, el código en Arduino se encuentra en los anexos:

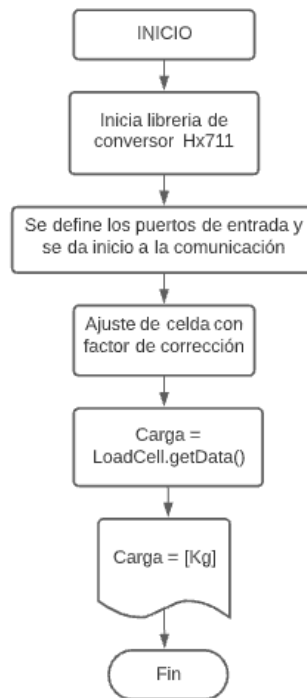


Figura 39. Diagrama de flujo de celda de carga [Autores]

6.5. Construcción

6.5.1. Prototipo



Figura 40. Prototipo ensamblado (mecanismo-generator)
[Autores]

En la figura 40, se observa la bicicleta estática manipulada para este proyecto ya con las modificaciones necesarias, en el tren delantero las barras frontales se separaron 5 cm entre sí, de esta forma se obtiene el espacio suficiente para el generador ya ensamblado.

6.5.2. Mecanismo

Al hablar del mecanismo se hace referencia principalmente al sistema de giro de los discos rotores del generador y su transmisión de potencia proveniente de la cadena, en este caso como se evidencio ya en el diseño del eje, se utiliza uno de 1" de diámetro, este reposa sobre un par de chumaceras "SY" o tipo pedestal, estas reposan sobre almohadillas de antivibración mecánica de neopreno de 5 mm de espesor.



Figura 41. Mecanismo de rotores [Autores]



Figura 42. Mecanismo de rotores completo [Autores]

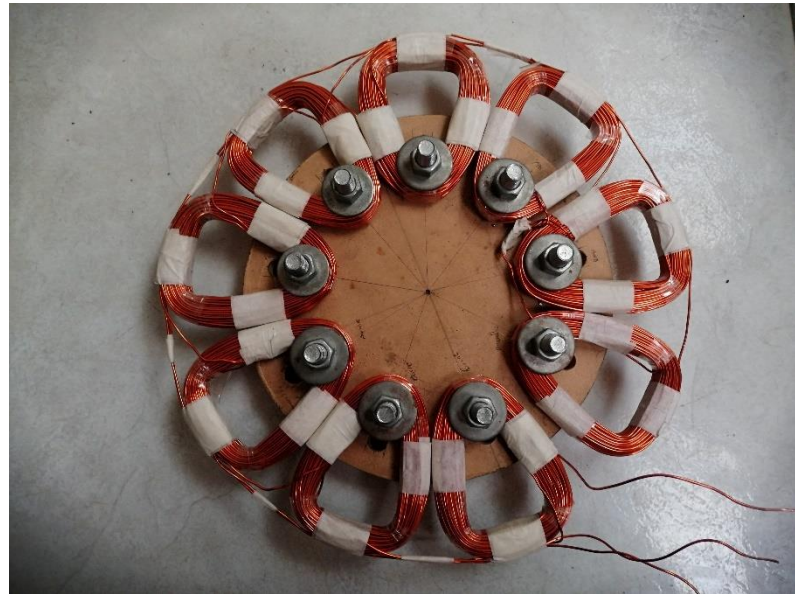


Figura 43. Bobinas conectadas [Autores]



Figura 44. Ensemble rotor-estator [Autores]

6.5.3. Sensores

Los sensores elegidos anteriormente se ubicaron de la siguiente manera:



Figura 45. Sensor de velocidad FC-03 ubicado en bicicleta [Autores]

Como se observa en la figura 46, el sensor de velocidad está ubicado en el plato más pequeño, esto con el fin de aprovechar el movimiento a la par que estos tienen.

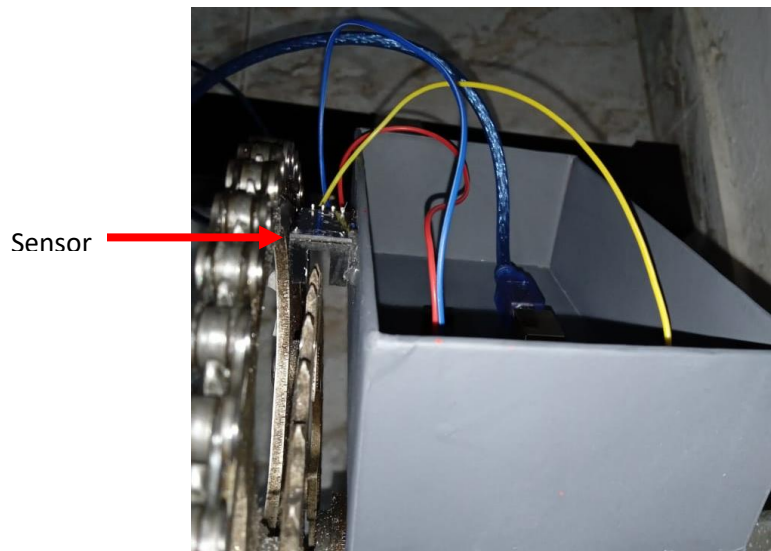


Figura 46. Sensor de velocidad FC-03 ubicado en bicicleta [Autores]

A continuación, se muestra la relación entre el voltaje generado AC y la velocidad del rotor:

Velocidad de pedaleo [RPM]	Velocidad del rotor [RPM]	Voltaje generado [V AC]
30	90	37,61
42	126	56,41
60	180	75,21
70	210	94,02
80	240	102,56
90	270	131,62

Tabla 4. Velocidad vs Voltaje generado. [Autores]

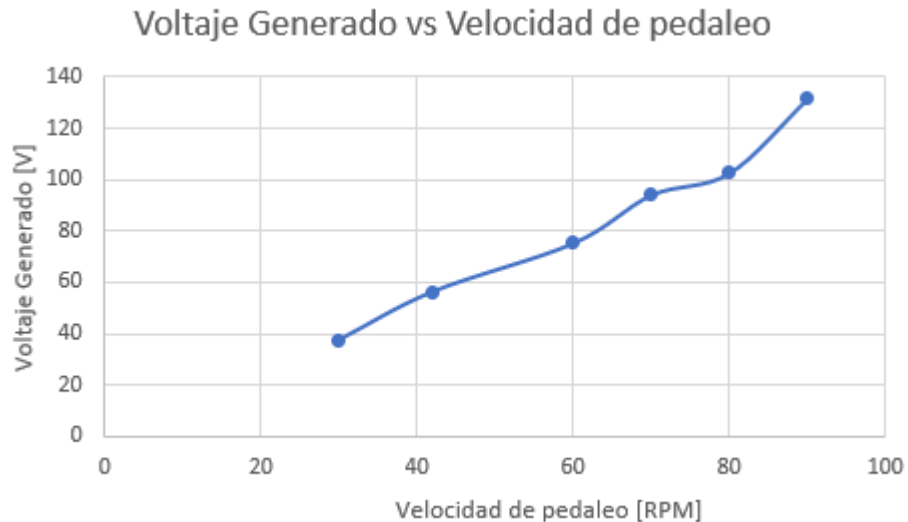


Figura 47. Voltaje generado vs Velocidad de pedaleo [Autores].

Para obtener la fuerza de pedaleo, se optó por ubicar una celda de carga en las punteras del pedal, la medición arroja la fuerza aplicada en kilogramos.

En la figura 48 se puede apreciar la relación entre la fuerza que se aplica al pedal y la velocidad de pedaleo, se puede apreciar que entre mayor sea la velocidad, mayor es la fuerza aplicada al pedal.

Los datos son un promedio de las pruebas realizadas con 3 sujetos.

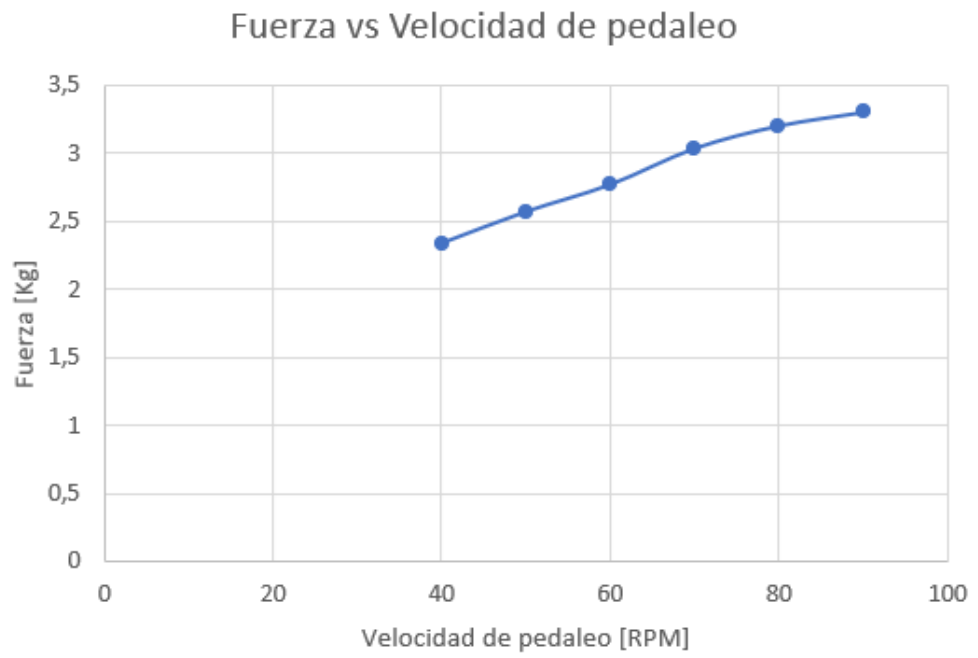


Figura 48. Fuerza vs velocidad de pedaleo. [Autores].

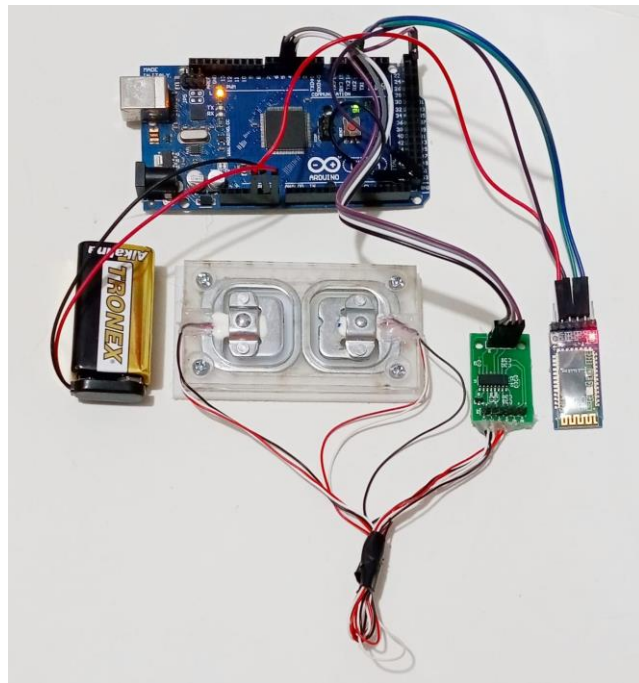


Figura 49. Conexión de la celda de carga. [Autores]



Figura 50. Celda de carga ubicada en puntera [Autores]

Se realizaron las pruebas con tres sujetos, las cuales se registran en las siguientes tablas:

SUJETO A	
VELOCIDAD EN RPM	FUERZA EN KG
40	2,3
50	2,6
60	2,8
70	3
80	3,1
90	3,2

Tabla 5. Velocidad vs Fuerza Sujeto A. [Autores]

SUJETO B	
VELOCIDAD EN RPM	FUERZA EN KG
40	2,5
50	2,6
60	2,9
70	3,1
80	3,3
90	3,5

Tabla 6. Velocidad vs Fuerza Sujeto B. [Autores]

SUJETO C	
VELOCIDAD EN RPM	FUERZA EN KG
40	2,2
50	2,5
60	2,6
70	3
80	3,2
90	3,2

Tabla 7. Velocidad vs Fuerza Sujeto C. [Autores]

Para determinar la fuerza mecánica aplicada se tomo como referencia la fuerza de pedaleo a 80 RPM. Inicialmente se determina el promedio de fuerza a las distintas velocidades:

PROMEDIO	
VELOCIDAD EN RPM	FUERZA EN KG
40	2,3
50	2,6
60	2,8
70	3,0
80	3,2
90	3,3

Tabla 8. Velocidad vs Fuerza promedio.
[Autores]

De la ecuación 6 que describe la potencia, reemplazamos la fuerza a 80 RPM para calcular la potencia mecánica:

$$P = F \cdot v$$

$$F = 3,2 \text{ kg} * 9,81 \text{ m/s}$$

$$F = 331,4 \text{ [N]}$$

$$V = 80 \text{ rpm} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}$$

$$V = 1,33 \text{ [rev/s]}$$

$$P = 331,4 * 1,33$$

$$P = 441,86 \text{ [W]}$$

A 80 rpm se producen 102,56 V utilizando una carga de 100 W en distribución como se muestra en la figura 51, donde

Z_y es la carga

I_a, I_b, I_c y I_N Son las corrientes de línea

V_{an}, V_{bn} y V_{cn} Son los voltajes generados en las 3 3 fases del generador.

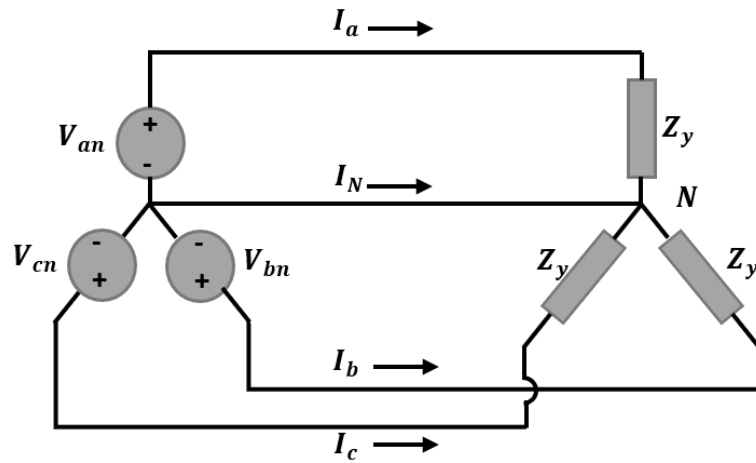


Figura 51. Distribución tipo Y-Y de las cargas [Autores]

La corriente generada son 975 [mA] que luego de realizar la transformación a corriente continua utilizando un controlador de carga se obtiene lo siguiente:

Velocidad de pedaleo [RPM]	Voltaje generado [V]
30	7,2
40	9,3
60	13,8
70	14,9
80	18,5
90	26,1

Tabla 9. Voltaje DC generado [Autores]

7. CONCLUSIONES

Se seleccionó un mecanismo de fácil accionamiento con el cual es posible accionar el rotor del generador y permitiendo al usuario alcanzar velocidades de pedaleo constantes durante el procedimiento para cargar la batería que alimenta los bombillos.

Se diseñó un mecanismo de generación eléctrica de flujo axial ya que permite la generación de energía eléctrica a bajas velocidades.

Teniendo en cuenta que la batería adquirida es de 55 Ah 12 V y 1C, el proceso y la corriente generada es cercana son 975 mA, el proceso de carga de la batería con el generador se tardaría 55 horas por lo cual no sería viable cargar la batería utilizando el generador ya que el tiempo de uso diario se plantea que son 5 horas y toma más tiempo cargarlo.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] H, Calle. (2018). La energía limpia que los excombatientes llevaron a Miravalle. Diario El Espectador. Recuperado de: <https://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/la-energia-limpia-que-los-excombatientes-llevaron-miravalle-articulo-826191>
- [2] H. M. C. Diana María Ocampo Duque y otros, «Cartilla Áreas protegidas de Colombia,» Ocampo duque, 2010. [En línea]. Recuperado de: <http://www.ocampoduque.com/wp-content/uploads/2015/12/Cartilla-areas-protegidas-final.pdf>. [Último acceso: 20 Julio 2019].
- [3] A. D. S. P. E. C. R. C. Marlin A. Aarón, «Caracterización Socioeconómica de la Comunidad Indígena Wayuu de Manzana en Colombia: Un aporte desde la Ingeniería Social,» Scielo, vol. 29, nº 6, 2018. Recuperado de: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642018000600003&lng=en&nrm=iso&tlng=en
- [4] E. O. C, J. E. CANDELO y J. I. SILVA-ORTEGA, «Perspectivas de Comunidades Indígenas de La Guajira Frente al Desarrollo Sostenible y el Abastecimiento energetico,» Revista ESPACIOS, vol. 38, nº 11, p. 25, 2017.
- [5] L. N. C. BARRAZUETA, DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN AEROGENERADOR EOLICO DE EJE VERTICAL TIPO SAVONIUS PARA PRODUCIR 20 WATTS, Quito, 2015.
- [6] M. C. Cherta, Curso moderno de máquinas eléctricas rotativas, Barcelona: Editorial reverté, S.A, 2006.
- [7] P. B. ROSENMAN, DISEÑO DE AEROGENERADORES CON IMANES PERMANENTES PARA APLICACIONES EN ELECTRIFICACIÓN RURAL, Santiago de Chile, 2007.
- [8]. A. A. E. R. Luisa Herrera, «DISEÑO DE UN GENERADOR DE FLUJO AXIAL USANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS,» *revistas.udistrital*, vol. 4, nº 2, 2013.
- [9]. F. Vargas-Machuca, máquinas eléctricas rotatorias, Lima: Magaprint EdicióMS s.a, 1990.
- [10]. J. Z. G. Lorena Arbeloa Sola, «DISEÑO DE UN AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL TIPO SAVONIUS PARA ELECTRIFICACIÓN RURAL», Pamplona: academica-e, 2012

- [11]. J. S. Osorio, S. Gómez, S. Restrepo, «Diseño y construcción de un pedal de bicicleta basado en sensores piezorresistivos para determinar la fuerza resultante», *Revista Ingeniería Biomedica*. Medellín. 2007
- [12]. J. Huirc-n, *Reguladores de Voltaje*, Universidad de La Frontera Departamento de Ingeniería Eléctrica.
- [13]. m. gimenez, *PRINCIPIOS DE REGULACION*, labc.usb.
- [14]. C. R. ZÚÑIGA, *STRATEGIAS DE REGULACIÓN PRIMARIA DE FRECUENCIA EN GENERADORES EÓLICOS*, Santiago de Chile, 2012.
- [15]. H. S. B. GRID LILIANA JIMÉNEZ TOVAR, «FICIENCIA DEL AHORRO ENERGÉTICOY REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTALNEGATIVO DE LA TECNOLOGÍA LED,» *Rev. Ingeniería, Matemáticas y Ciencias de la Información*, vol. 2, nº 3, pp. 51-58, 2015.
- [16]. Marketing Gela, «greenenergy-latinamerica.com,» Greenenergy, 21 agosto 2018. [En línea]. Available: <https://www.greenenergy-latinamerica.com>. [Último acceso: 11 agosto 2019].
- [17]. D. S. C. H. D. E. J. Powell Mlambo, «METHODOLOGIES FOR MECHATRONIC SYSTEMS DESIGN: ATTRIBUTES AND POPULARITY,» *Zimbabwe Journal of Science and Technology*, vol. 12, pp. 123-133, 2017
- [18] J, Muños. J, Londoño. D, Bedoya. «DISEÑO E INSTALACIÓN DE SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA POR MOVIMIENTO CIRCULAR UNIFORME», Pereira, 2016.
- [19] EcoInventos. Con sólo una hora de pedaleo, Free electric puede generar 24 horas de energía para una casa en comunidades sin suministro eléctrico. Publicación Web. (2018). Extraído de: <https://ecoinventos.com/free-electric/>
- [20] Blogthinkbig.com. Convertir el ejercicio físico en energía eléctrica, así funciona Green Gym. Publicación Web. (2015). Extraído de: <https://blogthinkbig.com/convertir-ejercicio-fisico-energia-electrica-asi-funciona-green-gym>
- [21] RENEW GROUP PTE LTD. BICYCLE GENERATOR. (06.05.2016). INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT). Consultado en: <https://patentimages.storage.googleapis.com/e9/18/56/1d8cddf282fb9a/WO2016070003A1.pdf>

[22] Aritz Urdampilleta, Patxi León. Análisis de las capacidades condicionales y niveles de entrenamiento para el rendimiento en el remo de banco fijo EFDeportes, nº 169, 2012

[23] J, Salamanca. DISEÑO DE UNA MÁQUINA ELÍPTICA PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA. (2017). Fundación universidad de américa. Extraído de: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6382/1/4121491-2017-2-IM.pdf>

[24] F, Agudelo. A, García. Sistema de Microgeneración de Energía a través del Ejercicio Humano. (2016). Pontificia Universidad Javeriana. Extraído de: http://vitela.javerianacali.edu.co/bitstream/handle/11522/7503/Sistema_microgeneracion_energia.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[25] Beer, F. Johnston, E. Cornwell, P. Mecánica Vectorial para Ingenieros. 9na Ed. McGrawHill Educación.

[26]. M. F. Podio, Diseño de ergómetro para atletas de alto rendimiento deportivo en silla de ruedas, Córdoba, 2017.

[27]. P. B. Carrasco, Sistema de Generación de Energía Eléctrica a Partir de Bicicletas Estáticas en un Gimnasio y Viabilidad de Apoyo Fotovoltaico, Sevilla, 2015.

[28] Ferdinand P. Beer, Mecánica de materiales, 5ta Ed. McGrawHill Educación.

9. ANEXOS

En el siguiente enlace se encuentra una carpeta en DRIVE con la siguiente información:

- Bitácoras del proyecto.
- CAD del prototipo.
- Construcción (Evidencia)
 - Bicicleta inicial.
 - Generador.
 - Mecanismo.
 - Bicicleta con generador.
 - Sensores.
- Planos del prototipo.
- Sensores (Código en Arduino)

Enlace:

<https://drive.google.com/drive/folders/1ab5WXMHwfULZPbKVHINqcwTuEDJvsboS?usp=sharing>