



**Desarrollo de una plataforma didáctica de simulación en tiempo real de un sistema de generación eléctrica compuesto por un aerogenerador de 400W y un inversor de potencia.**

**Erick Santiago Acosta Hernandez**

**Jhon Anderson Galvis Lizarazo**

11481724734

11481713280

**Universidad Antonio Nariño**

Ingeniería Mecatrónica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá, Colombia

2023

**Desarrollo de plataforma didáctica de simulación en tiempo real de un sistema de generación eléctrica compuesto por un aerogenerador de 400W y un inversor de potencia**

**Erick Santiago Acosta Hernandez**

**Jhon Anderson Galvis Lizarazo**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Ingeniero Mecatrónico**

Director (a):

Dr. Christian Erazo Ordoñez

Línea de Investigación:

Gestión de energía basada en computación en la nube para la interoperabilidad en un grupo de redes aisladas

**Universidad Antonio Nariño**

Programa Ingeniería Mecatrónica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá, Colombia

2023

## NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

\_\_\_\_\_

Cumple con los requisitos para optar

Al título de \_\_\_\_\_.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Bogotá D.C., 27 de enero del 2024.

## Contenido

Pág.

Abstract.....	8
INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 Planteamiento del problema.....	11
1.2 Objetivos.....	13
1.2.1 Objetivo general.....	13
1.2.2 Objetivos específicos.....	13
1.3 Metodología.....	14
1.4 Alcance.....	17
1.4.1 Marco en el cual se desarrolla el proyecto.....	17
1.4.2 Motivación del proyecto.....	18
MARCO TEÓRICO.....	20
2.1 Qué es la energía eólica.....	20
2.2 Cómo funciona.....	20
2.3 Transformación de la energía.....	21
2.3.1 Potencia eólica extraída.....	21
2.5 Generación de señales PWM.....	29
2.5.1 Conmutación bipolar.....	29
2.5.2 Conmutación unipolar.....	31
2.6 Control PID.....	33
2.6.1 Acción proporcional.....	33
2.6.2 Acción integral.....	34
2.6.3 Acción derivativa.....	35
DESARROLLO METODOLÓGICO.....	37
3.1 Modelamiento matemático de un generador eólico de 400 W.....	37
3.1.1 Modelo de la turbina.....	37
3.1.2 Motor DC.....	41
3.1.3 Simulación del aerogenerador.....	46
3.2 Inversor monofásico de potencia y sistema de control.....	49
3.3 OPAL-4510.....	60
3.3.1 RT-LAB.....	61
3.4 Sincronización con RT-LAB.....	62
3.4.1 Sincronizar modelo de la turbina con RT-LAB.....	64

3.4.1.2 Integración del Inversor en el Modelo de la Turbina.....	69
3.4.2 Validación del funcionamiento en el OPAL-4510.....	72
3.4.2.1 Conexión osciloscopio y Simulink.....	73
CONCLUSIONES.....	75
ANEXOS.....	77
Anexo A Añadir la Toolbox de RT-LAB a Simulink.....	77
Referencias bibliográficas.....	79

## Lista de Figuras

Figura 1.1: Representación del esquema de resultante	12
Figura 1.2 Representación de la conexión entre MatLab y OPAL 4510	16
Figura 2.1 Flujo de aire circulando a través del área barrida por el rotor	22
Figura 2.2 Variación del coeficiente de potencia $C_p$ frente a la velocidad específica ( $\lambda$ ) para diferentes tipos de aerogeneradores	26
Figura 2.3 Coeficiente de par $C_m$ frente a la velocidad específica $\lambda$ para diferentes tipos de rotores.	27
Figura 2.4 Modulación por anchura de pulso bipolar (a) Señal de referencia y señal portadora (b) Modulación del ancho de pulso	30
Figura 2.5 (a) Señales de control y señal portadora (b) Voltajes $V_a$ y $V_b$ del puente (c) Voltaje de salida	31
Figura 3.1 Variación del coeficiente de potencia $C_p$ frente a la velocidad específica ( $\lambda$ ) para diferentes tipos de aerogeneradores	38
Figura 3.2 Modelo de la turbina en MatLab-Simulink	40
Figura 3.3 Modelo de turbina en Simulink	40
Figura 3.4: Bloque DC machine	41
Figura 3.5 Configuración interna del bloque DC machine	44
Figura 3.6 Parámetros del bloque DC machine	45
Figura 3.7 Modelo del aerogenerador	46
Figura 3.8 Gráfica del comportamiento del motor (RPM)	48
Figura 3.9 Gráfica potencia	48
Figura 3.10 Inversor monofásico y sistema de control	
Figura 3.12 Filtro LC	50
Figura 3.13 Tensión eléctrica en un inductor	51
Figura 3.14 Voltaje y corriente en el inductor	52
Figura 3.15 Inversor monofásico de puente completo	56
Figura 3.16 Sistema de control para la generación de la señal de referencia	57
Figura 3.17 Bloque de generación de la señal de referencia	58
Figura 3.18 Bloque de generación PWM	59
Figura 3.19 OPAL - 4510	60
Figura 3.20 Bloques de conexión en simulink	61
Figura 3.21 Conexión entre RT-LAB con el OPAL-4510	62
Figura 3.24 Asignar los bloques del Opal	65
Figura 3.25 Creación del sistema SM_TURBINA	66
Figura 3.26 Creación del sistema SC_OPAL	67

Figura 3.27 Bloques de retroalimentación	68
Figura 3.28 Retroalimentación de sistemas maestro esclavo	69
Figura 3.29 Integración del inversor con turbina eólica	69
Figura 4.1 Montaje experimental del Opal 4510 - Inversor - Equipo de computo	72
Figura 4.2 Potencia extraída de la turbina	73
Figura 4.3 Señal de salida del inversor acoplado al aerogenerador	74
Figura A1 Sistema resultante	78

## Resumen

En este proyecto, se presenta el desarrollo de una plataforma de simulación de un sistema que está compuesto por un aerogenerador de 400 W y un inversor monofásico. La plataforma cuenta con software y hardware, los cuales se acoplan para construir una microred a escala. Primeramente se realizó el diseño y modelado matemático del aerogenerador, esto se logró haciendo uso de las herramientas numéricas de MatLab y el sistema de prototipado rápido OPAL-4510. Posteriormente, se llevó a cabo el diseño y validación de un sistema de control proporcional-integral (PI) con el fin de que a la salida del inversor la señal sea de corriente alterna AC con una frecuencia de 60 Hz y una magnitud de 120 V. Cuando se implementó el modelado del aerogenerador y el teniendo el algoritmo de control del inversor se acoplaron para desarrollar la plataforma de generación. Finalmente se validó el funcionamiento de la plataforma de generación de energía eléctrica. Los resultados muestran como la plataforma aunque toma un tiempo en poder estabilizarse; llega a una magnitud de 120 V con una frecuencia de 60 Hz y se obtiene una señal alterna.

Palabras clave: Aerogenerador, Microred, Simulación en tiempo real, Inversor de potencia, OPAL-4510

### **Abstract**

In this project, it was developed a simulation's platform of an electrical generation system which is composed of a 400 W wind turbine and a single phase inverter. The platform counts with software and hardware, these ones were coupled to build a scale microgrid. To begin with, the design and mathematical modeling of wind turbine. this was achieved using the numerical tools of MatLab and the OPAL-4510 rapid prototyping system. Subsequently, the design and validation of a proportional-integral (PI) control system was carried out so that at the output of the inverter the signal is AC alternating current with a frequency of 60 Hz and voltage magnitude of 120 V. When the wind turbine modeling and the inverter control algorithm were implemented, these were coupled to develop the generation platform. Finally, the operation of the electrical energy generation platform was validated; the results show how the platform takes some time until it is able to stabilize and it reaches a magnitude of 120 V with a frequency of 60 Hz and it gets an alternating signal.

Keywords: Wind turbine, Microgrid, Real-time simulation, Power inverter, OPAL-4510

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad se está atravesando por una crisis ambiental, esto debido al calentamiento global y al alto consumo energético [1]. Por esta razón en los últimos años las energías limpias han tenido un crecimiento significativo, la energía eólica es una de ellas; que se ha convertido en una fuente de energía limpia muy prometedora [2]. Gracias a lo mencionado anteriormente se han elaborado modelos que se pueden usar en ambientes de laboratorio, llegando a desarrollar los modelos matemáticos para así simular una micro red de energía eólica [3].

Un método para poder hacer dichas simulaciones está en usar un software (Simulink) con el cual se puede realizar el modelo de la red mediante diagramas de bloques, para así obtener el modelo matemático y numérico del sistema. Haciendo uso del dispositivo OPAL-RT se logra hacer el control de la simulación y se pueden obtener los datos en tiempo real de la simulación teniendo en cuenta las variables que se puedan presentar en la simulación, para que de esta manera se pueda analizar y hacer un estudio de las condiciones mínimas necesarias para que este modelo se pueda implementar en un entorno doméstico y/o industrial [4].

Por consiguiente, se desarrolla una plataforma de simulación donde se implementa el hardware de una turbina de viento, cuyo objetivo es probar y evaluar el rendimiento de esquemas de control avanzado para la correcta operación de sistemas de conversión de energía eólica. El comportamiento del sistema es probado utilizando un perfil de viento que simula la ubicación del generador a una altura mínima de 18.5 metros[4].

De igual manera, se elabora una plataforma de simulación con el método de Hardware in the loop (HIL), el cual está dedicado a probar diferentes estrategias de control de softwares, para que posteriormente se unifiquen con el generador y el inversor en tiempo real. Está compuesta por dos partes, donde se tiene que la primera parte es la parte de software, en la cual se contará con la simulación en tiempo real como el modelamiento aerogenerador y por otra parte es el entorno real que es el controlador PLC que se usa en esta plataforma, las partes descritas anteriormente se unen por métodos de comunicación por cable; finalmente se prueba un controlador de un aerogenerador de 3 MW para validar la plataforma[5].

Para el control se pretende diseñar e implementar un controlador lineal, donde el diseño de este controlador está orientado a la operación de un inversor monofásico de puente H dentro de una Microred; el rendimiento de este ha sido validado por pruebas en simulación y por medio de pruebas experimentales. La configuración del controlador presenta una ventaja en cuanto a amplitud y perturbaciones, cuando el inversor recibe cargas lineales y no lineales, y se consigue una solución para reducir la distorsión armónica[6].

El dispositivo OPAL-RT permite realizar una simulación en tiempo real, esta es una tecnología que combina software y hardware, con lo cual se obtienen resultados correctos y que pueden ayudar a interactuar con el mundo real, así mismo este puede llegar a tener varias aplicaciones dependiendo del método que se utilice si es model in-the-loop (MIL), rapid control prototyping (RCP), hardware in-the-loop (HIL), software in-the-loop (SIL), entre otras.[7]

## 1.1 Planteamiento del problema

Actualmente el planeta tierra atraviesa una crisis climática debido al calentamiento global, afectando de manera significativa la flora y fauna de todo el planeta y también a la humanidad; lo anterior, se debe a las emisiones de dióxido de carbono y contaminación ambiental que generan los sectores industriales tales como los que llevan a cabo procesos industriales y uso del producto, agricultura, gestión de residuos y el sector energético[8], situación que denota que no todas las fuentes de generación de energía son amigables con la naturaleza y el medio ambiente. Es así, como dentro de estas energías no amigables con el medio ambiente se encuentran la energía nuclear, el gas natural, la energía hidroeléctrica, el carbón y el petróleo, entre otros[9]. Es por esto, que a medida que pasa el tiempo la generación de energía limpia tomará mayor relevancia, en razón al avance de la tecnología y el uso de esta en los procesos productivos e industriales que harán que haya un incremento en la demanda de energías limpias y por ende la recuperación de los recursos naturales y la disminución de los impactos ambientales derivados de la generación y uso de las energías actuales.

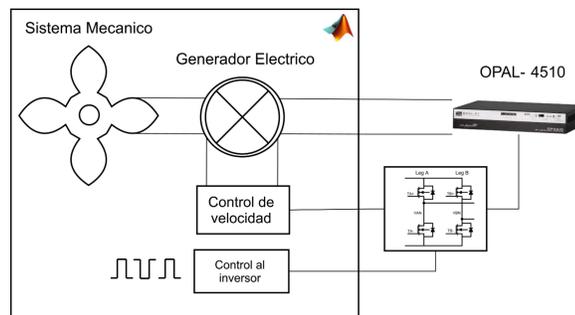
Así las cosas, es importante señalar que la energía eólica es una de las fuentes de generación eléctrica más prometedoras, a pesar de las críticas con respecto a los costos de producción, los cuales dependen de múltiples factores tales como el precio de los aerogeneradores, canalizaciones, conexiones a la red nacional y mantenimiento, entre otros.[10].

Otro factor que impacta en la generación de energía eólica, es la falta de incentivos e inversión en este tipo de energía y en la tecnología que para su generación se requiere, lo

que genera en los productores poco conocimiento sobre el desarrollo de proyectos eólicos, sus características en materia de tecnología, y la ausencia de mecanismos locales de promoción para el desarrollo de esta fuente; situación que dificulta, el acceso a los productores interesados a fuentes de financiación para desarrollar la transición energética, [11]. Por esta razón, surge la necesidad de realizar el diseño de un sistema eólico el cual se desarrolló haciendo uso de una herramienta de simulación que modelaron dicho propósito.

Es por esto, que en este proyecto se desarrolla una plataforma de simulación en tiempo real, que permite emular la alimentación de cargas de corriente alterna a partir de un generador eólico.

Figura 1.1: Representación del esquema de resultante



Fuente: Elaboración propia

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Desarrollar e implementar una plataforma de simulación en tiempo real de un sistema de generación eléctrica compuesto por un aerogenerador de 400W y un inversor.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Construir un modelo matemático de un generador eólico de 400W, con un voltaje nominal de 24V.
- Implementar un sistema de control para el inversor de potencia.
- Embeber el modelo matemático del aerogenerador y el control del inversor de potencia en el dispositivo OPAL 4510.
- Validar el funcionamiento de la plataforma de simulación de generación de energía eléctrica eólica.

### 1.3 Metodología

Esta sección está contemplada en cuatro etapas que son:

#### ETAPA 1

En esta primera etapa se realizó el modelo matemático y numérico de la turbina, haciendo uso de principios y ecuaciones físicas se obtuvieron las ecuaciones que describen el sistema. Con el fin de poder manejar los datos constantes y los datos que son variables y poder obtener una red que entregue las estimaciones de energía que se puede llegar a generar. Una vez hecho el modelo matemático se realiza un diagrama de bloques en MatLab creando así el sistema de la turbina el cual se conecta a un motor de corriente continua el cual se encarga de generar los 400 W. De igual manera, se diseñó el diagrama de bloques para que el modelo se pueda cargar y ejecutar en el software RT-LAB

#### ETAPA 2

Para la implementación del control inicialmente se diseñó un inversor monofásico de puente completo, lo cual se lleva a cabo utilizando transistores de potencia (MOSFETs) que actúan como interruptores electrónicos. Para hacer el control del inversor se realizó un control proporcional-integral PI donde las variables a controlar son el voltaje y la corriente de la salida del filtro LC, con dicho control se realiza la generación del pulso PWM, con el pulso se logra la conmutación de los transistores y así generar la señal alterna. Para el filtro LC del inversor se hallan los valores de la capacitancia y del inductor. Con los valores de mencionados anteriormente se logró obtener las ganancias proporcional e integral del

controlador, donde finalmente se simula el inversor y se obtuvo la señal en alterna del voltaje con una amplitud de 120 V.

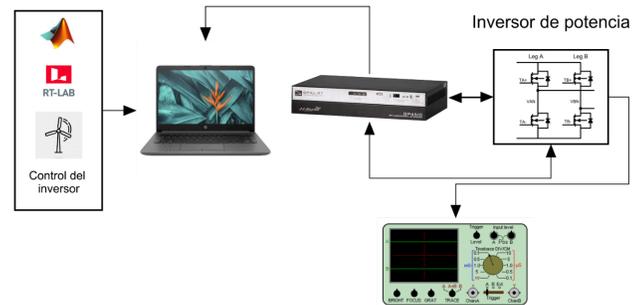
### ETAPA 3

Para acoplar la simulación del aerogenerador y el sistema de control del inversor al dispositivo OPAL-4510 se utiliza el software RT-LAB, el dispositivo permite realizar las simulaciones en tiempo real y conjuntamente permite hacer el control del inversor. De acuerdo a esto, en el software RT-LAB se carga el modelo del aerogenerador y el control del inversor que se realizó en Simulink; al ejecutar el modelo y el control en RT-LAB este los carga al dispositivo OPAL-4510, el cual está conectado al PC por medio de un cable de datos, con lo cual se extraen las gráficas de los resultados obtenidos tanto en Simulink como de manera física, esto último con un osciloscopio conectado al OPAL-4510.

### ETAPA 4

En esta última etapa, se realizan las pruebas con diferentes cargas y variando los parámetros del aerogenerador, con el fin de evidenciar el rendimiento de la plataforma, en cuanto a variaciones de carga y condiciones ambientales. También, se valida el sistema, emulando posibles fallas relacionadas con las perturbaciones paramétricas del inversor así como perturbaciones externas del generador eólico. En la figura 1.2 se observa el diagrama que representa la conexión entre MatLab y el OPAL 4510, mediante una conexión externa se añadió un inversor.

Figura 1.2 Representación de la conexión entre MatLab y OPAL 4510



Fuente: Elaboración propia

## 1.4 Alcance

### 1.4.1 Marco en el cual se desarrolla el proyecto

La necesidad de desarrollar fuentes de energía renovable se ha convertido en una prioridad debido a los desafíos ambientales y económicos que enfrenta el mundo. La energía eólica, en particular, es una de las fuentes de energía renovable más importantes y en constante crecimiento.

Además, la plataforma didáctica de simulación puede ser utilizada para capacitar a estudiantes y profesionales en el diseño y análisis de sistemas de generación eléctrica renovable. Por medio del uso de simulaciones la educación puede mejorar significativamente el aprendizaje de los estudiantes y la comprensión de conceptos complejos.

La simulación en tiempo real en Simulink permite modelar y analizar el comportamiento de un sistema de generación eléctrica en diferentes condiciones, como

cambios en la velocidad del viento o fallas en el sistema eléctrico. Esto permite diseñar y optimizar el sistema para que sea capaz de funcionar de manera eficiente y confiable en diferentes situaciones.

En conclusión, la realización de una plataforma didáctica de simulación en tiempo real de un sistema de generación eléctrica compuesto por un aerogenerador es importante en la actualidad porque según la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA), se espera que la energía eólica sea la fuente de energía renovable más grande del mundo para 2030, lo que resalta la importancia de desarrollar y mejorar sistemas de generación eléctrica basados en esta tecnología[12]. En este contexto, la plataforma didáctica de simulación en tiempo real de un sistema de generación eléctrica compuesto por un aerogenerador puede ser una herramienta muy valiosa.

#### **1.4.2 Motivación del proyecto**

En primer lugar, la creciente demanda de energía limpia y sostenible hace que el campo de la generación de energía renovable sea cada vez más importante y relevante. Por lo cual la tesis puede ayudar a abordar este desafío al desarrollar una plataforma de simulación que permita diseñar y optimizar sistemas de generación eléctrica renovable.

Así mismo, la simulación en tiempo real en Simulink es una herramienta ampliamente utilizada en la industria para el diseño y optimización de sistemas eléctricos, Lo que proporciona una oportunidad para desarrollar habilidades técnicas en el uso de

herramientas de simulación y análisis de sistemas eléctricos, lo que puede ser muy valioso en la industria.

Por otra parte, la plataforma de simulación desarrolla una importante contribución al conocimiento en el campo de la generación de energía renovable. La plataforma de simulación puede ser utilizada por otros investigadores y diseñadores de sistemas eléctricos para mejorar el diseño y la eficiencia de los sistemas de generación eléctrica renovable.

Finalmente, el documento puede ser motivado por la necesidad de resolver un problema específico en el campo de la generación de energía renovable. La plataforma de simulación puede ayudar a abordar problemas de integración entre aerogeneradores y sistemas de inversores de potencia, lo que es especialmente importante en el contexto de la transición a fuentes de energía renovable.

## MARCO TEÓRICO

### 2.1 Qué es la energía eólica

La energía eólica se obtiene a partir de la energía cinética del viento, que es capturada por las aspas de un aerogenerador acoplado a un eje. Esta energía mecánica se puede transformar en electricidad mediante un generador eléctrico. La energía eólica es una forma de energía renovable y limpia que no emite gases tóxicos de efecto invernadero y puede sustituir a la energía generada por combustibles fósiles.[13]

### 2.2 Cómo funciona

El proceso de generación de energía eléctrica a partir del viento comienza con la interacción del viento con las palas del aerogenerador. Esta interacción hace que las palas comiencen a girar y, a su vez, hacen girar el eje lento del aerogenerador. Posteriormente, el multiplicador eleva la velocidad del eje lento hasta 100 veces y la transfiere al eje rápido. Este último está conectado a un generador que aprovecha la energía cinética generada por el movimiento de las palas para transformarla en energía eléctrica.

Una vez que la energía eléctrica es producida, ésta desciende por el interior de la torre hasta la base, donde se encuentra un transformador encargado de elevar la tensión para que pueda ser transportada a la subestación. En la subestación, la energía se eleva nuevamente para incorporar a la red eléctrica y distribuirla a los diferentes puntos de consumo.

Es importante destacar que la generación de energía eólica es una fuente renovable de energía, que no produce emisiones de gases de efecto invernadero ni contamina el aire, lo que la convierte en una alternativa limpia y sostenible en comparación con los combustibles fósiles. Además, el uso de la energía eólica contribuye a reducir la dependencia de combustibles fósiles importados, promueve la creación de empleos en la industria de la energía renovable y ayuda a reducir la huella de carbono.[14]

## **2.3 Transformación de la energía**

### **2.3.1 Potencia eólica extraída**

La potencia eólica extraída es la cantidad de energía que se puede obtener de una corriente de aire que mueve las aspas de un aerogenerador. Esta potencia se mide en vatios (W) o kilovatios (kW) y depende de varios factores, como la velocidad del viento, la superficie de las aspas y la eficiencia del aerogenerador. Cuanto mayor sea la velocidad del viento y más eficiente sea el aerogenerador, mayor será la potencia eólica extraída. Esta potencia puede ser utilizada para generar electricidad y abastecer a hogares, edificios e industrias con energía limpia y renovable.

En el momento en que el viento incide sobre el rotor, éste posee una energía cinética que no es completamente aprovechada por la turbina. Esto se debe a que el viento conserva su velocidad abajo del rotor y no transfiere toda su energía cinética. Además, hay pérdidas debido a rozamientos aerodinámicos y mecánicos. Por lo tanto, la energía del rotor es menor a la energía cedida por el viento. Así que la potencia disponible del caudal del aire que atraviesa la sección es:

$$P_W = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (2.1)$$

Donde:

$\rho$ = Densidad del aire

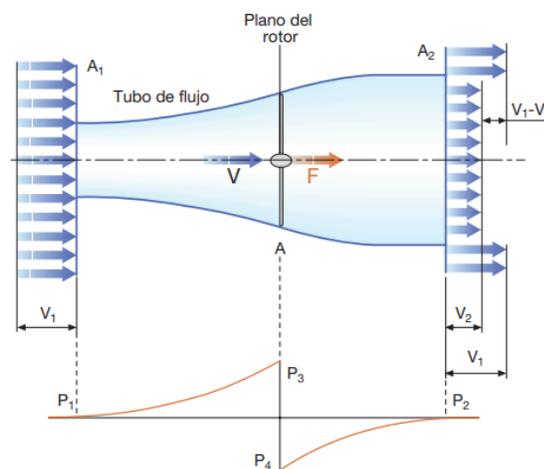
$v$  = Velocidad del viento

$A$ = Área de barrido

### Potencia eólica extraída teórica. Límite de Betz

Cuando el viento incide sobre la turbina no toda la energía cinética es aprovechada, es por esto que el teorema de Betz establece que hay un límite máximo para la potencia máxima que puede extraerse de un flujo de viento con una velocidad  $v$ . Se considera el aire como un fluido incompresible, gracias a que las variaciones de presión y temperatura son mínimas, en la figura 2.1 se muestra el diagrama de flujo que pasa a través por el área de barrido de la turbina.

Figura 2.1 Flujo de aire circulando a través del área barrida por el rotor



Fuente: Figura tomada de la referencia [13]

Aplicando el teorema de Betz se encuentra la velocidad en la sección del disco actuador[14]:

$$v_1 = \frac{1}{2} (v + v_2) \quad (2.2)$$

Ahora se define el factor de inducción axial  $a$  que es la desaceleración del viento que se reparte a medias entre el tramo aguas arriba y el tramo agua abajo del disco actuador y está dado por:

$$a = 1 - \frac{v_1}{v} \quad (2.3)$$

Partiendo de la ecuación (2.3) y teniendo en cuenta la ecuación (2.2) la velocidad  $v_1$  en el plano del disco y la velocidad  $v_2$  en la salida del tubo de flujo de la velocidad en la entrada  $v$  y el factor de inducción axial  $a$  [14].

$$v_1 = (1 - a) \cdot v \quad (2.4)$$

$$v_2 = (1 - 2a) \cdot v \quad (2.5)$$

Se aprecia que la potencia que se extrae del viento es proporcional al flujo de masa que atraviesa el rotor y a la diferencia de energía cinética entre la sección de entrada y la de salida, la potencia captada se puede definir como[13]:

$$P = 2 \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \cdot a \cdot (1 - a)^2 \quad (2.6)$$

Para  $a$  se obtiene un valor de  $1/3$ , lo que quiere decir que la velocidad de salida es un tercio de la velocidad de entrada.

Se conoce como potencia eólica disponible aquella que se encuentra antes de que el viento incida sobre el rotor y su relación con la potencia en el eje es establecido por medio del coeficiente de potencia y está definido como:

$$C_p = \frac{P}{P_d} = \frac{P}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3} \quad (2.7)$$

Donde  $C_p$  depende del tipo de rotor, de la velocidad de giro y de la velocidad del viento. Teniendo en cuenta (2.6) y un  $a=1/3$ , se obtiene que:

$$C_p = \frac{P}{P_d} = \frac{2 \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \cdot a \cdot (1-a)^2}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3} = 4 \cdot a \cdot (1 - a)^2 \quad (2.8)$$

El  $C_{p,max} = 0.59$ , este valor se conoce como límite de Betz y cuyo concepto es:

“La máxima potencia teórica extraíble de una corriente de aire con un aerogenerador ideal no puede superar el 59% de la potencia disponible del viento incidente”. Como se puede ver en el gráfico de la figura 3.5, el coeficiente de potencia  $C_p$  crece primero con el factor de inducción axial  $a$ , hasta alcanzar el máximo en  $a = 1/3$  y luego disminuye hasta  $a = 1/2$ , donde la velocidad de salida se iguala a cero. La parte

correspondiente a  $a > 1/2$  no tiene sentido físico, pues implicaría una velocidad negativa en la sección de salida.”[13]

El coeficiente de potencia  $C_p$  es función de la velocidad específica o tip speed ratio ( $\lambda$ ), la cual es la relación entre la velocidad lineal ( $u$ ) del extremo de la pala del generador y la velocidad del viento ( $v$ ), así que para obtener  $\lambda$  usamos la expresión:

$$\lambda = \frac{u}{v} = \frac{\Omega \cdot R}{v} \quad (2.9)$$

Donde:

$u$ : Velocidad lineal del extremo de la pala del rotor del generador (m/s).

$\Omega$ : Velocidad de rotación del rotor del generador (rad/s).

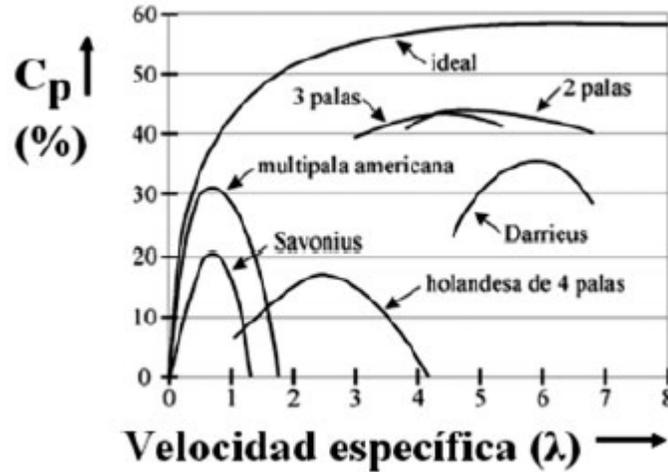
$R$ : Radio del rotor (m).

$v$ : velocidad del viento (m/S).

En la figura 2.2 se observa la variación del coeficiente  $C_p$  varía en función de la velocidad específica ( $\lambda$ ) para diferentes tipos de aerogeneradores.

Figura 2.2 Variación del coeficiente de potencia  $C_p$  frente a la velocidad específica ( $\lambda$ )

para diferentes tipos de aerogeneradores



Fuente: Figura tomada de la referencia [15]

Para el par en el eje del rotor se relaciona con la potencia  $P$  en el eje de acuerdo a la siguiente relación:

$$P = M\Omega \quad (2.10)$$

Donde  $\Omega$  es la velocidad angular de giro del eje del rotor (rad/s). El par específico ( $M/A$ ) se de por:

$$\frac{M}{A} = \frac{1}{2} \cdot C_m \cdot \rho \cdot v^2 \cdot R \quad (2.11)$$

Donde:

$C_m$ : Es el coeficiente de momento o de par.

$A$ : Área de la circunferencia barrida por el rotor ( $m^2$ ).

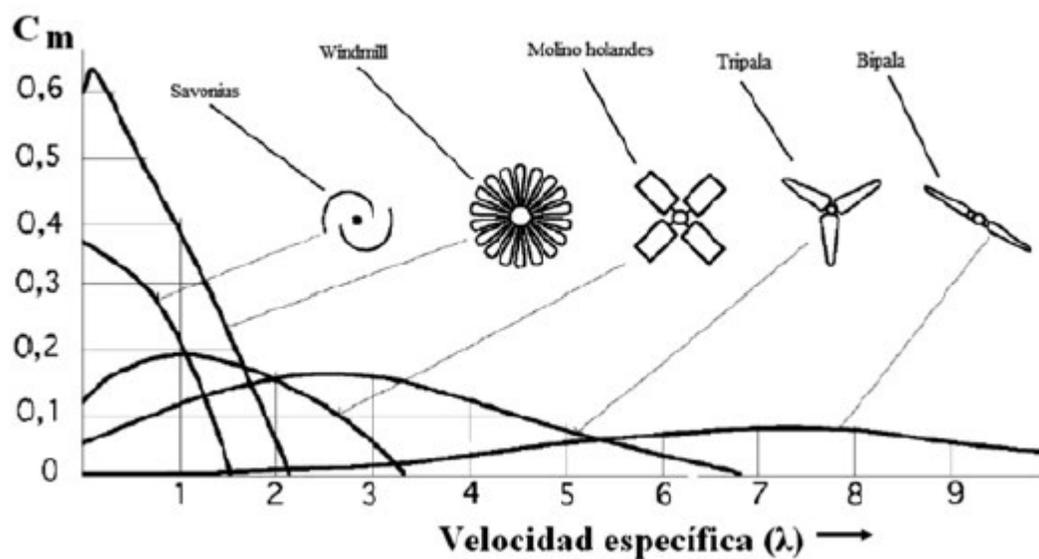
R: Es el radio de la circunferencia barrida por el rotor (m).

La relación entre los coeficientes de potencia  $C_p$  y de par  $C_m$  está dada por:

$$C_p = \lambda \cdot C_m \quad (2.12)$$

En la figura 2.3 se ilustra de forma orientativa la variación del coeficiente de par  $C_m$  frente a la velocidad específica  $\lambda$  para diferentes tipos de rotores.

Figura 2.3 Coeficiente de par  $C_m$  frente a la velocidad específica  $\lambda$  para diferentes tipos de rotores.



Fuente: Figura tomada de la referencia [15]

## 2.4 Inversor

El inversor monofásico de puente completo se basa en los principios de la conversión de corriente continua (DC) en corriente alterna (AC). Este tipo de inversor se utiliza ampliamente en aplicaciones de electrónica de potencia, como sistemas de energía renovable, accionamientos de motores y fuentes de alimentación.

El principio de funcionamiento del inversor monofásico de puente completo se basa en el uso de dispositivos de conmutación, como transistores de potencia o tiristores, para controlar la dirección y la magnitud de la corriente en una carga. El puente completo está compuesto por cuatro interruptores (generalmente MOSFETs o IGBTs) conectados en forma de puente, donde dos interruptores están en la rama superior y los otros dos en la rama inferior. Cuando los interruptores superiores están cerrados y los inferiores están abiertos, se aplica una tensión positiva en la carga y la corriente fluye en una dirección. Por otro lado, cuando los interruptores inferiores están cerrados y los superiores están abiertos, se aplica una tensión negativa y la corriente fluye en la dirección opuesta.

El control del inversor se logra mediante la modulación de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés). Esta técnica implica variar la duración de los pulsos de tensión aplicados a la carga para obtener una forma de onda de corriente alterna senoidal, con una frecuencia determinada y amplitud controlable.

Además, el inversor monofásico de puente completo puede incluir elementos de filtrado para suavizar la forma de onda de salida y reducir los armónicos generados. Estos elementos pueden incluir inductores y capacitores, que se colocan en paralelo con la carga para filtrar los componentes no deseados de la señal.[16], [17], [18].

## 2.5 Generación de señales PWM

La generación de señales PWM para inversores monofásicos implica la comparación de dos señales, una senoidal y otra triangular. La señal senoidal actúa como referencia, determinando la frecuencia de operación de la carga. Mientras tanto, la señal triangular se encarga de la conmutación de los dispositivos de estado sólido. Ambas señales se comparan para producir el esquema bipolar o unipolar correspondiente.

### 2.5.1 Conmutación bipolar

En la figura 2.4 se observa el principio de la modulación por ancho de pulsos bipolar donde se denota que cuando el valor de la señal de referencia es mayor que la señal portadora la salida es de  $+V_{cc}$ , y cuando la de referencia es menor que la portadora la salida es  $-V_{cc}$ ; a continuación, en la figura 2.3 se observa el principio de modulación por anchura de impulsos bipolar teniendo como señal de referencia una señal seno[19]:

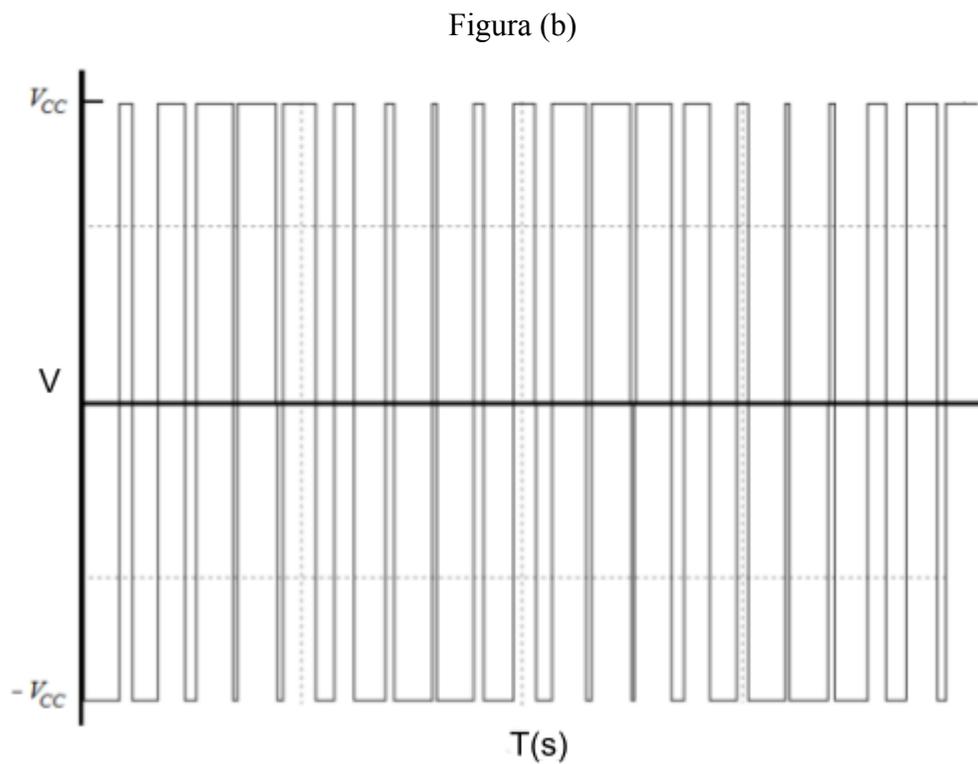
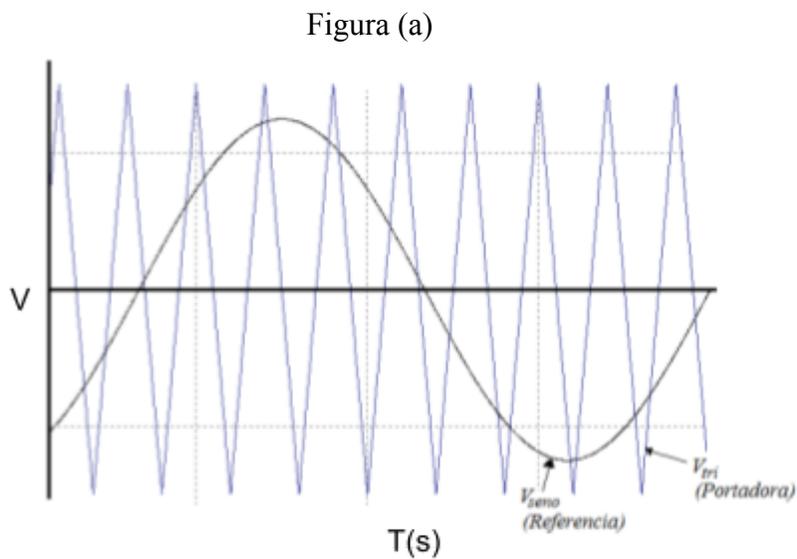
$$V_o = +V_{cc} \text{ para } V_{seno} > V_{triangular}$$

$$V_o = -V_{cc} \text{ para } V_{seno} < V_{triangular}$$

$$S_1 \text{ y } S_4 \text{ están conduciendo cuando } V_{seno} > V_{triangular} (V_o = +V_{cc})$$

$$S_2 \text{ y } S_3 \text{ están conduciendo cuando } V_{seno} < V_{triangular} (V_o = -V_{cc})$$

**Figura 2.4** Modulación por anchura de pulso bipolar (a) Señal de referencia y señal portadora (b) Modulación del ancho de pulso



Fuente: Figura tomada de la referencia [19]

## 2.5.2 Conmutación unipolar

Para la conmutación unipolar se requiere dos señales de referencia la primera será una señal sinusoidal sin ningún tipo de desfase y la segunda será una onda sinusoidal con un ángulo de desfase de  $180^\circ$ . Gracias a estas dos señales la salida puede conmutar de nivel alto a cero o de nivel bajo a cero. Un sistema de conmutación unipolar presenta los siguientes controles de acuerdo a la figura 2.5[17],[18], [19].

$$S_1 \text{ conduce cuando } V_{\text{seno}} > V_{\text{triangular}}$$

$$S_2 \text{ conduce cuando } -V_{\text{seno}} < V_{\text{triangular}}$$

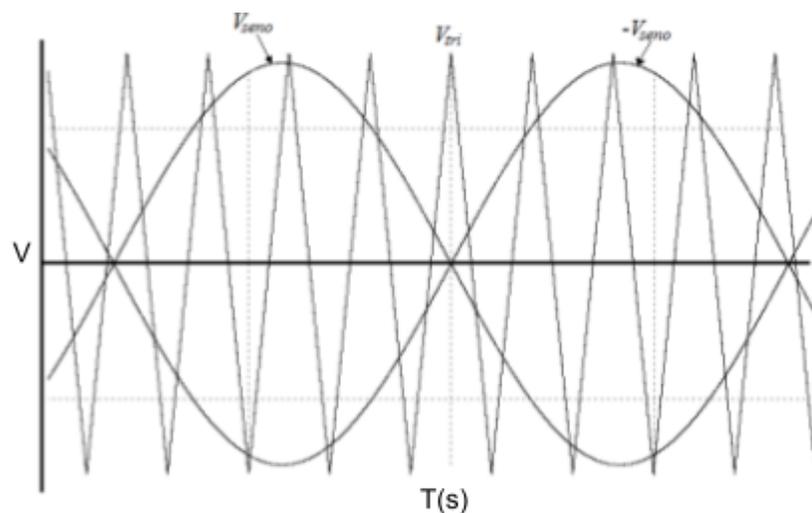
$$S_3 \text{ conduce cuando } -V_{\text{seno}} > V_{\text{triangular}}$$

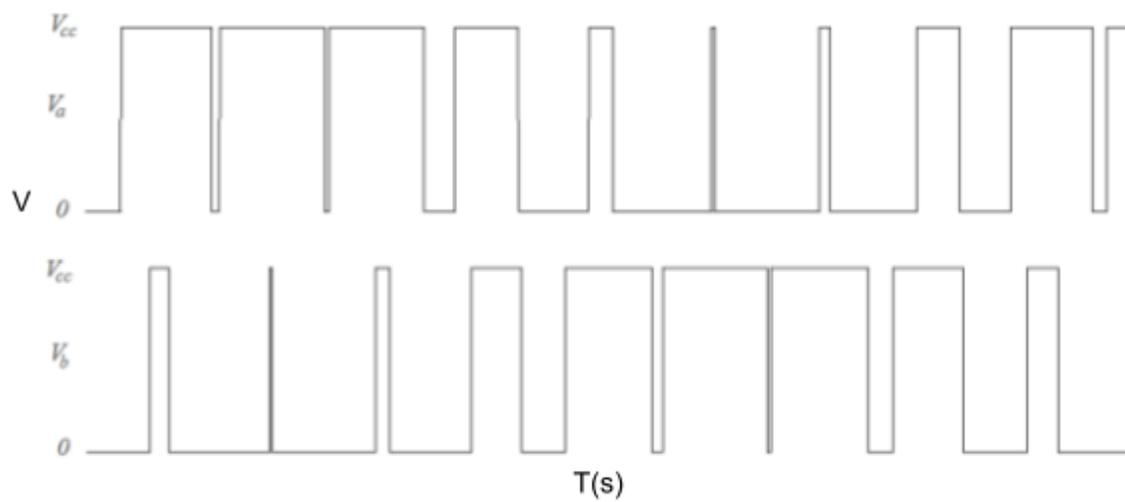
$$S_4 \text{ conduce cuando } V_{\text{seno}} < V_{\text{triangular}}$$

Figura 2.5 (a) Señales de control y señal portadora (b) Voltajes  $V_a$  y  $V_b$  del puente

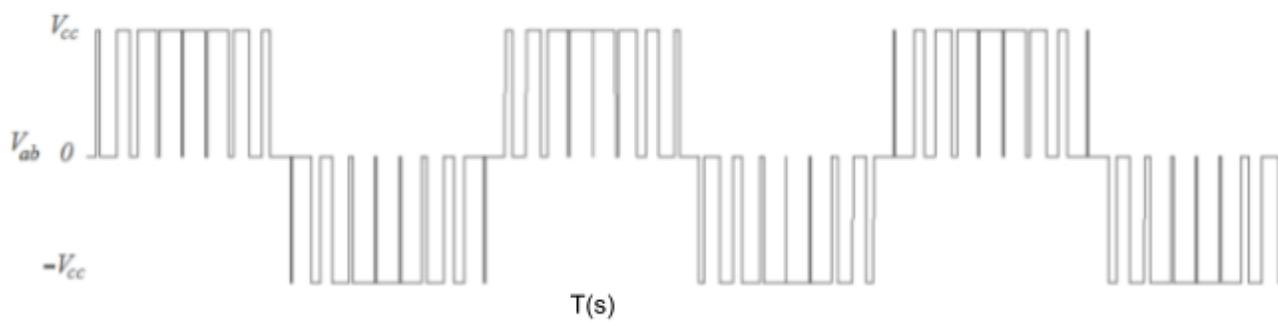
(c) Voltaje de salida

(a) Señales de referencia y portadora



(b) Voltajes  $V_a$  y  $V_b$  del puente

(c) Voltaje de salida



Fuente: Figura tomada de la referencia [19]

## 2.6 Control PID

El control PID se puede describir como:

$$u(t) = K \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.13)$$

Donde  $u$  es la señal de control y  $e$  es el error de control ( $e = y_{sp} - y$ ). Donde la señal de control es el resultado de la acción proporcional al error (P), proporcional a la integral del error (I) y la acción proporcional a la derivada del error (D). los parámetros del controlador son la ganancia  $K$ , el tiempo integral  $T_i$  y por último el tiempo derivativo  $T_d$ .

### 2.6.1 Acción proporcional

La acción proporcional es proporcional al error de control actual y se define por:

$$u(t) = K_p e(t) = K_p (r(t) - y(t)) \quad (2.14)$$

Donde  $K_p$  representa la ganancia proporcional, la operación implementada implica aumentar la variable de control cuando el error de control es significativo. La función de transferencia correspondiente es:

$$C(s) = K_p \quad (2.15)$$

Un problema asociado con la acción proporcional es su tendencia a generar un error de estado estacionario, incluso en sistemas con dinámica integradora (caracterizados

por tener un polo en el origen del plano complejo), especialmente cuando se produce una perturbación de carga constante. Para solucionar este problema, resulta necesario añadir un componente de reinicio, el cual se denota como  $u_b$ .

$$u(t) = K_p e(t) + u_b \quad (2.16)$$

El valor de  $u_b$  se puede fijar en un nivel constante dado por  $(u_{max} + u_{min})/2$ ; de igual manera también se puede fijar manualmente hasta que el error en estado estacionario sea cero. Es importante destacar que, en la mayoría de los productos comerciales, la ganancia proporcional se reemplaza con la banda proporcional (PB), que denota el rango de error que provoca un cambio completo en la variable de control.

$$PB = \frac{100}{K_p} \quad (2.17)$$

### 2.6.2 Acción integral

La acción integral es proporcional a la integral del error de control y está dada por:

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.18)$$

Donde  $K_i$  es la ganancia integral, la acción integral está relacionada con los valores anteriores del error de control y su función de transferencia es:

$$C(s) = \frac{K_i}{s} \quad (2.19)$$

Esto quiere decir que va existir un polo en el origen del plano complejo, lo que permite la reducción a cero del error de estado estable cuando se aplica una señal de referencia de paso o cuando cuando hay una perturbación de carga de paso. Lo anterior quiere decir que la acción integral puede ajustar y establecer automáticamente el valor correcto de  $u_b$  de la ecuación (2.7) para que así el error en estado estacionario sea cero.

Ahora la función de transferencia que se obtiene es:

$$C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_s s} \right) \quad (2.20)$$

### 2.6.3 Acción derivativa

La acción derivativa se basa en los valores futuros del error de control y se expresa con la siguiente expresión:

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.21)$$

Donde  $K_d$  es la ganancia deriva y la función de transferencia del controlador es:

$$C(s) = K_d s \quad (2.22)$$

Ahora se tiene en cuenta los dos primeros términos de la expansión de la serie de Taylor del error de control en el tiempo por consiguiente tenemos la siguiente expresión:

$$e(t + T_d) \approx e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.23)$$

Si se considera la ley proporcional de control, se toma en cuenta la relación directamente proporcional entre la salida del controlador y el error presente en el sistema:

$$u(t) = K_p \left( e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.24)$$

Así, se obtiene un controlador proporcional-derivativo (PD). Por lo tanto, la variable de control en el tiempo "t" se basa en el valor predicho del error de control en el tiempo  $t + T_d$ . [17], [18].

## DESARROLLO METODOLÓGICO

En este capítulo se llevará a cabo el modelamiento matemático de la turbina eólica para así acoplar a un motor DC, que en conjunto conforman el generador eólico. Además de esto se implementará un sistema de control para un inversor monofásico, de igual manera el aerogenerador junto con el inversor serán embebidos para posteriormente validar el funcionamiento de la plataforma.

### 3.1 Modelamiento matemático de un generador eólico de 400 W

Un aerogenerador es aquel que se utiliza para el proceso de generación de energía eléctrica, lo anterior comienza con la interacción del viento con las palas del aerogenerador. Esta interacción hace que las palas comiencen a girar y estas a su vez hacen girar el eje lento del aerogenerador, el cual está conectado a un multiplicador. El multiplicador es capaz de elevar la velocidad del eje lento hasta 100 veces, el multiplicador transfiere la velocidad al eje rápido. Este último está conectado a un generador y a un motor el cual aprovecha la energía cinética generada por el movimiento de las palas para transformarla en energía eléctrica.

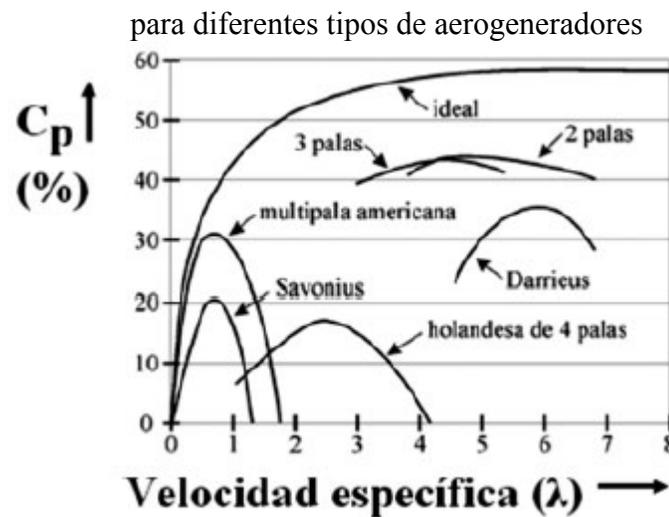
#### 3.1.1 Modelo de la turbina

Las características en estado estacionario de un aerogenerador eólico se pueden escribir a partir de la relación de la potencia mecánica de salida de la turbina  $P_m$  y la velocidad del viento  $V_w$ :

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot A \cdot V_w^3 \quad (3.1)$$

Donde  $C_p$  es el coeficiente de potencia, el cual dependerá de  $\lambda$  que es la relación de la velocidad de la punta de la pala del rotor y la velocidad del viento.  $\rho$  denota la densidad del aire y  $A$  el área de barrido de la turbina. Para elegir los valores de  $C_p$  se parte de la figura 3.1:

Figura 3.1 Variación del coeficiente de potencia  $C_p$  frente a la velocidad específica ( $\lambda$ )



Fuente: [15]

Se selecciona un aerogenerador ideal, donde se toma una velocidad específica de 5 obteniendo así un  $C_p$  máximo de 0.59. Si se quiere obtener una potencia de 400W Se tiene en cuenta los siguientes valores:

$$\rho = 1.23 \text{ Kg/m}^3$$

$$P_m = 400 \text{ W}$$

Se utiliza un rotor de 1 m de diámetro, así que el área será:

$$A = \pi \cdot 0.5^2 = 0.79 \text{ m}^2 \quad (3.2)$$

Para garantizar los 400 W la velocidad mínima del viento debe ser de:

$$V_w = \sqrt[3]{\frac{P_m \cdot 2}{C_p \cdot \rho \cdot A}} = 11.17 \text{ m/s} \quad (3.3)$$

Para este caso se toma una velocidad del viento de 12 m/s. Posteriormente se halla el valor del torque:

$$M = \frac{1}{2} \cdot C_m \cdot \rho \cdot v^2 \cdot R \cdot A \quad (3.4)$$

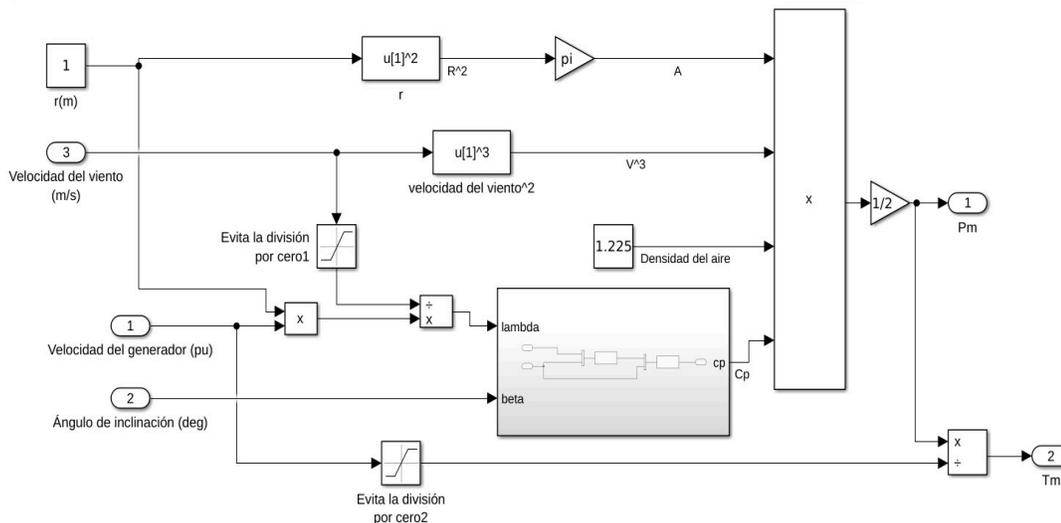
Para obtener  $C_m$  se aplica

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} \quad (3.5)$$

Se tiene que el valor de  $C_m$  es de 0.118 y el par generado es de 4.1 N

Así se obtiene el modelo matemático de la turbina; con el cual se realiza un diagrama de bloques en MatLab como se muestra en la figura 3.2:

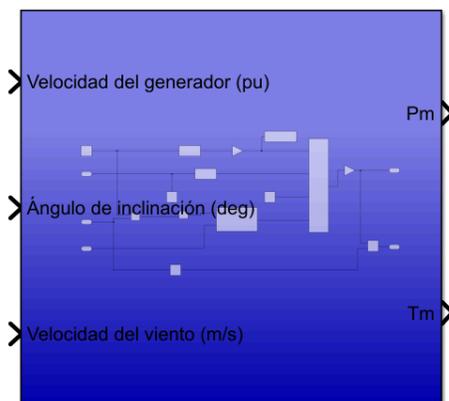
Figura 3.2 Modelo de la turbina en MatLab-Simulink



Fuente: Elaboración propia en el software MatLab

Partiendo del modelo matemático se crea un sistema presentado en la figura 3.3 para que de esta manera las variables de entrada se puedan definir, sean mucho más claras y poder asignar los valores correspondientes. El modelo tiene las características de potencia en estado estable, ya que el factor de fricción junto con la inercia se acoplan a un motor

Figura 3.3 Modelo de turbina en Simulink



Fuente: Elaboración propia en Software MatLab

Este modelo dispone de tres entradas y dos salidas, las entradas del sistema son:

- (pu): La velocidad del generador base acoplado que produce voltaje nominal sin carga.
- (deg): Es el ángulo de inclinación de la pala (beta) en grados (deg).
- (m/s): Velocidad del viento en m/s.

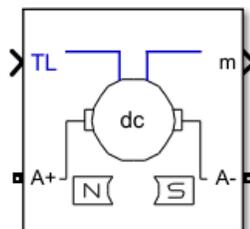
De igual manera cuenta con dos salidas que son:

- $P_m$  : Es la potencia de salida del generador.
- $T_m$  (pu): Es el par mecánico del aerogenerador, que se basa en la potencia y la velocidad nominal del generador.

### 3.1.2 Motor DC

El motor DC es una máquina eléctrica rotativa que tiene como fin convertir la energía mecánica en energía eléctrica. En Simulink, se encuentran varios modelos de máquinas eléctricas para simular su comportamiento en un sistema eléctrico. Uno de ellos es el modelo DC Machine; este modelo se utiliza para simular una máquina de corriente continua y permite seleccionar entre una máquina de campo bobinado o de imán permanente, además de establecer las constantes de la máquina como la resistencia del devanado y la inductancia de la armadura.

Figura 3.4: Bloque DC machine



Fuente: Software MatLab

El bloque "DC Machine" es una herramienta muy útil para simular el comportamiento de una máquina de corriente continua en diferentes situaciones. Este bloque permite seleccionar entre una máquina de campo bobinado o de imán permanente, lo que permite simular diferentes tipos de máquinas de corriente continua.

Las principales entradas del motor son la tensión de armadura y la corriente de campo. La tensión de armadura es la tensión aplicada a la máquina de corriente continua, que se convierte en una corriente de armadura que produce un par electromagnético en el rotor de la máquina. La corriente de campo es la corriente que fluye a través del devanado de campo, que crea un campo magnético que interactúa con el campo magnético de la armadura para producir el movimiento del rotor.

Como se puede observar en la figura 3.4 tenemos las siguientes entradas y salidas:

Entrada del bloque:

- TL : Par de carga mecánica,  $N*m$

Salidas del bloque:

- m — Vector de cuatro elementos de señales de medición

El vector m cuenta con cuatro elementos que facilitan realizar el modelamiento de la respuesta del motor las cuales son:

Tabla 3.1 Parámetros del motor DC

Nombre	Definición	Unidades
w	Velocidad $\omega_m$	rad/s
iA	Corriente de armadura $i_a$	A
iF	Corriente de campo $i_f$	A
Te	Torque eléctrico $T_e$	N.m

Fuente: Elaboración propia

También se cuenta con las entradas para caracterizar el voltaje de armadura y el circuito de campo.

- A+: Terminal positiva de la armadura
- A-: Terminal negativa de la armadura

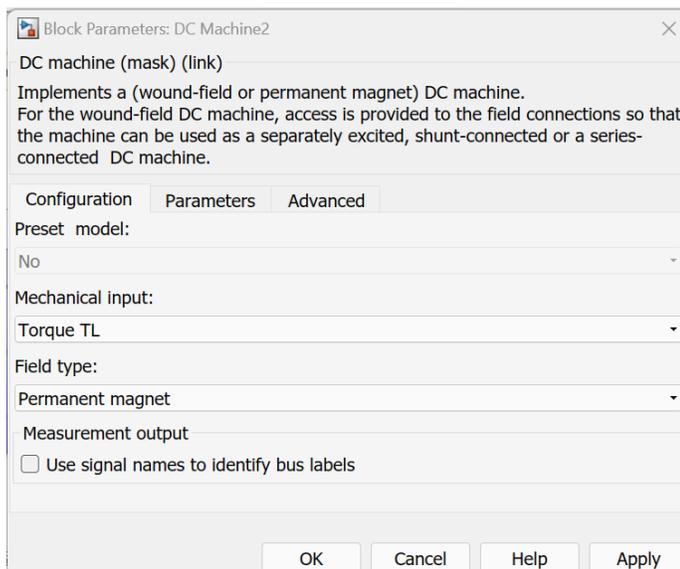
Al ingresar a las opciones del bloque de la figura 3.4 se observa en la figura 3.5 se tres opciones del bloque las cuales son: configuration, parameters, advanced.

La primera pestaña permite:

- Configurar el tipo de modelo ya propuesto por simulink los cuales tienen dentro de sus características:
  - Horsepower
  - Armature voltage
  - RPM
  - Field circuit
- La salida mecánica:
  - Torque TL
  - Speed W
  - Mechanical rotation port

- El tipo de campo:
  - Wound

Figura 3.5 Configuración interna del bloque DC machine

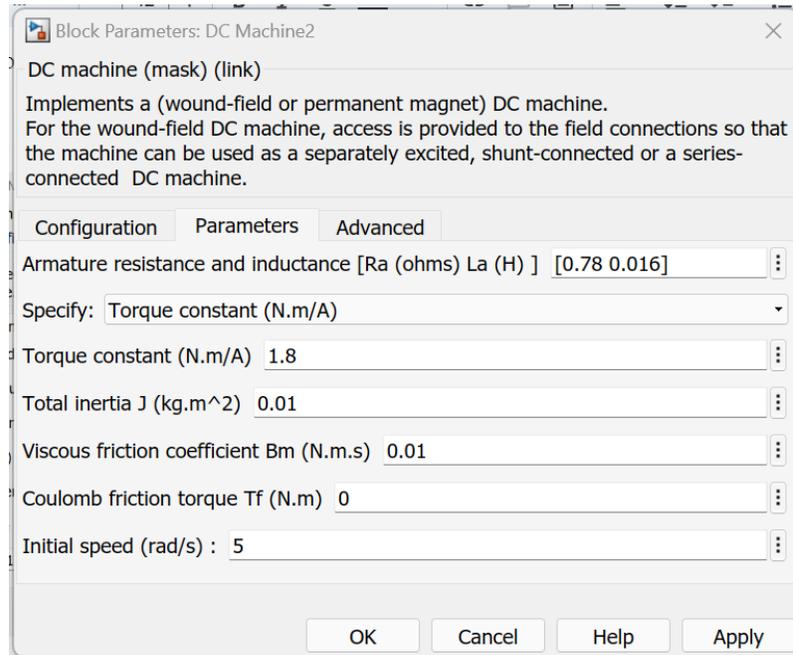


Fuente: Software MatLab

En la segunda pestaña, se ofrece la opción de configurar parámetros más específicos del motor. Sin embargo, en el caso de haber seleccionado un modelo predeterminado para el motor, no es necesario realizar esta configuración manualmente, ya que los valores óptimos y adecuados para el tipo de motor elegido vienen preasignados.

Al utilizar un modelo predispuesto, se han considerado los valores ideales y ajustes necesarios para el motor en cuestión. Esto significa que el software automáticamente calcula los parámetros óptimos para el modelo seleccionado, evitando la necesidad de ajustarlos manualmente.

Figura 3.6 Parámetros del bloque DC machine



Fuente: Software MatLab

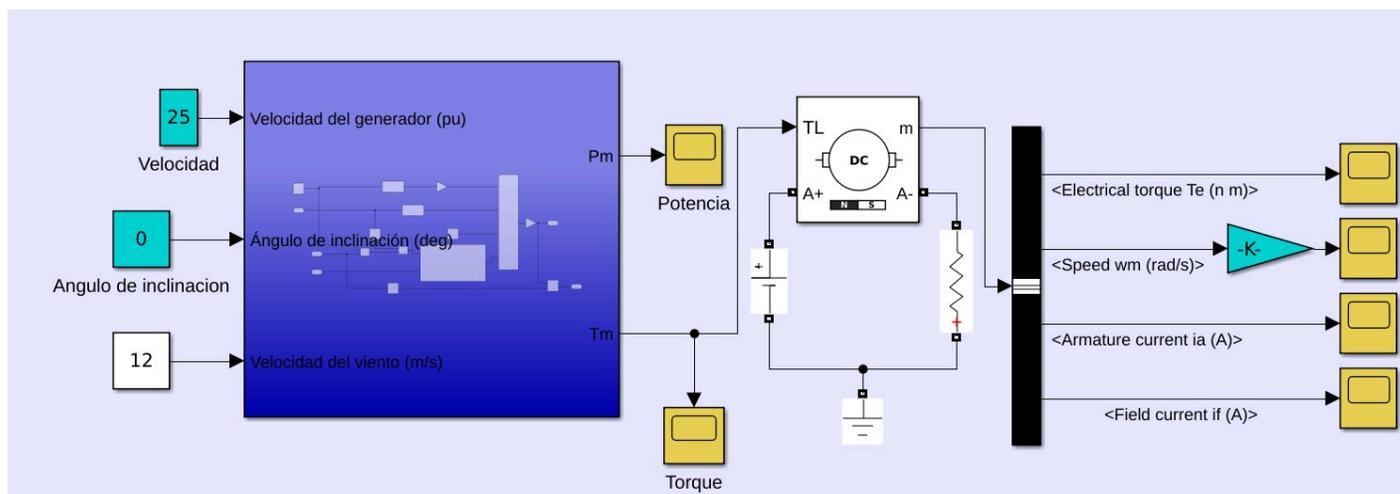
En la tercera pestaña se encuentra el tiempo de muestra del motor el cual tiene un valor asignado de -1.

Para realizar la simulación del motor se utiliza la opción que se observa en la figura 3.5, esta configuración es la más acorde al modelo propuesto. Ya por último se unirán los dos bloques ya antes mencionados, el diseño propuesto de la turbina y el bloque del motor DC.

### 3.1.3 Simulación del aerogenerador

A continuación se verifica y evalúa el comportamiento de la turbina, lo anteriormente mencionado se lleva a cabo haciendo pruebas para asegurar que la máquina funcione según lo esperado.

Figura 3.7 Modelo del aerogenerador



Fuente: Elaboración propia en software MatLab

En la figura anterior se muestra el diagrama de bloques en Simulink del modelo del aerogenerador. En este diagrama, se logra visualizar los distintos bloques mencionados previamente, así como algunos nuevos que serán detallados a continuación:

- Los bloques de color cian representan los valores constantes que se configuraron para la turbina. Estos valores se ingresan como parámetros fijos en el sistema para asegurar un funcionamiento estable y predecible.
- Los bloques de color amarillo representan los osciloscopios (scopes) con los cuales se logra visualizar y monitorear diversas variables o señales en tiempo real. Por medio de estos scopes se logra analizar y evaluar el comportamiento de la turbina

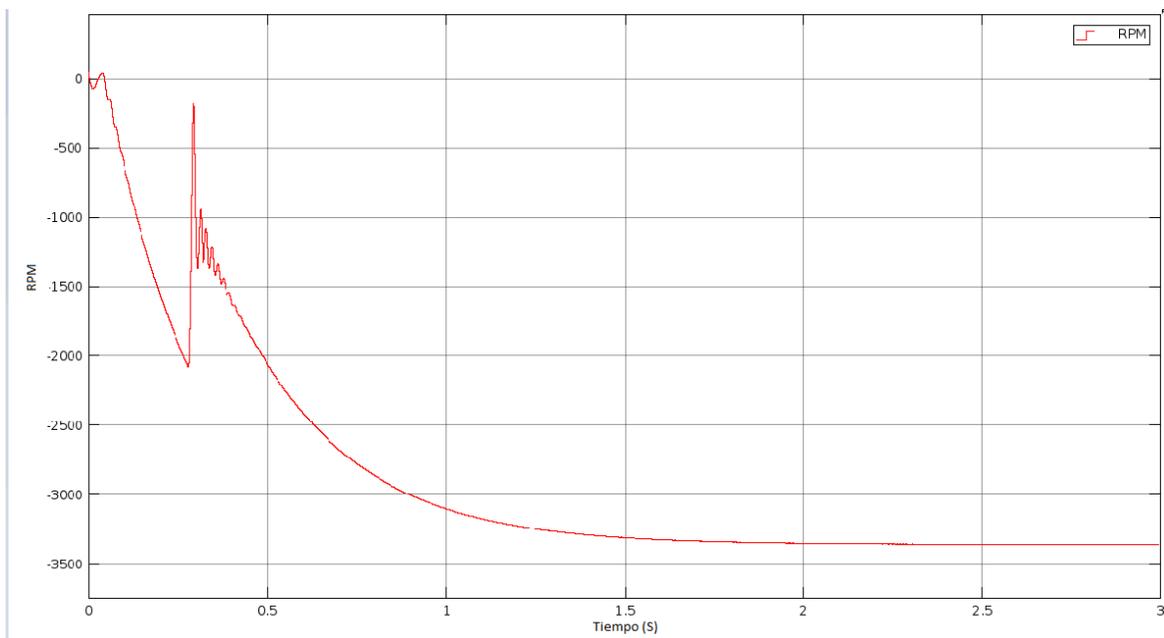
durante su funcionamiento, brindando información valiosa sobre su rendimiento y posibles mejoras.

- El bloque de color azul oscuro representa la turbina, la cual se ha mencionado y explicado anteriormente. Este bloque encapsula el modelo y el comportamiento de la turbina en el sistema y desempeña un papel fundamental en el funcionamiento general de la máquina.
- El bloque de color blanco representa el motor de corriente continua (DC), el cual ha sido mencionado y explicado anteriormente. Este bloque representa la parte central de la máquina, convirtiendo la energía eléctrica en energía mecánica para impulsar el funcionamiento de la turbina.

Al aplicar los valores establecidos en los bloques de color cian, se obtiene una respuesta en el sistema. Estos valores constantes son determinantes para el comportamiento y rendimiento de la turbina. La respuesta obtenida será el resultado de la interacción de todos los bloques y parámetros en el sistema, de esta manera se evalúa y analiza el rendimiento de la turbina en función de las condiciones específicas establecidas.

En la figura 3.8 se muestra el gráfico que representa el comportamiento del motor en conjunto con la turbina. Esta gráfica revela que a medida que transcurre el tiempo, la turbina experimenta un aumento gradual en las RPM hasta alcanzar un momento en el cual se mantiene constante. Esto indica que hay un momento en el que la velocidad del viento se vuelve constante, lo cual impacta en el comportamiento de la turbina. Cuando la velocidad del viento se estabiliza, la turbina opera de manera más consistente, ya que no hay fluctuaciones significativas en la entrada de energía. En esta fase de funcionamiento constante, la turbina puede mantener una generación de energía más estable y predecible.

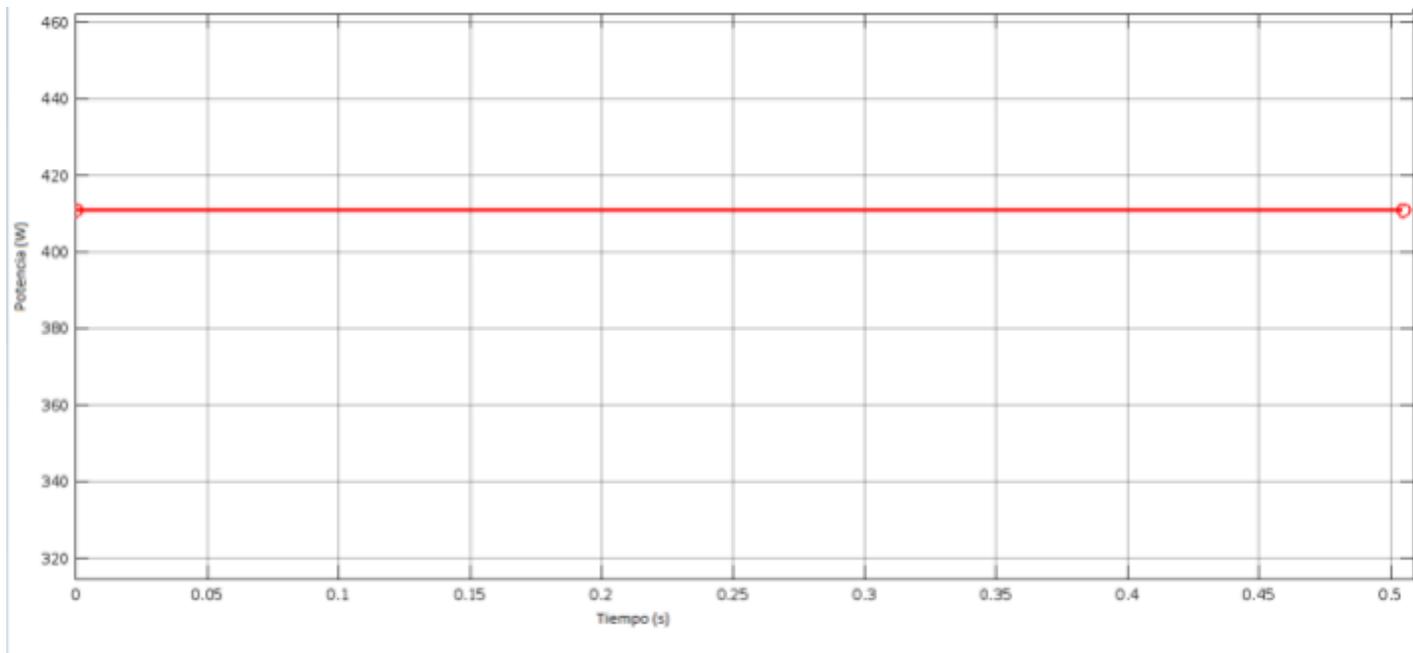
Figura 3.8 Gráfica del comportamiento del motor (RPM)



Fuente: Software MatLab

A continuación en la figura 3.9 se representa la respuesta de la potencia de la turbina y el motor, destacada en color rojo, evidenciando la estabilidad de la potencia a lo largo del período analizado.

Figura 3.9 Gráfica potencia

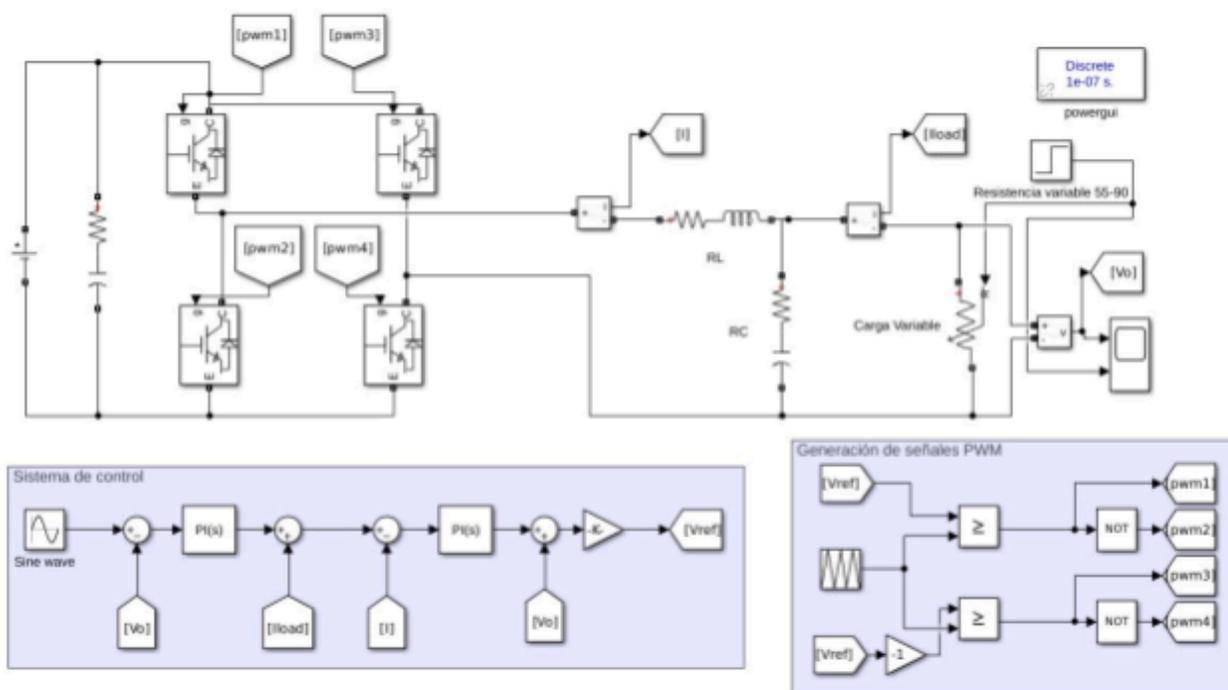


Fuente: Elaboración propia en MatLab

### 3.2 Inversor monofásico de potencia y sistema de control

En la figura 3.10 se muestra el inversor de potencia acoplado con el sistema de control del mismo.

Figura 3.10 Inversor monofásico y sistema de control



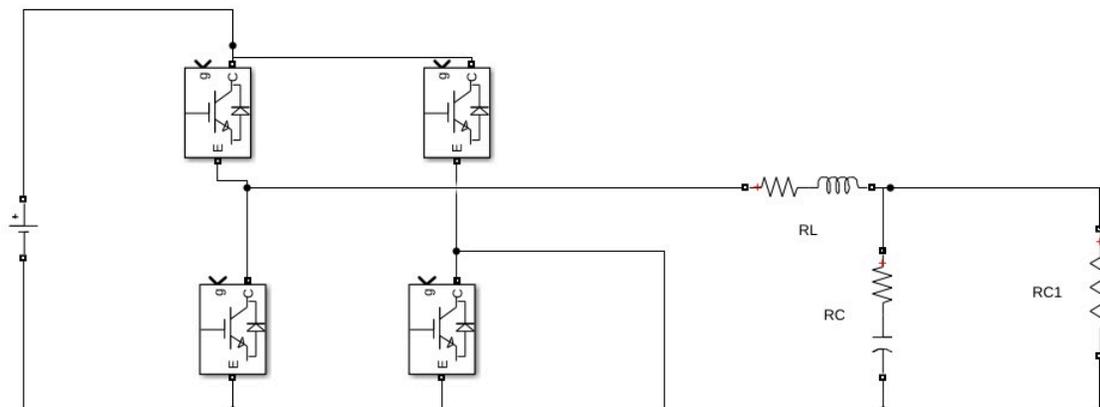
Fuente: Elaboración propia

#### 3.2.1 Inversor monofásico

El desarrollo del inversor de potencia se realiza en MatLab-Simulink, donde se hace la configuración con transistores IGBT, un inductor y una capacitancia que tiene como función filtrar la señal y por último una carga conectada a la salida. En la figura 3.11

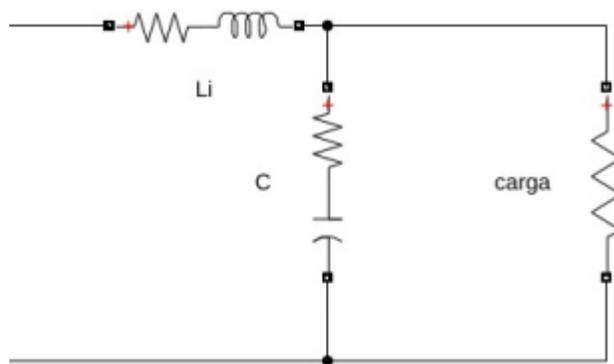
se observa la representación del inversor monofásico, de igual manera en la figura 3.12 se muestra el filtro LC.

Figura 3.11 Inversor monofásico



Fuente: Elaboración propia en software MatLab

Figura 3.12 Filtro LC



Fuente: Elaboración propia en software MatLab

A continuación se hallaran los valores de la inductancia y la capacitancia

Donde se toma como referencia los siguientes valores

$$V_{in} = 24 \text{ V}; V_{out} = 120 \text{ V}; f = 60 \text{ Hz}; P_{out} = 4.5 \text{ W}; f_s = 600 \text{ Hz y } I_{RIP} = 20\%$$

$V_{in}$ : Voltaje que entrega el aerogenerador.

$V_{out}$ : Voltaje que se quiere entregar a la salida.

$f$ : Frecuencia a la que va a operar

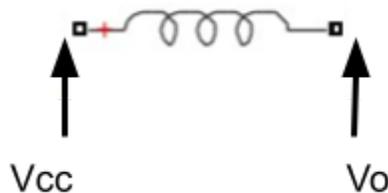
$P_{out}$ : Potencia consumida por la carga.

$f_s$ : Frecuencia de conmutación.

$I_{RIP}$ : Corriente de ondulación del inductor.

Para el diseño de un inductor se parte de que este recibe un voltaje  $V_{cc}$  en un extremo, que es el voltaje de entrada y un voltaje en el otro extremo que es el voltaje de salida  $V_o$  como se muestra en la Figura 3.13:

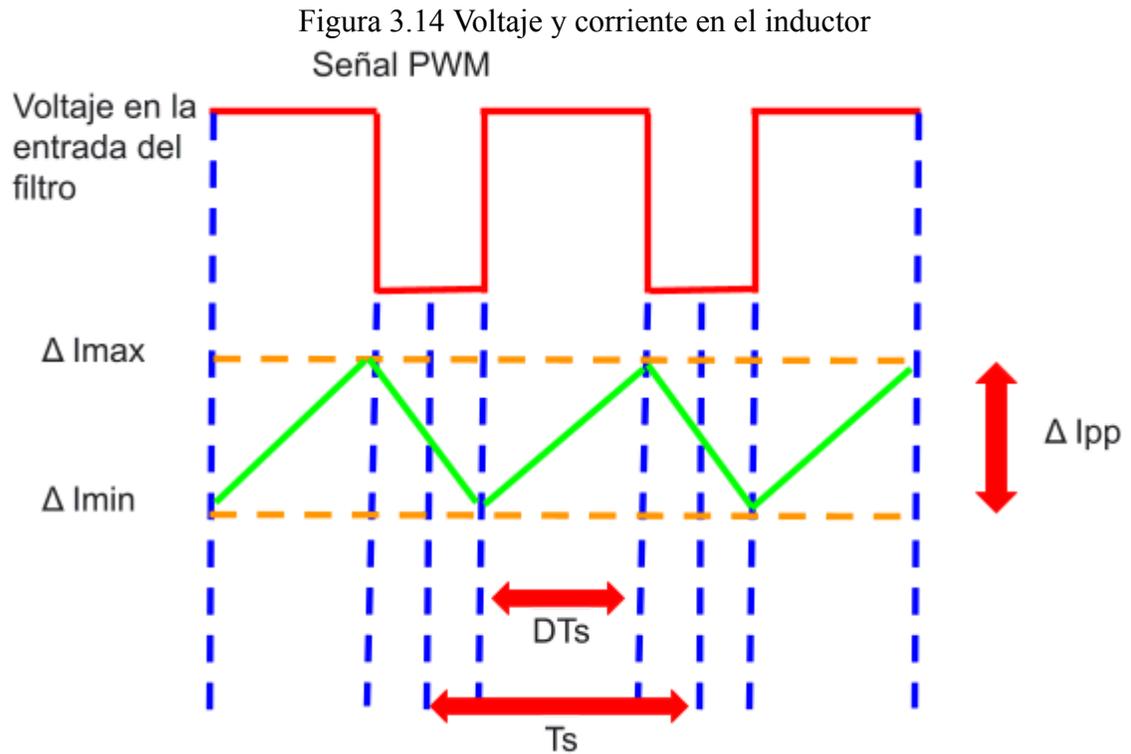
Figura 3.13 Tensión eléctrica en un inductor



Fuente: Elaboración propia

Cuando se aplica una señal PWM como se muestra en la figura 3.13 habrá un voltaje y una corriente en el inductor, la corriente se define como  $\Delta I_{pp}$  que es la corriente

de rizado, esta corriente de rizado es la diferencia entre  $\Delta I_{max}$  y  $\Delta I_{min}$  como se puede apreciar en la figura 3.14. Donde  $\Delta I_{pp} = I_{RIP}$



Fuente: Elaboración propia

Ahora para hallar voltaje en un inductor se parte de [20]:

$$V = L_i \frac{di}{dt} \quad (3.6)$$

Se puede expresar V como la diferencia de tensión de un extremo y otro, tomando como referencia la señal PWM que se muestra en la figura 3.13[20]:

$$V_{cc} - V_o = L_i \frac{\Delta I_{pp}}{DTs} \quad (3.7)$$

Donde:

$V_{cc}$ : Voltaje de entrada (V).

$V_o$ : Voltaje en la salida (V).

$L_i$ : Inductancia (H)

$\Delta I_{pp}$ : Corriente de rizado (A)

$D$ : Ciclo útil

$T_s$ : Frecuencia de conmutación (HZ).

De La ecuación (3.7) se despeja  $\Delta I_{pp}$  y se obtiene:

$$\Delta I_{pp} = \frac{DT_s(V_{cc} - V_o)}{L_i} \quad (3.8)$$

Para cualquier inversor PWM que use una señal de referencia sinusoidal el ciclo de trabajo es[20]:

$$D (wt) = ma \cdot \sin (wt) \quad (3.9)$$

En una señal PWM habrá un tiempo donde el nivel de voltaje sea alto y este tiempo es el ciclo útil así que el voltaje de salida también se puede describir como:

$$V_o = V_{cc} \cdot D \quad (3.10)$$

Se sustituye la ecuación (3.9) en la ecuación (3.8):

$$\Delta I_{pp} = \frac{ma \cdot \sin(wt)Ts(V_{cc} - V_{cc} \cdot ma \cdot \sin(wt))}{L_i} \quad (3.11)$$

Si se factoriza la ecuación (3.11) la ecuación final para  $\Delta I_{pp}$  es:

$$\Delta I_{pp} = \frac{ma \cdot \sin(wt)Ts \cdot V_{cc}(1 - ma \cdot \sin(wt))}{L_i} \quad (3.12)$$

Para encontrar el índice de modulación donde está presente la ondulación máxima se deriva  $\Delta I_{pp}$  respecto al tiempo y se iguala a cero (3.13), lo que da como resultado la ecuación (3.14)[20]:

$$\frac{d(\Delta I_{pp})}{dt} = 0 \quad (3.13)$$

$$\sin(wt) = \frac{1}{2ma} \quad (3.14)$$

Así que para obtener  $\Delta I_{ppmax}$  se sustituye en (3.12) y se obtiene[20]:

$$\Delta I_{ppmax} = \frac{V_{in} \cdot Ts}{4L_i} \quad (3.15)$$

La corriente máxima también se puede denotar como:

$$\Delta I_{ppmax} = I_{RIP} \cdot I_o \cdot \sqrt{2} \quad (3.16)$$

Para hallar la corriente se tiene en cuenta la ley de watt:

$$I_o = \frac{P_{out}}{V_{out}} \quad (3.17)$$

Finalmente para hallar el valor de la inductancia se despeja  $L_i$  de la ecuación (3.15) y se sustituye la ecuación (3.16) en la ecuación (3.15), para así obtener que:

$$L_i = \frac{V_{in}}{4 \cdot f_s \cdot I_{RIP} \cdot I_o \cdot \sqrt{2}} \quad (3.18)$$

Se reemplazan los valores de referencia para hallar el valor de la inductancia:

$$L_i = \frac{24}{4 \cdot 600 \cdot 0.2 \cdot (4500/120) \cdot \sqrt{2}} = 942.8 \mu H \quad (3.19)$$

A continuación se realiza el diseño del capacitor, para esto se tiene en cuenta que el inductor y el capacitor forma un filtro paso bajo y la frecuencia de corte está dada por [20]:

$$F_c = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}} \quad (3.20)$$

Para que la atenuación de la frecuencia de conmutación sea óptima, la frecuencia de corte Tiene que ser[20]:

$$F_c < = \frac{f_{sw}}{10} \quad (3.21)$$

Se sustituye la ecuación (3.21) en la ecuación (3.20):

$$\frac{f_{sw}}{10} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}} \quad (3.22)$$

Para hallar el valor del capacitor se despeja  $C$  de la ecuación (3.22):

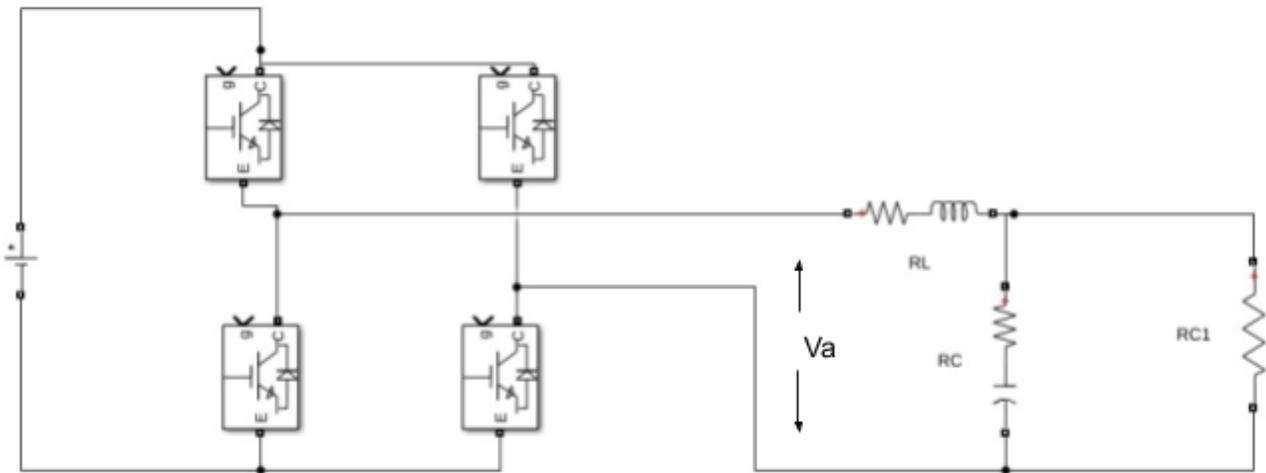
$$C = \left( \frac{10}{2\pi \cdot f_{sw}} \right)^2 \cdot \frac{1}{L} \quad (3.23)$$

Se reemplazan los valores de referencia y el valor de la inductancia y el valor del capacitor es de:

$$C = \left( \frac{10}{2\pi \cdot 600} \right)^2 \cdot \frac{1}{942.8 \mu} = 7.46 \text{ mF} \quad (3.24)$$

En la figura 3.15 se muestra la representación del inversor monofásico de puente completo con una carga.

Figura 3.15 Inversor monofásico de puente completo

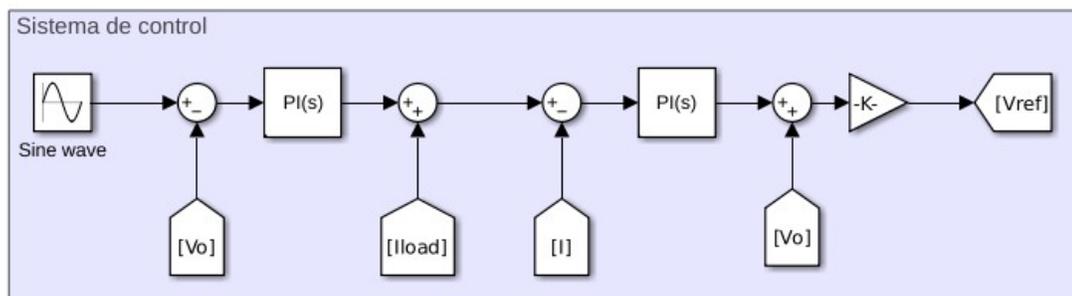


Fuente: Elaboración propia con software MatLab

### 3.2.2 Sistema de control del inversor

En la figura 3.16 se muestra el esquema del sistema de control que se realizó:

Figura 3.16 Sistema de control para la generación de la señal de referencia

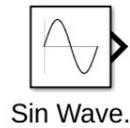


Fuente: Elaboración propia en software MatLab

El primer control proporcional es utilizado para el control de voltaje donde se compara el voltaje de la señal sinusoidal y el voltaje que hay sobre la carga al cual se aplica un control PI, la salida del controlador de voltaje es comparada con la corriente en la carga; el resultado de dicha comparación se compara con la corriente en el inductor esta comparación sirve para hacer el control de la corriente el resultado de dicha comparación se integra a un controlador PI, con este resultado se hace una comparación más con el voltaje en la carga para que dicho resultado sea el voltaje de referencia, que será el voltaje de referencia para generar la señal del PWM.

La señal sinusoidal se genera utilizando el bloque representado en la figura 3.17. Esta señal adopta la forma de una onda senoidal. Es necesario realizar ajustes en dos aspectos fundamentales: la amplitud y la frecuencia de la carga.

Figura 3.17 Bloque de generación de la señal de referencia



Fuente: Elaboración propia

En relación a la amplitud, se establece un valor específico que determina el voltaje de salida. En este caso, se ha seleccionado una amplitud de 120 unidades. Por otro lado, la frecuencia de la carga debe ser configurada en radianes; la carga maneja una frecuencia de 60Hz. La frecuencia en radianes es  $2 \cdot \pi \cdot f$ .

Para obtener las ganancias proporcionales e integrales del control de voltaje se toman los siguientes parámetros:

Un tiempo de control el cual será constante  $t_v=200$  uS, el valor de la capacitancia previamente obtenido  $C=7.46$  mF y la resistencia  $r_c=0.0042$  donde [21]:

$$K_p = \frac{\text{capacitancia}}{t_v} \quad (3.29)$$

$$K_i = \frac{r_c}{t_v} \quad (3.30)$$

Así que la ganancia proporcional del control del voltaje es 37.3 y la ganancia integral es 21.

A continuación se hallan las ganancias proporcionales e integrales para el control de corriente donde se tienen los siguientes parámetros:

Un tiempo de control el cual será constante  $t_i=150 \mu\text{s}$ , el valor de la inductancia hallado  $L = 942.8 \mu\text{H}$  y la resistencia  $r_l=0.001$  donde [21]:

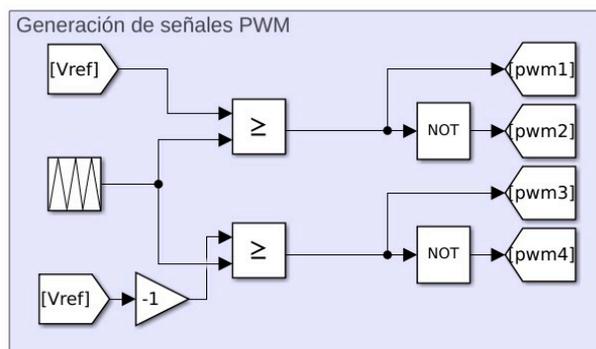
$$K_p = \frac{\text{Inductancia}}{t_i} \quad (3.31)$$

$$K_i = \frac{r_l}{t_i} \quad (3.32)$$

Al reemplazar los valores se obtiene una ganancia proporcional del control de corriente de 6.29 y una ganancia integral de 6.67.

A continuación se muestra el bloque de la generación PWM la cual se lleva a cabo con la conmutación unipolar como se muestra en la figura 3.18 donde esta la señal de referencia sin desfase y la señal de referencia con un desfase de  $180^\circ$ , para generar dicho desfase se aplicó una ganancia de -1. Además de esto se implementan compuertas lógicas NOT en cada una de las referencias. De aquí obtenemos los Voltajes  $V_a$  y  $V_b$  del puente.

Figura 3.18 Bloque de generación PWM



Fuente: Elaboración propia

### 3.3 OPAL-4510

El OPAL-4510 es un simulador compacto de nivel básico en cual se pueden realiza prototipos de control rápido de alto rendimiento y simulación de hardware en el bucle. Incorpora la plataforma en tiempo real OPAL-RT RT-LAB y FPGAAsim, en conjunción con los procesadores de alto rendimiento de chips Intel y FPGA, junto con el software estándar de la industria, Simulink y LabVIEW. Esta arquitectura, basada en FPGA de múltiples velocidades, permite al usuario alcanzar pasos de tiempo inferiores a  $7 \mu\text{s}$  para subsistemas ejecutados en CPU INTEL, y menos de 250 nanosegundos en el chip FPGA, garantizando una simulación precisa del convertidor de potencia para aplicaciones HIL.

Posteriormente, se puede implementar un controlador convertidor PWM avanzado para supervisar hardware real en aplicaciones de creación de prototipos de control rápido (RCP), con una resolución de temporización superior a 20 nanosegundos. Además, el OPAL-4510 puede entregarse como un sistema de prueba de controlador electrónico de potencia independiente, proporcionando modelos electrónicos de potencia predefinidos para facilitar su implementación.[22]

En la figura siguiente, se aprecia el OPAL-4510, el cual fue empleado para llevar a cabo las pruebas en el laboratorio.

Figura 3.19 OPAL - 4510



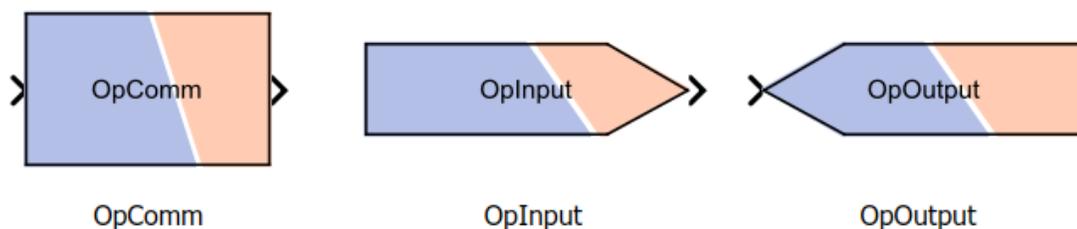
Fuente: [23]

### 3.3.1 RT-LAB

El RT-LAB es un software integrado con MatLab/Simulink, y posibilita que los modelos de Simulink interactúen en tiempo real. Esta característica hace que RT-LAB resulte ideal para la ingeniería, se desarrollen y validen eficazmente sus aplicaciones en tiempo real, sin importar su nivel de complejidad. Funcionando como una plataforma multidominio, RT-LAB ofrece soluciones flexibles y escalables que se adaptan a las necesidades de las industrias de sistemas de energía, electrónica de potencia, aeroespacial y automotriz.

Se trata de un software que posibilita la simulación en tiempo real al establecer una conexión con MatLab-Simulink. Este software colabora de manera conjunta con un diseño desarrollado en Simulink, y mediante la utilización de los bloques representados en la figura 3.20, se enlaza con RT-LAB para llevar a cabo simulaciones en el entorno OPAL.

Figura 3.20 Bloques de conexión en simulink

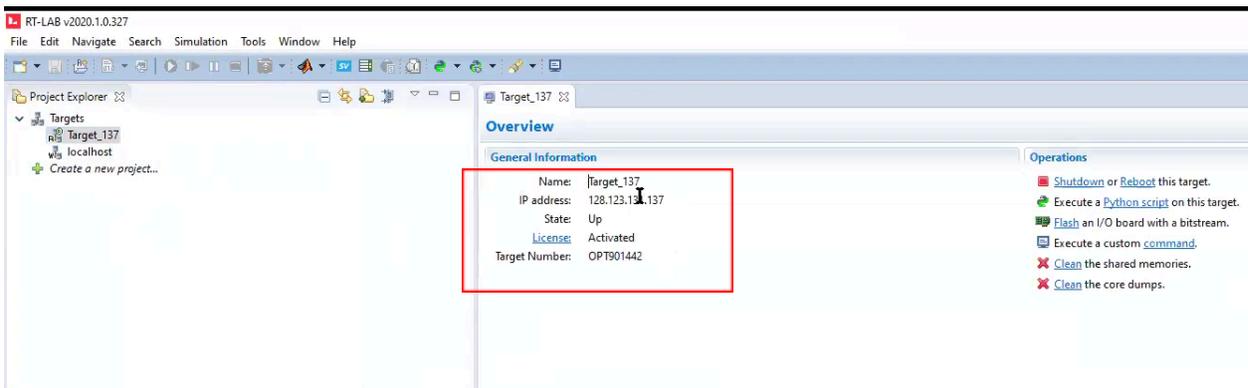


Fuente: Elaboración propia

### 3.4 Sincronización con RT-LAB

Para iniciar la sincronización con RT-LAB, es crucial asegurarse de que haya una conexión estable con el OPAL-4510, el cual debe estar previamente conectado a nuestra computadora. Esto se puede verificar mediante el software de RT-LAB. Tal como se evidencia en la figura 3.21, se muestra en el rectángulo rojo que disponemos de una licencia que nos brinda el acceso al OPAL-4510.

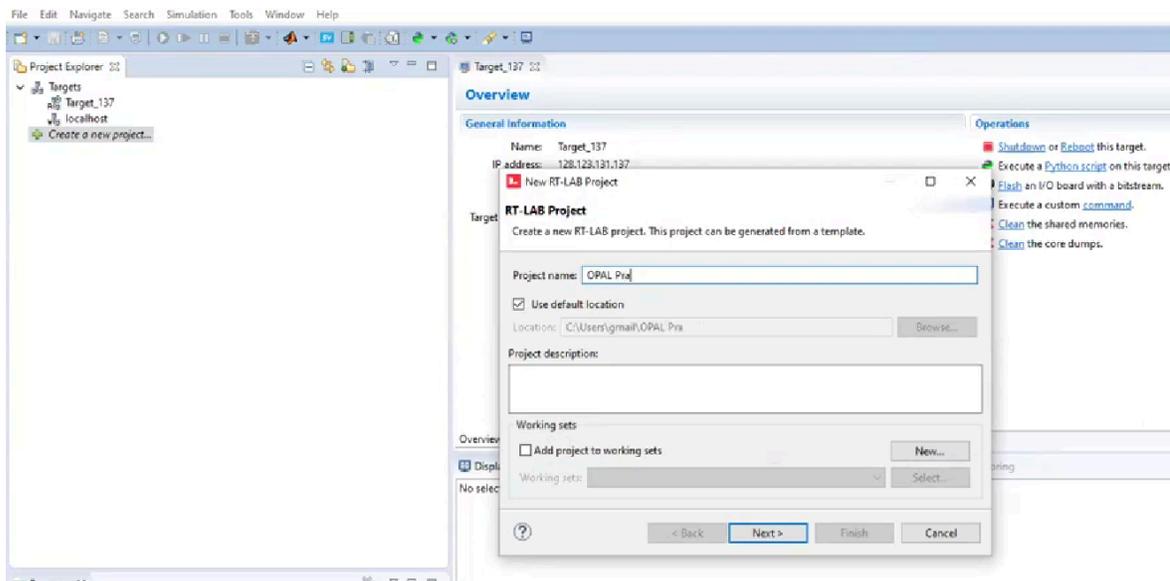
Figura 3.21 Conexión entre RT-LAB con el OPAL-4510



Fuente: Elaboración propia

Después de haber sincronizado exitosamente el software de RT-LAB con el OPAL-4510, el siguiente paso es crear un nuevo proyecto. Este proyecto actuará como un intermediario entre el OPAL-4510 y MatLab, facilitando así la conexión entre ambos sistemas como se muestra en la figura 3.22.

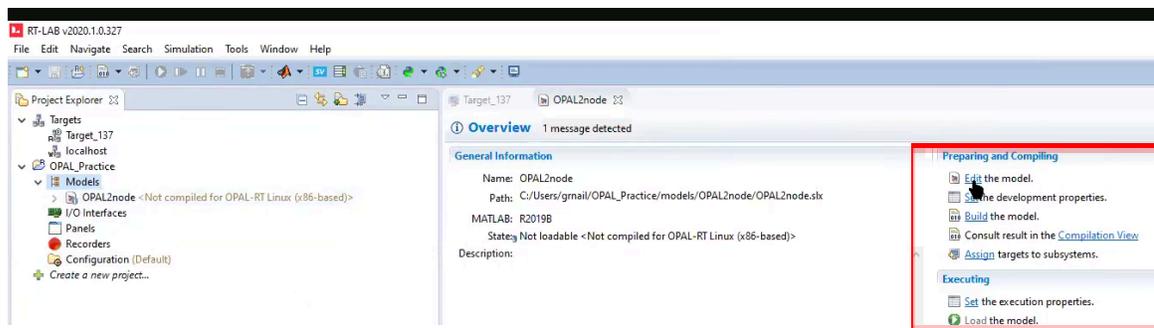
Figura 3.22 Creación de nuevo proyecto



Fuente: Elaboración propia

Después de haber creado el proyecto, se inicia Matlab desde el entorno RT-LAB. Este paso es esencial para garantizar la ejecución de los archivos de nuestro proyecto en el OPAL- 4510. como se observa figura 3.23. Este procedimiento garantiza una correcta integración entre el entorno de desarrollo y el hardware destinado

Figura 3.23 Creación de nuevo proyecto



Fuente: Elaboración propia

### **3.4.1 Sincronizar modelo de la turbina con RT-LAB**

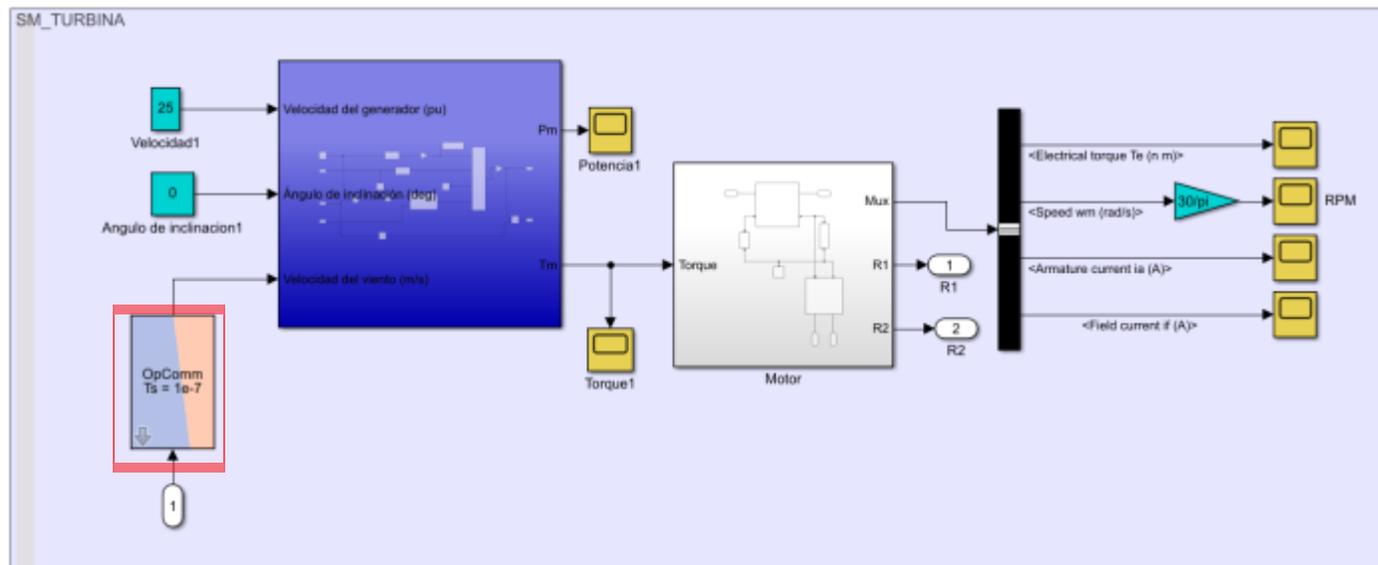
Una vez se haya sincronizado el RT-LAB con el OPAL-4510 se procede a colocar los bloques mencionados en el anexo figura 3.20 para establecer una comunicación de maestro-esclavo entre Simulink y OPAL-4510.

Estos bloques permitirán establecer una conexión y una sincronización adecuada entre los dos entornos de software. A través de esta comunicación de maestro-esclavo, Simulink actuará como el maestro que controla y monitorea el comportamiento de la turbina, mientras que OPAL-4510 funcionará como el esclavo que ejecuta la simulación y proporciona información en tiempo real.

La configuración de estos bloques permitirá una interacción fluida y eficiente entre Simulink y OPAL-4510, asegurando que el modelo de la turbina se ejecute de manera precisa y realista en el entorno de simulación.

En primer lugar, se asigna el bloque "OpComm" a la entrada de la turbina, el cual se encargará de establecer la comunicación con OPAL-4510. Este bloque permitirá la interacción y transferencia de datos entre el sistema y OPAL-4510, como se observa en la figura 3.24.

Figura 3.24 Asignar los bloques del Opal

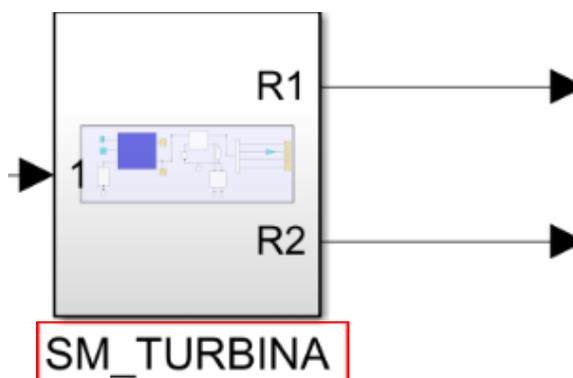


Fuente: Elaboración propia

De la figura 3.24 se procede a crear un subsistema, este subsistema se representa en la figura 3.25 y se utiliza para integrar todos los componentes necesarios en un solo conjunto. Al incluir el modelo de la turbina y su motor en este subsistema, se facilita el análisis y la simulación conjunta de ambos componentes, permitiendo evaluar su comportamiento y rendimiento de manera integrada.

Es esencial asignar la referencia "SM\_" al sistema durante su creación. Esta designación resulta necesaria para que Simulink identifique que dicho sistema desempeñará el papel de maestro en la configuración de comunicación maestro-esclavo.

Figura 3.25 Creación del sistema SM\_TURBINA

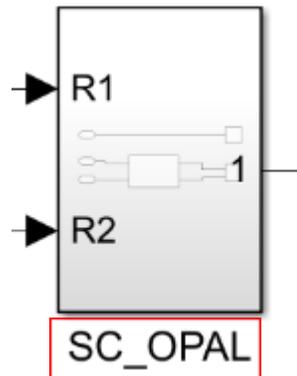


Fuente: Elaboración propia

Al utilizar el prefijo "SM\_" seguido del nombre del sistema, se establece de manera clara y explícita la función y el rol que desempeñará dentro del contexto de la comunicación. Esto garantiza una correcta identificación por parte de Simulink y evita posibles confusiones en la configuración y la interacción entre los diferentes sistemas y bloques involucrados en la comunicación maestro-esclavo, facilitando así la simulación y el monitoreo del modelo de la turbina en el entorno de simulación.

Se introduce un segundo subsistema que opera como esclavo el cual se observa en la figura 3.26, posibilitando la observación en tiempo real de la respuesta del sistema y la obtención de retroalimentación inmediata. Este proceso se realiza al recibir información del OPAL-4510. La adopción de este enfoque de configurar un sistema maestro-esclavo en dos subsistemas separados proporciona la capacidad de interactuar de manera eficiente y precisa con el OPAL-4510.

Figura 3.26 Creación del sistema SC\_OPAL



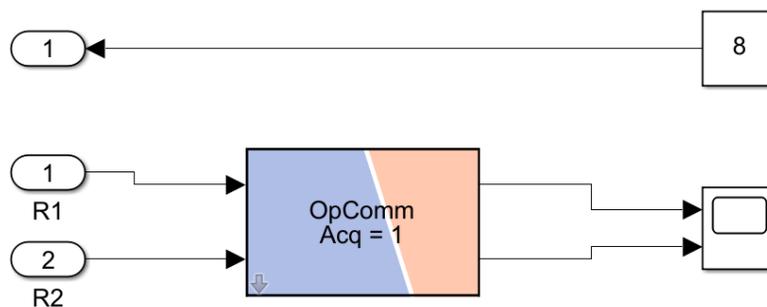
Fuente: Elaboración propia

Es importante asignar el nombre "SC\_" al sistema al momento de crearlo. Esta designación específica permite que Simulink reconozca de manera adecuada que este sistema en particular actuará como el esclavo dentro de la configuración maestro-esclavo.

Dentro del subsistema (SC\_OPAL), se encuentra el sistema representado en la figura 3.27. En este sistema, se incorpora un bloque de salida "OpComm" que genera la señal de retroalimentación proveniente de OPAL-4510. Esta señal se conecta a un bloque "Scope" para visualizar la respuesta del sistema.

La inclusión del bloque de salida "OpComm" permite capturar la señal generada por OPAL-4510, que refleja el comportamiento real del sistema. Al conectar esta señal al bloque "Scope", podemos observar y analizar visualmente la respuesta del sistema en tiempo real.

Figura 3.27 Bloques de retroalimentación



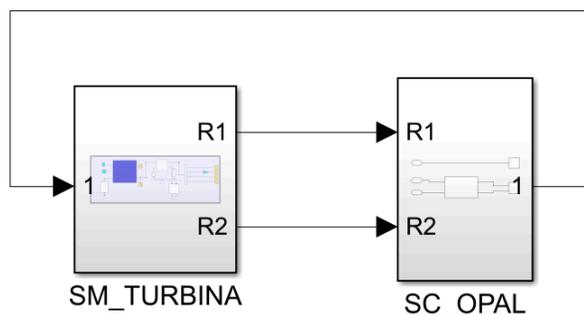
Fuente: Elaboración propia

Además, en el sistema se encuentra un bloque con un valor constante que representa la velocidad del viento. Este bloque se conecta al primer bloque "OpComm" que se muestra en la figura 3.24.

La razón de esta conexión es que se desea que esta señal de entrada se comunique con OPAL-4510 y sea retroalimentada en la turbina. La inclusión del bloque constante que representa la velocidad del viento permite proporcionar una entrada significativa al sistema de la turbina. Al conectar la constante al primer bloque "OpComm", se asegura que la señal de velocidad del viento sea transmitida al OPAL-4510 para su procesamiento y retroalimentación en la turbina.

De esta manera, se logra obtener el sistema global del modelo de la turbina como se observa en la figura 3.28, el cual establece una comunicación exitosa con el OPAL-4510. Mediante la integración de los bloques y sistemas descritos anteriormente, se ha configurado un entorno de simulación que permite evaluar y analizar el comportamiento de la turbina en tiempo real.

Figura 3.28 Retroalimentación de sistemas maestro esclavo

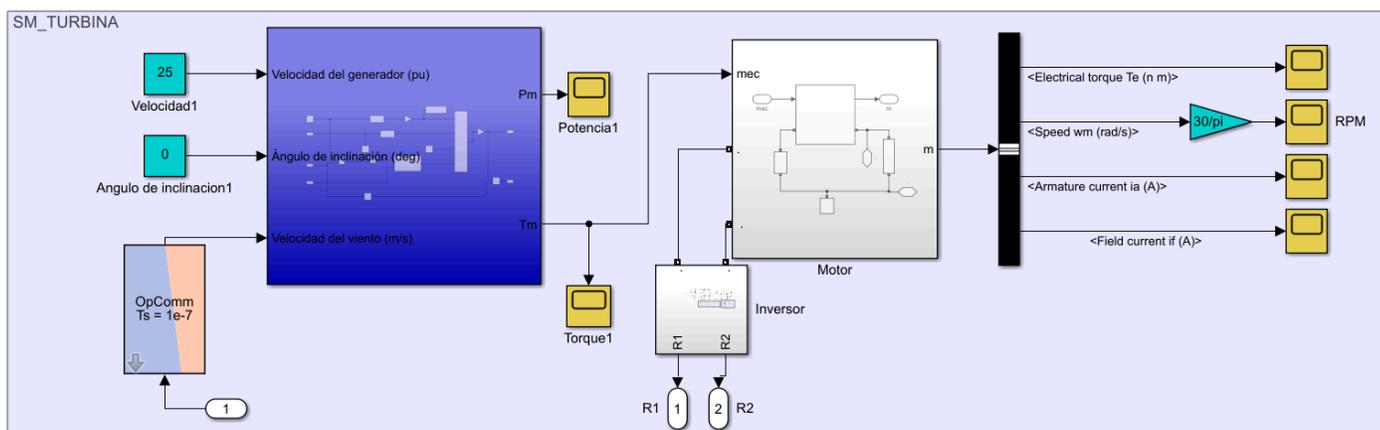


Fuente: Elaboración propia

### 3.4.1.2 Integración del Inversor en el Modelo de la Turbina

Una vez desarrollado y detallado los dos modelos previamente mencionados, el "Modelo de la turbina eólica" y el "Modelo del inversor monofásico", se procede a llevar a cabo la integración de estos dos componentes como se muestra en la figura 3.29. Esto permitirá obtener un modelo completo del sistema, el cual será utilizado para llevar a cabo su prueba de funcionamiento. Esta prueba es útil para someter el sistema y evaluar su desempeño.

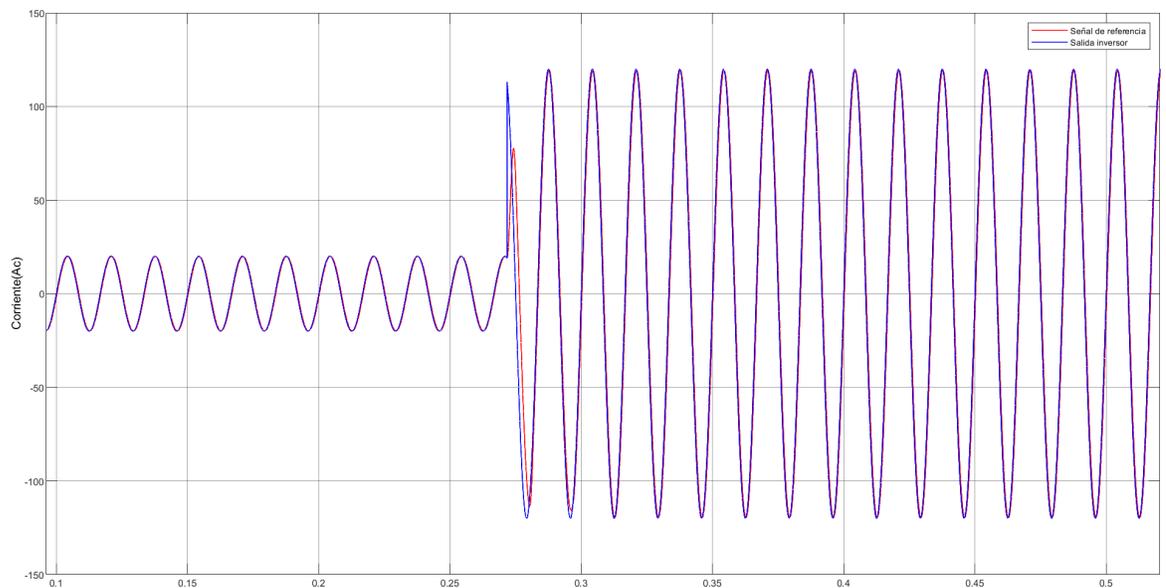
Figura 3.29 Integración del inversor con turbina eólica



Fuente: Elaboración propia

Una vez que el sistema ha sido acoplado, la turbina y el inversor operan de manera conjunta, proporcionando respuestas que serán objeto de análisis. Entre estas respuestas, se encuentra la información sobre las revoluciones por minuto (RPM) generadas por el sistema y, de manera similar, la señal de salida proveniente del inversor. La respuesta del sistema se observa en la figura 3.30.

Figura 3.30 Señal de salida del inversor acoplado al aerogenerador.

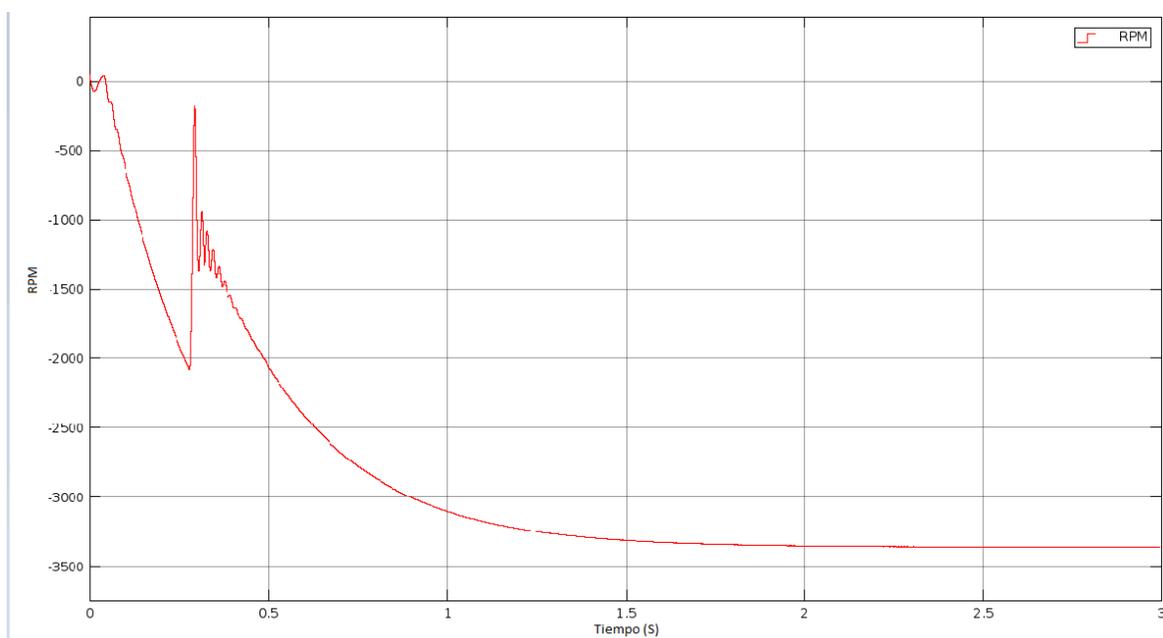


Fuente: Elaboración propia en MatLab

En la figura 3.30, se presenta la salida del sistema en términos del voltaje en corriente alterna (AC). La señal de referencia se representa en azul, mientras que la señal de salida del inversor se muestra en rojo. Es evidente que la señal en AC inicialmente es baja. Sin embargo, al alcanzar las -2000 RPM, como se muestra en la figura 3.31, la señal cambia al valor requerido.

En la figura 3.31, se aprecia la respuesta de las revoluciones por minuto (RPM) del sistema en su conjunto. Se observa un incremento progresivo en las RPM con el transcurso del tiempo. A los 0.25 segundos, se produce una perturbación que ocasiona una disminución en las revoluciones, aunque el sistema logra recuperar la estabilidad posteriormente, el sistema entra a un estado transitorio.

Figura 3.31 Respuesta de RPM

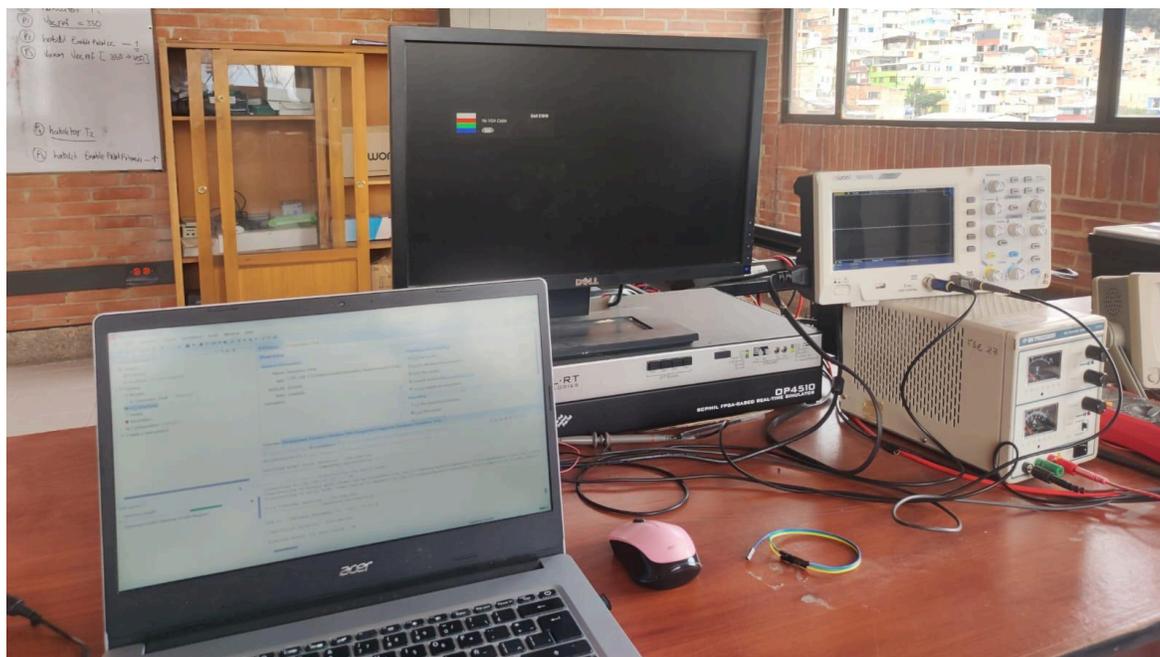


Fuente: Elaboración propia con software MatLab

### 3.4.2 Validación del funcionamiento en el OPAL-4510

En la fase final, se procede a integrar el OPAL-4510 con el sistema de Matlab-Simulink. Se ejecutará la misma prueba que se llevó a cabo en el entorno virtual. La respuesta del sistema integrado se visualizará a través de un osciloscopio, tal como se presenta en la figura 4.1, que incluye el OPAL-4510, el equipo utilizado para la simulación, y el osciloscopio.

Figura 4.1 Montaje experimental del Opal 4510 - Inversor - Equipo de computo



Fuente: Elaboración propia

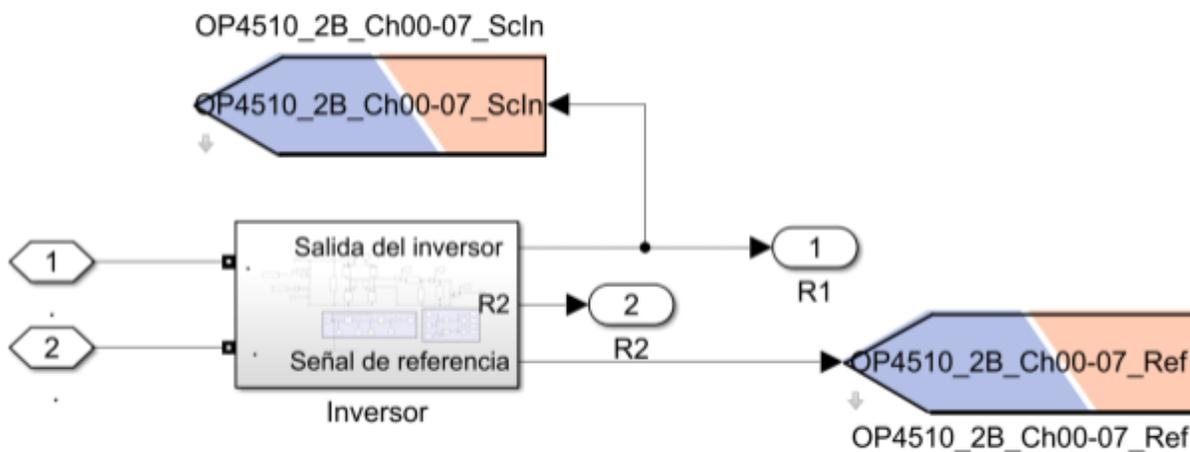
### 3.4.2.1 Conexión osciloscopio y Simulink

Para realizar la conexión entre el osciloscopio y el entorno de simulink se acoplan los bloques ya mencionados en la figura 3.20, que actúan como etiquetas que el OPAL-4510 reconoce.

- Para realizar la conexión de entrada al OPAL-4510 se le asigna a la etiqueta el nombre: OP4510-2B\_Ch00-07\_Ref
- Para realizar la conexión de salida del Opal y la cual va conectada al Osciloscopio se le asigna a la etiqueta el nombre: OP4510-2B\_Ch00-07\_Scln

Esta asignación de las etiquetas se observa en la figura 4.2 que se observa más adelante.

Figura 4.2 Potencia extraída de la turbina



Fuente: Elaboración propia

En la parte bibliográfica se anexa el manual correspondiente con el cual se realizó la verificación sobre la asignación de las etiquetas de salidas y entradas que tiene el OPAL - 4510.[23]

Al realizar la anterior conexión del OPAL - 4510 y el Osciloscopio se obtiene la siguiente respuesta que se observa en la figura 4.3, Es la señal de salida del inversor acoplado al aerogenerador.

Figura 4.3 Señal de salida del inversor acoplado al aerogenerador



Fuente: Elaboración propia con software MatLab

La figura 4.3 muestra una respuesta en tiempo real del sistema. Durante los primeros 0.27 segundos, se observa un período de estado transitorio, donde el sistema aún no ha alcanzado las revoluciones por minuto (RPM) necesarias para llegar al estado estable y generar los 120 voltios de corriente alterna (AC).

## CONCLUSIONES

Se realizó y construyó el diseño el modelo de una turbina eólica el cual se conectó con un motor DC y se obtuvo un aerogenerador que a la salida entrega una potencia de 400 W con un voltaje de 24 V. De igual manera se hizo un sistema de control PID de un inversor monofásico de potencia, obteniendo así una señal sinusoidal de 120 V con una frecuencia de 60 Hz. Posteriormente se acopló el aerogenerador y el inversor con el control haciendo uso del dispositivo de prototipado rápido OPAL 4510 y el software RT-LAB. Finalmente se hace la validación de la plataforma conectando un inversor y un osciloscopio al OPAL 4510 obteniendo así las gráficas de potencia, es así que se valida que tanto los resultados de la simulación en el software MatLab como los resultados de manera física son iguales obteniendo así una plataforma de simulación en tiempo real de un sistema de generación eléctrica compuesto por un aerogenerador de 400 W y un inversor.

## ANEXOS

### Anexo A Añadir la Toolbox de RT-LAB a Simulink

Para realizar este paso es necesario dirigirse a las siguientes direcciones en nuestro computador en el lugar donde se encuentran los datos de RT-LAB.

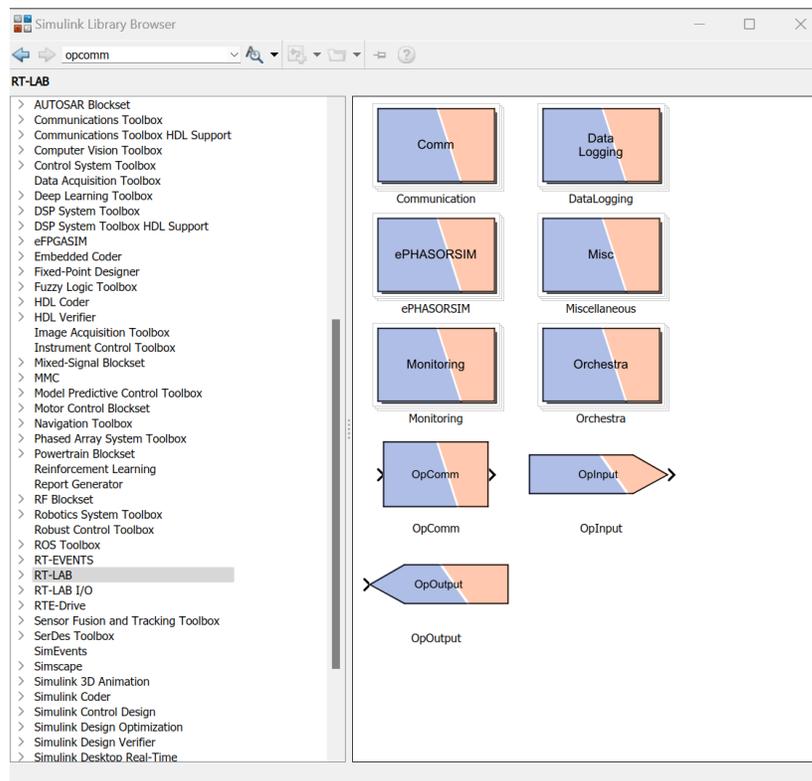
- R:T-LAB: C:\OPAL-RT\RT-LAB\[RT-Lab version]\simulink\m\setup\_rtlab.m
- ARTEMIS                      Blockset                      C:\OPAL-RT\ARTEMIS\[ARTEMIS version]\art\_m\setup\_artemis.m
- RT-EVENTS                      Blockset:                      C:\OPAL-RT\RT-EVENTS\[RT-EVENTS version]\rte\_m\setup\_rtevents.m
- RT-XSG: C:\OPAL-RT\RT-XSG\[RT-XSG version]\rtxsg\_m\setup\_rtxsg.m

Estas direcciones se encuentran en la guía de instalación que nos entrega RT-LAB [1].

Ingresamos a las direcciones en donde se encuentren los datos del software y abrimos los archivos como un script.m, esto para que en MatLab se ejecuten los códigos y carguen las Toolbox de RT-LAB a Simulink,

Después de realizar los anteriores pasos encontraremos en la librería de simulink los siguientes bloques que se observan en la figura A1.

Figura A1 Sistema resultante



Fuente: Elaboración propia

## Referencias bibliográficas

- [1] Sánchez R. D (2020). El futuro y la demanda energética.(2022-Julio-05)  
<https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/102598/S%c3%a1nchez%20Dur%c3%a1n%2c%20Rafael%20Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [2] Zacarias A, Gonzales D y Rodriguez E (2021).Production and consumption of renewable energy. Wind energy in Mexico.(2022-Julio-10)  
<https://www.fesc.edu.co/Revistas/OJS/index.php/mundofesc/article/view/831/673>
- [3] Merabet, A., Tawfique, K. A., Islam, M. A., Enebeli, S., & Beguenane, R. (2014). Wind turbine emulator using OPAL-RT real-time HIL/RCP laboratory. Proceedings of the International Conference on Microelectronics, ICM,(2022-Julio-15).  
<https://doi.org/10.1109/ICM.2014.7071839>
- [4] Hussain, J., & Mishra, M. K. (2015). Design and development of real-time small-scale wind turbine simulator. India International Conference on Power Electronics, IICPE,(2022-Julio-25). <https://doi.org/10.1109/IICPE.2014.7115782>
- [5] Chen Qi, Shiyao Qin, Fenglin Miao, Shaolin Li, Ruiming Wang, (2016), "Test and Assessment of Grid Forming Wind Turbine based on Controller Hardware-in-the-Loop". (2022-Julio-30). <https://doi.org/10.1109/PESGM.2016.7741243>

[6] Ortega, R., Carranza, O., Sosa, J. C., García, V., & Hernández, R. (2016). Diseño de controladores para inversores monofásicos operando en modo isla dentro de una microrred (2022-Julio-30) <https://doi.org/10.1016/j.riai.2015.09.010>

[7] OPAL-RT TECHNOLOGIES. (2020). Introducción a la simulación en tiempo real (2022-Agosto-01)

<https://www.youtube.com/watch?v=MTg3Mw9ZE2o>

[8] Parlamento Europeo.(2021). Emisiones de gases de efecto invernadero por país y sector (2022-Agosto-5)

<https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20180301STO98928/emisiones>

[9] Universitat Carlemany. (2022) Ejemplos de energías sucias y contaminantes (2022-Agosto-05)

<https://www.universitatcarlemany.com/actualidad/ejemplos-de-energias-sucias-o-contaminantes#:~:text=La%20energ%C3%ADa%20sucia%20es%20aquella,tiene%20por%20qu%C3%A9%20ser%20limpia.>

[10] fjarabo (2020)Diseño de instalaciones eólicas. (2022-Agosto-05)

<https://fjarabo.webs.ull.es/TER/EOLIC/EOLIC05.HTM#:~:text=El%20emplazamiento%20elegido%20para%20instalar,y%20distribuci%C3%B3n%20de%20los%20vientos.>

[11] UPME (2015) Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. (2022-Agosto-05)

[http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion\\_Energias\\_Renovables/INTEGRACION\\_ENERGIAS\\_RENOVANLES\\_WEB.pdf](http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion_Energias_Renovables/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf)

[12] International Renewable Energy Agency, *Energy Transition*, , 2020 [En línea]. Disponible en: <https://www.irena.org/energytransition>

[13] ABB, “Plantas eólicas”, *cuaderno de aplicaciones técnicas*, no. 12, pp 4-41, 2012

[14] P. E Loja Encalada, *sistema de emulación eólica para validar parámetros característicos de sistemas distribuidos*, Trabajo de titulación, Departamento de electrónica y automatización, Universidad politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2021.

[15] M. Villarrubia López, *Ingeniería de la Energía Eólica*, 1ra edición, Barcelona, España: Marcombo S.A, 2012.

[16] P. J. A. Del Rio Pinilla, *control de inversor en puente completo mediante modulación spwm*, Tesis técnico universitario, Departamento de Electrónica e Informática, Universidad Técnica Federico Santa María UTFSM, Valparaíso, Chile, 2018.

[17] D. W. Hart. *Electrónica de potencia*, 1ra edición, Madrid, España: Pearson Educación S.A, 2001.

[18] R. Muhammand, *Electrónica de potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones*, México D.F: Pearson Educación, 2004.

- [19] E. U. Juárez Santana, *Generador Solar de Energía Eléctrica a 200 W*, Tesis Licenciatura, Departamento de Computación, Electrónica y Mecatrónica. Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla, Cholula, Puebla, 2009.
- [20] Tech Simulator. (2020, 24 de mayo). *Single Phase Inverter Design & Open loop Simulation in MATLAB* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=ViYSB59iYLY>
- [21] Tech Simulator. (2020b, 27 de mayo). *Closed Loop Simulation of single Phase Stand-alone Inverter using MATLAB with PI controller design* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=PsQvBvdhulA>
- [22] *OPal-RT OP4510 Real-time HIL Simulator* | UseScience. (s. f.). UseScience. <https://scientificservices.eu/item/opal-rt-op4510-real-time-hil-simulator/5767>
- [23] *OP4510 RT-LAB-RCP/HIL SYSTEMS User Guide* | ManualZz. (s. f.). manualzz.com. <https://manualzz.com/doc/30207644/op4510-rt-lab-rcp-hil-systems-user-guide---opal-rt>