



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E
INDUSTRIAL**

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES

Tema:

**GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES DE FLUJO
RADIAL PARA UNA PICO CENTRAL HIDROELÉCTRICA EN EL CANAL
DE RIEGO AMBATO – HUACHI – PELILEO**

Trabajo de Titulación Modalidad: Artículo Académico, presentado previo a la
obtención del título de Ingeniera en Electrónica y Comunicaciones

AREA: Física y Electrónica

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Sistemas Electrónicos

AUTOR: Estefania Elizabeth Flores Díaz

TUTOR: Ing. Phd. Carlos Gordón.

Ambato –Ecuador

septiembre 2021

APROBACIÓN DEL TUTOR

En calidad de tutor del Trabajo de Titulación con el tema: GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES DE FLUJO RADIAL PARA UNA PICO CENTRAL HIDROELÉCTRICA EN EL CANAL DE RIEGO AMBATO – HUACHI – PELILEO, desarrollado bajo la modalidad Artículo Académico por la señorita Estefania Elizabeth Flores Díaz, estudiante de la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato, me permito indicar que el estudiante ha sido tutorado durante todo el desarrollo del trabajo hasta su conclusión, de acuerdo a lo dispuesto en el Artículo 15 del Reglamento para obtener el Título de Tercer Nivel, de Grado de la Universidad Técnica de Ambato, y el numeral 7.4 del respectivo instructivo.

Ambato, septiembre 2021.

Ing. Phd. Carlos Gordon

TUTOR

AUTORÍA

El presente Artículo Académico titulado: GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES DE FLUJO RADIAL PARA UNA PICO CENTRAL HIDROELÉCTRICA EN EL CANAL DE RIEGO AMBATO – HUACHI – PELILEO es absolutamente original, auténtico y personal. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, septiembre 2021.



Estefania Elizabeth Flores Diaz

C.C. 0502918220

AUTOR

APROBACIÓN TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de par calificador del Informe Final del Trabajo de Titulación presentado por el señorita Estefania Elizabeth Flores Díaz, estudiante de la Carrera de Ingeniería en electrónica y Comunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, bajo la Modalidad Artículo Académico, titulado GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES DE FLUJO RADIAL PARA UNA PICO CENTRAL HIDROELÉCTRICA EN EL CANAL DE RIEGO AMBATO – HUACHI – PELILEO, nos permitimos informar que el trabajo ha sido revisado y calificado de acuerdo al Artículo 17 del Reglamento para obtener el Título de Tercer Nivel, de Grado de la Universidad Técnica de Ambato, y al numeral 7.6 del respectivo instructivo. Para cuya constancia suscribimos, conjuntamente con la señora Presidenta del Tribunal.

Ambato, septiembre 2021.

Ing. Pilar Urrutia, Mg.

PRESIDENTA DEL TRIBUNAL

Ing. Patricio Córdova

PROFESOR CALIFICADOR

Ing. Alberto Ríos Villacorta, MSc.

PROFESOR CALIFICADOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga uso de este Trabajo de Titulación como un documento disponible para la lectura, consulta y procesos de investigación.

Cedo los derechos de mi Trabajo de Titulación en favor de la Universidad Técnica de Ambato, con fines de difusión pública. Además, autorizo su reproducción total o parcial dentro de las regulaciones de la institución.

Ambato, septiembre 2021.



Estefania Elizabeth Flores Díaz

C.C. 0502918220

AUTOR

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mis padres, David Flores e Isabel Díaz, que han sido los principales pilares en mi formación personal y profesional, a mi hija Anelisse Fonseca, que a pesar de su corta edad ha sabido demostrarme siempre su cariño y amor, y con ello darme la fuerza y el valor para seguir adelante y llegar hasta este momento de mi vida en el que culmino mi carrera profesional. A mis hermanos Irene y Luis, que con sus palabras me apoyaron y no me dejaron decaer.

Estefania Flores Díaz

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi gratitud a Dios, quien con su bendición llena siempre mi vida y a toda mi familia por estar siempre presentes.

De igual manera mis agradecimientos a la Universidad Técnica de Ambato, a toda la Facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial, y en el mismo sentido a la Universidad Tecnológica Indoamérica por su apoyo económico para la publicación de este proyecto, a mis profesores quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que pueda crecer día a día como profesional, gracias a cada uno de ustedes por su paciencia, dedicación, apoyo incondicional y amistad.

Estefania Flores Díaz

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL TUTOR.....	1
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	2
DERECHOS DE AUTOR.....	3
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	3
DEDICATORIA	5
AGRADECIMIENTO.....	6
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS.....	11
ÍNDICE DE TABLAS	13
RESUMEN EJECUTIVO	14
ABSTRACT.....	15
INTRODUCCIÓN	16
CAPITULO I .- MARCO TEÓRICO	18
1.1 Antecedentes Investigativos	18
1.1.1 Contextualización del problema	18
1.1.2 Fundamentación teórica	21
Imanes Permanentes	21
Generadores de Imanes Permanentes (PMG)	22
Generadores de Imanes Permanentes de Flujo Axial	22
Generadores de Imanes Permanentes de Flujo Radial	23
Pico Central Hidroeléctrica	25
Canal de Riego	26
Canal de riego Ambato Huachi Pelileo	26
1.1.3 Diseño del Generador	26
1.1.3.1 Diseño del Rotor	27

Elección de los imanes	27
Pares de polos.....	29
Energía Máxima	30
Velocidad Angular de rotación.....	31
Potencia Máxima.	31
1.1.3.2 Diseño del Estator	32
Número de ranuras.....	32
Total, número de bobinas	32
Número de bobinas por fase	33
Número de bobinas por grupo.....	33
Entrehierro o airgap.....	36
Rotor	37
Diámetro exterior del yugo del rotor	37
Número de vueltas o espiras	37
Coeficiente promedio aritmético:.....	37
Dimensión de la Ranura.....	38
Área de la ranura.....	38
Ancho del diente	38
Apertura de ranura	39
Ancho superior del diente	39
Profundidad y área total de la ranura.....	40
1.1.4 Simulaciones.....	43
1.1.5 Fabricación	46
1.1.6 Caracterización eléctrica del generador.....	50
1.1.7 Implementación de la Interfaz IOT	52
1.2 Objetivos.....	60
1.2.1 Objetivo general.....	60

1.2.2 Objetivos específicos	60
1.3 Descripción de Objetivos	61
CAPÍTULO II .- ARTICULO ACEPTADO PARA PUBLICACIÓN	63
1 Introduction.....	63
2 Related Works.....	64
3 Formulation of the Problem and Methodology.....	64
3.1 Theoretical Study.....	65
4 Design	73
5 Analysis of Results	75
6 Conclusions.....	76
Acknowledgments.....	77
7. References.....	77
CAPÍTULO III .- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	79
3.1 Conclusiones.....	79
3.2 Recomendaciones	80
C. MATERIALES DE REFERENCIA.....	81
ANEXOS.....	84
Pares de polos	85
Energía Máxima	85
Velocidad Angular de rotación	85
Potencia Máxima	85
Número de ranuras	85
Total, número de bobinas	86
Número de bobinas por fase	86
Número de bobinas por grupo	86
Entrehierro o airgap	87
Rotor	88

Diámetro exterior del yugo del rotor	88
Número de vueltas o espiras	88
Apertura de ranura	89
Ancho superior del diente.....	89
Profundidad y área total de la ranura.....	90

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Distribución típica de los imanes permanentes de flujo axial. Obsérvese que la polaridad de los imanes se alterna S-N, N-S en imanes contiguos [11].....	23
Figura 2. Distribución típica de los imanes permanentes de flujo radial. [11].....	24
Figura 3. Flujo Radial vs. Flujo Axial. [13]	25
Figura 4. Canal de riego Ambato - Huachi - Pelileo. [17]	26
Figura 5. Imán de neodimio	29
Figura 6. Diseño del portaimanes.....	30
Figura 7. Emsamble del Rotor al eje	30
Figura 8. Máquina síncrona de polo externo [8].....	34
Figura 9. Dimensiones principales de la ranura. [8]	38
Figura 10. Estator vista superior	41
Figura 11. Estator vista isométrica.....	41
Figura 12. Pantalla de Creación Guide.....	42
Figura 13. Pantalla del Guide Matlab.....	43
Figura 14. Modelado del generador	44
Figura 15. Campo Magnético del Generador	45
Figura 16. Resultados de simulacion voltaje	45
Figura 17. Resultados de simulación corriente.....	46
Figura 18. Imanes de neodimio	46
Figura 19. Rotor.....	47
Figura 20. Pegado de imanes	47
Figura 21. Eje.....	47
Figura 22. Estator.....	48
Figura 23. Ensamble del prototipo	48
Figura 24. Ubicación para la realización de las pruebas.....	49
Figura 25. Prototipo Completo.....	49
Figura 26. Voltaje del prototipo sin carga	50
Figura 27. Voltaje del prototipo con carga	51
Figura 28. Corrientes del prototipo	51
Figura 29. Arduino Uno [17]	53
Figura 30. Raspberry Pi 3 modelo B [18].....	53
Figura 31. Pantalla de Raspberry conectada por VNC	54
Figura 32. Sensor de Voltaje AC ZMPT101B [20].....	54

Figura 33. Sensor ACS712 [21]	55
Figura 34. Circuito de medición de Voltaje y Corriente.....	56
Figura 35. Circuito de medición con raspberrypi	56
Figura 36. Esquema de adquisicon de datos.....	57
Figura 37. Esquema de conexión sensor de corriente con carga.....	57
Figura 38. Visualización de datos obtenidos en la Base de datos	58
Figura 39. Visualización de los datos en la página web	58
Figura 40. Digrama de Bloques de la estructura completa	59
Figura 41. Diagrama físico de la de la estructura completa de una pico central hidroeléctrica	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características Generales	27
Tabla 2. Características de los imanes	28
Tabla 3. cálculo del número de polos a diferentes frecuencias	29
Tabla 4. Velocidad Angular con 6 pares de polos	31
Tabla 5. Parámetros para el diseño	31
Tabla 6. Cálculo Numero de ranuras	32
Tabla 7. Cálculo el número de bobinas	32
Tabla 8. Relaciones l/D , típicas para diferentes máquinas eléctricas [8]	35
Tabla 9. Especificaciones totales para el diseño del generador	43
Tabla 10. Características de hardware libre existente en el mercado local	52
Tabla 11. Características de sensores de corriente.....	55

RESUMEN EJECUTIVO

Se presenta el diseño, construcción y simulación de un generador síncrono de imanes permanentes de flujo radial, el cual se pueda emplear en una central pico hidroeléctrica ubicada en un canal de riego Ambato - Huachi – Pelileo y permita a los usuarios beneficiarse de energía eléctrica en zonas de difícil acceso, en la provincia de Tungurahua en Ecuador.

Una vez realizado el diseño y determinadas sus principales características, se realizó un archivo guide con las principales ecuaciones en Matlab para observar los parámetros más importantes a considerar al momento de la construcción del prototipo.

SolidWorks se utilizó para la elaboración de modelado 3D de cada una de las partes del generador, con la finalidad de crear un prototipo adecuado y finalmente en ANSYS para su análisis electromagnético.

Se ha construido un generador trifásico que consta de 12 polos, funciona a una frecuencia de 60[Hz] su voltaje nominal es de 12[V] por fase el cual deberá ser rectificado e invertido para poder aprovecharlo. La recolección de datos se realizó mediante comunicación serial entre una tarjeta Arduino y una NODEMCU, y de esta forma enviar a una base de datos, que se creó en el sistema operativo Debian que utiliza Raspberry Pi, para la creación de un entorno grafico amigable con el usuario.

Al final se ha realizado la validación del funcionamiento del prototipo comparando los datos medidos de este con los que fueron otorgados por la simulación.

ABSTRACT

The design, construction and simulation of a permanent magnet synchronous generator of radial flow is presented, which can be used in a pico hydroelectric plant located in an Ambato - Huachi - Pelileo irrigation canal and allows users to benefit from electrical energy in areas of difficult access, in the province of Tungurahua in Ecuador.

Once the design was made and its main characteristics were determined, a guide file was made with the main equations in Matlab to observe the most important parameters to consider when building the prototype.

SolidWorks was used for the elaboration of 3D modeling of each one of the parts of the generator, in order to create a suitable prototype and finally in ANSYS for its electromagnetic analysis.

A three-phase generator has been built that consists of 12 poles, it operates at a frequency of 60 [Hz], its nominal voltage is 12 [V] per phase, which must be rectified and inverted in order to take advantage of it. The data collection was carried out through serial communication between an Arduino card and a NODEMCU, and in this way sent to a database, which was created in the Debian operating system that uses Raspberry Pi, for the creation of a friendly graphical environment with the user.

In the end, the validation of the prototype's operation was carried out by comparing the measured data of this with those that were granted by the simulation.

INTRODUCCIÓN

El uso de recursos energéticos no convencionales en los últimos años se ha desarrollado principalmente con la intención de reducir el uso de combustibles [1]. Bajo este concepto, el agua es uno de los recursos utilizados, ya que satisface múltiples necesidades humanas. La conservación y el manejo adecuado de este recurso es importante en el país, ya que las desigualdades sociales y de producción están estrechamente relacionadas con el acceso al agua; Además, el 70% de la energía eléctrica en Ecuador es de origen hidráulico [2]. Las plantas de energía hidroeléctrica Pico son típicamente un sistema hidroeléctrico independiente construido para proporcionar electricidad a las comunidades rurales y se adoptan como energía renovable debido a sus ventajas sobre las grandes plantas hidroeléctricas [3]. Con lo anterior, se dice que estos sistemas son la opción más económica para suministrar energía en áreas rurales aisladas.

En este sistema de generación de energía, depende mucho de la variación del agua, y aquí es donde se utilizan los generadores para mantener su nivel, hay dos tipos de máquinas de imanes permanentes para generadores [4] [5] [6]; máquina síncrona de imán permanente de flujo radial (RF-PMSM) y máquina síncrona de imán permanente de flujo axial (AF-PMSM). Las máquinas de imanes permanentes de flujo radial son máquinas convencionales que han estado en uso durante mucho tiempo. RF-PMSM tiene algunas ventajas de estructura compacta, mayor capacidad de par, mayor eficiencia debido a la ausencia de bobinados del rotor y pérdidas por excitación, mayor densidad de potencia que las máquinas de inducción convencionales [7].

La mayoría de las aplicaciones RF-PMSM se centran en generadores aéreos, ya que la característica principal de este generador es su campo magnético constante, que es generado por sus imanes permanentes ubicados en el rotor.

El objetivo de este proyecto es hacer una contribución para el uso de RF-PMSM en centrales hidroeléctricas de pico, que pueden usarse como fuente de energía en áreas rurales con difícil acceso, logrando así que cada una de las áreas del país tenga acceso a este servicio básico. Por lo tanto, un generador ha sido diseñado para adaptarse a las características de una turbina mini hidráulica tipo michell-

banki, con el fin de proporcionar energía desde el flujo del canal de riego, que nos proporciona un pico de la planta de energía hidroeléctrica. Para llevar a cabo esta investigación, se utiliza ANSYS para el análisis electromagnético y SolidWorld se utiliza para modelar y dimensionar en 3D.

B. CONTENIDOS

CAPITULO I.- MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes Investigativos

1.1.1 Contextualización del problema

Para la elaboración del prototipo propuesto se tomó en cuenta las características mecánicas presentadas en el proyecto de investigación realizado en el año 2019 en la Universidad Técnica de Ambato con el título “Diseño y Construcción de una mini-turbina hidráulica tipo Michell – Banki para ser instalada en canales primarios abiertos y generar energía mecánica.”, dichas características son la principal guía para la realización del generador.

Del proceso de investigación realizada en los repositorios de las diferentes Universidades Nacionales e Internacionales, así como en artículos científicos publicados en diferentes revistas, se ha encontrado proyectos de investigación relacionados con los generadores de imanes permanentes de flujo axial, los cuales se describen a continuación:

En el año 2001, en la Revista Research Gate publicaron un artículo proveniente de Delft, Holanda y denominado “*Axial And Radial-Flux Permanent Magnet Generators For Direct-Drive Wind Turbines.*”, desarrollado por M.R. Dubois; H. Polinder y J. A. Ferreira; en donde se considera la aplicación de máquinas de imanes permanentes como generadores de accionamiento directo para turbinas eólicas. La máquina de imán permanente de flujo axial (AFPM) con ranuras se compara con la máquina de imán permanente de flujo radial (RFPM), para esta aplicación. El modelado del diseño se basa en computadora, utilizando el software de simulación ANSYS, los dos tipos de máquinas están optimizados con respecto a la densidad de flujo magnético, el par, las diferentes pérdidas y el enlace de flujo para las dos máquinas. Finalmente, el costo de las máquinas axiales y radiales se estima en función del consumo de material de las diferentes partes activas. [1]

En el año 2012 en la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial en Zaragoza, realizaron una investigación titulada “*Diseño de un Alternador de Flujo*”

Axial con Imanes Permanentes”, desarrollado por Julio Javier Murillo Julián; en la cual se realizó el diseño de un alternador de flujo axial con imanes permanentes, para aplicación en un generador eólico de tipo Savonius de pequeña potencia, con objeto de trabajar independiente de la red, abasteciendo pequeños consumos. El diseño, se lo realiza en el software de simulación FEMM (Método de elementos finitos magnéticos), está orientado a que la máquina genere electricidad a partir de bajas velocidades de viento, lo cual evita el sistema de transmisión del mecanismo elevador de velocidad, lo que mejora el rendimiento del sistema eólico. [2]

En el año 2016, en la Revista IEEE, publicaron un artículo de la Universidad de Túnez, Túnez, denominado *“3D Finite Element Modelling and Comparative Performance Analysis Between Axial and Radial Flux Machines for Micro Wind Turbine Application”*, desarrollado por Oussama Bouaziz; Imen Jaafar y Faouzi Ben Ammar; el cual se basa en un modelado de elementos finitos en 3D utilizando el programa ANSYS Multiphysics. El análisis de elementos finitos se aplicó para las configuraciones de las dos máquinas con el fin de evaluar sus rendimientos, comparar su eficiencia con respecto al consumo de material de las partes activas y eventualmente predecir su costo. Los resultados obtenidos promueven la topología de flujo axial como la mejor solución para la aplicación de micro turbinas eólicas. [3]

En el año 2016, en la Revista International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), publicaron un artículo elaborado en Teherán, Irán el cual esta denominado *“Design of a Radial Flux Permanent Magnet Wind Generator with Low Coercive Force Magnets”*, desarrollado por Jawad Faiz; Zahra Valipour; M. Shokri-Kojouri y M. Azeem Khan, donde se presenta el procedimiento de diseño de un generador síncrono de imán permanente de flujo radial trifásico (PMSG) para una aplicación de turbina eólica. Este generador está diseñado para el acoplamiento directo a una turbina eólica. Se presenta el diseño de un rotor alternativo que tiene como objetivo lograr una operación de intensificación de flujo. Además, el número óptimo de ranura / polo / fase se determina para la reducción del par de engranaje y la mejora del rendimiento del generador. Finalmente, la precisión del enfoque de diseño analítico del PMSG se valida mediante cálculos detallados de elementos finitos. [4]

En el año 2017, en la revista ELSEVIER, se publicó una investigación proveniente de Bhopal, India, denominada “*Design, modeling and simulation of variable speed Axial Flux Permanent Magnet Wind Generator*”, desarrollado por Sriram S. Laxminarayan; Manik Singh; Abid H. Saifee y Arvind Mittal; el proyecto consiste en el diseño de un generador de imanes permanentes de flujo axial muy adecuado para aplicaciones de viento de velocidad variable. El modelo completo del sistema se implementa en la plataforma MATLAB / Simulink y se realizan simulaciones para diversas condiciones de viento. Se ha presentado y discutido la respuesta del generador tanto para la entrada de viento constante como para el patrón de viento variable. El funcionamiento del controlador de pitch también se verifica para condiciones de alta velocidad del viento. [5]

También en el año 2018, en la Revista IEEE, publicaron la investigación realizada en el Estado Libre de Bloemfontein, Sudáfrica, titulada “*Voltage and Frequency Control of Isolated Pico-hydro System*”, desarrollado por B.A Mhlambi, K. Kusakana y J. Raath; en el cual se revisa las diferentes tecnologías de control de voltaje y frecuencia en el sistema Pico-hydro. Además, también se revisa el uso de un inversor fotovoltaico en Pico-hydro y la tecnología de seguimiento del punto de máxima potencia para extraer energía de los paneles fotovoltaicos. [6]

En el año 2018, en la Revista Ingenius de la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador, publicaron un artículo denominado “*Caracterización de un generador de flujo axial para aplicaciones en energía eólica*”, desarrollado por Mauricio Carrillo-Rosero; Cristian Claudio-Medina y Alex Mayorga-Pardo, cuyo objetivo fue desarrollar dos tipos de generadores de flujo axial; uno con bobinas en serie y otro con bobinas en paralelo, con la intención de valorar el rendimiento de cada uno. El diseño parte de la determinación del flujo magnético, el número de revoluciones, número de polos, número de bobinas, voltaje de salida y pérdidas eléctricas, para luego realizar el contraste a través de la toma de datos de amperaje y voltaje con respecto al cálculo teórico; la finalidad es establecer la eficiencia que presentan cada una de las configuraciones. Se estableció que el generador en serie posee características que lo convierten en una configuración que tiene una eficiencia mayor que la del generador en paralelo. [7]

1.1.2 Fundamentación teórica

Imanes Permanentes

Los imanes permanentes, naturales o artificiales, son aleaciones muy diversas. Atraen, con fuerza variable, las materias magnéticas. Poseen, pues en sí mismos una reserva de fuerza que permite asimilarles a verdaderos generadores de energía. La energía es magnética en este caso, pero puede transformarse fácilmente en otra forma, mecánica o eléctrica. [8]

La energía mecánica se manifiesta bajo la forma de fuerza portante o de atracción a distancia, según que las materias atraídas sean abrazadas por el imán o separadas de éste por un entrehierro (capa de aire o de materia no magnética). Mientras que la energía eléctrica se manifiesta, por la aparición de una f.e.m. en los bornes de un arrollamiento colocado a la proximidad de un campo magnético variable creado por un imán. El campo varía imprimiendo un movimiento giratorio u oscilatorio al imán o a la bobina. [8]

A partir del material con el que están hechos podemos definir los tipos de imanes permanentes:

Imanes de Neodimio: son los imanes más potentes del mundo. Forman parte del grupo de tierras raras y representan la última generación de los materiales magnéticos. La fuerza de sujeción con la que cuenta es tan potente que permite su uso en espacios reducidos. Son de alta resistencia. [9]

Imanes de Ferrita: también llamados imanes de cerámica. Tienen un alto nivel de dureza, lo que los hace más propensos a la alteración por golpes. Son la solución magnética más económica. Tienen buenas propiedades de mecanizado que les permiten ser cortados en diferentes formas y tamaños. [9]

Imanes de Samario: forman parte del grupo de tierras raras. Son muy versátiles, destacan entre sus propiedades: la flexibilidad, la funcionalidad y la precisión, lo que permite darle usos casi ilimitados. [9]

Imanes de Alnico: fueron los imanes permanentes más fuertes que existieron hasta la introducción de los imanes de tierras raras, todavía se usan comúnmente en varias industrias para trabajos específicos. Tienen una larga duración, una excelente

estabilidad de temperatura, alta inducción residual y energías relativamente altas, esto, debido a su composición. [9]

Generadores de Imanes Permanentes (PMG)

Un generador de imanes permanentes es un generador síncrono en el que se ha sustituido el bobinado de excitación, normalmente en el rotor, por un sistema formado por imanes permanentes que suministran un campo de excitación constante. La principal ventaja es su simplicidad. La fabricación y montaje del rotor es más barata si se usan imanes. No necesitan mantenimiento ya que no llevan escobillas. Además, la consistencia mecánica de un PMG es muy superior, aparte de no necesitar sistemas para su excitación. Al eliminar la excitación se puede llegar a ahorrar un 20% de energía simplemente por usar imanes. Al ser una fuente de energía independiente del generador, puede servir para suministrar energía a sistemas auxiliares del generador principal. [10]

La Fem inducida en una espira cuadrada generada por imanes móviles tiene una fila de imanes que se mueve con velocidad “lineal” frente a un grupo de espiras. Dicha situación no es la que se da en los generadores eléctricos, sino que los imanes se mueven con velocidad “circular”. Según sea el eje de giro, los generadores son de dos tipos, y sus definiciones generales son las siguientes. [11]

- *Generadores de flujo axial:* el eje de giro es paralelo al campo magnético de los imanes
- *Generadores de flujo radial:* el eje de giro es perpendicular al campo magnético de los imanes

Generadores de Imanes Permanentes de Flujo Axial

En los generadores *de flujo axial*, los imanes se disponen sobre un disco de hierro que gira alrededor de un eje perpendicular que pasa por su centro como se lo puede ver en la Figura 1. Así pues, el campo magnético de los imanes es paralelo al eje de giro, y de ahí la frase “flujo axial” que realmente significa campo magnético paralelo al eje de giro. [11]

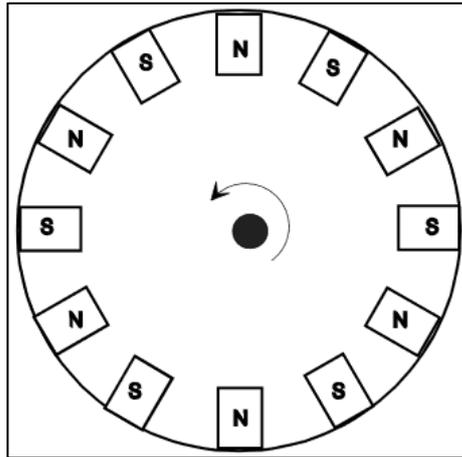


Figura 1. Distribución típica de los imanes permanentes de flujo axial. Obsérvese que la polaridad de los imanes se alterna S-N, N-S en imanes contiguos [11]

Son máquinas eléctricas que permiten obtener señales de voltaje trifásicas o monofásicas de forma sinusoidal así como señales de voltaje DC. Se compone por un sistema de imanes permanentes que establecen un campo magnético constante B y un sistema de devanados sobre los que se produce un flujo magnético variable en el tiempo $\Phi(t)$. Este flujo varía en función del tiempo gracias al movimiento relativo que se produce entre las bobinas y los imanes permanentes cuando el rotor gira. [12]

Son usados para generación de energía eléctrica en turbinas eólicas y otros dispositivos de generación que tienen baja velocidad de rotación. Además, permiten modificar la frecuencia de la señal de tensión, aumentando o disminuyendo el número de polos magnéticos del sistema, razón por la cual no se requiere de altas velocidades de rotación para lograr frecuencias elevadas en la señal de tensión. Esta característica lo hace ideal para su uso en turbinas eólicas de eje vertical, que no alcanzan velocidades de rotación elevadas, pero si pueden tener un par de rotación alto. [12]

Generadores de Imanes Permanentes de Flujo Radial

En los generadores de *flujo radial*, los imanes se colocan sobre la superficie lateral de un cilindro que gira alrededor de su propio eje esto se lo puede observar de una mejor manera en la Figura 2. En este caso el campo magnético de los imanes es perpendicular al eje de giro, y por tanto va en dirección radial, y de ahí la frase

“flujo radial” que realmente significa campo magnético en dirección radial o perpendicular al eje de giro. [11]

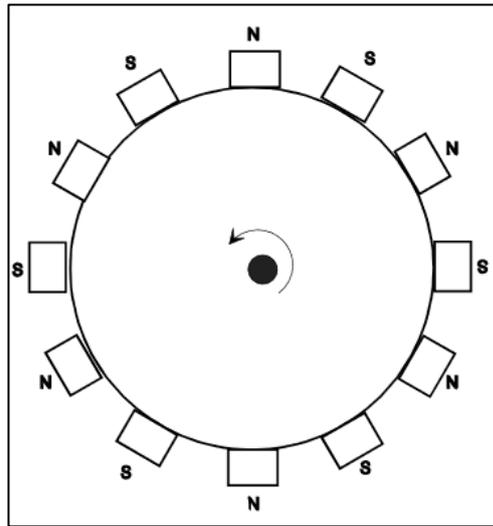


Figura 2. Distribución típica de los imanes permanentes de flujo radial. [11]

Este generador utiliza corriente alterna para funcionar, haciendo necesario entonces que la corriente continua que proviene de las baterías pase por un inversor para convertirse en alterna antes de llegar al motor. Yendo al estator, este se compone de tres bobinados conectados en estrella, mientras que el rotor consta de imanes permanentes que crean un flujo constante, sin necesidad de bobinados o escobillas. [13]

Para que se produzca el movimiento en este generador, el estator debe energizarse mediante un accionamiento de velocidad variable, capaz de modificar la magnitud y la polaridad de la corriente cada bobina, tarea que está a cargo del inversor. Y para ello el sistema necesita conocer exactamente la posición del rotor, motivo por el que deben contar con sensores de posición. [13]

El motivo por el cual se lo considera sincrónico se debe a que la velocidad de giro del campo magnético en el estator es la misma que la del rotor que está magnetizado. Además, el flujo magnético es del tipo radial. Un detalle interesante es que para la fabricación de los imanes permanentes de los rotores se suelen emplear aleaciones de tierras raras, que producen un mayor campo magnético que las aleaciones convencionales. Respecto de su utilización, al tener un rotor con imanes permanentes que generan su propio campo, son más eficientes y no

requieren energía extra para la generación del mismo. En contrapartida, son más caros por los materiales exóticos necesarios para el rotor. [13]

A continuación, se puede ver en la Figura 3 una comparativa entre los generadores de flujo axial y flujo radial.

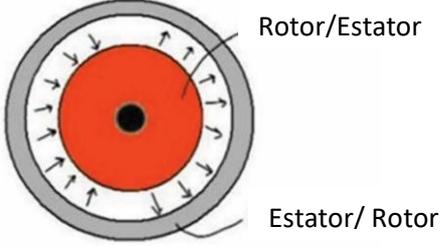
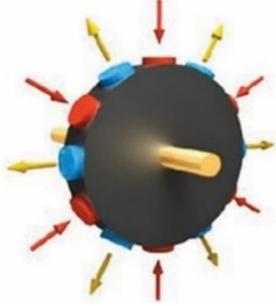
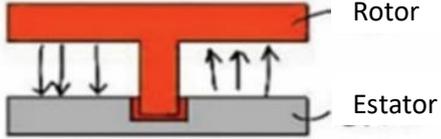
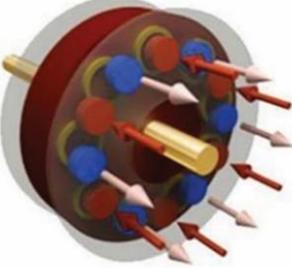
Flujo Radial	Flujo Axial
El flujo se produce radialmente a lo largo de los lados del rotor.	El flujo se produce axialmente a lo largo del eje del rotor.
 	 

Figura 3. Flujo Radial vs. Flujo Axial. [13]

Pico Central Hidroeléctrica

Pico hidro refiere a instalaciones hidroeléctricas con niveles de generación eléctrica menores de cinco kilovatios. Sistemas hidroeléctricos de este tamaño gozan de ventajas en términos de costos y simplicidad, comparados con sistemas hidroeléctricos de mayores capacidades, debido a distintos procedimientos que se aplican en los pasos de diseño, planificación e instalación del pico-sistema. Recientes innovaciones en la tecnología pico hidro han hechos que se convierta en una tecnología energética económicamente viable aún en partes del mundo muy pobres e inaccesibles. Además, es una fuente de potencia versátil. Puede generar electricidad CA (corriente alterna) permitiendo el funcionamiento de equipos eléctricos estándares, y la distribución de la electricidad a toda una comunidad. [14]

Canal de Riego

Consiste en conducir el agua desde la presa hasta el campo donde será aplicado a los cultivos. Son obras que deben ser cuidadosamente pensadas para no provocar daños al medio ambiente y para que se gaste la menos cantidad de agua. Están estrechamente vinculadas a las características de la zona donde se crea, por lo general siguen aproximadamente las curvas de nivel de la zona donde se creó, descendiendo suavemente hacia costas más bajas. [15]

Canal de riego Ambato Huachi Pelileo

El canal Huachi - Pelileo cuenta con 27 km, pertenecientes a los cantones Ambato, Cevallos y Pelileo. El canal Ambato – Huachi - Pelileo, cuyas aguas brindan el servicio de riego el cual abastece a los cantones de Ambato, Cevallos y Pelileo. Este canal en el tramo comprendido entre el óvalo 10 y 13, tiene una longitud de 2.7km, con una pendiente de 0.0017 la velocidad y el caudal 0.85m/s y 1.20m³/s respectivamente, lo que nos da un valor de número de Froude de 0.29 que corresponde a un estado de flujo subcrítico. El canal de riego Ambato – Huachi – Pelileo se lo puede observar en la Figura 4. [17]



Figura 4. Canal de riego Ambato - Huachi - Pelileo. [17]

1.1.3 Diseño del Generador

Para el desarrollo del diseño propuesto se tomaron las características mecánicas presentadas en el proyecto de investigación realizado en 2019 en la Universidad Técnica de Ambato con el título “Diseño y Construcción de una mini turbina hidráulica Michell-Banki para ser instalada en canales primarios abiertos. en cuenta. generan

energía mecánica.”, Estas características son la principal guía para la fabricación del generador. Los que se presentan a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Características Generales

Parámetros	Mediciones
Dimensiones	916,5x796,9x237 mm
Peso	33,35 Kg
Revoluciones	110 rpm
Torque	26 Nm
Potencia	22,88 W

Elaborada por el autor

Para el estudio teórico, el análisis se ha realizado considerando el libro Diseño de Máquinas Eléctricas Rotativas [8] que se detalla a continuación.

1.1.3.1 Diseño del Rotor

Elección de los imanes

Un imán permanente se define como un material que puede ser imantado y que es capaz de generar un campo magnético persistente, a diferencia de los imanes temporales que generan un campo magnético sólo mientras está activa la fuerza o energía externa que lo genera.

Los imanes permanentes pueden clasificarse en dos tipos, los naturales, como la magnetita, y en artificiales. Los imanes permanentes artificiales se fabrican con materiales ferromagnéticos duros, que son aquellos materiales ferromagnéticos que, tras ser imantados, tienden a mantener las propiedades magnéticas hasta que no son desmagnetizados, fenómeno que se produce cuando es aplicado un campo magnético contrario a la inicial.

Una de las características principales para la elección del juego de imanes, es que posea una elevada remanencia, mientras mayor sea ésta, mayor será el flujo magnético que pueda crear el imán con elevada coercitividad, mientras mayor sea, más difícil será que éste se desmagnetice.

Existen varios tipos de materiales de imanes permanentes como la ferrita, de bajo precio y baja energía, o los imanes de las tierras raras, de alto costo y alta energía.

Los imanes de tierras raras, es un poderoso imán, por tal motivo se utilizarán para esta aplicación, a pesar de su tamaño reducido, éstos cuentan con una potencia que puede llegar a ser varias veces superior a la de otros imanes en algunos casos.

Las tierras raras son unos elementos pertenecientes a la tabla periódica, las aleaciones de estos elementos son las que producen los imanes permanentes de las tierras raras.

Según el material químico que los componga, estos imanes se suelen dividir en:

Imanes de neodimio (Nd-Fe-B), estos están compuestos por boro, hierro y neodimio, de allí sus rasgos metálicos. Se caracterizan por oxidarse con extrema facilidad por lo que son recubiertos con una capa de barniz, zinc o níquel.

Imanes de samario cobalto (Sm-Co), a diferencia de los anteriores, estos no se oxidan con tanta facilidad. Es un buen material para aplicaciones que requieren elevado rendimiento en ambientes de trabajo con altas temperaturas, tiene excelentes características térmicas. [16]

A continuación, se analizará el grado de magnetización de los imanes de neodimio para la elección del grado adecuado, en el diseño del generador, podemos observar la Tabla donde se muestran los grados de magnetización.

Tabla 2. Características de los imanes

Calidad	Remanencia		Coercitividad				Producto Energético		Temperatura máxima de empleo
	Br		bHc		iHc		(BxH)max		
	kG	T	kOe	kA/m	kOe	kA/m	MGOe	kJ/m3	
N48	13.8-14.2	1.38-1.42	10.5	836	≥ 12	≥ 955	46-49	366-390	≤ 80
N50	14.0-14.5	1.40-1.45	10.0	796	≥ 10	≥ 876	48-51	382-406	≤ 60
N52	14.3-14.8	1.43-1.48	10.0	796	≥ 10	≥ 876	50-53	398-422	≤ 60

Elaborado por el autor

Bajo estas características el imán que se ha seleccionado es el N52 por su grado de magnetización fuerte, en las dimensiones que se ha obtenido son 100x20x6 [mm] como se observa en la Figura 5.

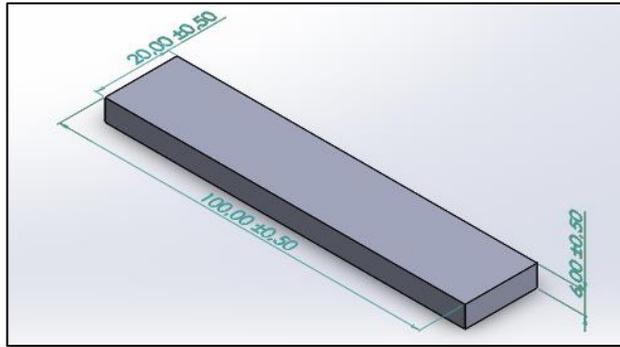


Figura 5. Imán de neodimio

Elaborado por el autor

Pares de polos

El número de pares de polos viene determinado por la frecuencia y la velocidad de rotación del rotor en rpm, como se observa en la ecuación (1).

$$p = \frac{60 \cdot f}{n} \quad (1)$$

Donde:

n = velocidad en rpm

p = número de pares de polos.

Los pares de polo se han calculado de acuerdo a la frecuencia y velocidad de rotación del rotor, a continuación, se muestra la tabla de cálculos a diferentes frecuencias.

Tabla 3. cálculo del número de polos a diferentes frecuencias

n (rpm)	f (Hz)	p	polos
600	60	6	12
600	45	4,5	9
600	30	3	6
600	15	1,5	3

Elaborado por el autor

La frecuencia que se ha seleccionado para la creación del generador es de 60 Hz, ya que es la frecuencia a la que se encuentra la red eléctrica de nuestro país. Los polos se colocan alrededor de un rotor el cual gira para crear una inducción magnética al bobinado del estator.

El rotor se ha diseñado como un dodecágono, para que los imanes se puedan ubicar de mejor manera en el rotor ya que los mismo son rectangulares y tienen así una mayor fijación como lo muestra la Figura 5, dentro del rotor se encuentran ocho círculos de 12 [mm] de radio los cuales permiten disminuir el peso del rotor, para que pueda girar con mayor eficiencia.

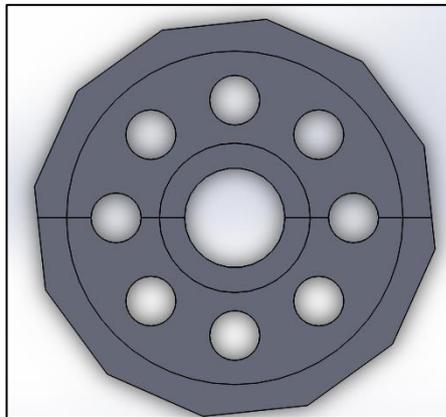


Figura 6. *Diseño del portaimanes*

Elaborado por el autor

Una vez ubicados los imanes en el rotor se procede a montar el rotor en conjunto con los imanes en el eje como se muestra en la Figura 6.

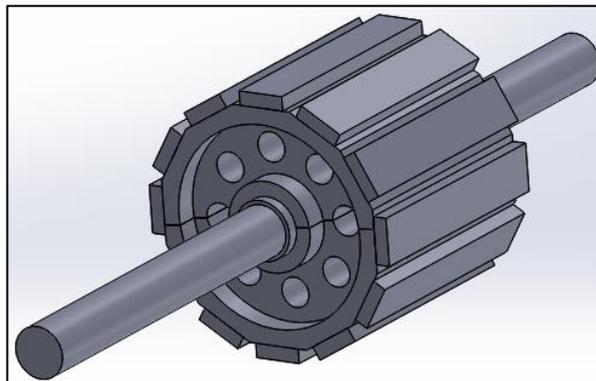


Figura 7. *Emsamble del Rotor al eje*

Elaborado por el autor

Energía Máxima.

La energía máxima está determinada por las características magnéticas del imán permanente, y viene dada por medio de la siguiente ecuación:

$$E_M = \frac{(B-H)_{\max} * V * n_{PMGS}}{2} \quad (2)$$

Donde:

$(B - H)_{\max}$: Producto energético máximo $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}\right)$, este viene determinado por las características del imán en este caso será un imán de neodimio de grado N52.

n_{PMGS} : velocidad de giro del generador (rpm)

V: volumen del imán. (m^3)

Velocidad Angular de rotación.

La velocidad angular de rotación viene determinada por la frecuencia de la corriente alterna y el número de pares de polos.

$$\omega_{\text{PMGS}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} \quad (3)$$

Donde:

p = número de pares de polos.

La velocidad Angular para este caso con los valores obtenidos anteriormente, se tiene lo presentado en la Tabla 3.

Tabla 4. Velocidad Angular con 6 pares de polos

p	f (Hz)	Wn (rad/s)
6	60	62,83185307

Elaborado por el autor

Potencia Máxima.

Con los valores obtenidos anteriormente, la potencia eléctrica por los imanes a una velocidad de 600 rpm es:

$$P = E_M * \omega_{\text{PMGS}} \quad (4)$$

El diseño del generador de imanes permanentes de neodimio se delimito con los parámetros que se aprecian en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros para el diseño

Parámetros Iniciales	
Potencia (W)	2 KW

Velocidad de giro (rpm)	600 rpm
Frecuencia eléctrica (Hz)	60 Hz
Voltaje de fase (V)	110 V

Elaborado por el autor

1.1.3.2 Diseño del Estator

Número de ranuras.

Para el cálculo del número de ranuras se tiene la siguiente ecuación:

$$Q_s = 2 * p * q_s * q \quad (5)$$

Donde:

p = número de pares de polos.

q= número de fases

q_s= número de ranuras por polo y fase

Tabla 6. Cálculo Numero de ranuras

P	qs	q	Qs
6	1	3	36

Elaborado por el autor

Entonces el número de ranuras que debe poseer son 36.

Total, número de bobinas

$$G = p * q \quad (6)$$

Donde:

p = número de pares de polos.

q= número de fases

Tabla 7. Cálculo el número de bobinas

p	q	G
6	3	18

Elaborado por el autor

Es decir, en esta ocasión se tiene 18 bobinas que será parte del devanado del estator.

Número de bobinas por fase

$$G_f = p \quad (7)$$

Donde:

p = número de pares de polos.

G_f = número de bobinas por fase

El número de bobinas por fase es igual al número de polos que posee el generador para este caso serán 6 bobinas por fase.

$$G_f = 6$$

Número de bobinas por grupo.

Este número nos dan cuantas de bobinas estarán dentro de las ranuras.

$$U = \frac{Q_s}{2 * p * q} \quad (8)$$

Donde:

U = número de bobinas por grupo.

Q_s = número de ranuras

p = número de pares de polos.

q = número de fases

$$U = 1$$

El espacio entre bobinas conectadas viene dado por:

$$m = (q - 1) * U \quad (9)$$

Donde:

U = número de bobinas por grupo.

m = amplitud o paso de bobina

$$m = 2$$

Una vez obtenido los parámetros principales se procede a él cálculo de dimensionamiento de rotor, estator y airgap o entrehierro los cuales nos servirán para

un diseño optimo, en este caso se tendrán que tomar en cuenta varios parámetros libres los cuales se puede resolver con tablas y graficas de investigaciones previas.

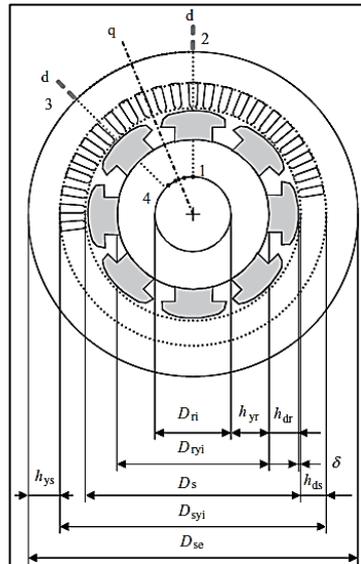


Figura 8. Máquina síncrona de polo externo [8]

Las fórmulas para la obtención de cada uno de estos cálculos son las siguientes:

Para el cálculo del diámetro interno del núcleo del estator se basa en el concepto de estrés torsional del rotor, donde se presentan parámetros como constante mecánica, y potencia nominal.

$$D_{si} = \sqrt[3]{\frac{P_{nom}}{x \cdot C_{mec} \cdot n_{syn}}} \quad (10)$$

Donde:

D_{si}: Diámetro interno del núcleo del estator (mm).

P_{nom}: Potencia nominal de diseño (kW).

x: Relación entre la longitud equivalente de la máquina y el diámetro del entre hierro.

C_{mec}: Coeficiente de potencia de salida o constante mecánica para generadores síncronos y asíncronos (kW/m³).

n_{syn}: Relación síncrona (s-1).

Para cada uno de los parámetros que se han pedido para lo obtención del diámetro interno del rotor se obtiene mediante las siguientes formulas:

La relación síncrona mediante:

$$n_{\text{syn}} = \frac{f}{p} \quad (11)$$

Para obtener la relación longitud equivalente y diámetro del entrehierro, en máquinas estándar se aplica lo siguiente:

$$x = \frac{l'}{D} \quad (12)$$

Donde:

l' : Longitud axial equivalente del estator (mm).

D : Diámetro del entrehierro o air-gap (mm)

El diámetro del air-gap D , es equivalente diámetro interno del estator, $D \approx Dsi$.

En el proceso investigativo se obtuvo la siguiente tabla que es la relación de x :

Tabla 8. Relaciones l'/D , típicas para diferentes máquinas eléctricas [8]

Máquinas Asíncronas	Máquinas Síncronas $p > 1$	Máquinas Síncronas $p = 1$	Máquinas DC
$x \approx \frac{\pi}{2 * p} \sqrt[3]{p}$	$x \approx \frac{\pi}{4 * p} \sqrt{p}$	$x = 1 - 3$	$x \approx \frac{0,8 - 1,6}{p}$

Teniendo en cuenta estas relaciones nos compete la segunda opción.

En la obtención de la constante mecánica tenemos lo detallado a continuación:

$$C_{\text{mec}} = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} K_w A \hat{B}_\delta \quad (13)$$

Donde:

K_w : Factor de bobinado.

A : Densidad de corriente lineal (kA/m)

\hat{B}_δ : Densidad de flujo del air-gap por polo (T)

Para lo cual el valor de la densidad de corriente lineal y la densidad del flujo se obtiene mediante software, por lo que el espacio en el entrehierro debe ser mínimo.

Y sin invalidar ninguno de estos parámetros se obtiene que el diámetro interno del estator es $D_{si} = 0,140m = 140mm$.

Una vez obtenido en diámetro y relación x , se logra calcular la longitud equivalente $l' = 45mm$

Entrehierro o airgap.

Un espacio de aire técnicamente debe de ser lo más pequeño posible, se puede determinar de la siguiente manera.

$$\delta = \gamma \tau_p \frac{A}{B_{\delta}} \quad (14)$$

Donde:

δ : Espacio de aire o entrehierro (mm).

γ : Coeficiente para la definición del espacio de aire

τ_p : Paso de polo (mm)

El coeficiente de definición del espacio de aire es $\gamma = 7 \times 10^{-7}$ para generadores de polos salientes. El paso polar viene dado por:

$$\tau_p = \frac{\pi D}{2p} \quad (15)$$

En la ecuación 15, el paso polar se determina con el diámetro interno del estator.

$$\tau_p = 36,652 \text{ mm}$$

Entonces el espacio máximo del entre hierro es:

$$\delta = 1,2 \text{ mm}$$

Diámetro externo del núcleo estator

$$D_{se} = \frac{D_{si}}{0,63} \quad (16)$$

En este caso el valor de 0,63 es la relación entre el radio externo del rotor y el radio externo del estator.

Rotor

$$D_{re} = D_{si} - 2 * \delta \quad (17)$$

Diámetro exterior del yugo del rotor

$$D_{ryi} = D_{re} - 2 * e \quad (18)$$

Donde:

D_{ryi} : Diámetro exterior del núcleo del rotor (mm).

e : Espesor de los imanes (mm).

Número de vueltas o espiras

$$W_s = \frac{\sqrt{2} * E_m}{2\pi f * k_w * \hat{B}_\delta * \tau_p * l_s * \alpha_i} \quad (19)$$

Donde:

W_s : Número de vueltas de espiras por fase en serie.

E_m : Fuerza electromotriz por fase (V)

l_s : Longitud real del núcleo de estator, siendo la misma longitud efectiva (mm).

f : Frecuencia (Hz).

α_i : Coeficiente promedio aritmético de la densidad de flujo de un polo.

Para el cálculo de E_m se utiliza la siguiente formula:

$$E_m = 1,1 * V_n \quad (20)$$

Y para el caso el cálculo de V_n se lo realiza teniendo en cuenta el valor máximo que se quiere alcanzar 120V.

$$V_n = \frac{V}{\sqrt{3}} \quad (21)$$

Coeficiente promedio aritmético:

$$\alpha_i = \frac{W_{PM}}{\tau_p} \quad (22)$$

Donde:

W_{PM} : Ancho del imán permanente (mm).

Dimensión de la Ranura

Para el dimensionamiento de la ranura se ha toma en cuenta ecuaciones de diferentes referencias, donde la mayor parte de investigaciones asumen valores que ayudan a determinar la geometría óptima [21], [54].

En la Figura 7 se muestra las dimensiones principales de una ranura semi abierta a diseñar.

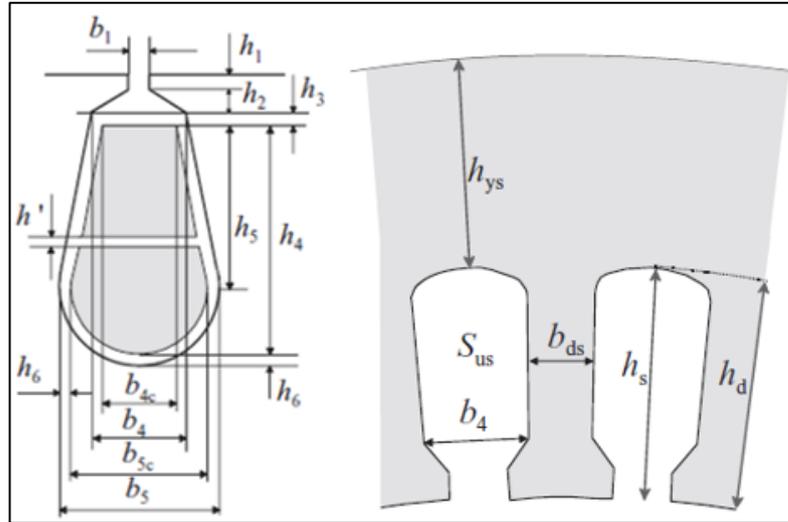


Figura 9. Dimensiones principales de la ranura. [8]

Área de la ranura

Su valor se determina con del factor de espacio del aislamiento del alambre de cobre, siendo aproximadamente $kCu = 0,62$ para una bobina enrollada al azar.

$$S_{Cus} = \frac{z_Q S_C}{K_{Cu}} \quad (23)$$

Donde:

K_{Cu} : Factor de espacio del aislamiento.

Ancho del diente

$$b_{ds} = \frac{l' \tau_u \bar{B}_s}{k_{Fe} (l_s - n_v b_n) \bar{B}'_d} + 0,1 \quad (24)$$

Donde:

b_{ds} : Ancho del diente (mm).

τ_u : Paso de ranura (mm).

kFe : Factor de espacio o apilamiento del acero eléctrico, es decir, es el espacio utilizado por el aislante y las caras que no son perfectamente planas, su valor es de 97% para una lámina de espesor mayor a 0,5mm [42].

$B \acute{d}$: Densidad de flujo por diente (T).

$nvbn$: Son dos coeficientes de ventilación que son tomados en cuenta principalmente para grandes máquinas.

Paso de ranura es:

$$\tau u = \pi D_{si} / Q_s \quad (25)$$

Apertura de ranura

Su dimensionamiento es importante durante el proceso del bobinado, ya que permite una mejor introducción de las espiras.

$$b_1 = \tau u - b_{ts} \quad (26)$$

Donde:

b_1 : Apertura de ranura (mm).

b_{ts} : Ancho superior del diente (mm).

Ancho superior del diente

$$b_{ts} = \tau u - 3,5 \quad (27)$$

$$b_{ts} = 8,8 \approx 9 \text{ mm}$$

Con el ancho superior de diente la apertura de la ranura es:

$$b_1 = 3,2 \text{ mm}$$

Profundidad 1 de la ranura

La primera profundidad en función del paso de ranura viene dada por:

$$h_1 = 0,125 \tau u \quad (28)$$

Ancho interior 4 de la ranura

$$B_{4c} = \frac{\pi(D_{si} + 2h_2)}{Q_s} - b_{ts} \quad (29)$$

Donde:

$b4c$: Ancho interior 4 de la ranura (mm).

$h2$: Profundidad 2 de la ranura es igual a 0,5 mm.

Profundidad 5 de la ranura

La profundidad 5 viene dada por el número de ranura y su área.

$$b5c = \frac{2\pi h_5}{Q_s} + b4c \quad (30)$$

$$SC_{us} = \frac{(b4c + b5c)h_5}{2} + \frac{\pi b5c}{8} \quad (31)$$

Donde:

$h5$: Profundidad 5 de la ranura (mm).

Resolviendo las ecuaciones 30 y 31 se obtiene $h5$.

Ancho interior 5 de la ranura

El valor de $h5$ se reemplaza en la ecuación 30, el ancho interior 5 de la ranura es:

Profundidad 4 de la ranura

$$h_4 = h_5 + \frac{b5c}{2} \quad (32)$$

Donde:

$h4$: Profundidad 4 de la ranura (mm).

Profundidad y área total de la ranura

Se calcula la altura total de la ranura, medida que va desde la apertura del diente hasta el diámetro externo de la ranura.

$$hT = h_s = h1 + h2 + h4 \quad (33)$$

Donde:

hT : Profundidad o altura total de la ranura (mm).

Una vez determinada la geometría de la ranura, su área final según la ecuación 23 es:

$$SCus = 110,365 \text{ mm}^2$$

En función de los cálculos realizados se puede tener como producto un estator que tiene la siguiente forma como lo muestra la Figura 10 y Figura 11.

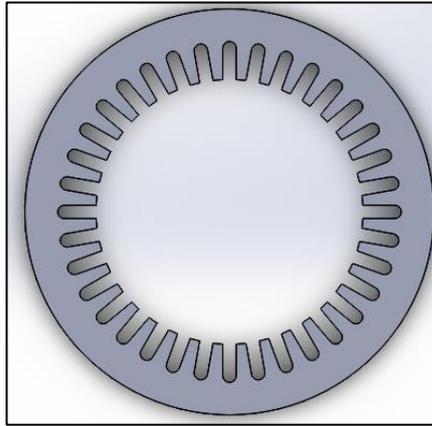


Figura 10. Estator vista superior

Elaborado por el autor

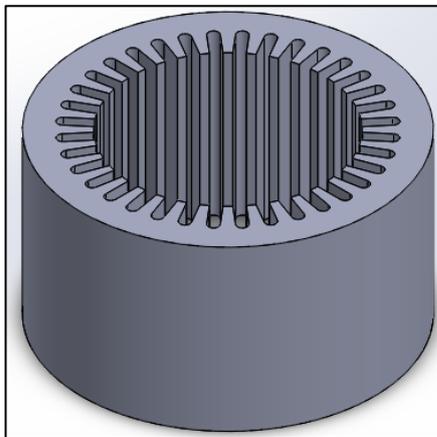


Figura 11. Estator vista isométrica

Elaborado por el autor

Se ha creado una interfaz de Matlab en guide la cual nos permite calcular de manera rápida todos los parámetros principales para la creación del prototipo como lo muestra la Figura 12. La programación se puede ver en el Anexo 1.

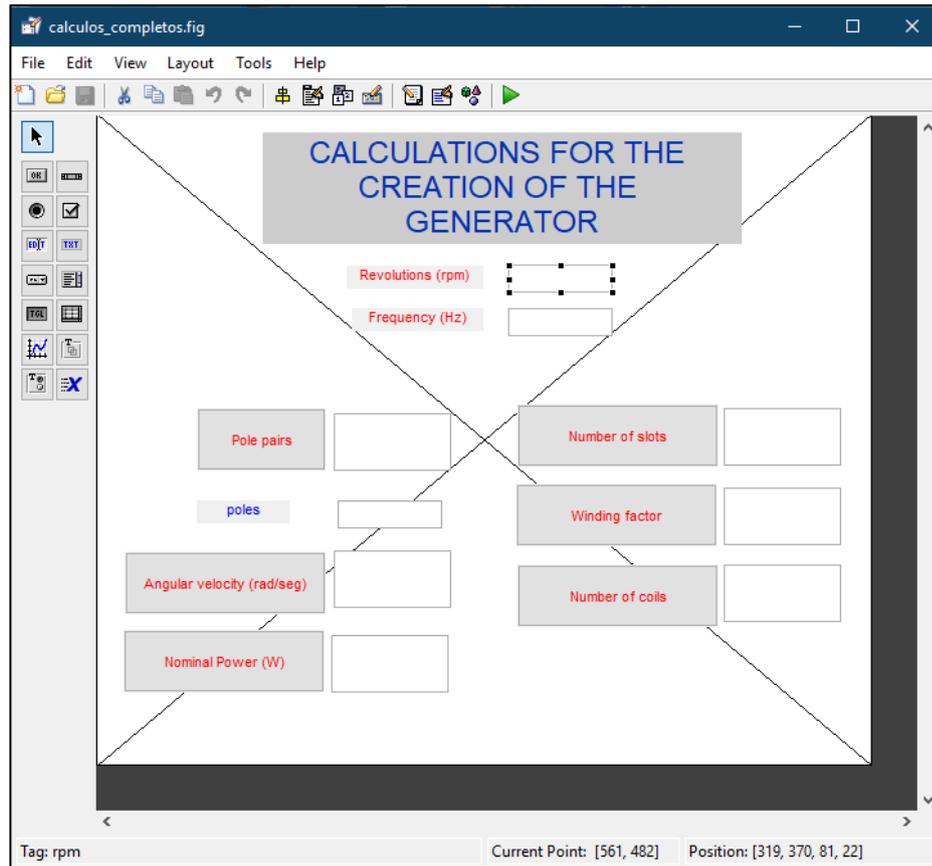


Figura 12. Pantalla de Creación Guide

Elaborado por el autor

Para el cálculo deseado se debe ingresar los valores de frecuencia y revoluciones a las que se va a trabajar para que el programa realice el cálculo de manera automática que es lo que podemos ver en la Figura 13, para el caso se ha ingresado el valor de 600 rpm y una frecuencia de 60 Hz.

CALCULOS PARA LA CREACION DEL GENERADOR

Revoluciones (rpm)	600		
Frecuencia (Hz)	60		
Pares de polos	6	Factor de bobinado	1
polos	12	Numero de bobinas	18
Velocidad Angular (rad/seg)	62.8319		
Potencia Nominal (W)	1145.4507		
Numero de ranuras	36		

Figura 13. Pantalla del Guide Matlab

Elaborado por el autor

1.1.4 Simulaciones

Las especificaciones de diseño del generador calculado se presentan en la Tabla 9 las cuales se tomaron en cuenta para la creación de las simulaciones y así tener valores de referencia los cuales podamos comprar con el prototipo final.

Tabla 9. Especificaciones totales para el diseño del generador

Descripción	Valor	Unidad
Tipo de generador	Trifásico de Imán permanente	
Velocidad nominal	600	rpm
Potencia	2	KW
Numero de ranuras	36	Unidades
Numero de polos	12	Unidades
Diámetro externo del rotor	138.8	mm
Diámetro externo del estator	222	mm
Entrehierro	1.2	mm

Diámetro interno del estator	140	mm
Numero de ranuras	36	Unidades
Profundidad de la ranura	18	mm
Ancho del diente	6.6	mm
Tipo de imán	NdFeb N52SH	
Numero de bobinas	18	Unidades

Elaborado por el autor

Con todas las características ya presentes se modelo el generador de la siguiente manera como se observa en la Figura 14. La cual se realizó en el software de simulación ANSYS Electronics Desktop.

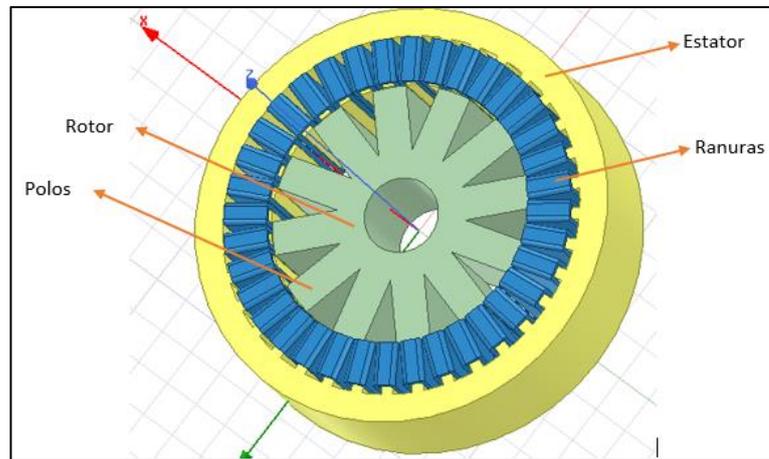


Figura 14. Modelado del generador

Elaborado por el autor

Se puede observar el diseño en 3D del generador con 12 polos, 36 ranuras con diámetro externo del rotor 138.8mm y diámetros del estator de 222 mm y 140 mm externo e interno respectivamente. El cuál es el resultado de modelar el generador en ANSYS con los parámetros de diseño de acuerdo con la Tabla 9.

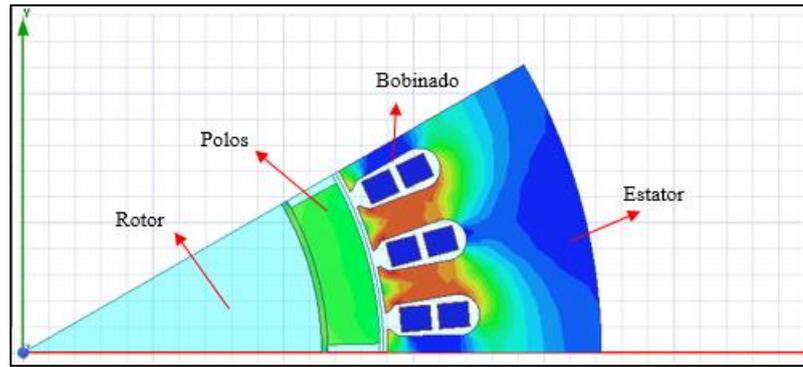


Figura 15. Campo Magnético del Generador

Elaborado por el autor

En la Figura 15 se observa una doceava parte de la simulación del generador, la distribución del flujo magnético en el núcleo del estator y el generador del rotor. El valor de la densidad de flujo de la fuerza del campo magnético en los engranajes del núcleo del estator varía de 0-1.72 Tesla. A partir de los resultados del modelado, se simula para obtener el voltaje de salida del generador a una velocidad de 600 rpm.

Las formas de onda obtenidas en el análisis sin carga se muestran en la Figura 16 la cual nos muestra la forma de onda de voltajes inducidos en el generador donde se aprecia que el voltaje máximo es 15,08[V], para obtener el voltaje rms se lo divide por $\sqrt{2}$.

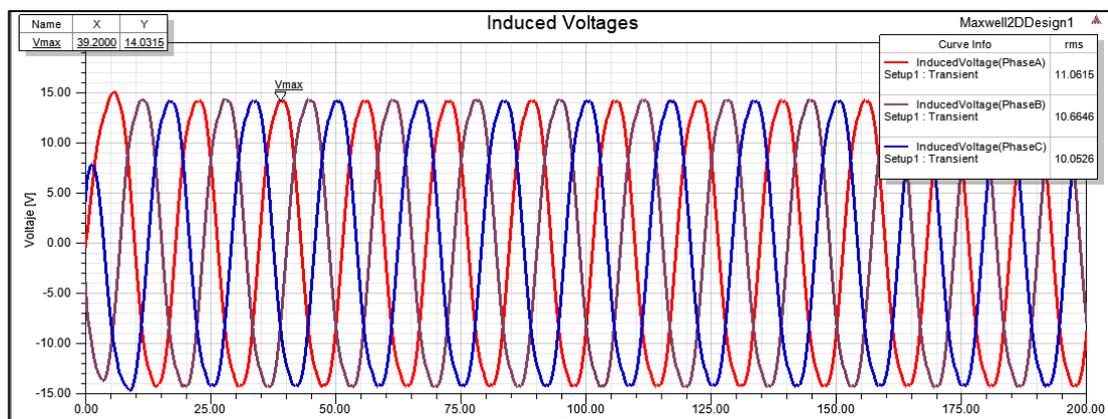


Figura 16. Resultados de simulacion voltaje

Elaborado por el autor

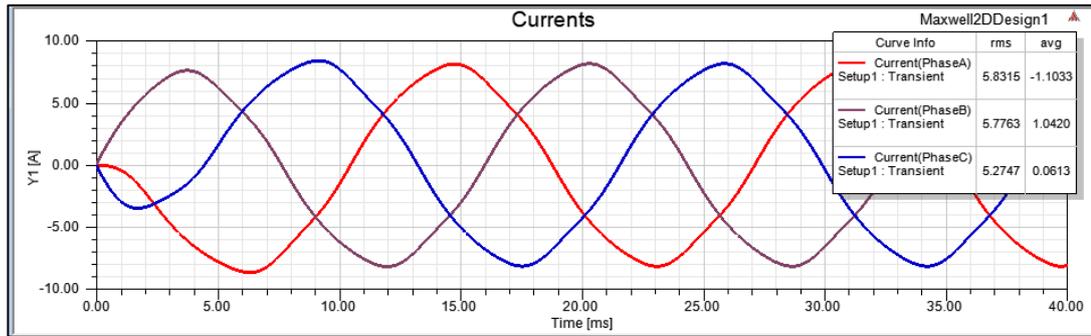


Figura 17. Resultados de simulación corriente

Elaborado por el autor

En la Figura 17, se puede observar como la corriente llega a 5V, la cual es directamente proporcional a la velocidad de rotación que ejerce el núcleo del rotor, que en el caso es de 600 rpm, esta corriente producida por el generador siempre dependerá de las revoluciones que el rotor puede alcanzar.

1.1.5 Fabricación

Para la realización del prototipo se fueron adquiriendo de uno en uno los materiales apropiados, lo primero en ser obtenido fueron los imanes como se puede ver en la Figura 14.



Figura 18. Imanes de neodimio

Elaborado por el autor

El rotor se realizó en un tubo de hierro que contienen 13 chavetas para una mejor colocación de los imanes, dando la forma de un dodecágono como puede observar en el Anexo 2, en la Figura 19 se puede observar claramente que es un dodecágono y tiene las dimensiones correctas.



Figura 19. Rotor

Elaborado por el autor

En este rotor se realizó el pegado de los imanes, con sus polos alternados, los cuales son de las dimensiones previstas como lo vemos en la Figura 20.



Figura 20. Pegado de imanes

Elaborado por el autor

El eje, es un eje de transmisión de media pulgada el cual es el adecuado para soportar el peso del rotor en conjunto con los imanes se observa más claramente en la Figura 21.



Figura 21. Eje

Elaborado por el autor

El estator se efectuó el bobinado de manera precisa dentro de las 36 ranuras a dos pasos y 18 bobinas así lo muestra la Figura 22.



Figura 22. Estator

Elaborado por el autor

Teniendo todas las piezas anteriores se procede al ensamble de las cada una de las partes en una base de madera, la cual soporta de una mejor manera el peso, se genera al momento que se unen las partes, en la parte trasera del generador se han colocado 4 borneras para tener acceso a cada una de sus fases y una común que es neutro.



Figura 23. Ensamble del prototipo

Elaborado por el autor

Para la realización de las pruebas se utilizo una polea conectada hacia un motor, que ejerce la tensión precisa en el generador y este adquiere el movimiento mecánico necesario para producir energía, como se lo ve en la Figura 24.



Figura 24. Ubicación para la realización de las pruebas

Elaborado por el autor

Finalmente se ha procedido a ensamblar el generador, como se observa Figura 25, por medio del software Solid Works se realizó el diseño de unas paredes de acrílico para que proteja al generador de la intemperie.



Figura 25. Prototipo Completo

Elaborado por el autor

1.1.6 Caracterización eléctrica del generador

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de las pruebas realizadas al generador. En la Figura 26 se comparan el voltaje inducido sin carga simulado y en una fase medidos del prototipo de máquina que funciona variando la velocidad hasta 600 rpm, donde se observa que los resultados medidos difieren de los calculados, ya que el simulado da un voltaje de 8,9 V y el experimental es de 7,5 V máximo, en donde tenemos un error relativo de 15,73 %.

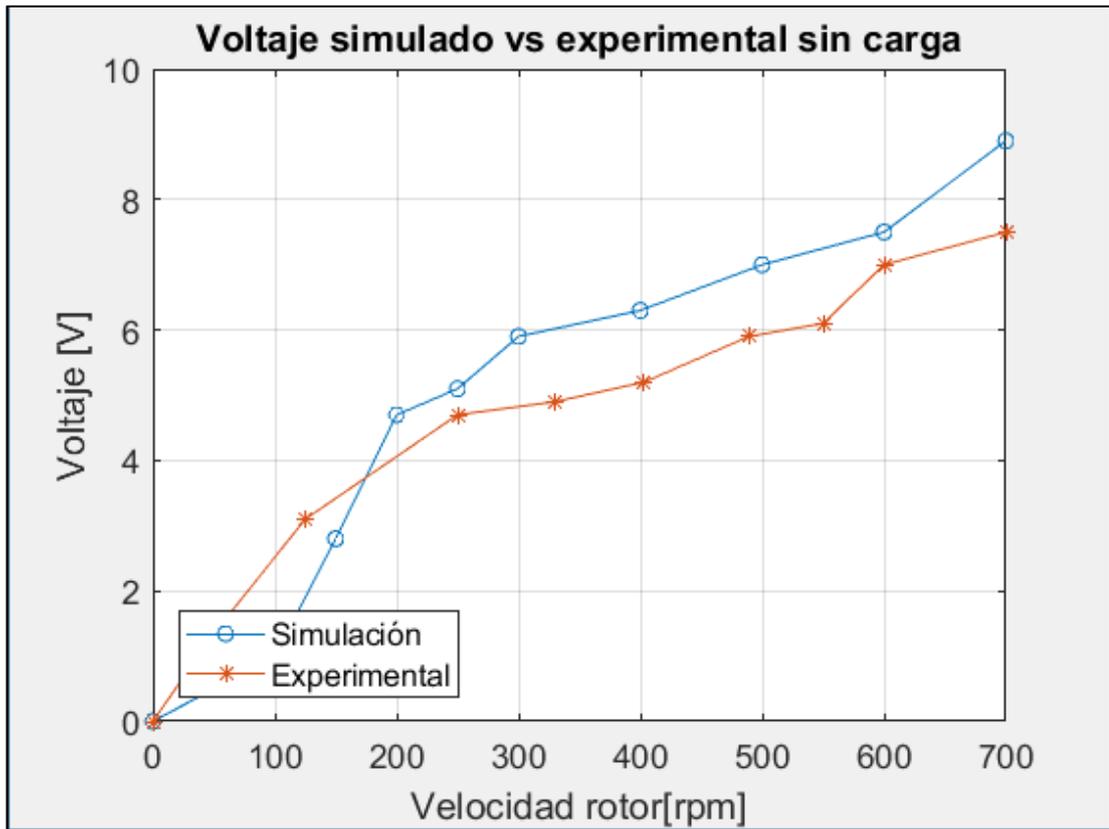


Figura 26. Voltaje del prototipo sin carga

Elaborado por el autor

En la figura 27 se muestra la variación de cargas, un voltaje máximo de 7,43 V a una velocidad de giro de 600 rpm con una carga de 5,1 ohm y un valor mínimo de 7,31 V a una velocidad de giro de 600 rpm con una carga de 47 ohm.

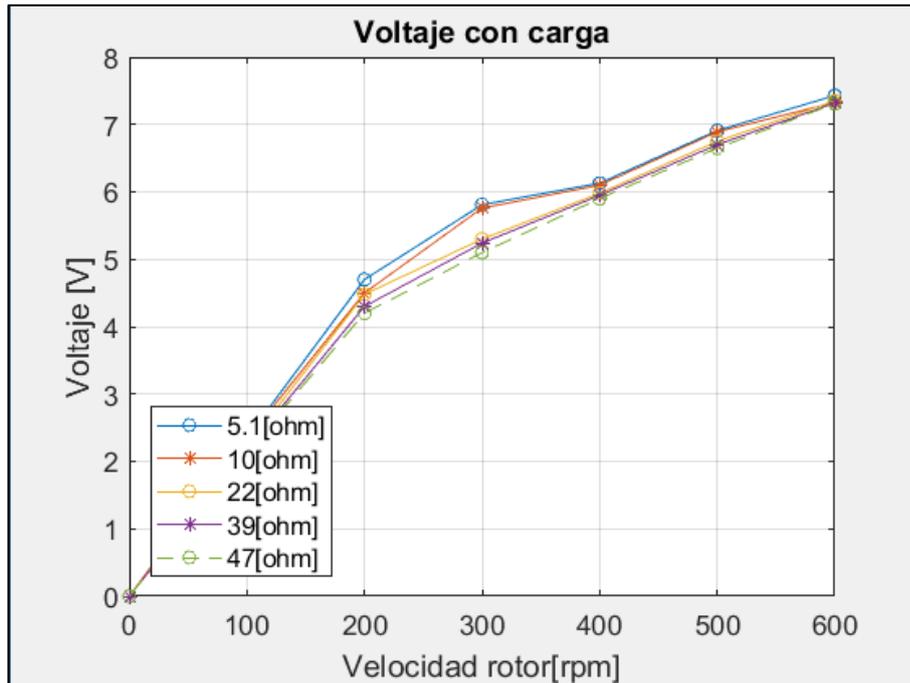


Figura 27. Voltaje del prototipo con carga

Elaborado por el autor

Los datos con los que se elaboró la figura 28 se muestra el valor de amperaje máximo de 2,41 A con una velocidad de giro de 600 rpm con una carga de 5,1 ohm y un mínimo de 1 A con una velocidad de giro de 600 rpm con una carga de 47 ohm.

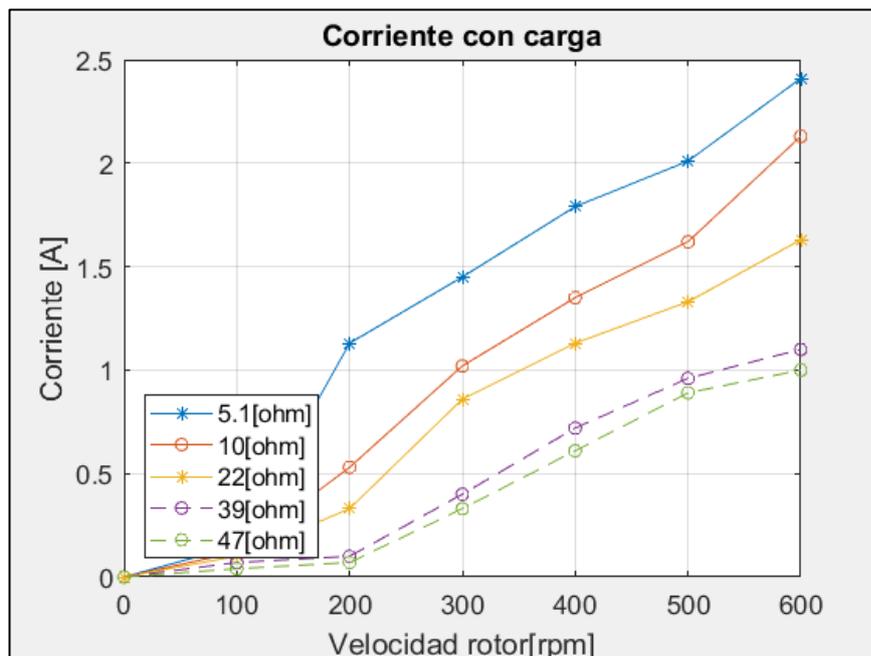


Figura 28. Corrientes del prototipo

Elaborado por el autor

1.1.7 Implementación de la Interfaz IOT

Del prototipo se determina obtener el valor de algunas de las variables que participan en el proceso de generación de energía, como son, el voltaje y la corriente de este.

Para elaborar la monitorización de los datos obtenidos del generador y ser comparados luego con los obtenidos por simulación se necesita emplear dispositivos que permita realizar esto, de los cuales se encuentra cantidad considerable de herramientas tecnológicas disponibles en el mercado local que tienen los requerimientos necesarios para desarrollar, en la Tabla 10 se analizan varios dispositivos comerciales existentes en el mercado local.

Tabla 10. Características de hardware libre existente en el mercado local

	Microcontrolador	Memoria RAM	Voltaje de operación	Velocidad	Puertos	Entorno	Costo
Arduino Uno	ATmega328	32 KB	5V	16 MHZ	Pines de Entradas Análogas: 6 Pines de Entradas/Salidas Digital: 14	Arduino IDE	\$10,00
NodeMCU	ESP8266	4 MB	3.3V	80 MHz	9 pines GPIO 1 analógico	Arduino IDE	\$ 13,00
Raspberry Pi 3	ARMv8 de 64 bits	1GB	5V	1,2GHz	GPIO de 40 pines 4 puertos USB Ethernet (PoE) SD	Linux, Embedded, Scratchbox, Java, Python,	\$ 85,00

Elaborado por el autor

Para la obtención y procesamiento de datos por medio de los sensores se utilizará un Arduino Uno el cual es una placa de microcontrolador basada en el ATmega 328. Consta de 14 pines de IN/OUT digitales, 6 entradas analógicas, 4 UART, velocidad de 16 MHz, conexión USB, un conector de alimentación. [17]



Figura 29. Arduino Uno [17]

Igualmente, por la conveniencia en capacidad, accesibilidad y precio será utilizada la Raspberry pi 3 modelo B, ya que tiene las funcionalidades para cumplir las posibilidades deseadas, como es la visualización de los datos.

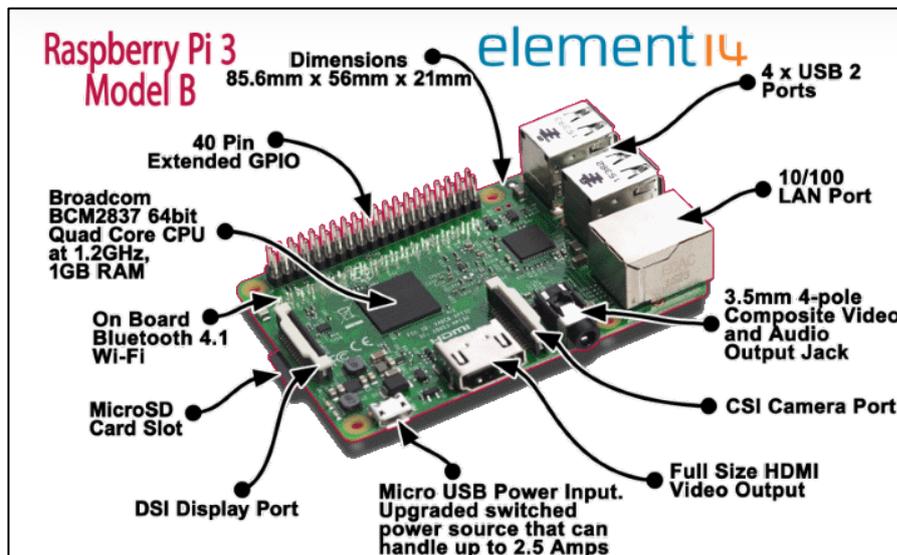


Figura 30. Raspberry Pi 3 modelo B [18]

Para la visualización de las variables se utilizó inicialmente un monitor conectado en el puerto HDMI de la Raspberry Pi 3, para configurar la misma y que luego se pueda conectar a ella sin necesidad de un monitor o pantalla adicional y se haga la conexión hacia la Raspberry Pi 3 por medio de VNC (Virtual Network Computing), el cual es un programa de software libre basado en una estructura cliente-servidor que permite observar las acciones del ordenador servidor remotamente a través de un ordenador cliente. VNC no impone restricciones en el sistema operativo del ordenador servidor con respecto al del cliente: es posible compartir la pantalla de una máquina con

cualquier sistema operativo que admita VNC conectándose desde otro ordenador o dispositivo que disponga de un cliente VNC portado. [19]



Figura 31. Pantalla de Raspberry conectada por VNC

Elaborado por el autor

Así mismo para la medición del voltaje se utilizó el Sensor de Voltaje AC ZMPT101B que envía la señal directa al arduino, Este es un módulo transformador de voltaje, tiene una salida monofásica activa. Además, contiene un circuito con amplificador operacional para compensar el offset de la salida analógica. Puede medir voltaje de baja tensión y la salida analógica es ajustable con el potenciómetro en la placa. Es un módulo ideal para aplicaciones de monitoreo de energía, muy común en aplicaciones de domótica. Debido a la naturaleza de los transformadores solo puede medir voltaje AC. [20]

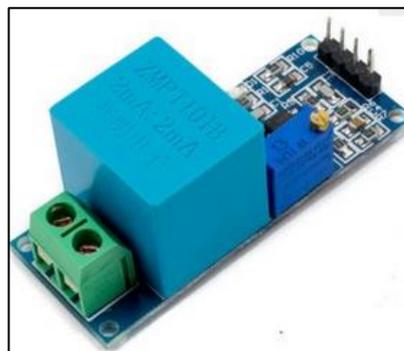


Figura 32. Sensor de Voltaje AC ZMPT101B [20]

Para la medición de la corriente se tomaron en cuenta varios sensores que se pueden encontrar fácilmente en el mercado, como lo muestra la Tabla 11.

Tabla 11. Características de sensores de corriente.

	ACS712	TA12-200	SCT-O 13-030
Tipo de sensor	Inductivo	No invasivo	No invasivo
Tipo de corriente	AC-DC	AC	AC
Temperatura de trabajo	-40 a 85 °C	-55 a 85 °C	-40 a 70°C
Consumo	2.5[mA]	2.5[mA]	3.2[mA]
Voltaje de operación	5[V]	3[V]	5 a 10 [C]
Rango de corriente	-5 a 5 [A] -20 a 20 [A] -30 a 30 [A]	0 a 5 [A]	0 a 30[A]
Resolución	66 mV/A 100 mV/A 185 mV/A	2000 V AC / 1min 5 mA	1000 V AC / 1min 5 mA

Elaborado por el autor

Finalmente se determinó que el módulo con sensor ACS712, dispositivo que está conformado por un circuito sensor de Hall, en el cual la corriente aplicada que fluye genera un campo magnético que es detectado por el Hall circuito integrado y convertido en un voltaje proporcional, es el correcto y se lo puede ver a continuación en la Figura 30.

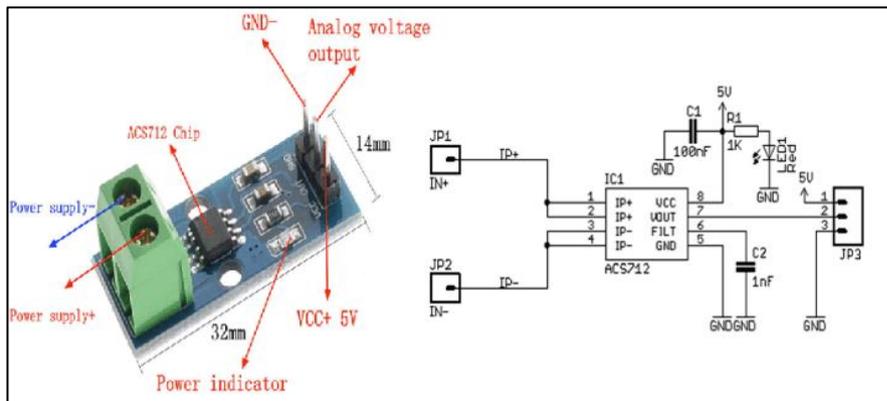


Figura 33. Sensor ACS712 [21]

Diagrama de conexiones de la plataforma de monitorización.

En la Figura 31 se observa cómo se han conectado todos los componentes utilizados para la monitorización.

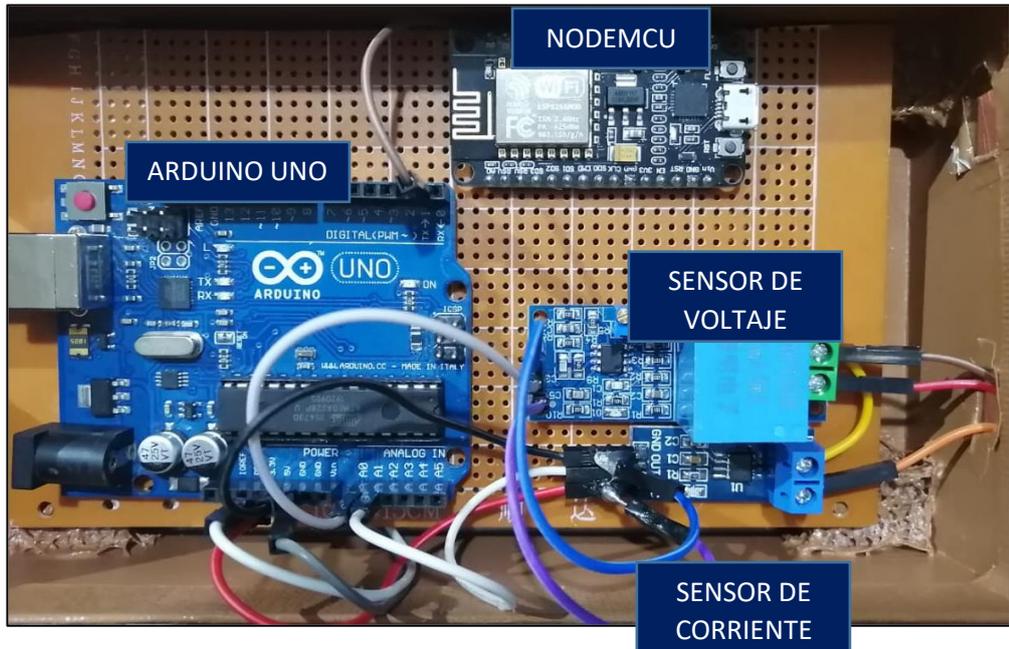


Figura 34. Circuito de medición de Voltaje y Corriente

Elaborado por el autor

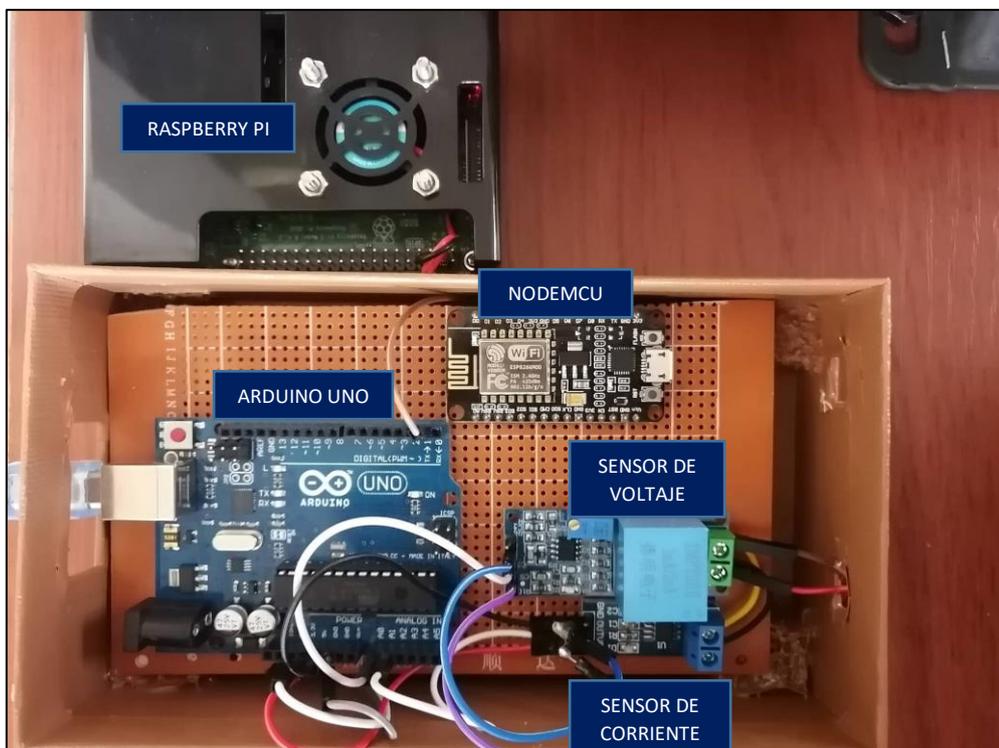


Figura 35. Circuito de medición con raspberrypi

Elaborado por el autor

Almacenamiento en la base de datos

En este proceso se compone de dos partes como se muestran en el esquema de la Figura 36.

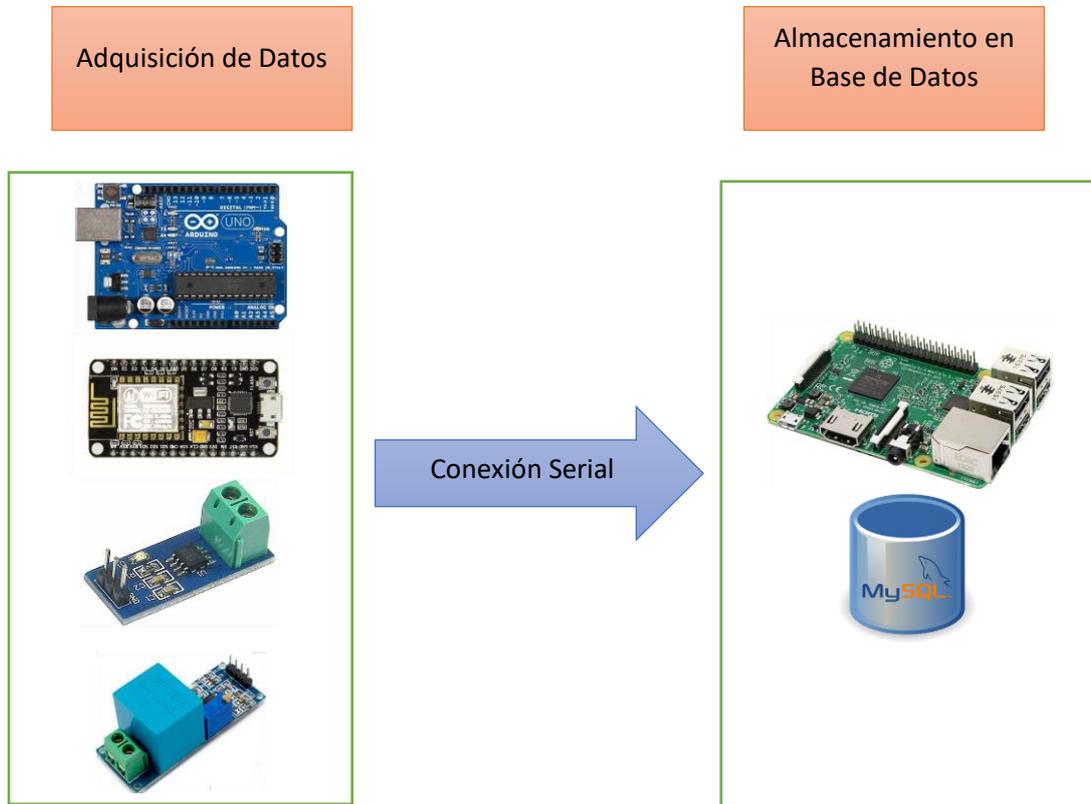


Figura 36. Esquema de adquisicon de datos

Elaborado por el autor

La obtención de los datos se la realiza en la tarjeta Arduino y en el esquema de la Figura 37 se muestra la conexión de el sensor de corriente y voltaje, la medición ha sido realizada a una sola fase, con los datos obtenidos se puede obtener la potencia.

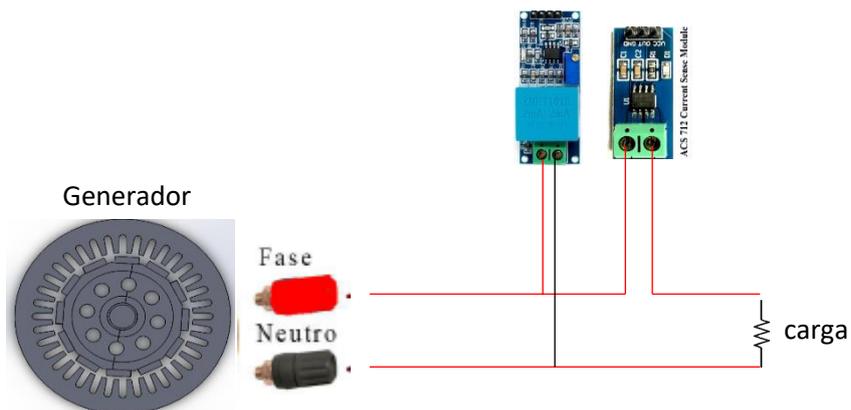


Figura 37. Esquema de conexión sensor de corriente con carga

Elaborado por el autor

En la Raspberry PI en la tarjeta microSD se ha instalado el sistema operativo Raspberry PI OS, para el almacenamiento de la base de datos se procede a instalar un gestor de estas el cual es phpmysqladmin la que nos permitirá gestionar la base de datos de manera gráfica.

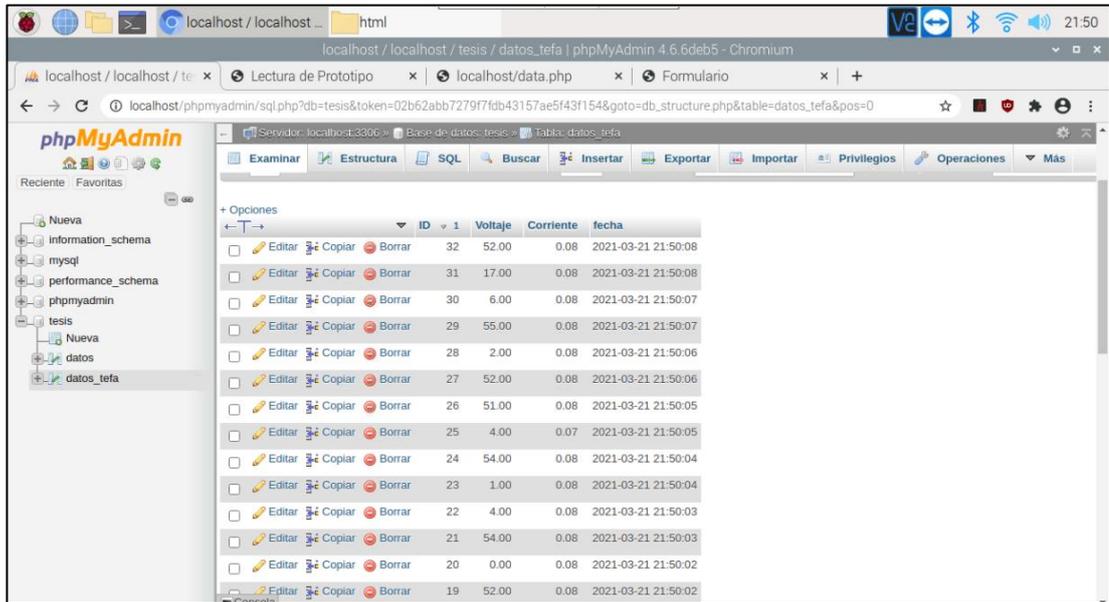


Figura 38. Visualización de datos obtenidos en la Base de datos

Elaborado por el autor

Finalmente se puede observar la pantalla de monitorización en la Figura 39 el cual será mostrado en pantalla.

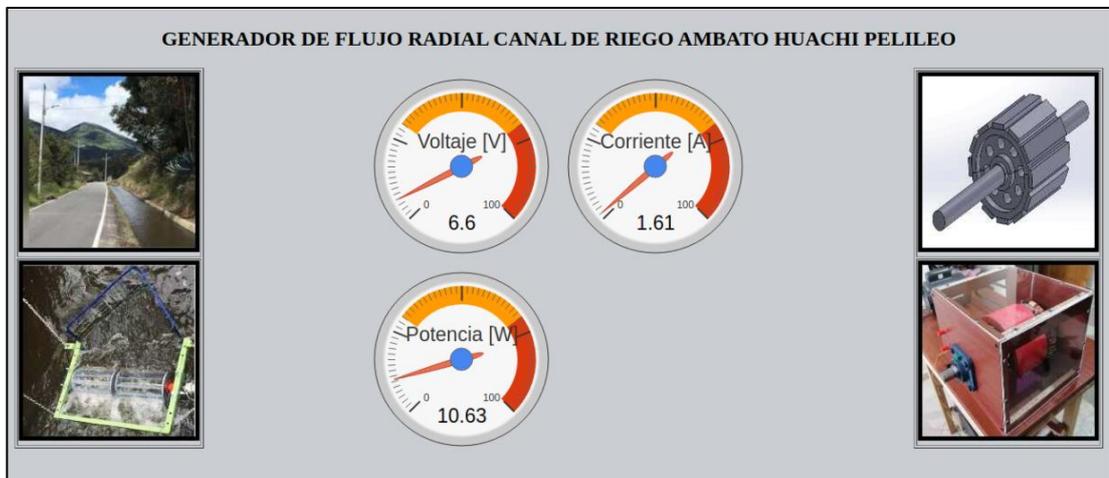


Figura 39. Visualización de los datos en la página web

Elaborado por el autor

Estructura completa de la pico central hidroeléctrica

Para tener una mejor visualización de la conexión que se realizará en la Pico central se muestra a continuación en la Figura 40 el diagrama de bloques de conexión.

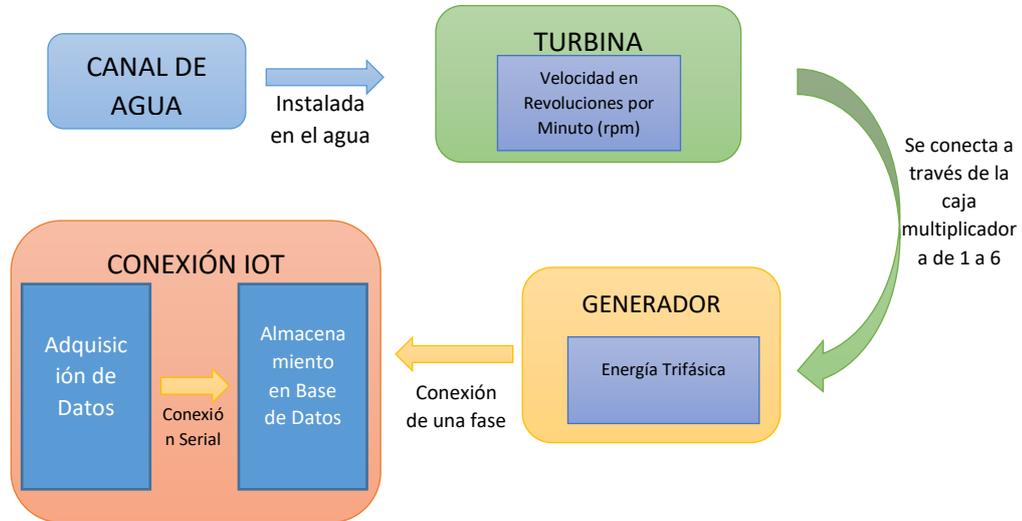


Figura 40. Diagrama de Bloques de la estructura completa

Elaborado por el autor

En seguida se puede observar en la Figura 41 la conexión física que debe tener la pico central hidroeléctrica.

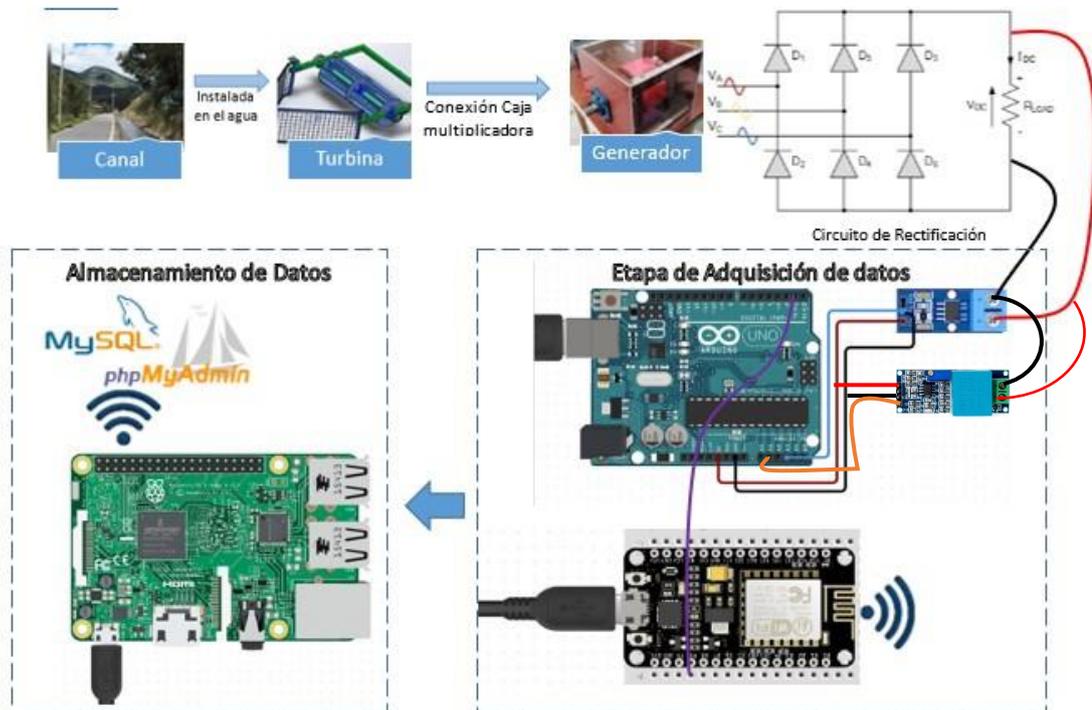


Figura 41. Diagrama físico de la de la estructura completa de una pico central hidroeléctrica

Elaborado por el autor

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Desarrollar un Generador síncrono de imanes permanentes de flujo radial para una pico central hidroeléctrica en el canal de riego Ambato – Huachi – Pelileo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Revisar las características técnicas de los sistemas de generadores de imanes permanentes de flujo radial, aplicado a pico centrales hidroeléctricas.
- Simular el generador de imanes permanentes de flujo radial para su aplicación en un pico central hidroeléctrica.
- Validar el comportamiento del prototipo de generador de imanes permanentes de flujo radial.
- Implementar una plataforma de monitoreo de variables físicas del generador de imanes permanentes de flujo radial.

1.3 Descripción de Objetivos

El objetivo general del presente proyecto se enfoca en el desarrollo de un generador síncrono de imanes permanentes de flujo radial que pueda ser utilizado en pico centrales hidroeléctricas para este caso se lo requiere en el canal de riego Ambato –Huachi –Pelileo, para ayudar a la iluminación del canal de riego y sectores cercanos.

La revisión sistemática de cada una de las características técnicas de los sistemas de generadores de imanes permanentes de flujo radial es de carácter investigativo el cual permitió tener una visión clara acerca del funcionamiento de un generador de flujo radial.

Para el cumplimiento de los objetivos propuestos se desarrollaron las siguientes actividades:

- Estudio el funcionamiento de los generadores de imanes permanentes.
- Análisis la estructura física de los generadores de imanes permanentes.
- Estudio de la clasificación de los generadores de imanes permanentes.
- Estudio de la efectividad del generador de imanes permanentes de flujo radial.

La simulación del generador de imanes permanentes de flujo radial para su aplicación en un pico central hidroeléctrica, ha permitido obtener una visión completa acerca del comportamiento de las variables que están involucradas en la obtención de energía eléctrica en este tipo de generación.

Las actividades para el cumplimiento del objetivo son los siguientes:

- Identificación de cada una de las etapas que conforman el generador síncrono de flujo radial de imanes permanentes.
- Diseño y simulación del generador síncrono de imanes permanentes de flujo radial.

- Determinación de dimensiones adecuadas para la puesta en marcha del generador síncrono de imanes permanentes de flujo radial en canales de riego.
- Seleccionar los componentes eléctricos, electrónicos y magnéticos que permitan la implementación del prototipo.

La validación del comportamiento del prototipo de generador de imanes permanentes de flujo radial permite obtener los resultados de la comparación de la simulación con el generador real. Esto se cumple desarrollando las siguientes actividades:

- Ejecución de pruebas, detección y corrección de errores del generador síncrono de imanes permanentes de flujo radial para pico - centrales hidroeléctricas en canales de riego.
- Análisis de resultados y la obtención de conclusiones del generador síncrono de imanes permanentes de flujo radial para pico - centrales hidroeléctricas en canales de riego.

Y finalmente la implementación de una plataforma de monitoreo de variables físicas del generador de imanes permanentes de flujo radial, para que las variables puedan ser observadas en tiempo real.

- Elaboración del diseño lógico de la plataforma y sus componentes tecnológicos.
- Selección de los sensores adecuados para la adquisición de los datos en el generador.
- Programación de la plataforma para la monitorización de las variables físicas adquiridas por los sensores mediante la plataforma.

CAPÍTULO II .- ARTICULO ACEPTADO PARA PUBLICACIÓN

Design of a Synchronous Generator of Permanent Magnets of Radial Flux for a Pico - Hydro Power Station

First Author¹[0000-1111-2222-3333] and Second Author²[1111-2222-3333-4444]

¹ Princeton University, Princeton NJ 08544, USA

² Springer Heidelberg, Tiergartenstr. 17, 69121 Heidelberg, Germany
lncs@springer.com

Abstract. The design of a radial flux permanent magnet synchronous generator is presented, which can produce a maximum power of 2KW at 600 rpm. Once the design was made and its main characteristics determined, the analysis was carried out in Matlab to observe the behavior of the generator in its operating range. SolidWorks was also used for the elaboration of 3D modeling and finally in ANSYS for its electromagnetic analysis. The objective of this design is that the generator can be installed in a Pico – hydro power station located in an Ambato - Huachi - Pelileo irrigation channel, in the Tungurahua province in Ecuador. This will allow users to get benefit from electrical energy in difficult access areas. At the same time, when used in the irrigation channel, it will be able to illuminate the channel and thus allow provide maintenance at any time of the day.

Keywords: Irrigation Channel, Generator, Permanent Magnets, Radial Flux.

1 Introduction

The use of unconventional energy resources in recent years has been developed mainly with the intention of reducing the use of fuels [1]. Under this concept, water is one of the resources used, since it satisfies multiple human needs. Conservation and proper management of this resource is important in the country, since social and production inequalities are closely linked to water access; Additionally, 70% of the electrical energy in Ecuador is of hydraulic origin [2].

Pico-hydroelectric power plants are typically a stand-alone hydroelectric system built to provide electricity to rural communities and are adopted as renewable energy due to their advantages over large hydroelectric plants [3]. With the foregoing, it is said that these systems are the most economical option to supply energy in isolated rural areas.

In this power generation system, it depends a lot on the variation of the water, and this is where generators are used to maintain its level, there are two types of permanent magnet machines for generators [4] [5] [6]; radial flow permanent magnet synchronous machine (RF-PMSM) and axial flow permanent magnet synchronous machine (AF-PMSM). Radial flux permanent magnet machines are conventional machines that have been in use for a long time. RF-PMSM has some advantages of compact structure, higher torque capacity, higher efficiency due to the absence of rotor windings and excitation losses, higher power density than conventional induction machines [7].

Most of the RF-PMSM applications are focused on aerial generators, since the main characteristic of this generator is its constant magnetic field, which is generated by its permanent magnets located in the rotor. If the machine is excited with permanent magnets, the permanent magnet materials have to be selected and the main dimensions of the parts manufactured from these materials have to be determined. Generally, when calculating the magnetizing current for a rotating machine, the machine is assumed to run at no load: that is, there is a constant current flowing in the magnetizing winding. [8].

The objective of this project is to make a contribution for the use of RF-PMSM in peak hydroelectric power plants, which may be used as an energy source in rural areas with difficult access, thus achieving that each of the country's areas have access to this basic service. Therefore, a generator has been designed to adapt to the characteristics of a michell-banki type mini-hydraulic turbine, in order to provide energy from the flow of the irrigation channel, which provides us with a hydroelectric power

plant peak. To carry out this research, the Matlab and SolidWorld Software is used for 3D modeling and sizing.

2 Related Works

One of the most recent works related to this particular project is the one presented in the article "Design and Fabrication of a Radial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator" where it mentions that radial flux direction synchronous generators produce a higher voltage compared to conventional ones. axial flow direction generators in the same radius of the machine. This generator is designed to produce a voltage of 26 volts at a speed of 375 rpm. [9]

It has also been taken into account that permanent magnet synchronous generators (PMSG) have been widely documented in specialized literature as the most suitable for use in low power wind turbines, mainly due to their high efficiency, its high reliability and high power density. [10] In our case it will be used hydraulically, since in both cases the potential of the air and water currents is used respectively, transforming the kinetic energy into electricity.

In the article "Analyzing the Power Quality of a RF-PMSG by Considering Different Types of Windings" published in the IEEE magazine in 2019, it is mentioned that the type of winding also directly intervenes in the analysis of the performance of the RF-PMSG generator. Considering this analysis, the impact of the winding on the quality of energy presented by it was taken into account. [11]

Induction and rare earth PMSGs currently have the largest share of the PMSG market. High power density, high efficiency, high reliability, low maintenance requirement are some of the advantages of PMSGs compared to induction and reluctance generators. [12] [13]

RF-PMSGs are so versatile generators that studies [14] [15] can be found in which they can be related to wind turbines in offshore areas.

3 Formulation of the Problem and Methodology

For the development of the proposed design, the mechanical characteristics presented in the research project carried out in 2019 at the Technical University of Ambato with the title "Design and Construction of a Michell-Banki mini hydraulic turbine to be installed in open primary channels were taken into account. they generate mechanical energy. ", These characteristics are the main guide for making the generator. Those presented below in Table 1:

Table 1. Mechanical dimensioning of the turbine

Parameters	Measurements
Dimensions	916,5x796,9x237 mm
Weight	33,35 Kg
Revolutions	110 rpm
Torque	26 Nm
Power	22,88 W

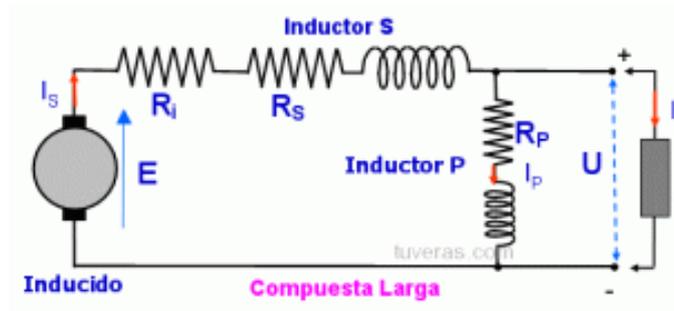
The main data obtained for the design of the turbine in question were taken from Lenin Ibañez tesis: [16]

- a) Channel width: 1.63 m
- b) Total depth of channel: 1.7 m
- c) Velocity in the channel: 1,512 m / s
- d) Channel flow: 0.0936 m³ / s

e) Accessibility to the canal.

Since the number of revolutions is low, a 1: 6 gearboxes will be used to work with a total of 600 rpm, which have been taken into account for the elaboration of our generator.

In the circuit of Fig 1 and it is visualized how permanent magnet generators provide electrical energy by induction. In this case, the inductor winding is connected in series with the armature, in such a way that all the current that the generator supplies to the load flows equally through both. Since the current flowing through the inductor winding is high, it is necessary to build them with few turns and a large section in the conductors.



$$U = E - (R_i + R_s)I_s - V$$

$$U = R_p I_p$$

Figure 1. voltage control at the terminals of a generator

Where:

E = Electromotive force (FEM)

I_s = series intensity

R_i = armature resistance

R_s = series resistance of inductor winding

R_p = resistance in parallel

I_p = intensity parallel to FEM

U = tension

3.1 Theoretical Study

For the theoretical study, the analysis has been carried out considering the book Design of Rotating Electrical Machines [8] which is detailed below.

Pole pairs. The number of pole pairs is determined by the frequency and the speed of rotation of the rotor in rpm, as seen in the equation.

$$p = \frac{60 \cdot f}{n} \quad (1)$$

Where:

n = speed in rpm

p = number of pairs of poles.

Maximum energy. The maximum energy is determined by the magnetic characteristics of the permanent magnet, and is given by the following equation:

$$E_M = \frac{(B-H)_{max} * V * n_{PMGS}}{2} \quad (2)$$

Where:

$(B - H)_{max}$: Maximum energy product $\left(\frac{kJ}{m^3}\right)$, this is determined by the characteristics of the magnet, in this case it will be a N52 grade neodymium magnet.

n_{PMGS} : generator rotation speed (rpm)

V: volume of the magnet. (m^3)

Angular speed of rotation. The angular speed of rotation is determined by the frequency of the alternating current and the number of pairs of poles.

$$\omega_{PMGS} = \frac{2 * \pi * f}{p} \quad (3)$$

Where:

p = number of pairs of poles

Maximum Power. With the values obtained previously, the electrical power by the magnets at a speed of 600 rpm is:

$$P = E_M * \omega_{PMGS} \quad (4)$$

Table 2. Initial parameters for design.

Initial Parameters	
Power (W)	2 KW
Spin speed (rpm)	600 rpm
Electric frequency (Hz)	60 Hz
Phase voltage (V)	110 V

The design of the neodymium permanent magnet generator was defined with the parameters shown in Table 2. Where a voltage of 110V is observed, which has been chosen because this is the most common used in homes, and the frequency of 60Hz, since at this frequency is the one at which the electrical network works nationwide, the speed of 600 rpm will be provided by the turbine using a multiplier box, in order to obtain a power of 2KW, which is what is desired. ideally.

Number of slots. To calculate the number of grooves we have the following equation:

$$Q_s = 2 * p * q_s * q \quad (5)$$

Where:

p = number of pairs of poles.

q = number of phases

q_s = number of slots per pole and phase

So the number of slots you must have are 36.

Total, number of coils.

$$G = p * q \quad (6)$$

Where:

p = number of pairs of poles.

q = number of phases

That is, this time there are 18 coils that will be part of the stator winding.

Number of coils per phase.

$$G_f = p \quad (7)$$

Where:

p = number of pairs of poles.

G_f = number of coils per phase

The number of coils per phase is equal to the number of poles that the generator has, in this case it will be 6 coils per phase.

Number of coils per group.

This number gives us how many coils will be inside the slots.

$$U = \frac{Q_s}{2 * p * q} \quad (8)$$

Where:

U = number of coils per group.

Q_s = number of slots

p = number of pairs of poles.

q = number of phases

$$U = 1$$

The space between connected coils is given by:

$$m = (q - 1) * U \quad (9)$$

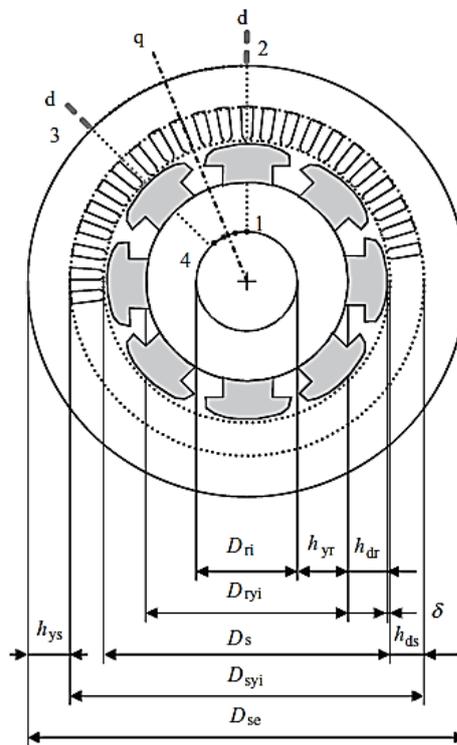
Where:

U = number of coils per group.

m = coil width or pitch

$$m = 2$$

Once the main parameters have been obtained, the calculation of the dimensioning of the rotor, stator and airgap or air gap is made, which will serve us for an optimal design. In this case, several free parameters must be taken into account, which can be solved with tables and graphs of previous investigations. In Fig. 2 these main parameters to be calculated are displayed, such as: the internal and external diameter of the rotor and stator respectively, as well as the dimensions of the grooves where the winding is placed.



(a)

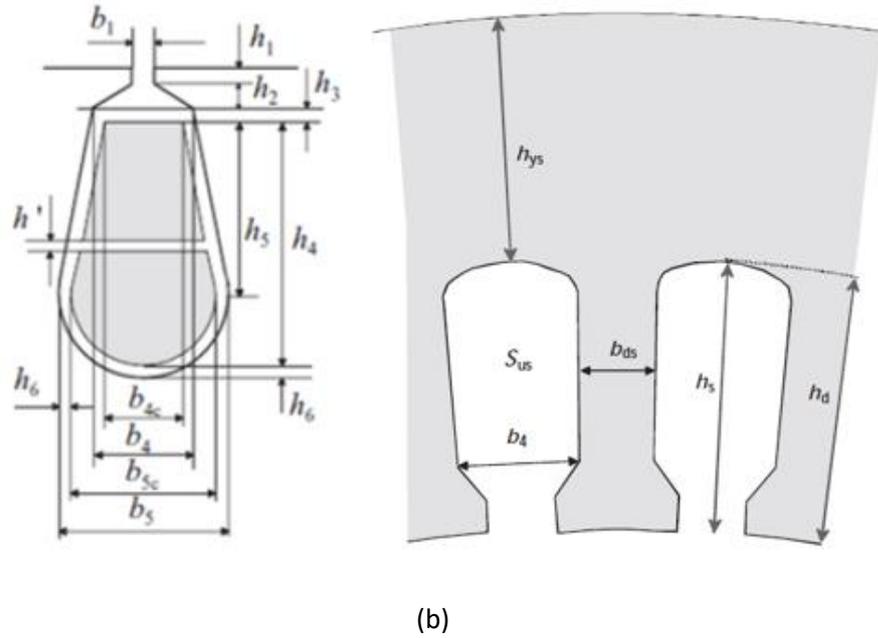


Figure 2. (a) Synchronous external pole machine. (b) Main dimensions of the slot

The formulas for obtaining each of these calculations are as follows:

For the calculation of the internal diameter of the stator core, it is based on the concept of torsional stress of the rotor, where parameters such as mechanical constant and nominal power are presented.

$$D_{si} = \sqrt[3]{\frac{P_{nom}}{x * C_{mec} * n_{syn}}} \quad (10)$$

Where:

D_{si} : Inner diameter of stator core (mm).

P_{nom} : Nominal design power (kW).

x : Relationship between the equivalent length of the machine and the diameter of the iron.

C_{mec} : Output power coefficient or mechanical constant for generators synchronous and asynchronous (kW / m³).

n_{syn} : Synchronous relationship (s-1).

For each of the parameters that have been requested to obtain the internal diameter of the rotor, it is obtained using the following formulas:

The synchronous relationship through:

$$n_{syn} = \frac{f}{p} \quad (11)$$

To obtain the relationship between the equivalent length and the gap diameter, in standard machines the following applies:

$$x = \frac{l'}{D} \quad (12)$$

Where:

l' : Stator equivalent axial length (mm).

D : Diameter of the air gap or air gap (mm)

The diameter of the air gap D , is equivalent to the internal diameter of the stator, $D \approx D_{si}$.

In the investigative process, the following table was obtained, which is the relationship of:

Taking these relationships into account, the second option is our responsibility.

In obtaining the mechanical constant we have the following:

$$C_{mec} = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} K_w A \hat{B}_\delta \quad (13)$$

Where:

K_w : Winding factor.

A : Linear current density (kA / m)

\hat{B}_δ : Air-gap flow density per pole (T)

For which the value of the linear current density and the flux density is obtained by software, so the gap in the air gap must be minimal.

We can see in Table 3 the relationship between the equivalent length of the machine and the diameter of the iron according to the type of machine that is going to be created, for our case the third option has been chosen since the number of poles with the that we count is greater than 1.

Table 3. L' / D Ratios, Typical for Different Electrical Machines.

Asynchronous Machines	Synchronous Machines $p > 1$	Synchronous Machines $p = 1$	DC machines
$x \approx \frac{\pi}{2 * p} \sqrt[3]{p}$	$x \approx \frac{\pi}{4 * p} \sqrt{p}$	$x = 1 - 3$	$x \approx \frac{0,8 - 1,6}{p}$

And without invalidating any of these parameters, it is obtained that the internal diameter of the stator is $D_{si} = 0,140m = 140mm$.

Once obtained in diameter and ratio, it is possible to calculate the equivalent length $l' = 45mm$.

Air gap. An air gap should technically be as small as possible, it can be determined as follows.

$$\delta = \gamma \tau_p \frac{A}{\hat{B}_\delta} \quad (14)$$

Where:

δ : Air gap or air gap (mm).

γ : Coefficient for the definition of the air gap

τ_p : Pole pitch (mm).

The definition coefficient of the air gap is $\gamma = 7 \times 10^{-7}$ for outgoing pole generators. The polar passage is given by:

$$\tau_p = \frac{\pi D}{2p} \quad (15)$$

In equation 12, the polar pitch is determined with the internal diameter of the stator.

$$\tau_p = 36,652 \text{ mm}$$

So the maximum space between the iron is: $\delta = 1.2 \text{ mm}$

Stator core outer diameter

$$D_{se} = \frac{D_{si}}{0,63} \quad (16)$$

In this case the value of 0.63 is the ratio between the external radius of the rotor and the external radius of the stator.

Rotor.

$$D_{re} = D_{si} - 2 * \delta \quad (17)$$

Number of turns.

$$W_s = \frac{\sqrt{2} * E_m}{2\pi f * k_w * \hat{B}_\delta * \tau_p * l_s * \alpha_i} \quad (18)$$

Where:

W_s : Number of turns of turns per phase in series.

E_m : Electromotive force per phase (V)

l_s : Actual length of the stator core, being the same effective length (mm).

f : Frequency (Hz).

α_i : Arithmetic average coefficient of the flux density of a pole.

The following formula is used to calculate:

$$E_m = 1,1 * V_n \quad (19)$$

And in this case, the calculation of V_n is done taking into account the maximum value to be reached 120V.

$$V_n = \frac{V}{\sqrt{3}} \quad (20)$$

Arithmetic average coefficient:

$$\alpha_i = \frac{W_{PM}}{\tau_p} \quad (21)$$

Where:

W_{PM} : Width of the permanent magnet (mm).

Slot Dimension. For the dimensioning of the groove, equations of different references have been taken into account, where most of the investigations assume values that help to determine the optimal geometry.

Slot area. Its value is determined with the space factor of the copper wire insulation, being approximately $kCu = 0.62$ for a randomly wound coil.

$$S_{Cus} = \frac{z_Q S_C}{K_{Cu}} \quad (22)$$

Where:

K_{Cu} : Insulation space factor

The guide developed in MATLAB allows us to enter the initial information and thus generate the output parameters. In Fig. 3 you can see the guide screen where the boxes in which it is possible to change the value of the data are highlighted, and obtain important parameters such as the number of poles, power that can be generated according to the poles, number of slots and number of coils for generator design. For the case, the data previously presented in Table 2 has been entered.

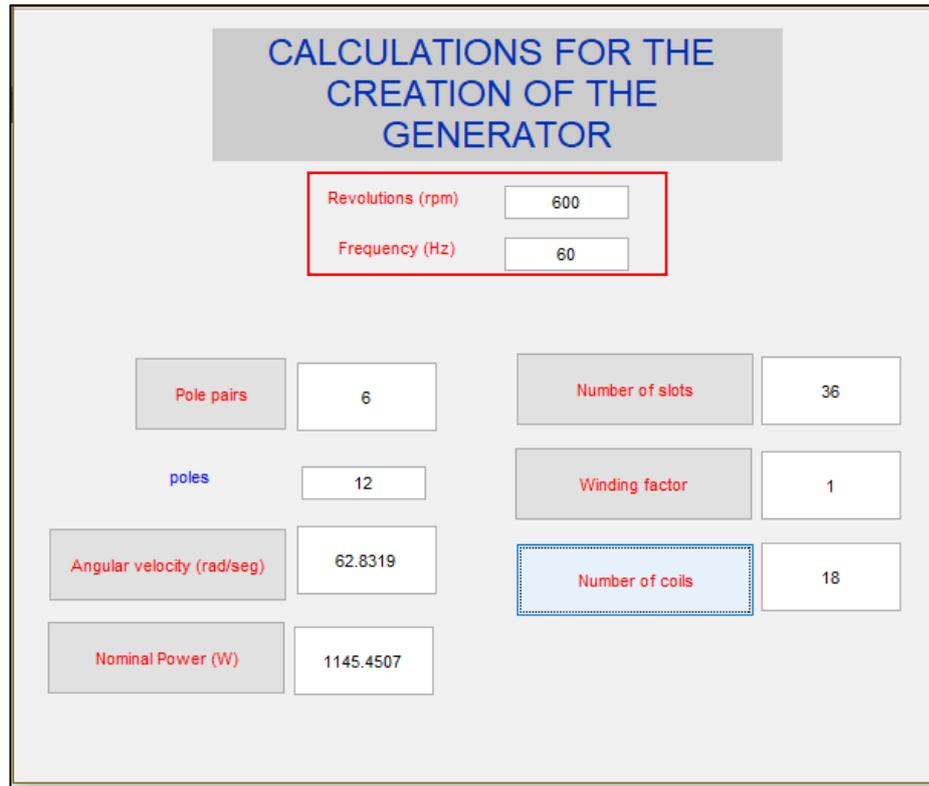


Fig 3. Matlab screen where the final parameters are displayed according to the data entered.

4 Design

The design specifications of the calculated generator are presented in Table 4. Where it is important to state that the most important of these are: the type of magnet that is going to be used since from this we will use its magnetic field, which generates the torque, the number of pole pairs that affect the voltage, the number of slots and turns of the winding, since with these the current is obtained and finally the speed with which the generator will work. Once the voltage and current data have been obtained, we can consider the power since it involves the magnetic characteristics of the magnet. Taking all these parameters into account, it is modeled and simulated in the software.

Table 4. Design specification of generator

Description	Value	Unit
Generator Type	Three Phase Permanent Magnet	-
Nominal speed	600	rpm
Power	2	KW
Number of slots	36	Units
Number of poles	12	Units
Rotor outer diameter	138.8	mm
Stator outer diameter	222	mm
Air gap	1.2	mm
Stator inner diameter	140	mm

Groove depth	18	mm
Tooth width	6.6	mm
Magnet type	NdFeb N52SH	
Number of coils	18	Units

Once the necessary specifications for the generator design have been obtained, we use the ANSYS software to obtain the desired structure and in turn perform its simulation. As can be seen in Fig. 4 we find the diagram made with the specifications in table 4.

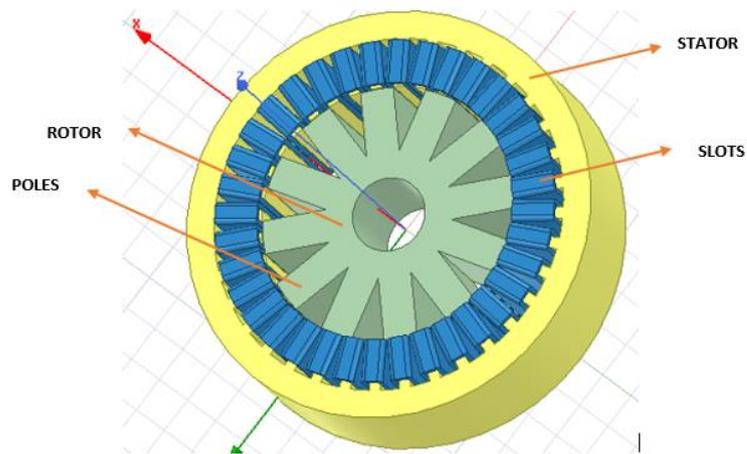


Fig 4. Model of the generator

In Fig. 5 we find a cut of 30 degrees in which the result of simulating can be visualized the distribution of the magnetic flux in the stator core and the rotor generator.

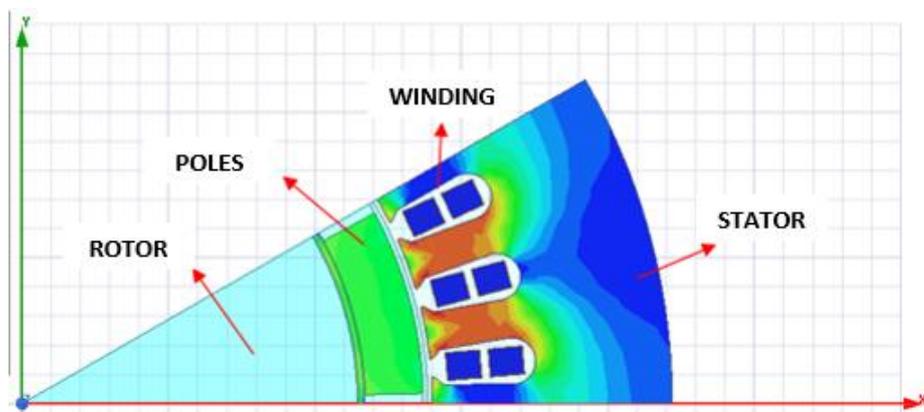


Fig 5. Magnetic field in one sixteenth of the generator.

In Fig. 6 we can see that the value of the flux density of the intensity of the magnetic field in the gears of the stator core varies constantly, the ideal value is $1.0744E + 000$ Tesla which indicates that the magnetic field is suitable in generation areas. From the modeling results, it is simulated to obtain the generator output voltage at a speed of 600 rpm.

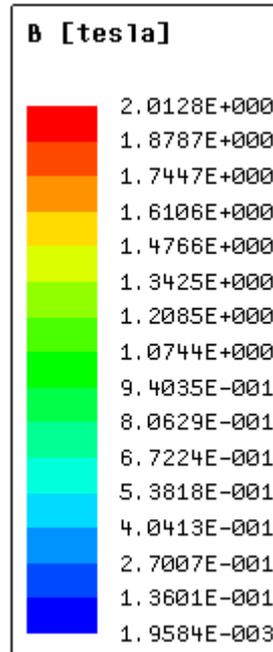


Fig 6. Simulator magnetic field values

5 Analysis of Results

The values reached by the generator are shown in the graphs shown below.

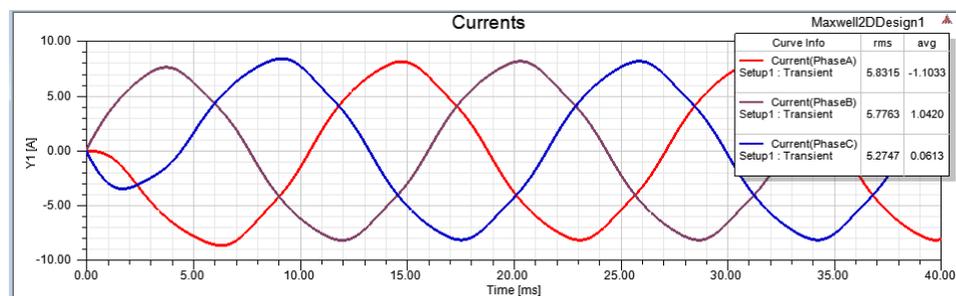


Fig 7. Generator current

In Fig. 7, it can be seen how the current reaches 5V, which is directly proportional to the rotation speed exerted by the rotor core, which in the case is 600 rpm, this current produced by the generator will always depend on the revolutions that the rotor can reach.

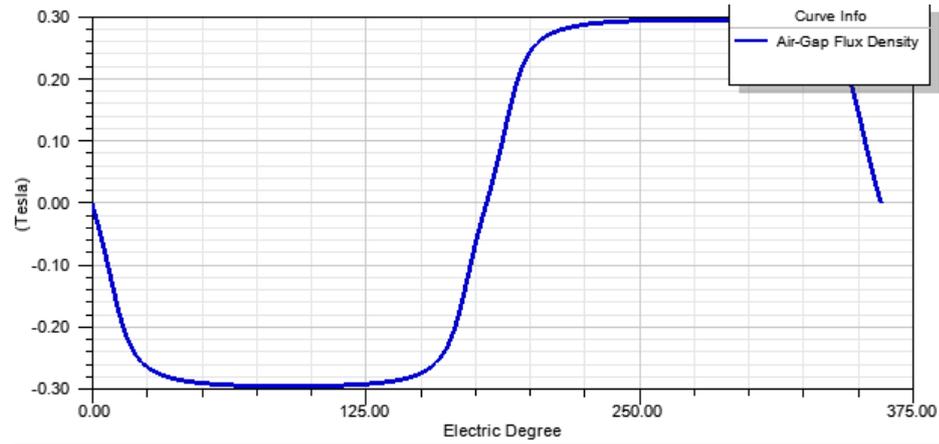


Fig 8. Gap behavior

In Fig. 8 the process of magnetization and demagnetization of the air gap is observed, the realization of this process shows us that the magnetic poles of the magnets are in the correct position, which shows that the generator is working in good conditions.

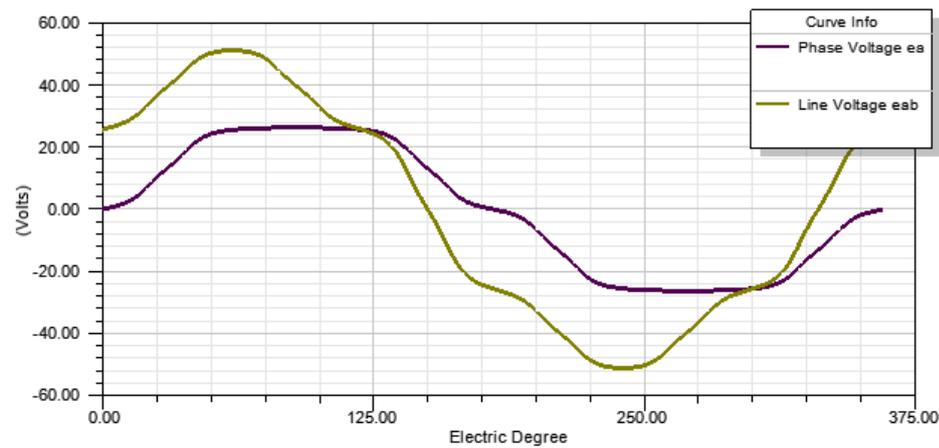


Fig 9. Evolution of the voltage in the generator

Fig. 9 shows the phase voltage and the line voltage produced by the generator in the simulation gives us a maximum of approximately 52V, while the phase voltage reaches approximately 24V, these values must be verified in real operation.

The results obtained in the simulation process may vary based on the needs. Therefore, we can say that to achieve optimum generator performance, the ideal would be to install the generator in an area where the water speed is sufficient to provide, at most, 5A in current and 24V in voltage. These generator features can satisfy loads such as a refrigerator, four light bulbs, and a blender covering 600 watts generated.

6 Conclusions

The design of this generator is mainly to benefit users in rural Ecuador, and give them the opportunity to have access to one of the main basic services, which is electric power.

In the most remote areas it is common to see hydroelectric power plants, since these are used for irrigation of agricultural production, which is the main occupation in these sectors, which is why

cleaning mingas are carried out for their conservation, that is where our design It becomes productive because thanks to this the channel is illuminated and makes cleaning more efficient, making it possible to carry it out also.

Acknowledgments

The authors thank the invaluable contribution of the Technological University Indoamerica in Ambato – Ecuador, for their support in carrying out this research, in the execution of the project “Estudio de Energía Eléctrica de Baja Potencia en los Canales de Riego como Fuentes Hídricas”, project code: 151.100.2018.

7. References

1. Carrillo-Rosero, M., Claudio-Medina, C., & Mayorga-Pardo, A. (2018). Caracterización de un generador de flujo axial para aplicaciones en energía eólica. *Ingenius*, (19), 19-28. <https://doi.org/10.17163/ings.n19.2018.02>
2. Galárraga, R. (2001, 10 marzo). Hidrored - Estado de los Recursos Hídricos en Ecuador - Bases de Datos. Recuperado 1 de octubre de 2019, de <http://tierra.rediris.es/hidrored/basededatos/docu1.html>
3. Mhlambi, B. A., Kusakana, K., & Raath, J. (2018). Voltage and Frequency Control of Isolated Pico-Hydro System. *2018 Open Innovations Conference (OI)*, 246-250. <https://doi.org/10.1109/oi.2018.8535603>
4. Chen, A., Nilssen, R., & Nysveen, A. (2009). Performance comparisons among radial flux, multi-stage axial flux and three-phase transverse flux PM machines for downhole applications. *2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, 1010-1017. <https://doi.org/10.1109/iemdc.2009.5075328>
5. Chen, Y., Fu, W. N., Ho, S. L., & Liu, H. (2014). A Quantitative Comparison Analysis of Radial-Flux, Transverse-Flux, and Axial-Flux Magnetic Gears. *IEEE Transactions on Magnetics*, 50(11), 1-4. <https://doi.org/10.1109/tmag.2014.2327622>
6. Madhavan, R., & Fernandes, B. G. (2012). Comparative analysis of axial flux SRM topologies for electric vehicle application. *2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/pedes.2012.6484421>
7. Bouaziz, O., Jaafar, I., & Ben Ammar, F. (2016). 3D finite element modelling and comparative performance analysis between axial and radial flux machines for micro wind turbine application. *2016 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/cistem.2016.8066804>
8. Pyrhonen, J., Jokinen, T., & Hrabovcova, V. (2008). Design of Rotating Electrical Machines (1.a ed.). Recuperado de https://www.academia.edu/36119607/Design_of_Rotating_Electrical_Machines_By_Juha_Pyrhonen_and_Tapani_Jokinen_and_Valeria_Hrabovcova_1_
9. Faqih, Moh. R., Sutedjo, S., & Wahjono, E. (2019). Design and Fabrication of a Radial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator. *2019 International Electronics Symposium (IES)*, 644-649. <https://doi.org/10.1109/elecsym.2019.8901620>
10. Iracheta Cortez, R., De la Cruz Soto, J., Hernandez, E., & Durante, W. (2019). Evaluating the Broad Range Performance of a Radial-Flux PMSG. *IEEE Latin America Transactions*, 17(11), 1909-1917. <https://doi.org/10.1109/tla.2019.8986431>
11. Ortiz-Garcia, E., & Iracheta-Cortez, R. (2019). Analyzing the Power Quality of a RF-PMSG by Considering Different Types of Windings. *2019 IEEE 39th Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXIX)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/concapanxxxix47272.2019.8977101>
12. Nourifard, S., Hasheminejad, S., & Jami, M. (2019). Design and simulation of a conical rotor axial-radial flux permanent magnet generator of power 1.1kW for micro wind turbines. *Revista Innovaciencia*, 7(2). <https://doi.org/10.15649/2346075X.770>
13. Faiz, J., Valipour, Z., Shokri-Kojouri, M., & Khan, M. A. (2016). Design of a radial flux permanent magnet wind generator with low coercive force magnets. *2016 2nd International*

- Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 1-7. <https://doi.org/10.1109/ieps.2016.7521864>
14. Romañach, A. (2018). Diseño de generador de imanes permanentes para aerogeneradores en áreas marinas. Recuperado 26 de febrero de 2020, de <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/23011>
 15. Johnson, M., Gardner, M. C., Toliyat, H. A., Englebretson, S., Ouyang, W., & Tschida, C. (2017). Design, construction, and analysis of a large scale inner stator radial flux magnetically geared generator for wave energy conversion. *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 5017-5024. <https://doi.org/10.1109/ecce.2017.8096848>
 16. L. Ibañez, “Diseño y Construcción de una mini turbina hidráulica Michell-Banki a instalar. en canales primarios abiertos y generan energía mecánica”, trabajo de fin de grado, Universidad Técnica de Ambato, 2019.

CAPÍTULO III.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Conclusiones

Para el desarrollo del generador se examinó diversos factores para determinar un diseño adecuado e idóneo. Se tomo en cuenta diferentes bibliografías en la que se estudió, las partes de la máquina, el número de polos que son 12, el número de fases las cuales fueron 3, la velocidad de giro de la máquina que fueron de 600 rpm, la geometría magnética de cada uno de los polos en este caso son rectangulares, los devanados que para el caso son 54 y la tensión de salida que es de 12 [V] por fase, los materiales adecuados para la creación del circuito magnético, y se elaboró un dimensionamiento a partir de las ecuaciones esenciales para el diseño de un generador.

Se llevo a cabo un modelo analítico 2D y 3D de análisis de elementos finitos para un generador de imanes permanentes de flujo radial considerando el campo magnético de imán permanente y la ubicación del estator, en consecuencia, de esta manera se obtiene simulación de voltajes, corrientes y la potencia que la máquina genera.

Mediante la comparación de los valores de las simulaciones y los valores experimentales, se pudo apreciar que los datos experimentales difieren de los de simulación debido a que hicieron adaptaciones del rotor y estator al realizar el prototipo, y se obtuvieron datos que discrepan a lo esperado. Al momento de simular el generador sin carga alguna se obtuvo un voltaje de 15,8 [V], mientras que en el experimental es de 7,5 [V] con una diferencia del 50 % aproximadamente ya que por la adaptación el voltaje descendió; se colocó también una carga de 5,1 Ω al momento de la simulación y nos dio un voltaje de 15,3 [V] con corriente 4,15 [A] y en el experimental 7,35 [V] con una corriente de 2,41 [A], a continuación una carga de 10 Ω que al momento de la simulación nos dio un voltaje de 14,7 [V] con corriente de 3,4 [A] y en el experimental de 7,25 [V] con una corriente de 2,13 [A], continuando con las pruebas se colocó una carga de 22 Ω y el voltaje simulado fue de 14,1 [V] con corriente de 2,65 [A] y el experimental de 7,25 [V] con una corriente de 1,63 [A] también se realizó las pruebas con una carga de 39

Ω en el cual el voltaje simulado fue 14,1 [V] con corriente de 1,9 [A] y el experimental fue 6,6 [V] con corriente de 1,1 [A] , finalmente se colocó una carga 47 Ω donde su voltaje simulado fue de 13,5 [V] con corriente de 1,15 [A] y el experimental de 6,6 [A] con corriente de 1 [A].

La plataforma de monitorización se construyó con la finalidad de monitorear el voltaje y la corriente de una fase, y de esta manera estimar el valor de la potencia total que suministra el generador.

3.2 Recomendaciones

La manipulación de los imanes permanentes debe realizarse con extremo cuidado debido a que su alto grado magnético podría provocar lesiones graves, así mismo al momento de montar los rotores magnéticos puede ser muy peligros si no se toman las precauciones necesarias.

A pesar de su alto grado de magnetización los imanes son extremadamente delicados por lo que si no se los trata con cuidado estos podrían llegarse a romper fácilmente, lo que los volverá inutilizables para esta aplicación.

Al momento de adherir los imanes al rotor se debe hacer en un periodo aproximado de 3 días ya que los mismos por su campo magnético tan alto se atraen fuertemente, y no permanecen donde deben ser adheridos, estos se deben colocar en un ángulo de 45° cada uno en el primer día se colocarán 4 imanes, al siguiente 4 más y al último día los 4 restantes.

El espacio entre los imanes permanentes del rotor y las bobinas del estator, denominado entrehierro, fue de 1,2 [mm] lo cual ayudó a que la densidad de flujo magnético sea mucho mayor lo que permite que aumente la inducción en las bobinas por lo que se puede generar mayor cantidad de voltaje, mientras menor sea el espacio, mayor será la cantidad de energía que puede generar.

Al momento de la construcción del generador es indispensable que tanto el rotor como el generador sean de hierro ya que sin este material el generador pierde energía y no se produce la corriente y voltaje adecuado.

En la implementación del prototipo, cada uno de los polos magnéticos tiene un ancho de 10[mm] lo cual causó una fuga en el flujo magnético, por lo tanto, se recomienda un imán permanente de mayor ancho, para obtener mayores potencias.

C. MATERIALES DE REFERENCIA

- [1] M. Carrillo, C. Claudio y A. Mayorga, "Caracterización de un generador de flujo axial para aplicaciones en energía eólica," *Ingenius*, n° 19, pp. 19-28, 2018.
- [2] R. Galárraga, "HidroRed," Departamento de Ciencias del Agua Escuela Politécnica Nacional, 10 Marzo 2001. [online]. Available: <http://tierra.rediris.es/hidrored/basededatos/docu1.html>.
- [3] B. Mhlambi y Kusakana, "Voltage and Frequency Control of Isolated Pico-hydro," *IEEE*, 2018.
- [4] A. Chen, Nilssen y Nysveen, "Performance Comparisons Among Radial-Flux, Multistage Axial-Flux, and Three-Phase Transverse-Flux PM Machines for Downhole Applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. 779-789, 2017.
- [5] Y. Chen, W. N. Fu, S. L. Ho and H. Liu, "A Quantitative Comparison Analysis of Radial-Flux, Transverse-Flux, and Axial-Flux Magnetic Gears," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 11, pp. 1-4, Nov. 2014, Art no. 8104604, doi: 10.1109/TMAG.2014.2327622.
- [6] R. Madhavan and B. G. Fernandes, "Comparative analysis of axial flux SRM topologies for electric vehicle application," 2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Bengaluru, 2012, pp. 1-6, doi: 10.1109/PEDES.2012.6484421.
- [7] O. Bouaziz, I. Jaafar and F. Ben Ammar, "3D finite element modelling and comparative performance analysis between axial and radial flux machines for

- micro wind turbine application," 2016 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), Marrakech, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/CISTEM.2016.8066804.
- [8] J. Pyrhönen, T. Jokinen y V. Hrabovcová, "Desing of rotating electrical machines," Reino Unido: John Wiley & Sons , 2014
- [9] M. R. Faqih, S. Sutedjo and E. Wahjono, "Design and Fabrication of a Radial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator," 2019 International Electronics Symposium (IES), Surabaya, Indonesia, 2019, pp. 644-649, doi: 10.1109/ELECSYM.2019.8901620.
- [10] R. Iracheta Cortez, J. De la Cruz Soto, E. Hernandez and W. Durante, "Evaluating the Broad Range Performance of a Radial-Flux PMSG," in IEEE Latin America Transactions, vol. 17, no. 11, pp. 1909-1917, November 2019, doi: 10.1109/TLA.2019.8986431.
- [11] E. Ortiz-Garcia and R. Iracheta-Cortez, "Analyzing the Power Quality of a RF-PMSG by Considering Different Types of Windings," 2019 IEEE 39th Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXIX), Guatemala City, Guatemala, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/CONCAPANXXXIX47272.2019.8977101.
- [12] S. Nourifard, S. Hasheminejad and M. Jami, "Design and simulation of a conical rotor axial-radial flux permanent magnet generator of power 1.1 kW for micro wind turbines," 2019 Revista Innovaciencia, 2019, vol. 7, no 2.
- [13] H. Prasetijo, W. Winasis, P. Priswanto and D. Hermawan, "Design of a single-phase radial flux permanent magnet generator with variation of the stator diameter," in Jurnal Teknologi, 2019, vol. 81, no 4.
- [14] A Romañach "Diseño de generador de imanes permanentes para aerogeneradores en áreas marinas," 2018, unpublished.
- [15] M. Johnson, M. C. Gardner, H. A. Toliyat, S. Englebretson, W. Ouyang and C. Tschida, "Design, construction, and analysis of a large scale inner stator radial flux magnetically geared generator for wave energy conversion," 2017 IEEE

Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Cincinnati, OH, 2017, pp. 5017-5024, doi: 10.1109/ECCE.2017.8096848.

[16] M. Rodríguez y M. León, «Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador,» 16 Agosto 2016. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/13147/1/UPS-GT001716.pdf>.

[17] J. Guerrero, «PlusElectric,» 21 Septiembre 2014. [En línea]. Available: <https://pluselectric.wordpress.com/2014/09/21/arduino-uno-especificaciones-y-caracteristicas/>.

[18] «Raspberry Shop,» [En línea]. Available: <https://www.raspberrypi-shop.com/raspberry-pi-3.php>.

[19] «Redes Zone,» 18 Agosto 2019. [En línea]. Available: <https://www.redeszone.net/2019/08/18/controla-ordenador-forma-remota-vnc/>.

[20] «Embtronik,» [En línea]. Available: <https://www.embtronik.com/producto/sensor-de-corriente-ac712/>.

[21] R. Galárraga, «HidroRed,» Departamento de Ciencias del Agua Escuela Politécnica Nacional, 10 Marzo 2001. [En línea]. Available: <http://tierra.rediris.es/hidrored/basededatos/docu1.html>. [Último acceso: 1 Octubre 2019].

[22] J. Pyrhönen, T. Jokinen y V. Hrabovcová, Desing of rotating electrical machines, Reino Unido: John Wiley & Sons , 2014.

ANEXOS

ANEXO 1 .- RESOLUCIÓN ECUACIONES DE DIMENSIONAMIENTO

Pares de polos

$$p = \frac{60 * f}{n}$$

$$p = \frac{60 * 60[\text{Hz}]}{600[\text{rpm}]}$$

$$\boxed{p = 12}$$

Energía Máxima.

$$E_M = \frac{(B - H)_{\max} * V * n_{\text{PMGS}}}{2}$$

$$E_M = \frac{422 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right] * ((0,1 * 0,02 * 0,006)) [\text{m}^3] * 600[\text{rpm}]}{2}$$

$$\boxed{E_M = 18,230 [\text{J}]}$$

Velocidad Angular de rotación.

$$\omega_{\text{PMGS}} = \frac{2 * \pi * f}{p}$$

$$\omega_{\text{PMGS}} = \frac{2 * \pi * 60[\text{Hz}]}{12}$$

$$\boxed{\omega_{\text{PMGS}} = 62,83185307 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]}$$

Potencia Máxima.

$$P = E_M * \omega_{\text{PMGS}}$$

$$P = 18,230 [\text{J}] * 62,83185307 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

$$\boxed{P = 1145,450 [\text{W}]}$$

Número de ranuras.

$$Q_s = 2 * p * q_s * q$$

$$Q_s = 2 * 6 * 1 * 3$$

$$\boxed{Q_s = 36}$$

Total, número de bobinas

$$G = p * q$$

$$G = 6 * 3$$

$$\boxed{G = 18}$$

Número de bobinas por fase

$$\boxed{G_f = 6}$$

Número de bobinas por grupo.

$$U = \frac{Q_s}{2 * p * q}$$

$$U = \frac{36}{2 * 6 * 3}$$

$$\boxed{U = 1}$$

El espacio entre bobinas conectadas viene dado por:

$$m = (q - 1) * U$$

$$m = (3 - 1) * 1$$

$$\boxed{m = 2}$$

Diámetro interno del núcleo del estator

$$D_{si} = \sqrt[3]{\frac{P_{nom}}{X * C_{mec} * n_{syn}}}$$

$$D_{si} = \sqrt[3]{\frac{1145,450 [W]}{\left(\frac{\pi}{4 * 6} \sqrt{6}\right) * (228,63 \left[\frac{kW}{m^3}\right]) * \frac{60}{6}}}$$

$$\boxed{D_{si} = 0,140 [m] = 140 [mm]}$$

Relación entre la longitud equivalente de la máquina y el diámetro del entrehierro.

Tabla 12. Relaciones l/D , típicas para diferentes máquinas eléctricas [8]

Máquinas Asíncronas	Máquinas Síncronas $p > 1$	Máquinas Síncronas $p = 1$	Máquinas DC
$x \approx \frac{\pi}{2 * p} \sqrt[3]{p}$	$x \approx \frac{\pi}{4 * p} \sqrt{p}$	$x = 1 - 3$	$x \approx \frac{0,8 - 1,6}{p}$

$$C_{mec} = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} K_w A \hat{B}_\delta$$

$$C_{mec} = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} * 1 * \left(36 \left[\frac{kA}{m} \right] \right) * (0,91 [T])$$

$$C_{mec} = 228,63 \left[\frac{kW}{m^3} \right]$$

Entrehierro o airgap.

$$\delta = \gamma \tau_p \frac{A}{\hat{B}_\delta}$$

$$\delta = (7 \times 10^{-7}) * (36,652 \text{ mm}) * \frac{0,99}{\hat{B}_\delta}$$

$$\delta = 1,2 [\text{mm}]$$

El paso polar viene dado por:

$$\tau_p = \frac{\pi D}{2p}$$

$$\tau_p = 36,652 [\text{mm}]$$

Diámetro externo del núcleo estator

$$D_{se} = \frac{D_{si}}{0,63}$$

$$D_{se} = \frac{140 [\text{mm}]}{0,63}$$

$$D_{se} = 222[\text{mm}]$$

Rotor

$$D_{re} = D_{si} - 2 * \delta$$

$$D_{re} = 140 [\text{mm}] - 2 * 1,2[\text{mm}]$$

$$D_{re} = 137 [\text{mm}]$$

Diámetro exterior del yugo del rotor

$$D_{ryi} = D_{re} - 2 * e$$

$$D_{ryi} = 137 [\text{mm}] - 2 * 0,006[\text{mm}]$$

$$D_{ryi} = 114,620 [\text{mm}]$$

Número de vueltas o espiras

$$W_s = \frac{\sqrt{2} * E_m}{2\pi f * k_w * \hat{B}_\delta * \tau_p * l_s * \alpha_i}$$

$$W_s = \frac{\sqrt{2} * 30,484 \text{ V}}{2\pi(60) * k_w * 0,91 \text{ T} * 36,652 \text{ mm} * 1,2 \text{ mm} * 0,347 \text{ mm}}$$

$$W_s = 164,915 \text{ vueltas}$$

Área de la ranura

$$S_{Cus} = \frac{Z_Q S_C}{K_{Cu}}$$

$$S_{Cus} = \frac{54,972 * 0,8 \text{ mm}^2}{0,62}$$

$$S_{Cus} = 71,681 \text{ mm}^2$$

Ancho del diente

$$b_{ds} = \frac{l' \tau_u \hat{B}_\delta}{k_{Fe} (l_s - n_v b_n) \hat{B}'_d} + 0,1$$

$$b_{ds} = 6,6 \text{ mm}$$

Paso de ranura es:

$$\tau u = \pi D_{si} / Q_s$$

$$\tau u = \pi * 140 \text{ [mm]} / 3$$

$$\boxed{\tau u = 6,6 \text{ [mm]}}$$

Apertura de ranura

$$b_1 = \tau u - b_{ts}$$

$$b_1 = 6,6 \text{ [mm]} - 8,8 \text{ [mm]}$$

$$\boxed{b_1 = 3,2 \text{ mm}}$$

Ancho superior del diente

$$b_{ts} = \tau u - 3,5$$

$$\boxed{b_{ts} = 8,8 \approx 9 \text{ mm}}$$

Profundidad 1 de la ranura

$$h_1 = 0,125 \tau u$$

$$h_1 = 0,125 * 6,6 \text{ [mm]}$$

$$\boxed{h_1 = 1,5 \text{ mm}}$$

Ancho interior 4 de la ranura

$$B_{4c} = \frac{\pi(D_{si} + 2h_2)}{Q_s} - b_{ts}$$

$$B_{4c} = \frac{\pi(140 \text{ [mm]} + 2(0,5 \text{ mm}))}{36} - 9 \text{ mm}$$

$$\boxed{B_{4c} = 5,705 \text{ [mm]}}$$

Profundidad 5 de la ranura

$$b_{5c} = \frac{2\pi h_5}{Q_s} + b_{4c}$$

$$b_{5c} = \frac{2\pi * 11,969 \text{ [mm]}}{36} + 5,705 \text{ [mm]}$$

$$\boxed{b_{5c} = 8,1 \approx 8 \text{ mm}}$$

$$SC_{us} = \frac{(b_{4c} + b_{5c})h_5}{2} + \frac{\pi b_{5c}}{8}$$

$$SC_{us} = \frac{(5,705 [mm] + 8,1 [mm]) * 11,969 [mm]}{2} + \frac{\pi * 8,1 [mm]}{8}$$

$$\boxed{SC_{us} = 110,365 \text{ mm}^2}$$

Profundidad 4 de la ranura

$$h_4 = h_5 + \frac{b_{5c}}{2}$$

$$h_4 = 11,969 [mm] + \frac{8,1 [m]}{2}$$

$$\boxed{h_4 = 16,015 [mm]}$$

Profundidad y área total de la ranura

$$h_T = h_s = h_1 + h_2 + h_4$$

$$h_T = h_s = 1,5 [mm] + 0,485 [mm] + 16,015 [mm]$$

$$\boxed{h_T = h_s = 18 [mm]}$$

TABLA ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL GENERADOR

 GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES DE FLUJO RADIAL 		
Descripción	Valor	Unidad
Tipo de Generador	Imán permanente trifásico	-
Velocidad	600	rpm
Potencia	2	KW
Número de ranuras	36	Units
Número de polos	12	Units
Diámetro externo del rotor	138.8	mm
Diámetro externo del estator	222	mm
Entrehierro	1.2	mm
Diámetro interno del estator	140	mm
Profundidad de la ranura	18	mm
Ancho de diente	6.6	mm
Tipo de imán	NdFeb N52SH	
Numero de bobinas	18	Units

ANEXO 2.- ENTORNO MATLAB

Programación

Pares de Polos

```
function ParesPolos_Callback(hObject, eventdata, handles)
%FUNCION
% Creación de variables
frecuencia = str2double (get(handles.frec, 'string'));
RPM = str2double (get(handles.rpm, 'string'));
%Calculo de los pares de polos
resul = ((60*frecuencia)/RPM);
resul_1=resul*2;
set (handles.res , 'string', num2str(resul));
set (handles.polos , 'string', num2str(resul_1));
%END FUNCION
```

Velocidad Angular

```
% --- Executes on button press in velocidad.
function velocidad_Callback(hObject, eventdata, handles)
%FUNCION
% Creación de variables
frecuencia = str2double (get(handles.frec, 'string'));
RPM = str2double (get(handles.rpm, 'string'));
%Calculo de los pares de polos
resul = ((2*pi*frecuencia)/(str2double(get(handles.res,
'string'))));
set (handles.velocidad_angular , 'string', num2str(resul));
%END FUNCION
```

Potencia Nominal

```
% --- Executes on button press in potencia.
function potencia_Callback(hObject, eventdata, handles)

%FUNCION
% Creacion de variables
frecuencia = str2double (get(handles.frec, 'string'));
RPM = str2double (get(handles.rpm, 'string'));

%FUNCION DE ENRGIA MAXIMA PRODUCIDA POR LOS IMANES
EnerIman=422;
VolIman=1.20e-5;
Energia_Maxima=((EnerIman*VolIman*RPM)/2)*12);

%Calculo de potencia nominal
PotenciaNominal =
(Energia_Maxima*(str2double(get(handles.velocidad_angular,
'string'))));
PotenciaFinal=num2str(PotenciaNominal);
set (handles.pote , 'string', PotenciaFinal);
```

Número de Ranuras

```

% --- Executes on button press in num_ranuras.
function num_ranuras_Callback(hObject, eventdata, handles)
%FUNCION
% Creacion de variables
Numero_de_ranuras_por_polo_y_fase=1;
NumFases=3;
parpolo=str2double (get(handles.res, 'string'));

%Calculo de numero de ranuras
NumRanuras = (2*Numero_de_ranuras_por_polo_y_fase*NumFases*parpolo);
set (handles.ranuras , 'string', num2str(NumRanuras));
%END FUNCION

```

Número de bobinas

```

% --- Executes on button press in bobinado.
function bobinado_Callback(hObject, eventdata, handles)

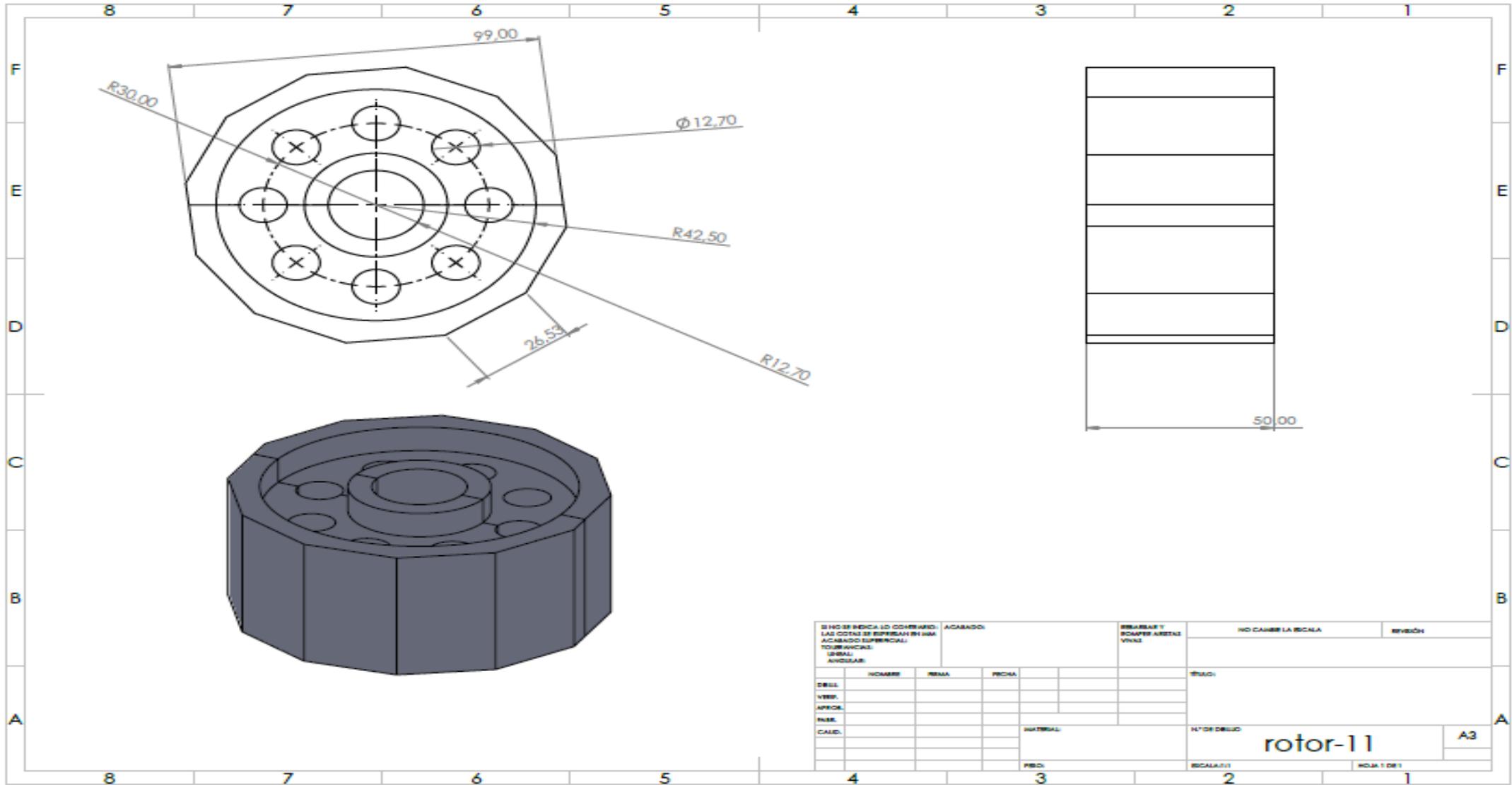
%FUNCION
% Creacion de variables
bobina_factor_paso=1;% es 1 segun la bibliografia
Numero_de_ranuras_por_polo_y_fase=1;
%parpolo=str2double (get(handles.res, 'string'));

%Calculo de factor de distribucion
Factor_dis=((sin((1/6)*pi))/((Numero_de_ranuras_por_polo_y_fase)*sin
((1/6)*pi)));

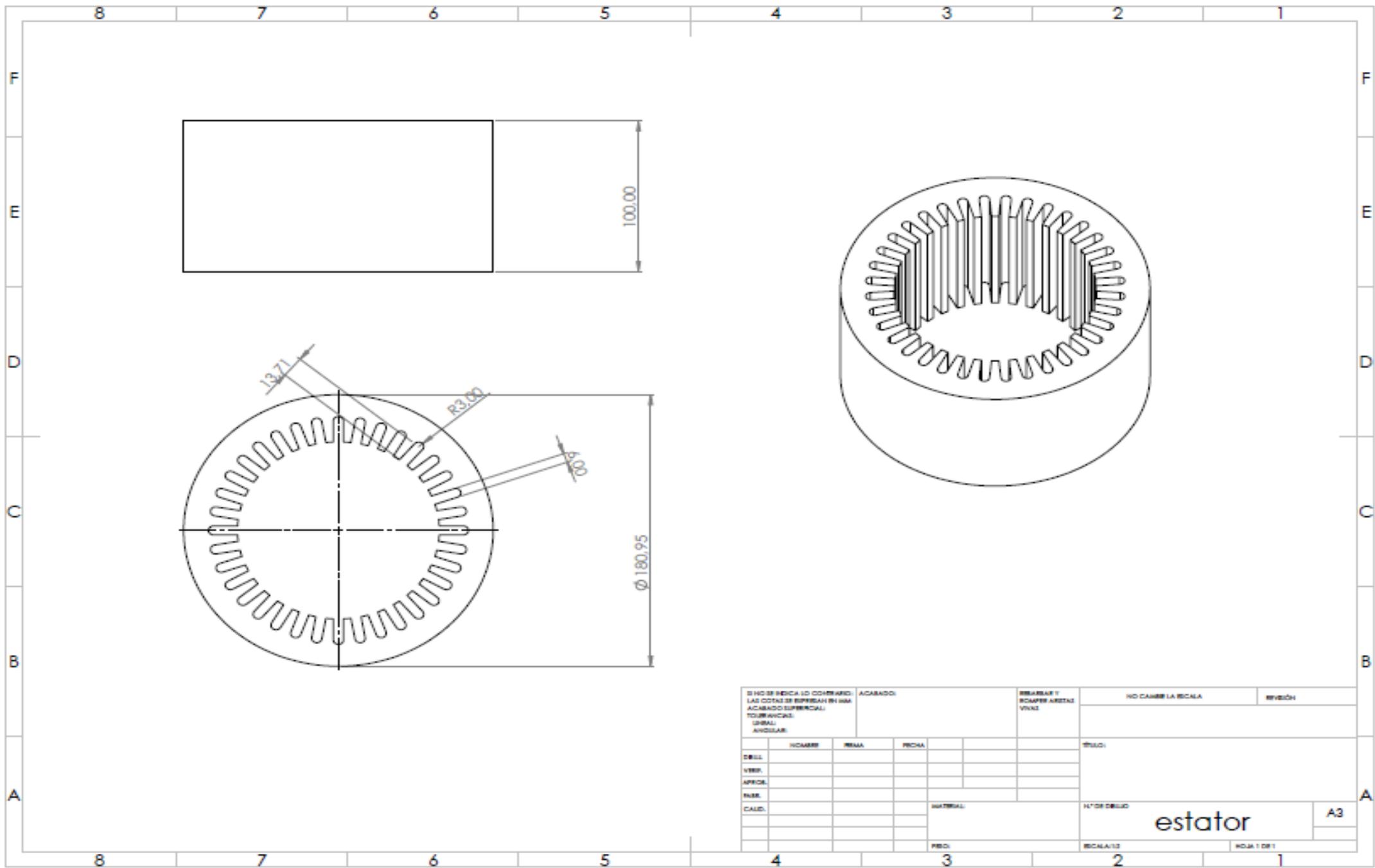
%Calculo de factor de bobinado
Factor_bob = (Numero_de_ranuras_por_polo_y_fase*bobina_factor_paso);
set (handles.facbob , 'string', num2str(Factor_bob));
%END FUNCION

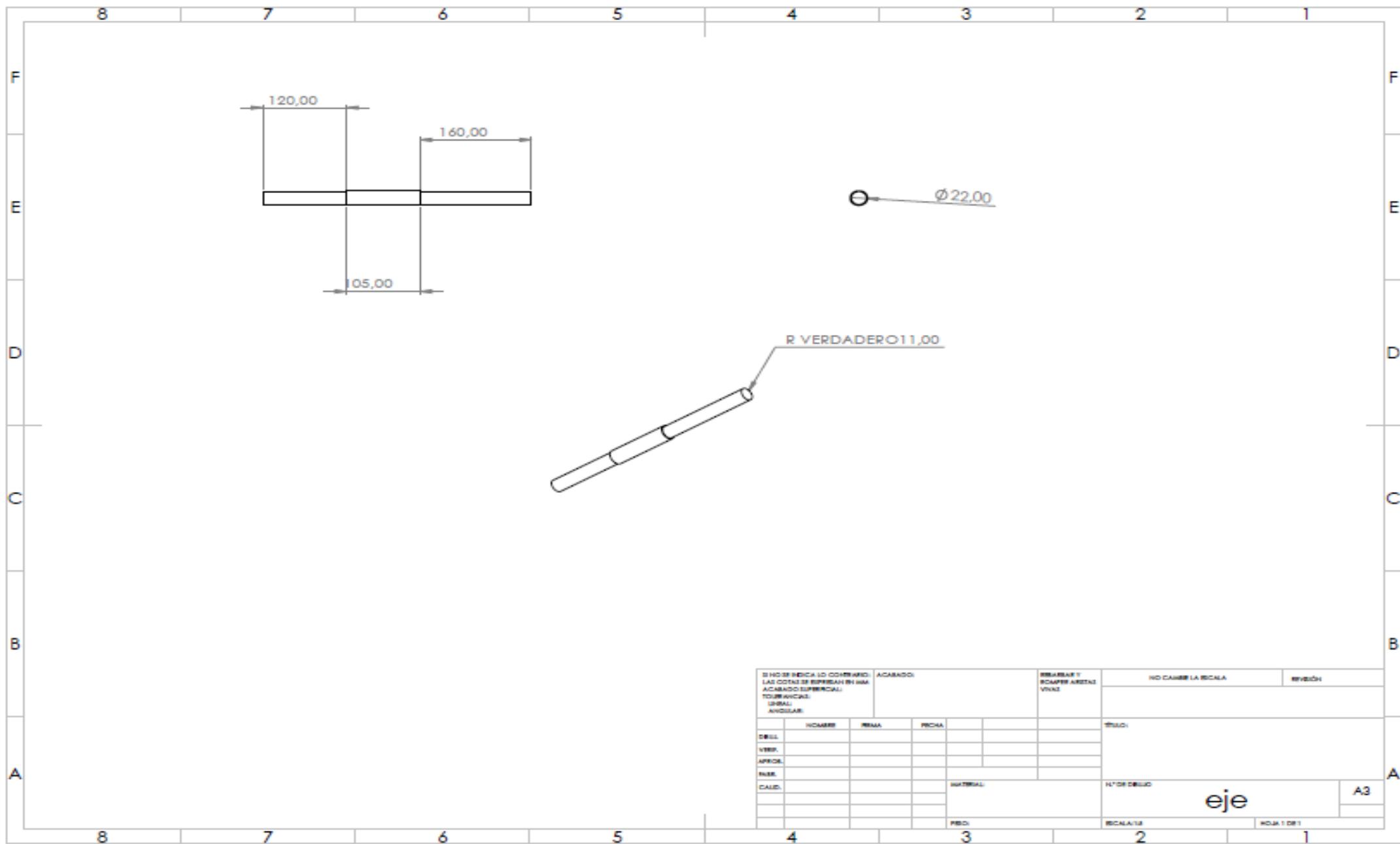
```

ANEXO 3.- PLANOS SOLIDWORK

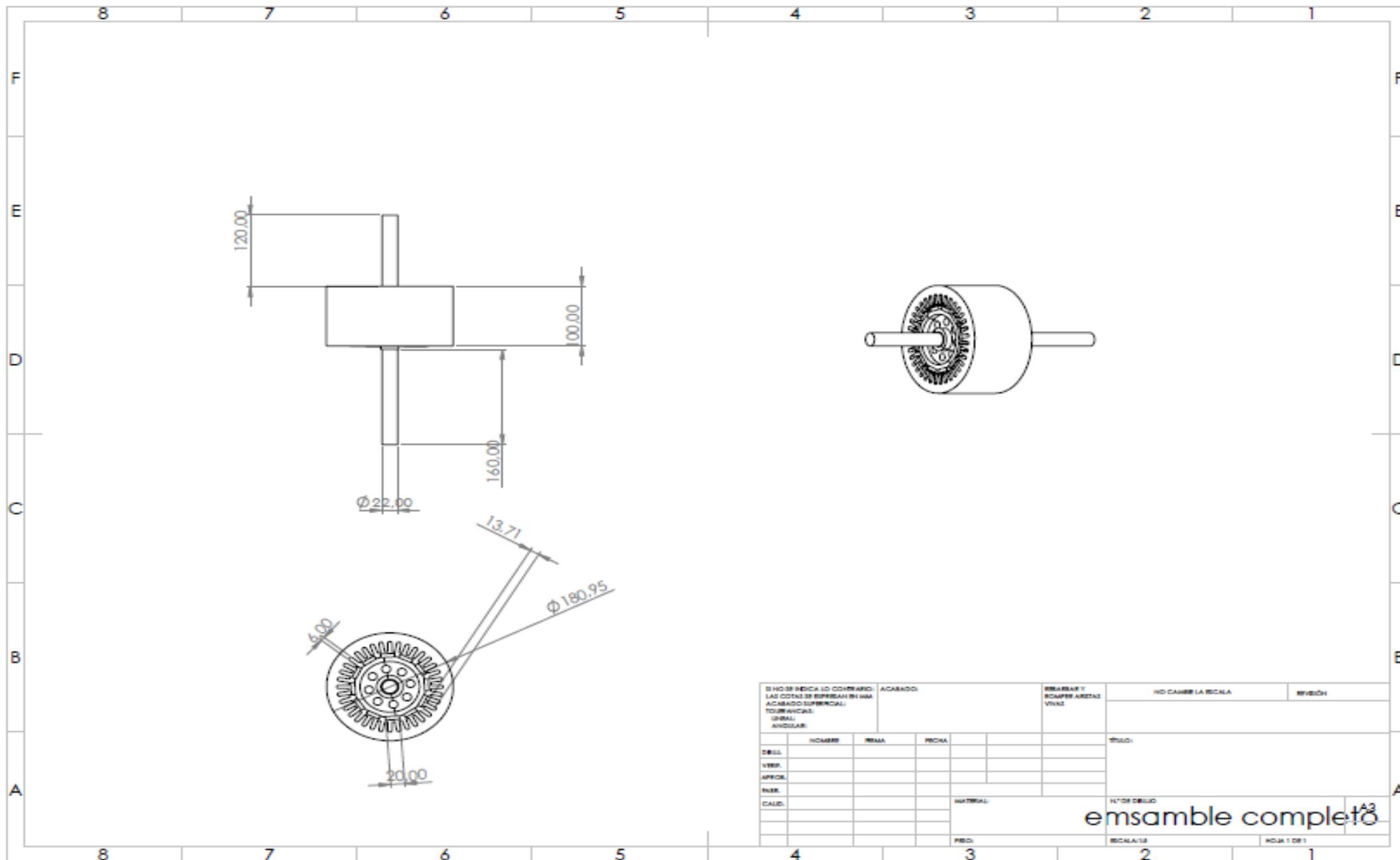


SI NO SE INDICA LO CONTRARIO, LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM. ACABADO SUPERFICIAL: TODAS ANCHURAS: LINEAS ANGULARES:				ACABADO:		REBARBAR Y ESCAPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
DISEÑO				NOMBRE		FECHA		MATERIAL		NÚMERO DE DIBUJO	
VERIF.				REVISIÓN		FECHA		PROYECTO		rotor-11	
APROB.				FECHA		FECHA		ESCALA		A3	
CALC.				FECHA		FECHA		ESCALA		HOJA 1 DE 1	





SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE SUPLEN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TORNEADO: LINEAL: ANGULAR:	ACABADO:			REBARBAT ESCAFES ARISTAS VIVAS	NO CAMBIA LA ESCALA	REVISION
DISEÑ: VERIF: APROB: FUSE: CALIF:	NOMBRE	FECHA	FECHA		TÍTULO:	
					N° DE DIBUJO	
					eje	
					ESCALA: 1/1	HOJA 1 DE 1
						A3



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS DE ESPESOR EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TORNEADAS: GENERAL: ANILLAS:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE DISEÑO VERIFICACIÓN APROBACIÓN FECHA CALIDAD		FECHA MATERIAL PESO	TÍTULO: N° DE DIBUJO ESCALA 1:1 HOJA 1 DE 1		
		ensamble completo			A3

ANEXO 4.- ENTORNO DE RASPBERRY PI

Programación Arduino para captar los valores de voltaje y corriente

/ 0- General */*

```
int decimalPrecision = 1;           // decimal places for large values such as voltage, wattage,
apparent power, and frequency shown in LED Display & Serial Monitor

// decimal places for small values such as current, power factor and
accumulate energy will be decimal places x 2.
```

/ 1- AC Voltage Measurement */*

```
int VoltageAnalogInputPin = A0;     // Which pin to measure voltage Value

float voltageSampleRead = 0;        /* to read the value of a sample*/

float voltageLastSample = 0;        /* to count time for each sample. Technically 1 milli second
1 sample is taken */

float voltageSampleSum = 0;         /* accumulation of sample readings */

float voltageSampleCount = 0;       /* to count number of sample. */

float voltageMean ;                /* to calculate the average value from all samples*/

float RMSVoltageMean ;             /* square roof of voltageMean*/
```

*/*1.1 Offset AC Voltage */*

```
float voltageOffset1 = 0;          // to Offset deviation and accuracy. Offset any fake current when
no current operates.

float voltageOffset2 = 0;          // to offset value due to calculation error from squared and square
root.
```

/ 2- AC Current Measurement */*

```
int CurrentAnalogInputPin = A1;    // Which pin to measure Current Value

float mVperAmpValue = 31.25;       // If using ACS712 current module : for 5A module key
in 185, for 20A module key in 100, for 30A module key in 66

// If using "Hall-Effect" Current Transformer, key in value using
this formula: mVperAmp = maximum voltage range (in milli volt) / current rating of CT

/* For example, a 20A Hall-Effect Current Transformer rated at
20A, 2.5V +/- 0.625V, mVperAmp will be 625 mV / 20A = 31.25mV/A */

float currentSampleRead = 0;       /* to read the value of a sample*/

float currentLastSample = 0;       /* to count time for each sample. Technically 1 milli second
1 sample is taken */

float currentSampleSum = 0;        /* accumulation of sample readings */

float currentSampleCount = 0;      /* to count number of sample. */

float currentMean ;                /* to calculate the average value from all samples*/

float RMSCurrentMean =0 ;          /* square roof of currentMean*/

float FinalRMSCurrent ;           /* the final RMS current reading*/
```

/*2.1 Offset AC Current */

float currentOffset1 = 0; // to Offset deviation and accuracy. Offset any fake current when no current operates.

float currentOffset2 = 0; // to offset value due to calculation error from squared and square root.

/* 5- frequency measurement */

unsigned long startMicros; // start counting time for frequency (in micro seconds)*/

unsigned long currentMicros; // current counting time for frequency (in micro seconds) */

int expectedFrequency = 54; // This is to collect number of samples. for 50Hz use 46 or below. For 60Hz use 54 or below.

// Use exact number of frequency number (50/60) will have calculation error

float frequencySampleCount = 0; // count the number of sample, 1 sample equivalent to 1 cycle */

float frequency = 0; // shows the value of frequency*/

float a; // use for calculation purpose*/

float switch01 = 9; // use for switching function */

float vAnalogRead = 0; // read analog value, highly recommend AC voltage sensor

// Automatically bonded with "VoltageAnalogInputPin = A2" reading

void setup() //codes to run once */

{

/ 0- General */*

Serial.begin(115200); // to display readings in Serial Monitor at 9600 baud rates */

/ 5- frequency measurement */*

startMicros = micros(); // Start counting time for frequency measurement */

}

void loop() //codes to run again and again */

{

/ 1- AC Voltage Measurement */*

if(millis() >= voltageLastSample + 1) // every 1 milli second taking 1 reading */

{

voltageSampleRead = 2*(analogRead(VoltageAnalogInputPin)- 512) + voltageOffset1; // read the sample value */

voltageSampleSum = voltageSampleSum + sq(voltageSampleRead) ; // accumulate value with older sample readings*/

```

voltageSampleCount = voltageSampleCount + 1;    /* to move on to the next following count */
voltageLastSample = millis() ;    /* to reset the time again so that next cycle can start again*/
    }

if(voltageSampleCount == 1000)    /* after 1000 count or 1000 milli seconds (1 second), do the
calculation and display value*/
{
voltageMean = voltageSampleSum/voltageSampleCount;    /* calculate average
value of all sample readings taken*/

RMSVoltageMean = sqrt(voltageMean)+ voltageOffset2;    /* square root of the
average value*/

Serial.print(RMSVoltageMean,decimalPrecision);

Serial.print(',');

//Serial.print(" V  ");

voltageSampleSum =0;    /* to reset accumulate sample values for the next cycle */
voltageSampleCount=0;    /* to reset number of sample for the next cycle */
    }

/* 2- AC Current Measurement */

if(millis() >= currentLastSample + 1)    /* every 1 milli second taking 1 reading */
    {

currentSampleRead = analogRead(CurrentAnalogInputPin)-512 + currentOffset1;    /* read the
sample value */

currentSampleSum = currentSampleSum + sq(currentSampleRead) ;    /* accumulate value
with older sample readings*/

currentSampleCount = currentSampleCount + 1;    /* to move on to the next
following count */

currentLastSample = millis();    /* to reset the time again so that next
cycle can start again*/
    }

if(currentSampleCount == 1000)    /* after 1000 count or 1000 milli
seconds (1 second), do the calculation and display value*/
{
currentMean = currentSampleSum/currentSampleCount;    /* calculate average
value of all sample readings taken*/

RMSCurrentMean = sqrt(currentMean)+currentOffset2 ;    /* square root of the
average value*/

FinalRMSCurrent = (((RMSCurrentMean /1024) *5000) /mVperAmpValue);    /* calculate
the final RMS current*/

Serial.print(FinalRMSCurrent,decimalPrecision*2);

```

```

//Serial.print(" A ");
Serial.print(',');
currentSampleSum =0;    /* to reset accumulate sample values for the next cycle */
currentSampleCount=0;  /* to reset number of sample for the next cycle */
float P = FinalRMSCurrent * RMSVoltageMean; // P = I * V watts
Serial.println(P,2);
//Serial.println("W ");
}
}

```

Programacion NODEMCU para enviar a la base de datos

```

#include <ESP8266WiFi.h>
#include <WiFiClient.h>
#include <SPI.h>

#define DEBUG_ARRAY(a) {for (int index = 0; index < sizeof(a) / sizeof(a[0]); index++)
{Serial.print(a[index]); Serial.print('\t');} Serial.println();};

String str = "";
const char separator = ',';
const int dataLength = 8;
float data[dataLength];

//-----VARIABLES GLOBALES-----
int contconexion = 0;
int cont = 0, dato_rx = 0, valor;
// la ip de mi red local
const char *ssid = "DAVID1";
const char *password = "ECUADORQUERIDO.";
WiFiServer server(80);
// la ip de mi nodem
IPAddress ip(192, 168, 100, 229);    // IP address of the server
IPAddress gateway(192, 168, 100, 1); // gateway of your network
IPAddress subnet(255, 255, 255, 0); // subnet mask of your network

```

```

unsigned long previousMillis = 0;

// aqui va la ip de la raspberry
char host[48];

String strhost = "192.168.100.9";

String strurl = "/envioDataBas.php"; // DENTRO DE LA CARPETA HTML ESTA EL ARCHIVO
ENVIOdATABASE ESO PONGO EN ESA LINEA

String chipid = "";

String valueString = String(5);

//////////Función para Enviar Datos a la Base de Datos SQL //////////
// esto es va igual en todos los programas
String enviardatos(String datos) {
    String linea = "error";
    WiFiClient client;
    strhost.toCharArray(host, 49);
    if (!client.connect(host, 80)) {
        Serial.println("Fallo de conexion");
        return linea;
    }
    client.print(String("POST ") + strurl + " HTTP/1.1" + "\r\n" +
        "Host: " + strhost + "\r\n" +
        "Accept: */*" + "\r\n" +
        "Content-Length: " + datos.length() + "\r\n" +
        "Content-Type: application/x-www-form-urlencoded" + "\r\n" +
        "\r\n" + datos);
}

void setup() {
    // Inicia Serial
    Serial.begin(115200);

    // Conexión WIFI
    WiFi.config(ip, gateway, subnet);
    WiFi.begin(ssid, password);
}

```

```

while (WiFi.status() != WL_CONNECTED and contconexion < 50) { //Cuenta hasta 50 si no se puede
conectar lo cancela

    server.begin();

    delay(500);

}

}

//-----LOOP-----

void loop() {

if (Serial.available())

{

    str = Serial.readStringUntil('\n');

    for (int i = 0; i < dataLength ; i++)

    {

        int index = str.indexOf(separator);

        data[i] = str.substring(0, index).toFloat();

        str = str.substring(index + 1);

    }

    //DEBUG_ARRAY(data);

}

WiFiClient client = server.available();

if (Serial.available())

{

    str = Serial.readStringUntil('\n');

    for (int i = 0; i < dataLength ; i++)

    {

        int index = str.indexOf(separator);

        data[i] = str.substring(0, index).toFloat();

        str = str.substring(index + 1);

    }

}

Serial.print(data[0]); //voltaje data[1]

Serial.print(',');

Serial.println(data[1]); //corriente data [2]

enviardatos("&Voltaje=" + String(data[0]) + "&Corriente=" + String(data[1]));

```

```
delay(200); }
```

Programación Raspberrypi

Archivo index

```
<!DOCTYPE HTML>
<html xmlns="http://www.w3.org/1999/xhtml">
<head runat="server">
<meta http-equiv="Content-Type" content="text/html; charset=utf-8">
  <title>Lectura del Prototipo</title>
  <script src="https://ajax.googleapis.com/ajax/libs/jquery/2.2.0/jquery.min.js"></script>
  <script type="text/javascript" src="https://www.gstatic.com/charts/loader.js"></script>
  <script src="http://code.highcharts.com/highcharts.js"></script>
  <script type="text/javascript">
  <!-- Caracteristicas de los Medidores -->
google.charts.load('current', {'packages':['gauge']});
google.charts.setOnLoadCallback(drawChart);
function drawChart() {
  var data = google.visualization.arrayToDataTable([
    ['Label', 'Value'],
    ['Voltaje [V]', 0],
    ['Corriente [A]', 0],
    ['Potencia [W]', 0]
  ]);
  var options = {
    width: 450, height: 450,
    redFrom: 70, redTo: 100,
    yellowFrom:30, yellowTo: 70,
    minorTicks: 15, max: 100
  };
  var chart = new google.visualization.Gauge(document.getElementById('Medidores'));
  chart.draw(data, options);
  setInterval(function() {
    var JSON=$.ajax({
      url:"http://localhost/data.php",
```

```

        dataType: 'json',
        async: false}).responseText;
    var Respuesta=jQuery.parseJSON(JSON);
    data.setValue(0, 1,Respuesta[0].Voltaje);
    data.setValue(1, 1,Respuesta[0].Corriente);
    data.setValue(2, 1,Respuesta[0].Potencia);
    chart.draw(data, options);
    }, 1300);
}
</script>
</head>
<body bgcolor="#c9ced1">
    <!-- Titulo de la pagina -->
    <h2><center>GENERADOR DE FLUJO RADIAL CANAL DE RIEGO AMBATO HUACHI
    PELILEO</center></h2>
    <!-- Tabla 1 de las imagenes -->
    <table border="1" align ="left">
        <tr>
            <td></td>
        </tr>
        <tr>
            <td></td>
        </tr>
    </table>
    <!-- Tabla 2 de las imagenes -->
    <table border="1" align ="right">
        <tr>
            <td></td>
        </tr>
        <tr>
            <td></td>
        </tr>
    </table>
    <!-- Tabla 3 de los medidores -->

```

```

<table border="0" align="center">
    <tr>
        <td><div id="Medidores" align="center"></td>
    </tr>
</table>
</body>
</html>

```

Archivo envioDataBas

```

<?php
$conexion = mysqli_connect("localhost", "root", "root", "tesis");/*se pone el usuario y clave del
phpmyadmin y el nombre de la base de datos*/
if (!$conexion) {
    echo "Error: No se pudo conectar a MySQL." . PHP_EOL;
    echo "error de depuración: " . mysqli_connect_error() . PHP_EOL;
    exit;
}
$Voltaje = $_POST['Voltaje'];
$Corriente = $_POST['Corriente'];
$Potencia = $_POST['Potencia'];
/*nombre de mi tabla creada en la base de datos_tefa luego los nombres de las
* columnas de mi tabla y luego el mismo nombre de las variables q estoy enviando del arduino */
$sql = "INSERT INTO `datos_tefa` (`ID`, `Voltaje`, `Corriente`, `Potencia`) VALUES (NULL,
'$Voltaje', '$Corriente', '$Potencia')";
$resultado = mysqli_query($conexion, $sql) or die ('error en el query');
mysqli_close($conexion);
echo "Datos ingresados correctamente.";
?>

```

Archivo data.php

```

<?php
header('Content-Type: application/json');
$con = mysqli_connect("localhost", "root", "root", "tesis") or die ('Error en la conexion con servidor');
if (mysqli_connect_errno($con)) {
    echo "Failed to connect to DataBase: " . mysqli_connect_error();
} else {

```

```
$data_points = array();

$result = mysqli_query($con, "SELECT Voltaje,Corriente,Potencia FROM datos_tefa ORDER BY
id DESC LIMIT 0,1");

while ($row = mysqli_fetch_array($result)) {

    $point = array( "Voltaje" => $row['Voltaje'],
                  "Corriente" => $row['Corriente'],
                  "Potencia" => $row['Potencia'],
                  );

    array_push($data_points, $point);
}

echo json_encode($data_points);

}

mysqli_close($con);

?>
```