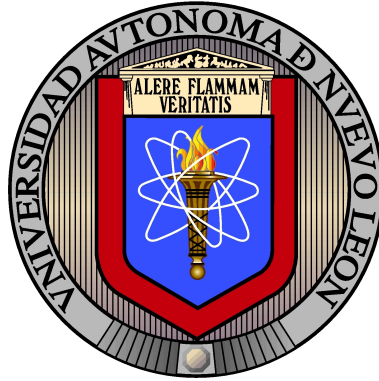


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



CONTROL BASADO EN PASIVIDAD DE UN AEROGENERADOR DE  
VELOCIDAD VARIABLE MODELADO EN GRÁFICAS DE LIGADURA

POR

ING. ALAN EMILIO OROZCO GALAVIZ

EN OPCIÓN AL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA

CIUDAD UNIVERSITARIA A SEPTIEMBRE DE 2020

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



CONTROL BASADO EN PASIVIDAD DE UN AEROGENERADOR DE  
VELOCIDAD VARIABLE MODELADO EN GRÁFICAS DE LIGADURA

POR

ING. ALAN EMILIO OROZCO GALAVIZ

EN OPCIÓN AL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA

CIUDAD UNIVERSITARIA A SEPTIEMBRE DE 2020



## Universidad Autónoma de Nuevo León Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis “Control Basado en Pasividad de un Aerogenerador de Velocidad Variable Modelado en Gráficas de Ligadura”, realizada por el alumno Alan Emilio Orozco Galaviz, con número de matrícula 1646515, sea aceptada para su defensa como requisito para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica.

El Comité de Tesis

Dr. René Galindo Orozco  
Director

Dr. Jesús de León Morales  
Revisor

Dr. Noe Villa Villaseñor  
Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez  
Subdirector de Estudios de Posgrado



017

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, septiembre de 2020

## Dedicatoria

*Esta tesis se la dedico a mi familia que a lo largo de los años han mostrado su apoyo para que cada día me prepare para ser mejor y siempre me han motivado a seguir creciendo, en especial a mis abuelos que desde que decidí dejar mi casa para mudarme a Monterrey siempre han estado para apoyarme en todo lo que está a su alcance.*



## **Agradecimientos**

Agradezco a mis amigos de maestría que gracias a su compañía en estos años puede aprender de ellos y se convirtieron en parte de mi familia. A mi asesor el Dr. Rene Galindo Orozco que bajo su tutela adquirí las bases para desarrollar este trabajo con un método que desconocía y me abrió un nuevo horizonte de investigación y que me queda claro que siempre hay algo nuevo por aprender. Un agradecimiento especial al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado durante mi estancia en la maestría. Y a Dios, que gracias a él todas las cosas son posibles.

## Resumen

En este trabajo de tesis se desarrolla un modelo en bond graph de un aerogenerador de velocidad variable, que integra los modelos de las aspas, del generador de imanes permanentes, del rectificador y del convertidor. En base de este modelo se diseña un control dinámico basado en pasividad y se utiliza una ley de control estática del ángulo de desviación. Considerando que el voltaje de CD a la entrada del convertidor es constante el control pasivo asegura que el voltaje de CD a la salida del convertidor siga a la salida del modelo de referencia propuesto que a su vez converge a su referencia. El sistema retroalimentado es pasivo cuando el multipuerto disipativo es conservativo. Este control pasivo garantiza estabilidad en lazo cerrado y da cierto grado de robustez al asegurar que la función de transferencia del sistema en lazo cerrado es positiva real. El control estático de desviación actúa cuando la velocidad del viento excede a la velocidad nominal y mantiene a la potencia en un valor menor que la potencia nominal. Cuando la velocidad del viento es menor que la nominal se propone un control que regula a cero el ángulo de desviación, orientando al aerogenerador en la dirección del viento y extrayendo en este caso la máxima potencia del aerogenerador. El control completo da seguridad al usuario al no exceder en ningún momento la energía inicial y al equipo al no exceder la potencia nominal.

## Índice general

<b>Dedicatoria</b>	<b>I</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>II</b>
<b>Resumen</b>	<b>III</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del problema . . . . .	1
1.2. Hipótesis . . . . .	3
1.3. Estado del Arte . . . . .	4
1.4. Justificación . . . . .	13
1.5. Objetivo General . . . . .	13
1.6. Objetivos Particulares . . . . .	14
1.7. Organización de la Tesis . . . . .	15
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>16</b>
2.1. Descripción General del capítulo . . . . .	16
2.2. Energía Eólica [11] [8] [12] . . . . .	16
2.2.1. Características de un aerogenerador moderno [35] . . . . .	24

---

2.2.2. Potencia de la Energía Eólica [11] . . . . .	29
2.3. Gráfico de Ligaduras [26] [4] [10] . . . . .	32
2.3.1. 20-Sim [1] . . . . .	47
2.4. Generador Síncrono de Imanes Permanentes [20] . . . . .	51
2.5. Rectificador [5] [3] . . . . .	55
2.6. Convertidor Reductor (Buck) [13] . . . . .	61
2.7. Pasividad [18] [9] [25] . . . . .	67
<b>3. Modelado en Bond Graph</b>	<b>71</b>
3.1. Modelo General . . . . .	71
3.2. Molino . . . . .	73
3.3. Generador de Imanes Permanentes Síncrono (PMSG) [39] . . . . .	75
3.4. Rectificador [39] [15] . . . . .	77
3.5. Convertidor . . . . .	80
<b>4. Controles diseñados e implementados en el sistema</b>	<b>83</b>
4.1. Control de la desviación del aerogenerador (Yaw) . . . . .	83
4.2. Control Basado en Pasividad . . . . .	87
<b>5. Aplicación a un aerogenerador de velocidad variable</b>	<b>107</b>
5.1. Simulaciones y Resultados . . . . .	107
5.1.1. Sin viento . . . . .	108
5.1.2. Viento de 13 m/s . . . . .	111
5.1.3. Vientos por encima del nominal (mayores a 13 m/s) . . . . .	114
5.2. Conclusiones y trabajo a futuro . . . . .	117
<b>A. Cambio de coordenadas ABC a 0DQ [36] [7]</b>	<b>119</b>
A.1. Transformación de Park . . . . .	119
A.2. Propiedades de la matriz de transformación . . . . .	121



---

A.3. Propiedades del sistema y componentes homopolares . . . . .	122
<b>B. Ponencias</b>	<b>124</b>

## Índice de figuras

1.1. Inductor de enlace de DC . . . . .	5
1.2. Capacitor de canal de DC . . . . .	5
1.3. Impedancia cero del enlace de CD . . . . .	5
1.4. Configuración en paralelo de un parque eólico . . . . .	6
1.5. Configuración en serie de un parque eólico . . . . .	6
1.6. Modelo de un sistema de energía eólica de baja tensión con convertidor de corriente . . . . .	6
1.7. Modelo del convertidor Buck en Bond Graph . . . . .	7
1.8. Modelo de promedios del convertidor Buck en Bond Graph . . . . .	7
1.9. Bond Graph dinámico deseado con estimación de carga resistiva . . . . .	8
1.10. Dinámica deseada y Bond Graph de error con corriente deseada fija . . . . .	8
1.11. Esquema eléctrico de un convertidor Buck . . . . .	9
1.12. Circuito equivalente de un Mosfet . . . . .	9
1.13. Bond Graph de un transistor de efecto de campo (MOSFET, por sus siglas en inglés) . . . . .	9
1.14. Circuito equivalente de un diodo PiN . . . . .	9
1.15. Bond Graph de un diodo PiN . . . . .	10

1.16. Esquema de un convertidor Buck modelado en Bond Graph . . . . .	10
1.17. Esquema general de generación de energía . . . . .	11
1.18. Bond Graph del modelo de velocidad variable de la turbina . . . . .	12
1.19. Bond Graph del Generador Síncrono de Imanes Permanentes . . . . .	12
1.20. Bond Graph del control para asegurar el punto máximo de operación	13
2.1. Molino de Bombeo . . . . .	17
2.2. Molino de Brush . . . . .	18
2.3. Molino de Cour . . . . .	19
2.4. Aerogenerador Actual de 3 palas . . . . .	20
2.5. Aerogenerador Monopala . . . . .	21
2.6. Aerogenerador Bipala . . . . .	22
2.7. Aerogenerador Multipala . . . . .	22
2.8. Aerogenerador Vertical . . . . .	23
2.9. Regiones de operación de un aerogenerador . . . . .	25
2.10. Elementos de un Aerogenerador . . . . .	28
2.11. Movimientos de un Aerogenerador . . . . .	29
2.12. Representación de flechas y señales . . . . .	38
2.13. Ejemplo de Bond Graph . . . . .	39
2.14. Causalidades de un Bond, lado izquierdo flujo hacia Y; lado derecho esfuerzo hacia Y . . . . .	40
2.15. Causalidades predefinidas . . . . .	40
2.16. Circuito de dos capacitores en paralelo . . . . .	42
2.17. Bond Graph de la Figura 2.16 . . . . .	42
2.18. Asignación de causalidades . . . . .	43
2.19. Causalidades predefinidas . . . . .	44
2.20. Estructura de unión asociada al Bond Graph . . . . .	44

2.21. Relación de almacenadores de energía en el caso lineal . . . . .	46
2.22. Relación de almacenadores de energía en el caso no lineal . . . . .	46
2.23. 20-Sim ® . . . . .	51
2.24. Rotor con polos no salientes . . . . .	52
2.25. Rotor con polos salientes . . . . .	52
2.26. Rotor sin escobillas . . . . .	53
2.27. Circuito equivalente de un generador síncrono trifásico . . . . .	54
2.28. Rectificador de media onda . . . . .	56
2.29. Voltaje de entrada ( $V_{p(in)}$ ) . . . . .	56
2.30. Voltaje de salida ( $V_{p(out)}$ ) . . . . .	57
2.31. Voltaje de entrada ( $V_{p(in)}$ ) . . . . .	58
2.32. Voltaje de salida ( $V_{p(out)}$ ) . . . . .	58
2.33. Rectificador de onda completa con punto medio . . . . .	58
2.34. Rectificador de onda completa con puente de diodos . . . . .	58
2.35. Rectificador trifásico de onda completa con puente de 6 diodos . . . . .	60
2.36. Convertidores Buck, Boost y Buck-Boost . . . . .	62
2.37. Posiciones del convertidor Buck . . . . .	62
2.38. Rizo y componente DC del voltaje de un convertidor . . . . .	63
2.39. Transitorio de la corriente en el inductor . . . . .	65
2.40. Corriente del inductor en estado estacionario . . . . .	65
2.41. Voltaje del inductor en un ciclo completo . . . . .	66
2.42. Interconexión en paralelo y retroalimentación de sistemas pasivos . . . . .	69
3.1. Sistema físico . . . . .	72
3.2. Modelo Completo de Generación de Energía Eólica . . . . .	72
3.3. Diagrama a bloques de las partes Mecánica, Generación, Convertidor y Rectificación . . . . .	72



3.4. Modelo en Bond Graph del Molino . . . . .	74
3.5. Analogía de un molino con el modelo . . . . .	74
3.6. Modelado del Generador . . . . .	76
3.7. Diagrama de un rectificador trifásico con filtro . . . . .	78
3.8. Bond Graph de un rectificador trifásico con filtro . . . . .	78
3.9. Modelo de conmutación . . . . .	79
3.10. Modelo del Convertidor Buck continuo . . . . .	81
3.11. Modelo del Convertidor Buck discreto . . . . .	82
3.12. Comparación del modelo continuo y discreto . . . . .	82
4.1. Control de ángulo del Yaw . . . . .	84
4.2. Corrección del ángulo del Yaw . . . . .	85
4.3. Experimento de la modificación de la potencia mencionada en [34] . . . . .	85
4.4. Arduino Uno R3 . . . . .	86
4.5. Controlador dinámico con inductancia, resistencia y unión 1 . . . . .	89
4.6. Controlador dinámico con inductancia, resistencia y unión 0 . . . . .	89
4.7. Controlador dinámico con capacitancia, resistencia y unión 1 . . . . .	91
4.8. Controlador dinámico con capacitancia, resistencia y unión 0 . . . . .	91
4.9. Convertidor Buck con Controlador y Modelo de Referencia . . . . .	95
4.10. Controlador Dinámico con unión 1 . . . . .	97
4.11. Voltaje de entrada . . . . .	101
4.12. Voltaje de Salida . . . . .	102
4.13. Ciclo de trabajo del controlador . . . . .	102
4.14. Energías del sistema . . . . .	102
4.15. Voltaje de entrada . . . . .	103
4.16. Voltaje de Salida . . . . .	103
4.17. Ciclo de Trabajo del controlador . . . . .	104

4.18. Energías del sistema . . . . .	104
4.19. Controlador dinámico con unión 0 . . . . .	105
5.1. Modelo Completo de Generación de Energía Eólica . . . . .	107
5.2. Velocidad de viento y velocidad de Molino . . . . .	109
5.3. Ajuste del ángulo Yaw . . . . .	109
5.4. Corrientes del PMSG . . . . .	110
5.5. Voltajes trifásicos y Rectificado . . . . .	110
5.6. Voltaje de entrada, salida y ciclo de trabajo del Convertidor Reductor	111
5.7. Velocidad de viento y velocidad de Molino . . . . .	112
5.8. Ajuste del ángulo Yaw . . . . .	112
5.9. Corrientes del PMSG . . . . .	113
5.10. Voltajes trifásicos y Rectificado . . . . .	113
5.11. Voltaje de entrada, salida y ciclo de trabajo del Convertidor Reductor	114
5.12. Velocidad de viento y velocidad de Molino . . . . .	115
5.13. Ajuste del ángulo Yaw . . . . .	115
5.14. Corrientes del PMSG . . . . .	116
5.15. Voltajes trifásicos y Rectificado . . . . .	116
5.16. Voltaje de entrada, salida y ciclo de trabajo del Convertidor Reductor	117
A.1. Referencias 0DQ y ABC . . . . .	121

## Índice de cuadros

2.1. Productores y capacidad instalada de energía eólica 2016 . . . . .	24
2.2. Analogía de los elementos utilizados en Bond Graph . . . . .	33
2.3. Relaciones constitutivas de elementos . . . . .	38
3.1. Representación de cada elemento del Molino . . . . .	75
3.2. Representación de cada elemento del PMSG . . . . .	77
3.3. Representación de cada elemento del Rectificador . . . . .	79
4.1. Tabla de potencias a diferentes valores de la relación de velocidad de punta, $\gamma$ . . . . .	87
4.2. Tabla de controladores con su función de transferencia . . . . .	94
4.3. Representación de cada elemento del Convertidor . . . . .	96
5.1. Valores de simulación . . . . .	108

## Simbología utilizada

Símbolo	Representación
PWM	Pulse Width Modulation (Modulación por Ancho de Pulso)
WECS	Wind Energy Conversion System (Sistema de conversión de energía eólica)
HVDC	High Voltage Direct Current (Alto Voltaje DC)
MVDC	Medium Voltage Direct Current (Mediano Voltaje DC)
$V_{pin}$	Voltaje de entrada
$V_{pout}$	Voltaje de salida
$\gamma$	Diferencia entre la dirección del viento y el ángulo del molino
$\lambda$	Tip speed ratio (Relación de velocidad de punta)
$C_p$	Coefficiente de potencia en aerogeneradores
$\rho$	Densidad del aire ( $1.225 \text{ kg/m}^3$ )
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator (Generador síncrono de imanes permanentes)
$\pi$	Constante (3.1416)
$E_c$	Energía cinética
DDWT	Direct Drive Wind Turbine (Turbina de viento de accionamiento directo)
VSC	Voltage Source Converter (Convertidor de voltaje)
VSI	Voltage Source Inverter (Inversor de voltaje)
CSC	Current Source Converter (Convertidor de corriente)
CSI	Current Source Inverter (Inversor de corriente)
PMG	Permanet Magnet Generator (Generador de Imanes Permanentes)
CD	Current Direct (Corriente Continua)
AC	Alternating Current (Corriente alterna)
Dominio Físico	Utilizando valores de parámetros reales en sus elementos y variables con significado físico



*“Son la fe y el amor los que dan a la probabilidad una fuerza que no tiene ella por sí misma.”*

John Henry Newman

## **1.1. Planteamiento del problema**

En los últimos años ha crecido significativamente la producción de electricidad por medio de energía eólica. Esto se ha logrado mejorando el rendimiento de los aerogeneradores para reducir el costo de la energía obtenida del viento, reduciendo cargas mecánicas y fatigas estructurales para aumentar su vida útil y aumentando la calidad de la potencia producida. Para hacer frente a estos retos se siguen realizando diferentes diseños aerodinámicos de turbinas, se estudian los modelos matemáticos tanto de los aerogeneradores como del viento, se proponen diversas técnicas de control para mejorar su rendimiento, y se utilizan convertidores de potencia cada vez más sofisticados. Los aerogeneradores de velocidad variable mejoran la eficiencia del sistema, al lograr un seguimiento de máxima eficiencia de potencia a bajas velocidades del viento, y regular la velocidad angular y potencia en los valores nominales del generador eléctrico para fuertes vientos

(ver [23]). Se han realizado diversas investigaciones de diferentes métodos para extraer el Punto Máximo de Potencia (PMP), desde los métodos más sencillos y más utilizados como Perturbe y Observe como en [24], a métodos más complejos como algoritmos de Redes Neuronales Artificiales como en [37]. De manera original se propone en esta tesis que el modelo de referencia represente al aerogenerador en el PMP o en la Potencia de operación deseada; y diseñar un algoritmo de control basado en pasividad que asegure que el aerogenerador siga a este modelo de referencia y no se exceda en ningún momento la energía inicial. Se propone construir el modelo de referencia, modelando el aerogenerador en gráficas de ligadura (bond graph, BG) y utilizando un modelo de promedios para el convertidor. Esta tesis se enfoca en resolver el problema de seguimiento del modelo de referencia propuesto basado en modelos de BG y técnicas de pasividad. Se propone obtener un modelo del sistema completo en BG adecuado para aplicaciones de control y diseñar un controlador basado en pasividad para un aerogenerador con convertidor, en el dominio físico, es decir, utilizando valores de parámetros reales en sus elementos o también dominio físico, es decir, utilizando valores de parámetros y variables con significado físico. Un modelo complejo y detallado en Bond Graph de un aerogenerador de velocidad fija es el de [41]. Muchos trabajos han sido realizados en control basado en pasividad (ver [32]), y hay pocos trabajos en control basado en pasividad para sistemas modelados por BG, uno de ellos es el de [21] y otros son los de [31] y [29] en que se basa esta tesis. Los trabajos de [31] y [29] son aplicables a sistemas lineales invariantes en el tiempo, por lo que en esta tesis se propone utilizar uno de los modelos de convertidores más utilizados que es el reductor (Buck), ya que utilizar este dispositivo las pérdidas por calentamiento son menores gracias a la conmutación que hay en el sistema en comparación con utilizar un divisor de voltaje, además podemos controlar la salida de voltaje a una deseada cambiando la frecuencia de conmutación por medio de un control, ya que la entrada de voltaje

puede ser no constante y como se busca un voltaje menor al que proporciona el aerogenerador (110 v aproximadamente), se optó por utilizar un convertidor reductor. (ver [22] y [14]). Las técnicas de BG han sido utilizadas para el diseño de controladores basados en pasividad (ver [17] o [27]). Por un lado, BG permite modelar fácilmente sistemas multi-dominio, sus parámetros y variables tienen significado físico, y se pretende explotar las propiedades de energía, en particular del multipuerto disipativo tal como se realizó en [31] y [29], y por otro lado la propiedad de pasividad asegura estabilidad robusta y da seguridad a los usuarios del sistema al garantizar que no se exceda en ningún momento la energía inicial utilizada. En [31] se propone una pseudo-estructura que satisface las propiedades de energía y transfiere al multipuerto disipativo los posibles elementos no conservativos. Así, asegurando la pasividad de este multipuerto, se asegura la pasividad del sistema completo de acuerdo con [27] y [19], cuando las salidas y entradas externas son energéticas, es decir, el producto de estas variables es potencia. Una continuación del trabajo presentado en [31] es el trabajo de [29], donde se diseñan algoritmos de control, para interconexiones en cascada y retroalimentadas, tales que el sistema en lazo cerrado sea pasivo. El trabajo de [31] se enfoca principalmente en el análisis de pasividad y se consideran sistemas interconectados que incluyen sistemas en lazo cerrado mediante retroalimentación estática de la salida, mientras que el trabajo de [29] considera controladores dinámicos y se enfoca en el diseño de algoritmos de control.

## 1.2. Hipótesis

Se puede modelar un sistema de generación eólica en Bond Graph para regular el voltaje generado utilizando un control que aproveche las propiedades de pasividad en el convertidor reductor y a su vez, modificando el ángulo del pitch

o yaw en el molino para que cambie ajuste el torque y velocidad angular, el cual influye en el voltaje generado y evita que el sistema pueda sufrir algún daño ante rachas de viento mayores a la nominal.

### 1.3. Estado del Arte

En la literatura existen varias investigaciones que comparten similitudes

En [6] describe de un método llamado Direct Drive Wind Turbine (DDWT) donde elimina la caja de engranes que está típicamente conectado al rotor de un generador y éste está conectado directamente al sistema de potencia, haciendo la función de un generador de imanes permanentes que opera a velocidades bajas, pero necesita una mayor cantidad de polos por lo que agrega peso y volumen al sistema de generación. En este tipo de sistemas se utiliza un convertidor back to back el cual lleva la totalidad de la energía generada, razón por la cual la mayoría de las fallas se encuentran en esta parte, donde también los capacitores electrolíticos son uno de los elementos más vulnerables. Por lo que se propone en este artículo una nueva topología de transición tecnológica para hacer sistemas DDWT más rentables y compactos para reducir los costos de inversión y mantenimiento. Las topologías convencionales se muestran en la Figura 1.1 donde utiliza un convertidor en modo de fuente de corriente y un inversor en modo de fuente de corriente, unidas por una impedancia y en la Figura 1.2 se utilizan un convertidor en modo de fuente de voltaje y un inversor en modo de fuente de voltaje, conectadas por medio de un banco de capacitores para regular el voltaje; y en la Figura 1.3 se muestra la topología propuesta en el trabajo [6] donde no se tiene la necesidad de utilizar un inductor o capacitor para unir los convertidores, sino que se utiliza la sincronidad de la inductancia del generador para substituir la impedancia que se muestra en la Figura 1.1, además de que utiliza un convertidor en modo de fuente



de voltaje y un inversor en modo de fuente de corriente.

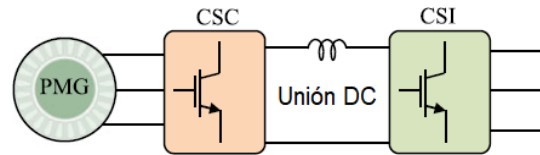


Figura 1.1 – Inductor de enlace de DC

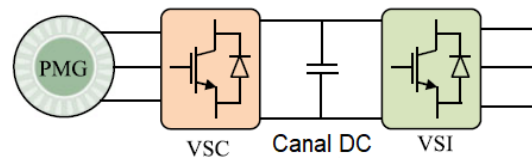


Figura 1.2 – Capacitor de canal de DC

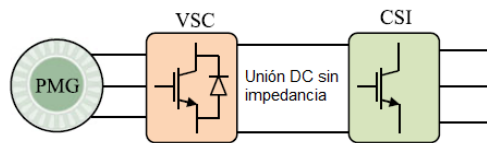


Figura 1.3 – Impedancia cero del enlace de CD

En [28] se propone una nueva configuración en convertidores usando PWM en fuentes convertidoras de corriente para turbinas de bajo voltaje para sistemas de conversión de energía WECS. Pero el problema es que estos sistemas en su mayoría son utilizados para sistemas de generación de media tensión (3-4 kV) y no para sistemas de baja tensión; siendo este el mayor reto, ya que los interruptores del mercado no son adecuados para sistemas de baja tensión. Por lo que en respuesta a esta problemática en [28] se propone una nueva configuración donde un módulo de fuente convertidora de voltaje en baja tensión es usado del lado del generador de energía para que sea compatible con una fuente convertidora de corriente en media tensión. En las Figuras 1.4 y 1.5 se muestran las configuraciones utilizadas en parques eólicos.

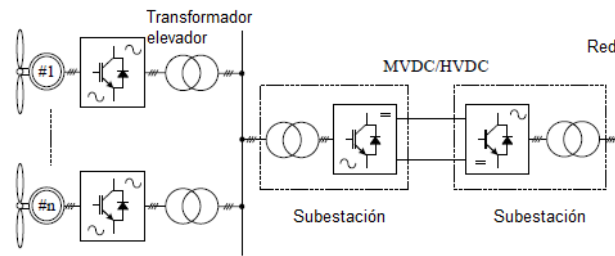


Figura 1.4 – Configuración en paralelo de un parque eólico

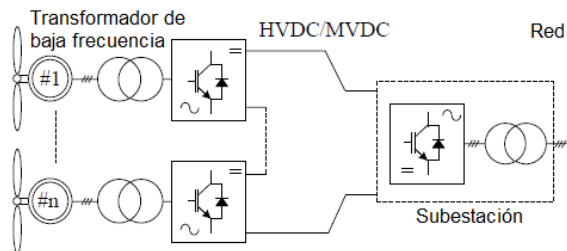


Figura 1.5 – Configuración en serie de un parque eólico

El modelo propuesto en el trabajo [28] se muestra en la figura 1.6 donde podemos ver el esquema desde el sistema de generación de energía de baja tensión hasta su conexión hasta la red.

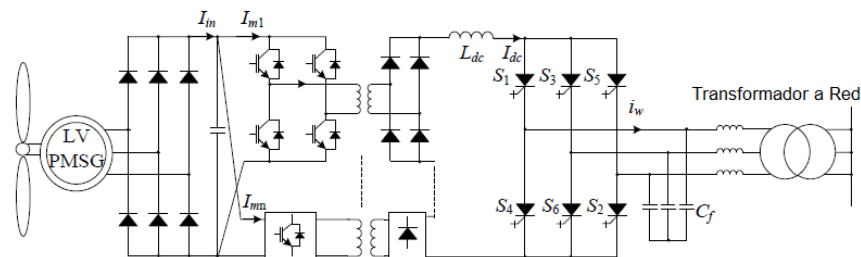


Figura 1.6 – Modelo de un sistema de energía eólica de baja tensión con convertidor de corriente

Por otro lado, en [21, J. Garcia G. and M. Delgado, 2006] se da una nueva propuesta para crear un algoritmo para regular compensadores dinámicos basados en pasividad adaptativa para la salida de voltaje por medio de PWM en convertidores DC/DC. Se desarrolla un modelo en bond graph (Ver Figuras 1.7 a 1.10), utilizando la bicausalidad para determinar el valor en estado estacionario de la salida deseada,

donde además el controlador es modificado para generar una retroalimentación adaptativa en el sistema (Ecuaciones (1.1) a (1.3) ). Los resultados fueron probados en simulación, donde utilizan los tipos de convertidores DC/DC comunes (Buck y Buck-Boost). Se desarrollan desde la implementación de los circuitos haciendo uso de la bicausalidad hasta la implementación de un controlador de pasividad adaptativa en Bond Graph para el control de salida de voltaje.

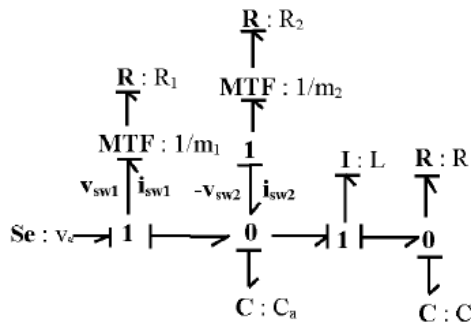


Figura 1.7 – Modelo del convertidor Buck en Bond Graph

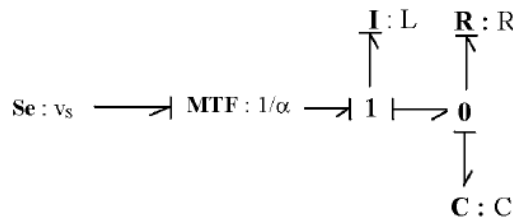


Figura 1.8 – Modelo de promedios del convertidor Buck en Bond Graph

$$\dot{\theta} = -\frac{q_{Cd}}{C} \frac{\tilde{q}_C}{C} \tag{1.1}$$

$$\alpha = -\frac{-L\bar{v}_{Cd} \frac{q_{Cd}}{C} (\frac{q_C}{C} - \frac{q_{Cd}}{C}) + \frac{q_{Cd}}{C} - R_1 (\frac{P_L}{L} - \theta \bar{v}_{Cd})}{v_S} \tag{1.2}$$

$$\dot{q}_{Cd} = -\frac{\theta}{C} [q_{Cd} - C_{vS}] \tag{1.3}$$

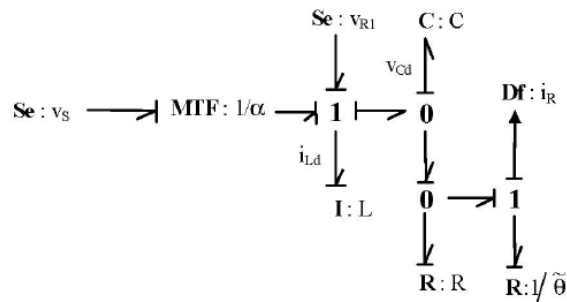


Figura 1.9 – Bond Graph dinámico deseado con estimación de carga resistiva

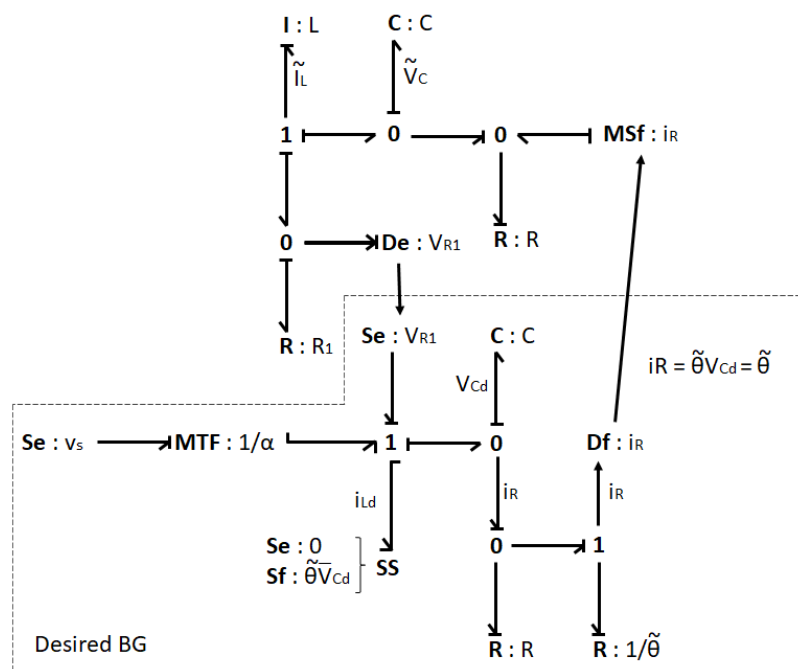


Figura 1.10 – Dinámica deseada y Bond Graph de error con corriente deseada fija

Mientras que en [33] los autores se enfocan principalmente en el convertidor Buck, modelando en Bond Graph cada elemento que conforma el convertidor (Ver Figuras 1.11 a 1.16), tomando en cuenta las variables que involucra cada uno de estos elementos y su representación así como la estructura de unión resultante.

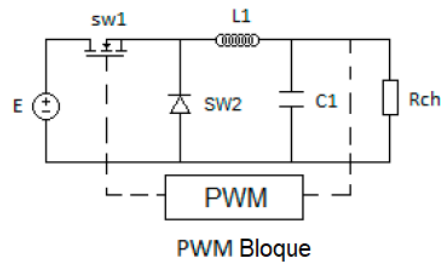


Figura 1.11 – Esquema eléctrico de un convertidor Buck

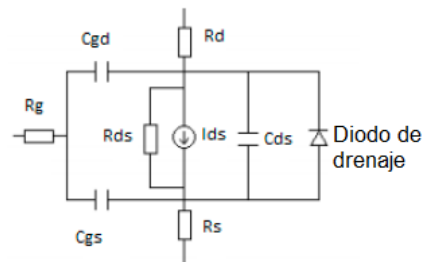


Figura 1.12 – Circuito equivalente de un Mosfet

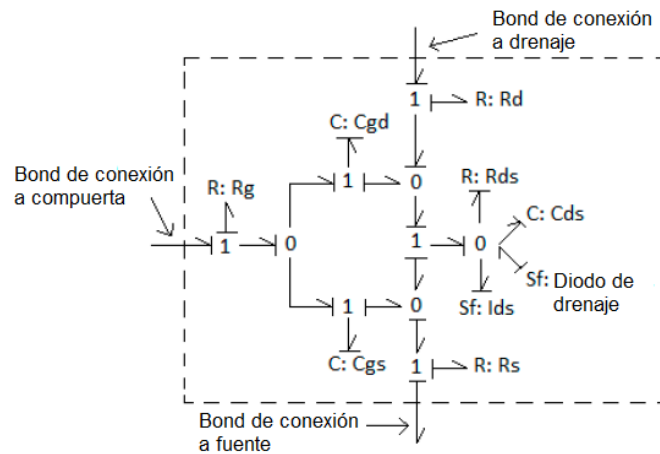


Figura 1.13 – Bond Graph de un transistor de efecto de campo (MOSFET, por sus siglas en inglés)

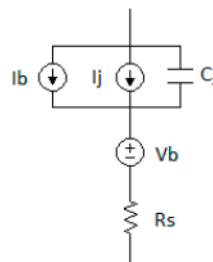


Figura 1.14 – Circuito equivalente de un diodo PiN

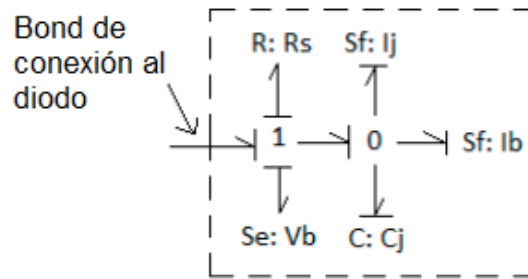


Figura 1.15 – Bond Graph de un diodo PiN

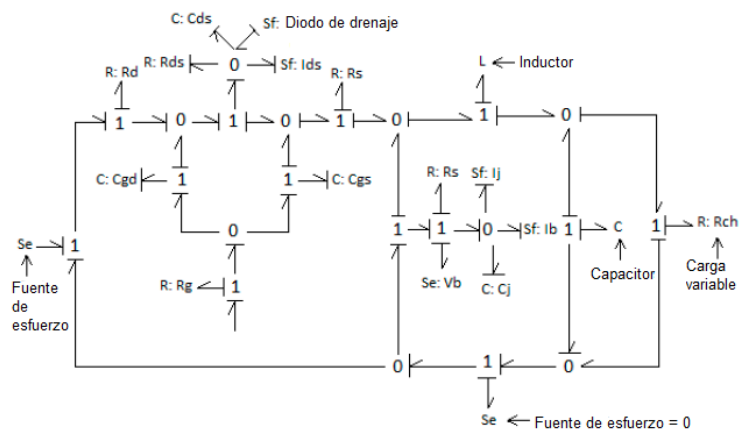


Figura 1.16 – Esquema de un convertidor Buck modelado en Bond Graph

En [2] se modela y controla un nuevo esquema de una red trifásica conectada a un sistema de conversión de energía (WECS), donde un generador síncrono de imanes permanentes está conectado a un convertidor back to back (AC-DC-AC) y finalmente se emplea un inversor trifásico para poder conectarlo a la red trifásica. En este trabajo nos comenta sobre las dificultades de suministrar constantemente la misma cantidad de tensión debido a las variaciones que el viento tiene, por lo que uno de los puntos principales es el desarrollo de un controlador para corregir estas variaciones. En la Figura 1.17 se muestra el esquema utilizado para la generación, conversión y suministro de la energía eléctrica.

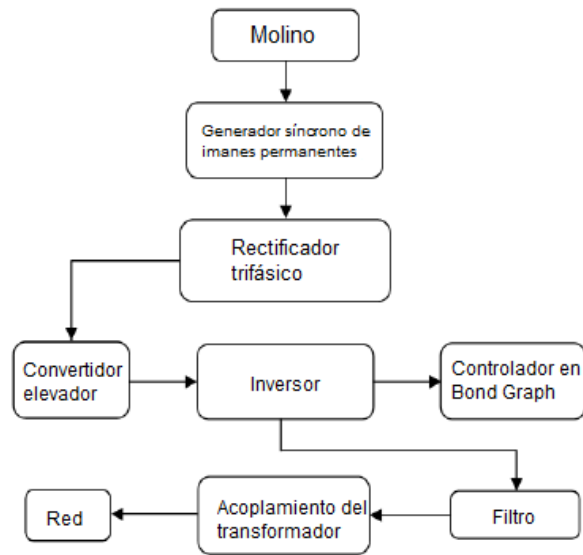


Figura 1.17 – Esquema general de generación de energía

Podemos obtener la potencia producida por el viento con la siguiente ecuación:

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \quad (1.4)$$

Siendo  $C_p$  el coeficiente de potencia,  $\rho$  la densidad del aire,  $A$  el área del molino y  $V$  la velocidad del viento; y como una de las variables a controlar es la velocidad de la turbina se utiliza la Ec (1.5) para obtener el torque producido por el viento, donde  $\lambda$  es la relación de la velocidad de punta de los álabes respecto a la velocidad del viento:

$$T_{turbina} = \frac{1}{2} \frac{C_p \rho A V}{\lambda} \quad (1.5)$$

En la Fig 1.18 vemos el modelo en Bond Graph de una turbina con velocidad variable, mientras que en la Fig 1.19 se muestra el modelo de un generador síncrono de imanes permanentes.

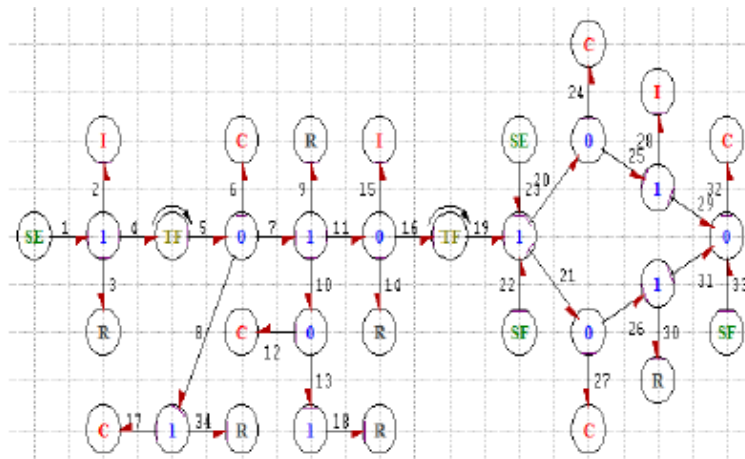


Figura 1.18 – Bond Graph del modelo de velocidad variable de la turbina

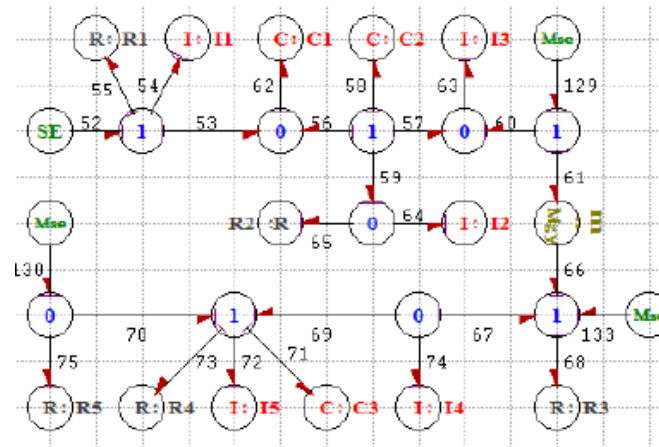


Figura 1.19 – Bond Graph del Generador Síncrono de Imanes Permanentes

La estrategia de control consiste en regular el torque electromagnético para ajustar la velocidad mecánica y a su vez maximizar la energía eléctrica generada (Ver Fig 1.20). Por lo que se busca que el valor de  $\lambda$  sea igual al valor óptimo de esta misma o también llamada  $\lambda_{opt}$  la cual está asociada al valor óptimo de  $C_p$  el cual podemos también llamar  $C_{pmax}$



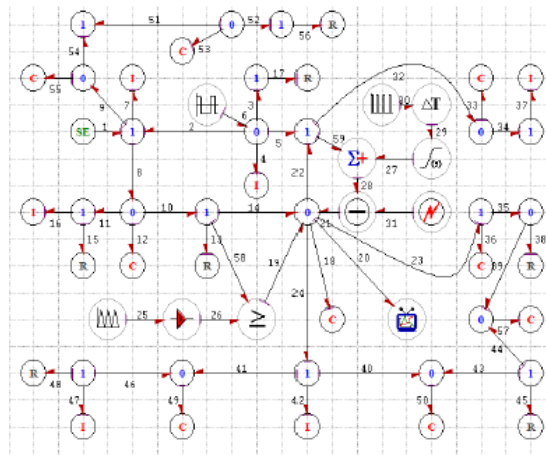


Figura 1.20 – Bond Graph del control para asegurar el punto máximo de operación

## 1.4. Justificación

Ante las variaciones de viento que se presentan en un aerogenerador, se busca que la potencia producida se mantenga en su potencia nominal o deseada por el usuario ante vientos fuertes para mantener la integridad del equipo utilizando un control del ángulo de desviación del aerogenerador; y así mismo también se busca que la salida de voltaje producido sea constante utilizando un control basado en pasividad, pues esta podría estar alimentando a un banco de baterías, por lo que se considera importante que este voltaje producido se mantenga fijo o también para asegurar la calidad del voltaje de CA en caso de que estuviera conectado a un inversor después del convertidor.

## 1.5. Objetivo General

Diseñar un control basado en pasividad implementado en el convertidor reductor, pues con la presencia de perturbaciones e incertidumbres de norma dos e infinito acotadas, respectivamente, se tiene un esquema de control de segui-

miento del modelo, buscando seguir el punto máximo de potencia o la potencia nominal potencia o la potencia de operación a velocidades del viento menores a la nominal de un aerogenerador con convertidor, modelando un BG adecuado para aplicaciones de control del aerogenerador con convertidor, y se diseña un controlador pasivo. Las posibles perturbaciones son por ejemplo cambios en la carga eléctrica conectada, variaciones en la velocidad e intensidad del viento o cambios en la temperatura o humedad del ambiente, y las posibles incertidumbres son por ejemplo variaciones en los parámetros reales con respecto a los de diseño o dinámicas no modeladas. En particular, las dinámicas no modeladas debidas a las diferencias entre el modelo con lógica de conmutación de los convertidores y sus modelos de promedios, y entre el aerogenerador con convertidor y el modelo de referencia.

En esta tesis se aprovecha al máximo la potencia generada por el aerogenerador, diseñando un algoritmo de control basado en pasividad para el seguimiento del modelo de referencia propuesto. Se propone que el modelo de referencia represente a este sistema en el PMP en la potencia nominal o en la potencia de operación deseada y que el algoritmo de control asegure que el sistema real tienda a este modelo de referencia, en el rango de velocidades del viento bajas hasta la velocidad del viento que produce la potencia nominal y asegurar que la potencia no exceda la potencia nominal del generador ante fuertes vientos.

## 1.6. Objetivos Particulares

- Modelar en BG del convertidor, del modelo de referencia y del aerogenerador, desarrollando los trabajos de [31] y de [29] para el esquema de seguimiento de modelo.

- Desarrollar un algoritmo de control basado en pasividad para el seguimiento del PMP en la potencia nominal o en la potencia de operación deseada del aerogenerador con convertidor.
- Analizar el comportamiento del sistema en lazo cerrado del control basado en pasividad aplicado al aerogenerador con convertidor, cuando el controlador y la planta ambos están descritos por modelos en BG.
- Implementar y validar los algoritmos de control mediante simulaciones computacionales y datos del viento reales. Primero se desarrollan los controladores en una computadora personal, después se implementan en un prototipo de laboratorio para su prueba y sintonización, realizando pruebas bajo perturbaciones e incertidumbres en escenarios reales.

## 1.7. Organización de la Tesis

En el capítulo 2 se define la teoría para que el lector adquiera o retroalimente los conocimientos que se necesitarán en los capítulos posteriores. En el capítulo 3 se verá el proceso de modelado del sistema eólico desde el molino hasta el convertidor reductor. En el capítulo 4 se abordan las soluciones implementadas que resuelven los problemas de casos cuando el viento recibe vientos fuertes y se asegura la integridad del aerogenerador; y en el convertidor se asegura un voltaje constante definido por el usuario y en el capítulo 5 se mostrarán las simulaciones de todo el sistema completo. en diferentes escenarios.

## 2.1. Descripción General del capítulo

Durante este capítulo se sientan las bases para los experimentos y resultados que se exponen en los capítulos posteriores a este, comprendiendo desde que es la energía eólica y el porque es importante su uso actualmente, las maneras en que pueden ser aprovechadas las corrientes de viento y como es que han ido evolucionando a través de la historia los aerogeneradores que son los dispositivos utilizados comúnmente para aprovechar la energía proporcionada por el viento. Posterior a eso tendremos el método de modelado utilizado en esta tesis que es el de Bond Graph, explicando la teoría que fundamenta a esta técnica de modelado y como es que se pueden modelar grandes sistemas con modelos que están interconectados entre sí. También se explica sobre los sistemas utilizados de electrónica de potencia, su funcionamiento y cual es su utilidad en el sistema general.

## 2.2. Energía Eólica [11] [8] [12]

La energía eólica es uno de los tipos de energía renovable que el humano ha utilizado desde hace siglos para realizar trabajos que con su mera fuerza le sería

más complicado, permitiéndose de esta manera poder ahorrar tiempo y esfuerzo. Esto no sería posible si no fuera por los molinos de viento que aprovechando corrientes de aire que transforman esa energía en energía mecánica comúnmente, convirtiéndola después en otros tipos de energía, como la eléctrica, por ejemplo. Aunque en sus comienzos no se utilizaba para generar energía eléctrica como mayormente se utilizan hoy en día.

Los molinos de bombeo suelen tener entre 6 y 24 palas, lo que les confiere elevados pares de arranque y reducida velocidad de giro. No se destinan a generación eléctrica sino, tradicionalmente, a aplicaciones como bombeo de agua (Ver Fig 2.1). En estas máquinas el coeficiente de  $\lambda$  de las aspas, relación entre velocidad lineal en punta de pala y velocidad del viento, es igual a 1.

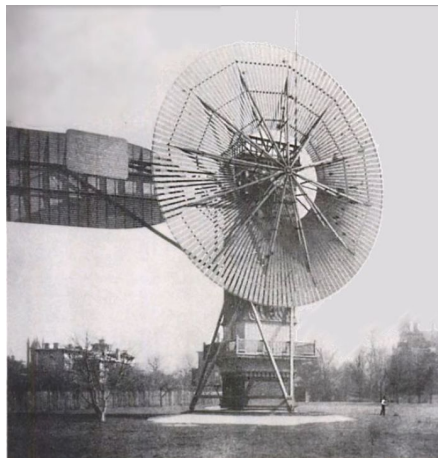


Figura 2.1 – Molino de Bombeo

En un principio, la energía proporcionada por el viento se utilizó para impulsar barcos desde el año 5000 a.C y utilizar molinos que bombeaban agua en China en el año 200 a.C. mientras que en Persia se utilizaban los molinos para moler los granos de sus cultivos.

Charles F. Brush (1849-1929), uno de los fundadores de la compañía eléctrica americana, inventó un dinamo muy eficiente de corriente continua utilizada en la red eléctrica pública, la primera luz de arco eléctrico comercial, así como un

eficiente método para la fabricación de baterías de plomo-ácido. Su compañía, la Brush Electric, en Cleveland (Ohio), fue vendida en 1889 y en 1892 se fusionó con la Edison General Electric Company bajo el nombre de General Electric Company (GE). En el verano de 1887-88 construyó una máquina considerada actualmente como el primer aerogenerador (Fig 2.2) para generador de electricidad. Las dimensiones eran para aquella época enormes: diámetro de rotor de 17m y 144 hojas de rotor de madera de cedro. Estuvo en funcionamiento durante 20 años, durante los cuales alimentó una batería colocada en su sótano. A pesar de las dimensiones del rotor, la potencia del aerogenerador era solamente de 12kW.



**Figura 2.2** – Molino de Brush

A Poul la Cour (1846-1908), meteorólogo Danés, se le considera el padre de la energía eólica moderna y pionero de la aerodinámica moderna, construyó su propio túnel de viento para realizar experimentos. Sus primeros aerogeneradores (Fig 2.3) comerciales se instalaron después de la primera guerra mundial, como consecuencia de la escasez de combustibles. Fundó la primera academia de energía eólica, de donde surgieron los primeros ingenieros especializados. Paralelamente fundó el primer periódico exclusivo con esta temática.



**Figura 2.3** – Molino de Cour

Albert Betz (1885-1968), Físico alemán. En su etapa de director del instituto aerodinámico en Göttingen, formuló la ley Betz, que establece que el máximo valor que se puede aprovechar es de 59.3 % de la energía cinética del viento. Su teoría sobre la formación de las alas todavía sirve de fundamento para la construcción de aerogeneradores.

Johannes Juul (1887-1969), ingeniero danés y estudiante de Poul la Cour, construyó el primer aerogenerador para corriente alterna de 200 kW, en Dinamarca, en 1957. Es el predecesor de los aerogeneradores actuales.

Palmer Cosslett Putnam (1910-1986), ingeniero americano, desarrolló en 1941 el aerogenerador Smith Putman de 1.25 MW. Este aerogenerador trabajó hasta 1945 sin interrupciones, hasta que un fallo en el material hizo que dejase de funcionar. En aquella época no existían materiales en el mercado aptos para este objetivo.

Ulrich W Hüttner (1910-1990), ingeniero alemán, creó el aerogenerador StGW-34 en el año 1957 que se considera la primera piedra de la tecnología eólica moderna.

En los años 70s y 80s debido a la crisis del petróleo llevó a un cambio en la manera de pensar de la política energética. El interés en las energías renovables creció y llevó a la creación de programas de investigación y de subvenciones; y

gracias a esto fue que se pudieron crear avances para el desarrollo de las turbinas eólicas modernas que actualmente podemos ver en parques eólicos, siendo a través de la historia los alemanes y daneses los pioneros que desarrollaron los primeros aerogeneradores rentables económicamente, que llevaron a una revolución de la energía eólica, tanto en el aspecto industrial como en el tecnológico.

Los generadores actuales (ver Fig 2.4) y que son más comúnmente usados utilizan el clásico concepto danés, y esto tiende a imponerse como estándar al resto de conceptos evaluados. La gran mayoría de las turbinas vendidas en los mercados mundiales poseen este diseño. El concepto básico fue introducido por primera vez por el célebre aerogenerador de Gedser. Otra de las características es el uso de un generador asíncrono.



**Figura 2.4** – Aerogenerador Actual de 3 palas

Los aerogeneradores monopala mostrados en la Fig 2.5 no están muy extendidos comercialmente, pues los inconvenientes de los bipala, mencionados a continuación también son aplicables, e incluso en mayor medida, a las máquinas monopala. Además de una mayor velocidad de giro, y de los problemas de ruido y de intrusión visual, necesitan un contrapeso en el lado del buje opuesto a la pala que equilibre el rotor. Obviamente, esto anula el ahorro de peso comparado con un diseño bipala.





**Figura 2.5** – Aerogenerador Monopala

Los diseños bipala de aerogeneradores tienen la ventaja de ahorrar el coste de una pala y, por su puesto, su peso. Sin embargo, suelen tener dificultades para penetrar en el mercado, en parte porque necesitan una mayor velocidad de giro para producir la misma energía de salida. Esto supone una desventaja tanto en lo que respecta al ruido como el aspecto visual. Las máquinas bipala y monopala requieren de un diseño más complejo, con un rotor basculante (bujes oscilante), como el que se muestra en la Fig 2.6, es decir, el rotor tiene que ser capaz de inclinarse, con el fin de evitar fuertes sacudidas en la turbina cada vez que una de las palas pasa por la torre. Así pues, el rotor está montado en el extremo de un eje perpendicular al eje principal, y que gira junto con el eje principal. Esta disposición puede necesitar de amortiguadores adicionales que eviten que las palas del rotor choquen contra la torre.



**Figura 2.6** – Aerogenerador Bipala

Los aerogeneradores multipala como el mostrado en la Fig 2.7 todavía conservan similitud con los antiguos molinos multipala que se usaban para bombear agua de los pozos. Este tipo de aerogeneradores son utilizados especialmente para zonas donde el viento tiene poca fuerza y el tener múltiples palas ayudan al giro, por otro lado, no son recomendables para zonas donde los vientos sean fuertes por peligro a dañar el sistema al tener un exceso de velocidad.



**Figura 2.7** – Aerogenerador Multipala

Los aerogeneradores de eje vertical (ver Fig 2.8) tienen la ventaja de adaptarse a cualquier dirección de viento y por ello se les llama panemonos (todos los vientos). No precisan dispositivos de orientación; trabajan por la diferencia de coeficiente

de arrastre entre las dos mitades de la sección expuesta al viento. Esta diferencia de resistencia al viento hace que el rotor sea propenso a girar sobre su eje en una dirección específica. A excepción del rotor Darrieus, los aerogeneradores de eje vertical operan con vientos de baja velocidad donde difícilmente superan las 200 [RPM]. Se emplean para generar potencias que van de los 200[W] a los 4[MW]. En estricto rigor no necesitan de una torre. Generalmente se caracterizan por tener altos torques de partida. Otra particularidad de estos aerogeneradores es que son mucho más fácil de reparar pues todos los elementos de transformación de la energía del viento se encuentran a nivel de suelo. El inconveniente de este tipo de turbinas es que el eje no se ubica a mucha altura y las velocidades del viento disminuyen al llegar al suelo por efecto de la rugosidad del este. Los tipos de aerogeneradores verticales más comunes son los Darrieus, Windside y Savonius



**Figura 2.8** – Aerogenerador Vertical

Con el tiempo, el uso de aerogeneradores se ha ido popularizando en diferentes países, en la Tabla 2.1 podemos ver que la capacidad instalada en el mundo en energía eólica, en el año 2016 [35].

<i>Productores</i>	<i>TWh</i>	<i>% del total del mundo</i>	<i>Capacidad instalada</i>	<i>GW</i>
<i>Estados Unidos</i>	193	23.0	<i>China</i>	129.3
<i>China</i>	186	22.2	<i>Estados Unidos</i>	72.6
<i>Alemania</i>	79	9.5	<i>Alemania</i>	44.7
<i>España</i>	49	5.9	<i>India</i>	25.1
<i>India</i>	43	5.1	<i>España</i>	22.9
<i>Reino Unido</i>	40	4.8	<i>Reino Unido</i>	14.3
<i>Canadá</i>	26	3.2	<i>Canadá</i>	11.2
<i>Brasil</i>	22	2.6	<i>Francia</i>	10.2
<i>Francia</i>	21	2.5	<i>Italia</i>	9.1
<i>Suecia</i>	16	1.9	<i>Brasil</i>	7.6
<i>Resto del mundo</i>	162	19.3	<i>Resto del mundo</i>	67.0
<i>Total del mundo</i>	838	100	<i>Total del mundo</i>	415

Cuadro 2.1 – Productores y capacidad instalada de energía eólica 2016

### 2.2.1. Características de un aerogenerador moderno [35]

- **Marca y modelo:** Son muchos los fabricantes que construyen turbinas eólicas. La mayor parte de ellos son ensambladores, es decir, son empresas que toman equipos estándar del mercado, realizan una ingeniería de integración y producen turbinas sin fabricar ninguno de sus componentes, que adquieren en el mercado.
- **Potencia:** La potencia es el principal parámetro característico de un aerogenerador, y expresa la energía que es capaz de generar en la unidad de tiempo. Los pequeños aerogeneradores para autoconsumo doméstico arrancan en 1 kW, mientras que los aerogeneradores off-shore pueden llegar a alcanzar

los 10 MW, incluso más de acuerdo con las últimas noticias que transmiten fabricantes líderes de aerogeneradores a los medios de comunicación.

- Curva de respuesta al viento: Es la curva potencia-velocidad de viento de un aerogenerador, y está dividida en 4 regiones (Ver Fig 2.9: la región I es en la que la velocidad es insuficiente para arrancar la producción; la región II comprende el rango de velocidades desde la velocidad en la que se produce la sincronización con la red y la máxima potencia; la región III es donde la velocidad del aerogenerador puede mantenerse en marcha con viento racheado por encima del viento donde se obtiene su potencia máxima; y la región IV el rango de velocidades a partir de las cuales el aerogenerador debe pararse.

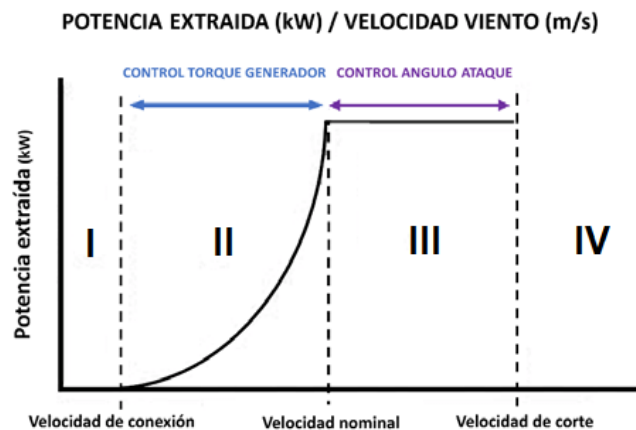


Figura 2.9 – Regiones de operación de un aerogenerador

- Tipo de generador: Los generadores encargados de convertir la energía mecánica suministrada por el rotor pueden ser síncronos o asíncronos. Esta distinción tiene consecuencias tecnológicas muy importantes en el diseño del aerogenerador en conjunto.
- Tipo de tren de engranes: Multiplicadoras de ejes paralelos o planetarios (ambos de una o varias etapas) y Mixtos, usualmente utilizados para generadores

de gran potencia.

- Número de palas: Ya se ha indicado al hablar de los tipos de aerogeneradores que los de eje horizontal pueden ser de una, dos o tres palas, aunque los modelos más pequeños pueden tener más de tres (siempre un número impar para darle estabilidad al aerogenerador, ya que puede ser considerado como un disco a la hora de calcular las propiedades dinámicas).
- Altura de las góndolas: La altura a la que se sitúa la góndola se mide desde la base de ésta hasta el centro de la góndola, o altura del eje del rotor. Las alturas son muy variables, y están en función de la potencia, que a su vez define la longitud de pala. Son habituales alturas que van desde los 25 metros para aerogeneradores de cientos de kilovatios, hasta los más de 100 metros que miden los de potencias superiores a 2 MW.
- Longitud de pala: Las palas son las responsables de convertir la energía cinética del viento en energía mecánica rotativa, y su longitud está en función de la potencia del aerogenerador. Son habituales longitudes que van desde los 5 metros para generadores de poca potencia hasta los más de 80 metros que pueden llegar a medir los de mayor tamaño. Por supuesto, tal longitud genera problemas de transporte, requiriéndose en la mayoría de los casos transportes especiales para llevar las palas desde fábrica hasta el emplazamiento del aerogenerador.
- Altura máxima: Esta altura, que es un dato a tener en cuenta por las autoridades de aviación civil, es la altura de la góndola más la altura de pala.
- Rendimiento: El rendimiento del aerogenerador depende de la curva de velocidad, y por tanto, es variable en función de dicha velocidad. El máximo rendimiento se alcanza a la velocidad a la que la potencia alcanza su

máximo, (en general dicha velocidad ronda los 10-12 m/s). De acuerdo con la ley de Betz, no puede ser superior al 59 %. Rendimientos del 35-40 % son considerados hoy en día como aceptables.

- Área de barrida: Es el área del círculo que dibujan las palas al girar.
- Velocidad de rotación: En la mayoría de los aerogeneradores se trata de un rango, no de una velocidad. Para los aerogeneradores de gran potencia utilizados para la generación de energía eléctrica conectados a red, esta velocidad ronda las 15 revoluciones por minuto (r.p.m.), variando hasta un 10-15 % de acuerdo con la velocidad del viento. A mayor tamaño, menor velocidad de rotación.
- Tipo de pala y sistema de orientación: El tipo de pala que puede tener un aerogenerador es muy variado. Las palas para aerogeneradores de gran tamaño existen en el mercado diversas opciones. Existen aerogeneradores con tres tipos de sistemas de orientación de palas: Sin orientación, con orientación hidráulica y con orientación eléctrica.
- Voltaje de generación y de salida del aerogenerador: Los aerogeneradores generan en baja tensión, siendo los voltajes más habituales (medidos en las bornas del generador) 400 voltios y 690 voltios, ambos en corriente trifásica. Para generadores domésticos o de baja potencia es posible que éstos generen directamente en baja tensión, y por tanto la tensión de generación y la tensión de salida coincidan. Pero es mucho más habitual, para generadores de media o alta potencia, que entre el generador y la subestación de conexión haya un transformador, normalmente situado en la góndola o a pie de torre, que eleve la tensión hasta la de conexión con la subestación.
- Tipo de transformador y ubicación: Los tipos de transformador posibles para

elevar la tensión desde la tensión de generación a la tensión de transporte hasta la subestación son el transformador de llenado integral y el transformador seco, siendo muchísimo más habitual el segundo (el primero es posible, pero es una rareza). El transformador elevador puede situarse bien en la parte trasera de la góndola, y por tanto, en la parte superior del aerogenerador, o bien a pie de torre.

- Dimensiones y peso de la góndola: Alto, largo y ancho de la góndola son tres parámetros importantes a definir porque tienen implicaciones en el transporte hasta el sitio y en el montaje de ésta. El peso de la góndola, igual que las dimensiones de ésta, es importante para conocer el tipo de transporte que será necesario contratar para el traslado de la góndola completa desde fábrica hasta el emplazamiento final y para contratar los medios de elevación necesarios para situar la góndola en lo alto de la torre.

En la Fig 2.10 se muestra la ubicación de la gran mayoría de elementos mencionados anteriormente de un aerogenerador.

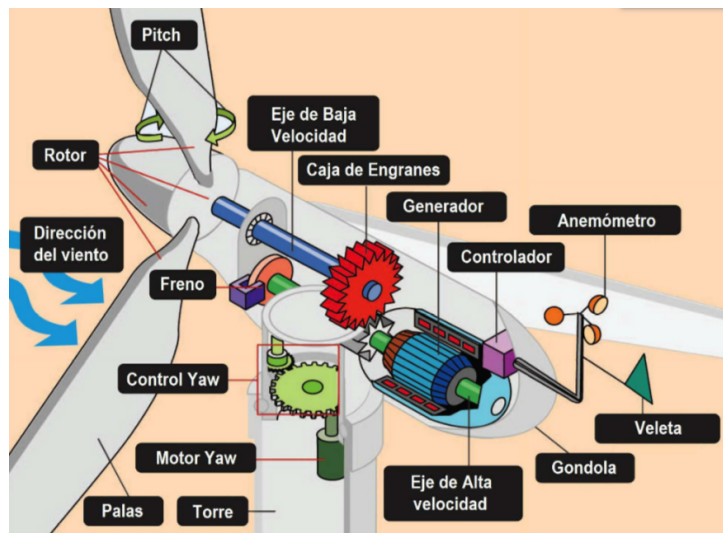


Figura 2.10 – Elementos de un Aerogenerador



### 2.2.2. Potencia de la Energía Eólica [11]

En un aerogenerador horizontal existen 3 tipos de ajustes (ver Fig 2.11) para controlar la potencia: yaw, pitch y roll (giro del eje vertical, giro en las palas y giro de eje horizontal).

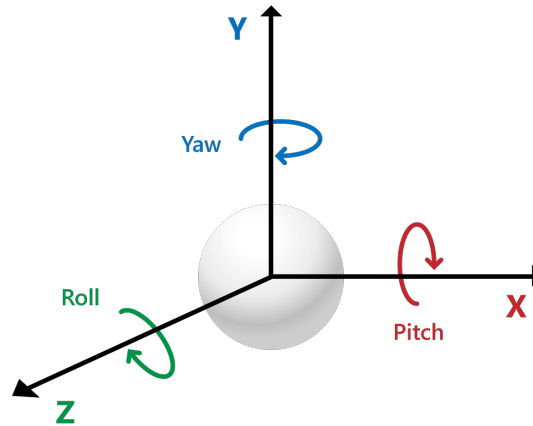


Figura 2.11 – Movimientos de un Aerogenerador

La energía eólica se puede medir en función de la energía cinética de las partículas que contiene el aire cuando viajan a cierta velocidad. Como el viento llega a un molino, la superficie de contacto será circular, por lo que el área de contacto será la superficie que generan las aspas del molino donde se considerará que el viento está perpendicular al molino. La masa del viento atravesará dicha área por un período de tiempo definido ( $t$ ) por lo que la potencia puede ser calculada de la siguiente manera:

$$m = \rho V = \rho A v t = \rho \pi r^2 v t \quad (2.1)$$

Donde  $A$  es el área creada por el movimiento de las aspas,  $r$  es el radio de la circunferencia de las aspas,  $\rho$  es la densidad del aire,  $v$  es la velocidad del viento. Por lo que la energía cinética del aire está dada por:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho\pi r^2 tv^3 \quad (2.2)$$

Y la potencia está dada agregando el coeficiente de potencia que es obteniendo gracias a la Ley de Betz [11]:

$$P = \frac{E_c}{t} = \frac{1}{2}\rho\pi r^2 v^3 C_p \quad (2.3)$$

En aerogeneradores grandes para regular la potencia generada debido a las variaciones del viento y como método de protección, se ajusta el pitch de las aspas ya sea para reducir o aumentar la velocidad, en cambio para generadores de menor potencia regular el pitch es más complicado, por lo que se opta por modificar en lugar del pitch el yaw.

De acuerdo a [34] la potencia uniforme generada cuando se modifica el yaw está dada de acuerdo con la fórmula de:

$$P = \frac{E_c}{t} = \frac{1}{2}\rho\pi r^2 v^3 C_p \cos^3 \gamma \quad (2.4)$$

Donde:

$$\gamma = \gamma_{(Turbina)} - \gamma_{(Viento)} \quad (2.5)$$

Siendo  $\gamma_{(Turbina)}$  el ángulo a la dirección en la que está posicionada la turbina y  $\gamma_{(Viento)}$  el ángulo a la dirección de donde proviene el viento. De esta manera se puede regular la potencia que genera un aerogenerador con giro en la parte del Yaw para buscar su PMP o potencia nominal o potencia de operación deseada. Siendo  $\omega$  la velocidad angular (rad/s) y  $C_p$  el coeficiente de potencia de un aerogenerador, se tienen las Ecuaciones (2.6) y (2.7), donde ambas ecuaciones se utilizaran para poder obtener el valor de  $\gamma$  óptima.

$$\lambda = \frac{r\omega}{v} \quad (2.6)$$

$$C_p = \left(\frac{110}{\lambda} - 9,96\right) \exp\left(\frac{-18,4}{\lambda} + 0,055\right) \quad (2.7)$$

En [34] se busca obtener un valor de  $\gamma$  donde siempre se obtenga un valor de potencia nominal en estado estacionario a pesar de que aún se pueda obtener mayor potencia con la velocidad del viento en ese instante, esto con el motivo de proteger los componentes del aerogenerador. La ecuación que se emplea para lograr este valor de  $\gamma$  se muestra en la Ec (2.8) y dicho valor se utiliza en la Ec (2.4).

$$\gamma = \frac{v_n}{v} \sqrt[3]{\frac{C_{pmax}}{\left(\frac{100v}{r\omega_n} - 9,96\right)e^{\left(\frac{-18,4v}{r\omega_n} + 0,055\right)}}} \quad (2.8)$$

Siendo  $v_n$  la velocidad nominal del viento que deseamos siempre para nuestro aerogenerador,  $v$  el viento que en realidad tenemos en nuestro aerogenerador,  $R$  el radio de nuestro molino y  $\omega_n$  la velocidad angular nominal del molino (rad/s). Cabe mencionar que en [34] la Ec (2.8) solo funciona cuando tenemos velocidades de viento iguales o mayores a nuestro viento nominal.

Así mismo utilizando la Ec(2.4) podemos despejar a  $\gamma$  donde la ecuación resultante es la que se muestra a continuación:

$$\gamma = \arccos\left(\sqrt[3]{\frac{2P}{\rho\pi r^2 v^3 C_p}}\right) \quad (2.9)$$

Con ayuda de estas relaciones se propone una técnica de control que en capítulos más adelante se implementa para garantizar el máximo punto de potencia o potencia nominal o potencia de operación deseada del sistema sin llegar a comprometer el estado de los elementos mecánicos o eléctricos.

### 2.3. Gráfico de Ligaduras [26] [4] [10]

El Gráfico de Ligaduras o Bond Graph, por su uso común en inglés, es una técnica de modelado de sistemas físicos donde se utilizan elementos para representar acciones como generación, almacenamiento y disipación de energía. La energía la podemos definir como la capacidad que tiene la materia para producir un trabajo y matemáticamente la energía está expresada como se muestra en la Ec (2.10), puesto que esta técnica hay una transferencia de energía en sus elementos, se usan dos covariables, donde una de ellas es el esfuerzo ( $e$ ), donde esto representa un voltaje, una fuerza o una presión; que al ser multiplicado por la segunda que será un flujo ( $f$ ), siendo una corriente, velocidad o flujo de algún fluido; nos da como resultado potencia y al integrarla en un intervalo de tiempo definido obtenemos energía.

$$E = \int e f dt \quad (2.10)$$

En la siguiente tabla se muestran los elementos que comúnmente se pueden encontrar en la literatura referente a Bond Graph y las analogías con las que pueden relacionarse para tener una mejor idea de como está modelado un sistema en cada una de las diferentes áreas en que se puede aplicar esta técnica de modelado, más adelante se hablará a detalle sobre cada uno de ellos.

Símbolo	Tipo de elemento	Nombre	Área eléctrica	Área mecánica	Área hidráulica
$R$	Disipador	Resistor	Resistencia	Amortiguador	Válvula
$C$	Almacenamiento	Capacitancia	Capacitor	Resorte	Tanque
$I$		Inercia	Inductor	Masa	Flujo de inercia
$S_e$	Fuentes	Esfuerzo	Voltaje	Fuerza	Presión
$S_f$		Flujo	Corriente	Velocidad	Flujo
$TF$	Transductores	Transformador	Transformador	Palanca	Pistón
$GY$		Girador	Motor	Motor	Motor
0	Uniones	Union 1	El flujo es igual en sus bonds y el esfuerzo es diferente		
1		Union 0	El esfuerzo es igual en sus bonds y el flujo es diferente		

Cuadro 2.2 – Analogía de los elementos utilizados en Bond Graph

Cada uno de esos elementos tienen puertos (entrada-salida) que son conectados por bonds (flechas) para poder transmitir un flujo de energía entre componentes y con base a la tabla 2.2, podemos deducir que esta técnica de modelado es multidominio ya que con los mismos elementos del Bond Graph, podemos representar sistemas eléctricos, mecánicos, hidráulicos y térmicos.

En este modo de modelado encontraremos principalmente 4 tipos de elementos con los cuales realizaremos desde modelos sencillos hasta más complicados:

- Fuentes de energía: suministran a un sistema la energía de entrada principalmente, pudiendo ser una fuente ideal configurada para entregar un esfuerzo constante o para entregar un flujo constante positivo o negativo; así también como un esfuerzo y flujo variable.
- Almacenadores de energía: estos elementos acumulan ya sea un esfuerzo o flujo variable y son descritos como almacenadores de esfuerzo o almacenadores de flujo. Esta acumulación sea cual sea de las dos formas le da al sistema estados, con los cuales lo dota de dinámicas. Son considerados como elementos que solo almacenan energía y no la disipan.

- Disipadores de energía: estos elementos no son dinámicos, expulsan energía del sistema. Se considera que solo disipan energía, por lo cual no almacenan esta.
- Elementos de unión: estos elementos conservan la energía, siendo meramente la forma en que se transfiere de un elemento a otro. Estas conexiones pueden ser en paralelo o en serie dependiendo el dominio en que se esté trabajando o pueden ser puntos comunes en sistemas mecánicos. No disipan energía más solo transforman el esfuerzo y el flujo.

Los elementos de transferencia de energía en realidad representan la estructura del modelo, son multipuertos, esto es tienen dos o más puertos por donde transfieren la energía. La relación de interconexión común en estos elementos es tal que la suma de todos los flujos de potencia en una unión es igual a cero como se representa en la Ec (2.11) pudiendo ser que se suman o se restan las potencias de todos los elementos, simplemente el signo denota si la energía entra o sale de un elemento.

$$e_1 f_1 + e_2 f_2 + \dots + e_n f_n = 0 \quad (2.11)$$

Existen principalmente 4 tipos básicos de elementos que transfieren energía: uniones 1 y 0 (las más comúnmente utilizadas en la literatura) las cuales mantienen constante ya sea el esfuerzo o el flujo, transformadores y giradores los cuales transforman la energía.

Las uniones de esfuerzo (0) o de flujo (1) tienen el mismo esfuerzo o el mismo flujo respectivamente y la suma de las covariables debe ser igual a cero. Una unión 0 mantiene las siguientes relaciones en los esfuerzos y flujos incidentes:

$$e_1 = e_2 = \dots = e_n \quad (2.12)$$

$$f_1 + f_2 + \cdots + f_n = 0 \quad (2.13)$$

Mientras que una unión uno mantiene las siguientes relaciones en los esfuerzos y flujos incidentes:

$$f_1 = f_2 = \cdots = f_n \quad (2.14)$$

$$e_1 + e_2 + \cdots + e_n = 0 \quad (2.15)$$

Los transformadores y giradores son elementos que cambian ya sea esfuerzo o flujo y por lo tanto también las covariables son transformadas para mantener las relaciones de conservación de la energía dadas en la Ec (2.11). Estos elementos tienen dos puertos comúnmente (entrada y salida de energía) pero se pueden aplicar una cantidad  $n$  de puertos. Las relaciones que definen a los transformadores son las siguientes:

$$e_2 = ke_1 \quad (2.16)$$

$$f_1 = kf_2 \quad (2.17)$$

Donde el valor  $k$  es una constante o puede ser una variable dependiente de otro sistema, el cual nos indica la modulación en la que cambiará la energía el transformador. Por otro lado, los giradores satisfacen las siguientes relaciones:

$$f_2 = ge_1 \quad (2.18)$$

$$f_1 = ge_2 \quad (2.19)$$

Donde el valor  $g$  es la relación de transformación de energía que puede ser constante o dependiente de algún otro sistema. Un girador a diferencia de un transformador, generalmente su función principal es transformar la energía de un dominio a otro, un ejemplo sencillo es un motor, puesto que la entrada de esfuerzo y flujo está en un dominio eléctrico y su salida está en un dominio mecánico el cual es una velocidad y torque en el eje del motor, caso contrario ocurre en un generador, donde la entrada es en un dominio mecánico y su salida es en un dominio eléctrico.

Fuentes de energía, almacenadores y disipadores son de los elementos básicos utilizados para emular el comportamiento de un sistema de una forma comprensible en su modelo de energía, para ello sus relaciones constitutivas nos dan un mejor entendimiento, pues de esta forma las podemos expresar en ecuaciones algebraicas relacionando el esfuerzo e integrando solo en los almacenadores el flujo o viceversa, aunque este comportamiento también podría ser descrito por un gráfico. En varios sistemas físicos los comportamientos entre esfuerzos y flujos no son lineales y por esto es importante que la técnica de modelado pueda adaptarse a estas no linealidades.

Las entradas proporcionadas por fuentes ideales pueden ser tanto de esfuerzo o flujo constante, es independiente de la covariable donde esta es definida por el sistema que la fuente suministra. La relación constitutiva para una fuente ideal de esfuerzo es:

$$e = e_0 \quad (2.20)$$

Y para una fuente ideal de flujo es:



$$f = f_0 \quad (2.21)$$

Donde tanto el esfuerzo como el flujo son constantes.

Por otro lado, los almacenadores de energía se dividen en dos tipos básicos, almacenadores de esfuerzo y de flujo. Para un almacenador de esfuerzo la relación constitutiva es la utilizada en la Ec (2.22) donde  $\phi(p)$  es una función (probablemente no lineal) de la integral del esfuerzo o momento generalizado  $p$  dado por la Ec (2.23)

$$f = \phi(p) \quad (2.22)$$

$$p = \int e dt \quad (2.23)$$

En el caso de que la función sea lineal, la Ec (2.23) puede reescribirse como:

$$f = \frac{p}{I} \quad (2.24)$$

Donde  $I$  es el valor de la constante proporcional llamada inercia. Utilizando las Ecuaciones (2.22) y (2.23) podemos escribir la siguiente ecuación:

$$e = \frac{dp}{dt} \quad (2.25)$$

$$p = \phi^{-1}(f) \quad (2.26)$$

Donde  $\phi^{-1}$  es la inversa de  $\phi$

Los disipadores de energía solo existen en un solo tipo a diferencia de las fuentes o almacenadores de energía, por lo que sus relaciones constitutivas se

pueden expresar de la siguiente manera:

$$e = \phi(f); f = \phi^{-1}(e) \quad (2.27)$$

Y para el caso lineal tenemos la siguiente ecuación:

$$e = Rf; f = \frac{e}{R} \quad (2.28)$$

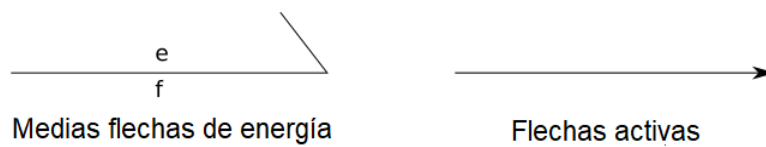


Figura 2.12 – Representación de flechas y señales

En la Tabla 2.3 se tiene un resumen de las relaciones constitutivas de los elementos de Bond Graph.

Símbolo	Tipo de Elemento	Relación Constitutiva
$S_F$	Fuente de flujo	$f = f_{entrada}$
$S_E$	Fuente de esfuerzo	$e = e_{entrada}$
$C$	Almacenador de flujo	$e = (1/C) \int f dt = q/C$
$I$	Almacenador de esfuerzo	$e = (1/I) \int e dt = p/I$
$R$	Disipador	$e = Rf$ o $f = e/R$

Cuadro 2.3 – Relaciones constitutivas de elementos

Otro elemento importante y básico en esta técnica es el medio por el cual los elementos mencionados anteriormente son conectados, los bonds de energía mostrados en la Fig 2.12 o dicho de otra manera los enlaces o medias flechas que conectan todo. Estas medias flechas son los componentes que llevan la transferencia o flujo de energía entre la interacción de los elementos como fuentes, almacenadores,

disipadores, transformadores y giradores; donde estas medias flechas entran y salen de los puertos que contienen los elementos mencionados. Así mismo, existen las flechas enteras o bonds activos que más que transmitir energía nos permite saber información ya sea del esfuerzo, flujo o energía en algún punto de nuestro sistema y poderlo usar como referencia para otra sección de nuestro sistema o también para poder modular alguna fuente o transformador de energía, dependiendo como se requiera el modelo a realizar, además el uso de bonds activos suele afectar a la propiedad de conservación de la energía.

En la Figura 2.13 se puede apreciar un circuito sencillo y su representación en Bond Graph utilizando los elementos mencionados anteriormente. A continuación, se desarrollaran las ecuaciones por medio el modelo en Bond Graph.

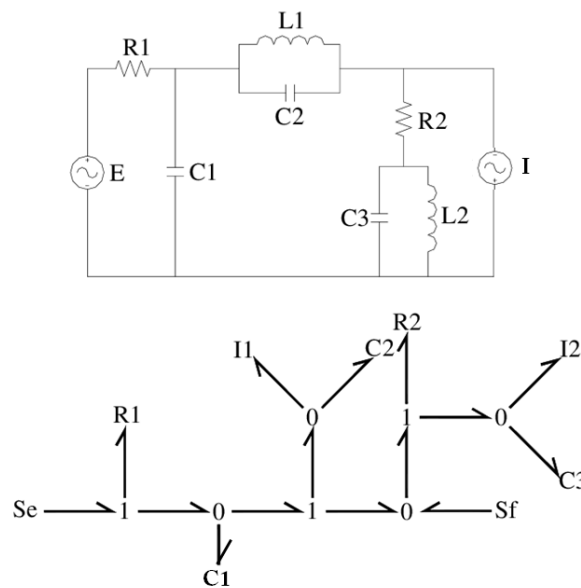


Figura 2.13 – Ejemplo de Bond Graph

Un factor importante también en el Bond Graph es la asignación de la causalidad a los elementos, el concepto de causalidad (computacional) es fundamental para la resolución sistemática en la forma matemática elegida. Asignar la orientación causal de un enlace dado implica que específicamente se conoce el esfuerzo o

la variable de flujo en ese enlace, y esto se le conoce como el valor (o expresión) que se puede propagar a través del sistema para llegar a un modelo matemático completo. A esta causa y efecto de esfuerzos y flujos se representan en direcciones opuestas y para identificar la causalidad o dirección, se hace una marca llamada trazo causal, que es una línea recta ubicada al inicio o al final de cada bond, dependiendo si transmite esfuerzo en una dirección y flujo en la dirección contraria o viceversa (Ver Figura 2.14).

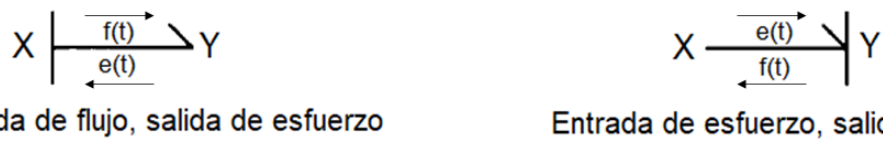


Figura 2.14 – Causalidades de un Bond, lado izquierdo flujo hacia Y; lado derecho esfuerzo hacia Y

Así mismo, hay elementos que tienen su causalidad predefinida (Ver Figura 2.15), la cual al momento de armar un modelo esta característica nos ayuda para poder asignarles la causalidad a los elementos restantes.

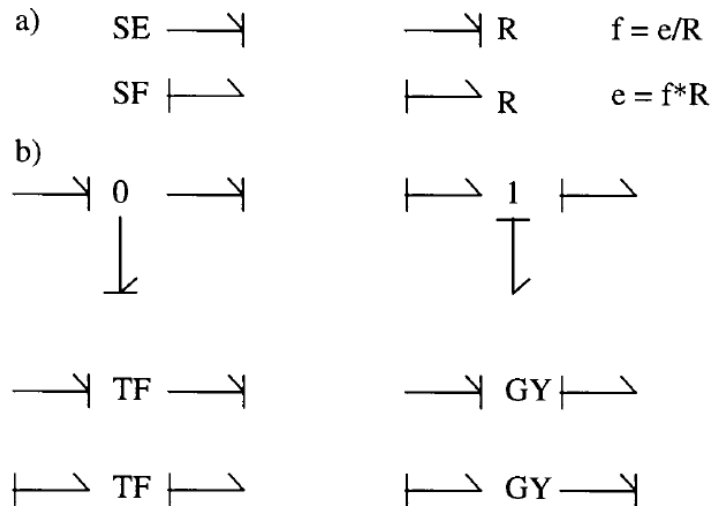


Figura 2.15 – Causalidades predefinidas

Cuando se transforma el Bond Graph a ecuaciones de estados, la causalidad que es de interés para los almacenadores de energía se denomina causalidad in-

tegral. La capacidad de asignar una causalidad integral implica que el sistema es físicamente realizable, proporcionando así un nivel de análisis de las restricciones del sistema más profundo del que sería posible sin el concepto de causalidad. Una mezcla de causalidad integral y derivativa puede ser forzada por la propagación de causalidad en sistemas físicos reales, pero implica que al menos dos almacenadores de energía no son dinámicamente independientes, solo aquellos exhibiendo causalidad integral resultan en variables de estado.

La aplicación de la causalidad derivativa a almacenadores de energía en un Bond Graph da como resultado la forma derivativa del modelo matemático del sistema y tiene la forma más general: un conjunto de ecuaciones diferenciales y algebraicas, aunque en algunos casos pueden producirse ecuaciones diferenciales ordinarias. La causalidad derivativa también se puede aplicar a los almacenadores de energía para facilitar el análisis estacionario de sistemas, sin modificar la estructura fundamental de la modelo. Las formas derivativas de las relaciones constitutivas para almacenadores de energía son:

$$e = I \frac{df}{dt} \quad f = C \frac{de}{dt} \quad (2.29)$$

Se puede ver que el modelo estacionario se da cuando las derivadas del esfuerzo y flujo son cero, es decir, el estado estacionario.

En la Figura 2.16 se puede ver un circuito con dos capacitores en paralelo y en la Figura 2.17 su representación en Bond Graph, donde vemos que ambos capacitores tienen una causalidad derivativa.

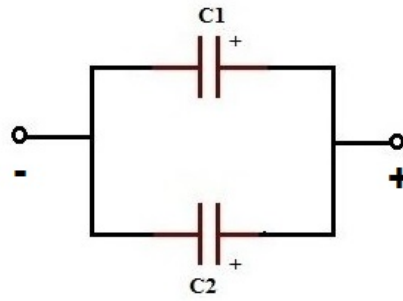


Figura 2.16 – Circuito de dos capacitores en paralelo

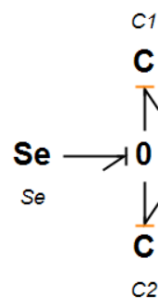


Figura 2.17 – Bond Graph de la Figura 2.16

Al tener causalidades integrales y derivativas nos influye de la siguiente manera: el número de elementos almacenadores con causalidad integral es igual al número de ecuaciones diferenciales linealmente independientes y el número de elementos almacenadores con causalidad derivativa es igual al número de ecuaciones diferenciales linealmente dependientes.

Las reglas para asignar la causalidad son las siguientes:

- Asigne causalidad a cualquier esfuerzo o flujo conocido, como los enlaces activos (señales) derivado de uniones. Por ejemplo, una señal de una unión '0' transmite el esfuerzo de esa unión mientras el flujo de esta unión a la señal es, por definición, cero.
- Asigne la causalidad a los enlaces que se unen directamente a cada fuente y extienda estas causalidades en la medida de lo posible a través de la estruc-

tura de unión aplicando las restricciones de causalidad para elementos de estructura (0, 1, TF, GY).

- Asigne causalidad integral a cada almacenador de energía a su vez y extienda esto a lo largo de la estructura de unión. Cualquier conflicto entre la causalidad debido al almacenamiento debe resolverse reasignando la causalidad derivativa en ese acumulador y establecer la nueva causalidad a través del gráfico de enlace.
- Si quedan enlaces no asignados, entonces asigne una causalidad ya sea arbitrariamente o por conveniencia computacional y nuevamente extienda esto a través de la estructura unión. La asignación de causalidad a un enlace de interconexión no asignado (enlace interno), de modo que este enlace fuerza la causalidad en ambos nodos conectados, minimiza el número de bucles algebraicos. Repita para cualquier enlace restante no asignado.

En la Figura 2.13 tenemos el ejemplo de un circuito eléctrico y su representación en Bond Graph y en la Figura 2.18 completamos el modelo al asignar las causalidades siguiendo las reglas antes mencionadas.

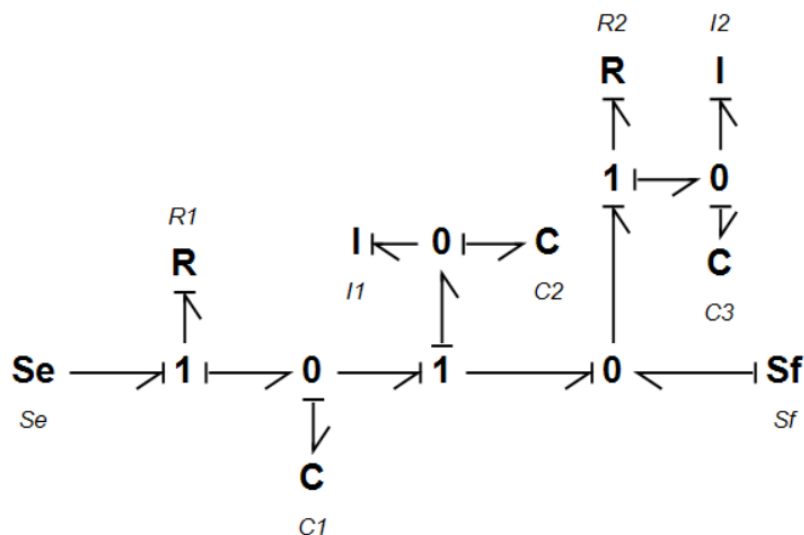


Figura 2.18 – Asignación de causalidades

En la Figura 2.19 podemos ver un resumen de las causalidad que pueden tener los elementos de Bond Graph, incluyendo las derivativas de los elementos que las puedan tener.

Component	Possible causalities
Fuente de esfuerzo	S $\overline{\quad}$
Fuente de flujo	S   $\overline{\quad}$
R	R $\overline{\quad}$   or R   $\overline{\quad}$
I (causalidad integral)	I   $\overline{\quad}$
I (causalidad derivativa)	I $\overline{\quad}$
C (causalidad integral)	C $\overline{\quad}$
C (causalidad derivativa)	C   $\overline{\quad}$
Transformador	$\overline{\quad}$ TF   $\overline{\quad}$ or $\overline{\quad}$ TF $\overline{\quad}$
Girador	$\overline{\quad}$ GY   $\overline{\quad}$ or $\overline{\quad}$ GY $\overline{\quad}$
Unión interna bond	$\overline{\quad}$ or $\overline{\quad}$
Unión interna señal	0 $\rightarrow$ or 1 $\rightarrow$

Figura 2.19 – Causalidades predefinidas

Una vez que tenemos nuestro modelo con todos los elementos necesarios para representar un sistema en Bond Graph, el siguiente paso es obtener la estructura de unión del modelo para por medio de ellas poder obtener ecuaciones. La interacción entre estos elementos para esta estructura es como se muestra en la Figura 2.20

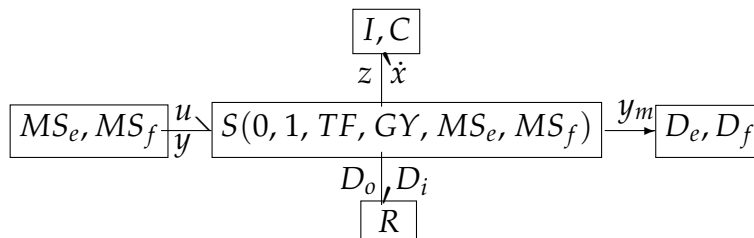


Figura 2.20 – Estructura de unión asociada al Bond Graph

La estructura de unión de la Fig 2.20 no es convencional, ya que al incluir a las fuentes moduladas puede o no perderse la propiedad de conservación de la energía. Al representar la Fig 2.20 en forma matricial se muestra en la Ec (2.30) el



resultado.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ D_i \\ y \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} z \\ D_o \\ u \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Donde la estructura está formada de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ D_i \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ D_o \\ u \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Donde  $\dot{x}$  son derivadas de los estados del sistema,  $z$  son las covariables de estado  $D_i$  y  $D_o$  son las variables asociadas a los elementos disipativos y los elementos  $y$  y  $u$  representan las salidas y entradas al sistema; los elementos de la estructura de unión  $S$  toman valores de:  $0, \pm 1, \pm n$  y  $\pm r$ ; donde  $n$  y  $r$  son los módulos del transformador y girador, respectivamente.

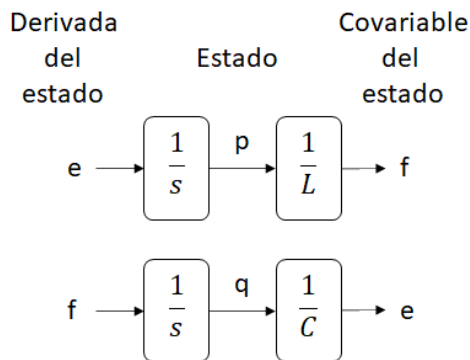
La relación constitutiva describe el comportamiento de un elemento mediante una ley física, por lo que si se tienen relaciones constitutivas lineales se tienen las siguientes ecuaciones;

$$z = Fx \quad (2.32)$$

$$D_o = LD_i \quad (2.33)$$

Donde  $F$  y  $L$  son matrices reales de dimensión  $n \times n$  y  $m \times m$  (siendo  $n$  y  $m$  un número entero positivo real), tendrán los elementos de almacenamiento de energía y los disipativos, respectivamente. En la Fig 2.21 podemos observar como es la relación que asocia las derivadas de estado con las covariables en el caso lineal

para almacenadores de energía.



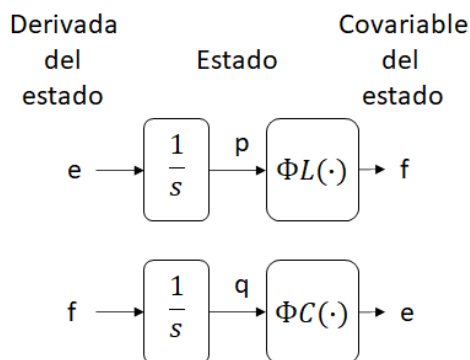
**Figura 2.21** – Relación de almacenadores de energía en el caso lineal

Para el caso no lineal se tiene:

$$z = \Phi_F(x) \quad (2.34)$$

$$D_o = \Phi_L(D_i) \quad (2.35)$$

Donde  $\Phi_F$  y  $\Phi_L$  son funciones que relacionan cada  $z_i$  con  $x_i$  y cada  $D_{oi}$  con  $D_{ii}$  para  $i = 1, \dots, n$  e  $i = 1, \dots, m$ , respectivamente. En la Fig 2.22 podemos observar como es la relación que asocia las derivadas de estado con las covariables en el caso no lineal para almacenadores de energía.



**Figura 2.22** – Relación de almacenadores de energía en el caso no lineal

Hay dos propiedades que la estructura de unión ( $S$ ) debe cumplir para saber si el diagrama de Bond Graph es correcto:

- P1:  $S_{11}$  y  $S_{22}$  son matrices cuadradas antisimétricas
- P2:  $S_{12} = -S_{21}^T$  y viceversa

Cumpliendo estas propiedades significa que hay conservación de la energía.

### 2.3.1. 20-Sim [1]

En esta tesis se utilizó 20-sim, que es un software de modelado y simulación para sistemas mecatrónicos. Con 20-Sim, los modelos pueden ser creados gráficamente, similar a dibujar un esquema de ingeniería. Estos modelos representan el comportamiento de la dinámica, y así, los sistemas pueden ser analizados y los sistemas de control pueden ser diseñados. Los modelos de 20 Sim se pueden exportar como código C a ejecutarse en hardware para prototipos rápidos y simulación computacional por lazo (Hardware In the Loop, HIL, por sus siglas en inglés). 20-Sim incluye herramientas que permiten a un ingeniero crear modelos de forma rápida e intuitiva. Se pueden crear modelos utilizando ecuaciones, diagramas de bloques, componentes físicos y Bond Graph. Varias herramientas dan soporte durante la construcción de modelos y simulación. Otras opciones de herramientas ayudan a analizar modelos, construir sistemas de control y mejorar el rendimiento de sistema.

El software de 20-Sim consta de 2 ventanas que están estrechamente integradas, donde los modelos se crean en la primera (Editor) y la simulación y resultados se muestran en la segunda (Simulador). Cuando se inicia 20-Sim, se abrirá el Editor, el cual contiene un árbol de biblioteca de modelos desde donde se pueden arrastrar y soltar elementos en el área de trabajo para construir los modelos. El editor

de 20-Sim se mostrará como un editor gráfico o un editor de texto dependiendo de modelo que se utilice. La biblioteca contiene elementos para construir modelos de Bond Graph, componentes para construir sistemas físicos y bloques para construir modelos de diagrama de bloques. Todos los elementos de la biblioteca están abiertos y el usuario puede cambiarlos. La biblioteca contiene los siguientes elementos:

- Bond Graph.- elementos para contruir modelos en Bond Graph
- Diagramas de esquema.- componentes para representar sistemas físicos tales como:
  - Eléctrico.- componentes para construir circuitos eléctricos.
  - Mecánico.- componentes para construir estructuras rotacionales y traslacionales.
  - Hidráulico.- componentes para construir sistemas hidráulicos
  - Térmicos.- componentes para modelar transferencia de calor
- Diagrama de bloques.- bloques para construir modelos lineales o no lineales, fuentes, mediciones, funciones de transferencia, etc.
- Ejemplos.- modelos de ejemplo para mostrar el uso básico de las librerías antes mencionadas.

Los modelos en 20 sim están orientados jerárquicamente. El modelo principal está construido por varios elementos gráficos llamados submodelos. Se pueden conectar submodelos y dependiendo del submodelo, la conexión puede ser una variable compartida o una conexión física. Un submodelo en sí mismo puede construirse a partir de múltiples submodelos, y estos submodelos en sí mismos pueden construirse con submodelos, abarcando muchas capas de profundidad. En

la parte inferior de la jerarquía, los modelos se describen mediante conjuntos de ecuaciones. Estos modelos se llaman Modelos de Ecuaciones.

Así mismo cuenta con herramientas para la construcción de modelos más avanzados como:

- **Controller Design Editor:** ayuda a los usuarios a diseñar sistemas de retroalimentación con una planta lineal, controlador y prefiltro. Las respuestas de lazo abierto y cerrado pueden investigarse usando las metodologías de Bode y Nyquist.
- **Editor de mecánica 3D:** los sistemas mecánicos 3D son notoriamente difíciles de modelar utilizando elementos 1D, 3D Mechanics Editor permite al usuario definir sistemas mecánicos arrastrando y soltando cuerpos, articulaciones y otros objetos en un espacio de trabajo 3D. El conjunto correspondiente de ecuaciones diferenciales optimizadas se genera automáticamente.
- **Asistentes:** varios asistentes lo ayudarán a crear perfiles de movimiento, definir levas, construir servomotores y mucho más.

Cuando un modelo está listo, el simulador se puede abrir desde el Editor. El modelo es compilado automáticamente para crear código de simulación y no se requieren herramientas adicionales. En la fase de compilación, 20-sim verificará si el modelo es correcto y optimizar las ecuaciones si es posible, utilizando un solucionador simbólico incorporado para eliminar causalidades derivativas, lazos algebraicos y otros posibles problemas.

El programa puede simular y analizar modelos. Antes de que se pueda iniciar una simulación, el usuario tiene que definir algunas configuraciones:

- **Propiedades de ejecución:** tiempo de inicio y de finalización de una ejecución.

- Método de integración: 20-sim admite varios métodos numéricos avanzados para ejecutar una simulación. El método numérico se puede elegir junto con la configuración adecuada. Estas configuraciones incluyen por ejemplo error de integración máxima y tamaño de paso.
- Valores de parámetros: antes de ejecutar una simulación, es posible que los valores de los parámetros predeterminados tengan que cambiarse.
- Propiedades del gráfico: el número y la apariencia de los gráficos deben establecerse y las variables a graficar deben ser elegidas.

Junto a los gráficos de simulación, los resultados también se pueden mostrar como animaciones 3D. Un editor especial está disponible en que cualquier variable se puede conectar a la posición, orientación, tamaño y color de los objetos 3D. Están disponibles figuras básicas, pero también se pueden importar desde otros programas CAD.

El software de 20-Sim tiene dos opciones que se pueden utilizar para analizar modelos.

- Dominio en el tiempo: permite el análisis del modelo cambiando los valores de los parámetros y usando múltiples simulaciones. Los barridos de parámetros, la optimización y el ajuste de curvas ayudan a mejorar el rendimiento del sistema. El análisis de sensibilidad, el análisis de Monte Carlo y el análisis de variación, son de ayuda para verificar la robustez de un sistema.
- Dominio en la frecuencia: los modelos en 20-Sim se pueden linealizar para mostrar el sistema lineal correspondiente en el Editor de sistema lineal. Linear System Editor es una herramienta especializada para el diseño y visualización de sistemas lineales. El editor admite sistemas SISO de tiempo continuo y de tiempo discreto y puede mostrar la respuesta del sistema mediante gráficos de

Bode Nyquist. Si los modelos no se pueden linealizar, la transformada rápida de Fourier se puede usar para mostrar el comportamiento en la frecuencia de un modelo.



Figura 2.23 – 20-Sim ®

## 2.4. Generador Síncrono de Imanes Permanentes [20]

En un generador síncrono se produce un campo magnético en el rotor ya sea mediante el diseño de éste como un imán permanente o mediante la aplicación de una corriente de CD a su devanado para crear un electroimán. En seguida, el rotor del generador gira mediante un motor primario, y produce un campo magnético giratorio dentro de la máquina. Este campo magnético giratorio induce un conjunto de voltajes trifásicos dentro de los devanados del estator del generador. Estos devanados pueden ser "devanados de campo o devanados del inducido". El primer término se aplica a los devanados que producen el campo magnético principal en la máquina, mientras que el segundo se aplica a los devanados donde se induce el voltaje principal. En las máquinas síncronas, los devanados de campo están en el rotor, por lo que los términos devanados del rotor y devanados de campo se utilizan indistintamente. De manera similar, los términos devanados del estator y devanados del inducido se utilizan de manera indistinta. El PMSG Transforma la energía mecánica en energía eléctrica, donde se ha sustituido el bobinado de excitación, por lo general en el rotor, por un sistema de imanes permanentes que suministran un campo de excitación constante. Esto da como ventajas que se necesita un menor mantenimiento

El rotor de un generador síncrono es en esencia un electroimán grande. Los polos magnéticos del rotor pueden ser tanto salientes como no salientes. El término saliente significa proyectado hacia “afuera” o “prominente” y un polo saliente (Ver Fig 2.25) es un polo magnético proyectado hacia afuera del eje del rotor. Por otro lado, un polo no saliente (Ver Fig 2.24) es un polo magnético construido al mismo nivel de la superficie del rotor.

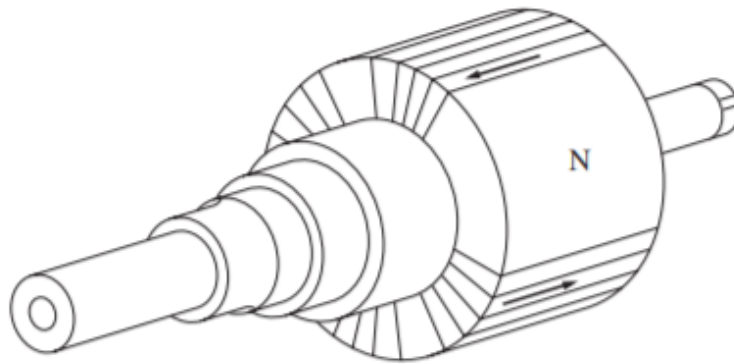


Figura 2.24 – Rotor con polos no salientes

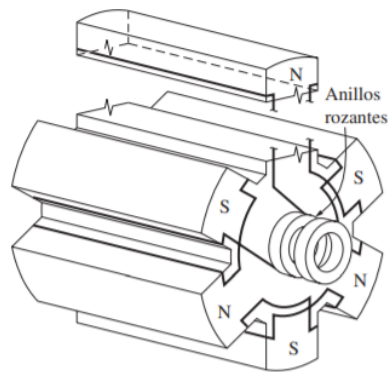


Figura 2.25 – Rotor con polos salientes

Se debe suministrar una corriente de cd al circuito de campo del rotor. Puesto que éste gira, se requiere de un arreglo especial para que la potencia de CD llegue a los devanados de campo. Existen dos formas comunes de suministrar esta potencia de cd:



- Suministrar al rotor la potencia de cd desde una fuente externa de CD por medio de anillos rozantes y escobillas.
- Suministrar la potencia de CD desde una fuente de potencia de CD especial montada directamente en el eje del generador síncrono.

En los generadores y motores más grandes se utilizan excitadores o excitatrices sin escobillas para suministrar a la máquina corriente de campo de CD. Un excitador sin escobilla (Ver Fig 2.26) es un generador de ca pequeño con un circuito de campo montado en el estator y un circuito de armadura acoplado en el eje del rotor. La salida trifásica del generador excitador se rectifica a corriente directa por medio de un circuito rectificador trifásico.

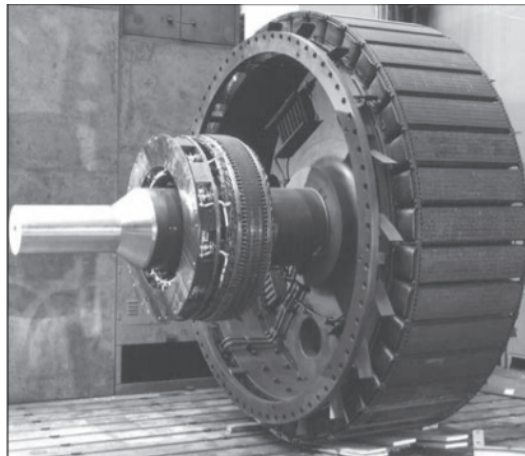


Figura 2.26 – Rotor sin escobillas

La frecuencia eléctrica está dada por la siguiente ecuación

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad (2.36)$$

Donde

- $f_e$  : Frecuencia eléctrica
- $n_m$  : Velocidad mecánica del campo magnético en r/min

- $P$  : Número de polos

Y podemos representar un generador síncrono trifásico como un circuito equivalente (Ver Fig 2.27), siendo  $V_F$  y  $I_F$   $R_F$   $L_F$  el voltaje, corriente, resistencia e inductancia de campo,  $R_{ajus}$  una resistencia variable,  $jX_S$   $R_A$  la inductancia y resistencia en cada fase,  $E_{A1}$   $E_{A2}$   $E_{A3}$  el voltaje inducido en cada fase y  $V_{\phi 1}$   $V_{\phi 2}$   $V_{\phi 3}$  Los voltajes y corrientes entre cada fase están separados por  $120^\circ$ .

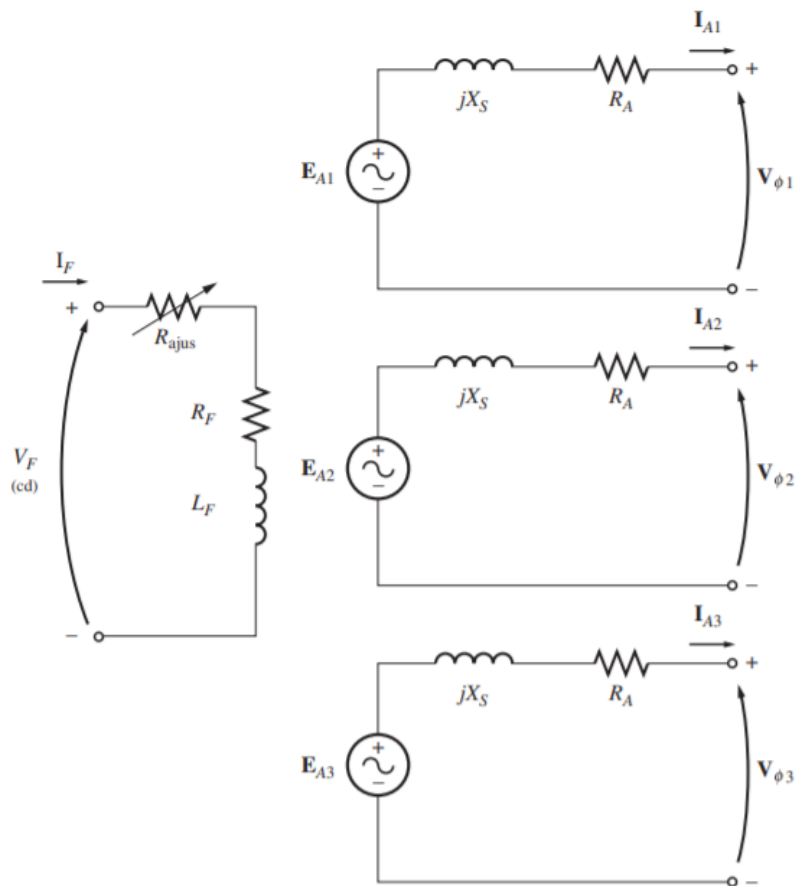


Figura 2.27 – Circuito equivalente de un generador síncrono trifásico

Las ecuaciones que describen el comportamiento de un generador síncrono de imanes permanentes [40] son las que se muestran a continuación:

$$L_d \frac{di_d}{dt} = -R_d i_d + \omega L_q i_q + v_d \tag{2.37}$$

$$L_q \frac{di_q}{dt} = -R_q i_q - \omega L_d i_d - \omega \Phi + v_q \quad (2.38)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = p((L_d - L_q)i_d i_q + \Phi i_q) - T_l \quad (2.39)$$

Siendo:

- $v_d$  y  $v_q$  : Los voltajes en el marco  $d - q$
- $i_d$  y  $i_q$  : Las corrientes en el marco  $d - q$
- $L_d$  y  $L_q$  : Las inductancias en el marco  $d - q$
- $\omega$  : La velocidad rotacional del rotor
- $\Phi$  : El flujo de los imanes permanentes
- $J$  : La inercia del generador
- $T_l$  : El torque de entrada
- $p$  : El numero de polos

Así mismo, como un sistema físico trabaja en un marco ABC (la división de las fases que tenemos en un generador trifásico o los voltajes en cada fase ( $v_a$ ,  $v_b$  y  $v_c$ )) es necesario llevarlo a un marco 0DQ (marco del modelo de ecuaciones teniendo los voltajes  $v_d$  y  $v_q$ ) para poder utilizar las ecuaciones (2.37), (2.38) y (2.39). Para esto es necesario una matriz de transformación de Park (Ver Apéndice A).

## 2.5. Rectificador [5] [3]

Un rectificador a grandes rasgos es un dispositivo que permite convertir una corriente alterna en una corriente directa, utilizando un dispositivo semiconductor,

comúnmente los diodos rectificadores. Estos elementos son muy útiles por sus características no lineales; puesto que hay una corriente para una polaridad de voltaje, pero es prácticamente cero para la polaridad opuesta, características que son de interés ya que un voltaje alterno tiende a cambiar de polaridad en base a su frecuencia (50 o 60 Hz). El proceso de rectificación en una tensión monofásica se clasifica en dos tipos:

- Rectificador de media onda: en este tipo de rectificado se utiliza únicamente un diodo y una resistencia conectados al lado secundario de un transformador. Durante el semiciclo positivo de la tensión de fuente polarizará el diodo en directa. Dado que el interruptor está cerrado, el semiciclo positivo de la tensión de la fuente aparecerá en la resistencia de carga. En el semiciclo negativo, el diodo está polarizado en inversa, en este caso, el diodo ideal se comportará como un interruptor abierto y no caerá tensión en la resistencia de carga.

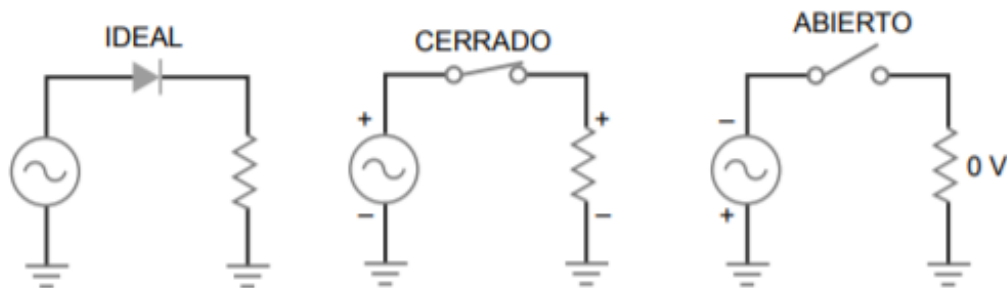


Figura 2.28 – Rectificador de media onda

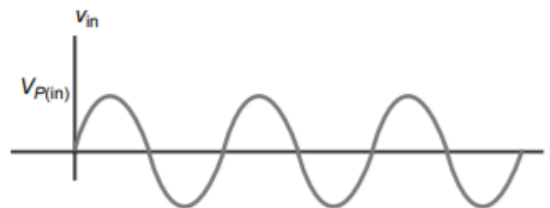


Figura 2.29 – Voltaje de entrada ( $V_{p(in)}$ )

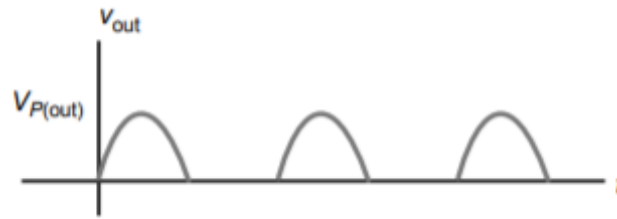


Figura 2.30 – Voltaje de salida ( $V_{p(out)}$ )

Siendo el voltaje de salida ( $V_{DC}$ , voltaje en una sola polaridad) con respecto a la entrada calculado de la siguiente manera:

$$V_{DC} = \frac{V_p}{\pi} \quad (2.40)$$

$$V_{DC} \approx 0,318V_p \quad (2.41)$$

Claro está, también hay que tomar en cuenta el voltaje de polarización del diodo, que comúnmente se encuentra en  $0,7V$ , por lo que si el valor de entrada de la fuente es mucho mayor a este valor prácticamente será el mismo valor que el de salida, de lo contrario el valor se obtiene de la forma  $V_{p(out)} = V_{p(in)} - 0,7$

- Rectificador de onda completa: en este tipo de rectificadores a diferencia del de media onda, rectifica también las partes negativas de la onda senoidal de modo que se genera una señal de salida unipolar durante las dos mitades de la señal senoidal de entrada (Ver Fig 2.31 y 2.32). Existen dos variantes de este tipo de rectificación: el rectificador de onda completa con punto medio (Ver Fig 2.33) y el rectificador de puente de diodos (Ver Fig 2.34); este último más comúnmente usado.



Figura 2.31 – Voltaje de entrada ( $V_{p(in)}$ )



Figura 2.32 – Voltaje de salida ( $V_{p(out)}$ )

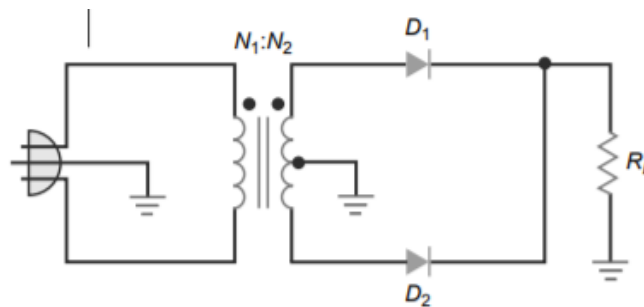


Figura 2.33 – Rectificador de onda completa con punto medio

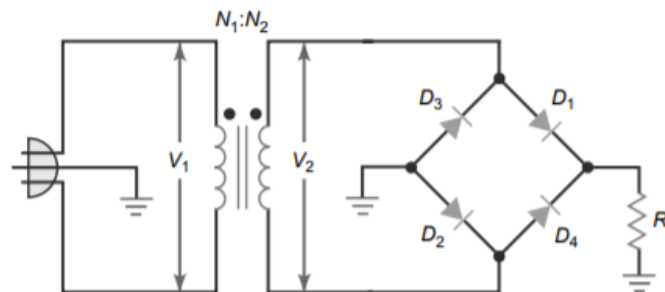


Figura 2.34 – Rectificador de onda completa con puente de diodos

En el rectificador de tipo puente en cada semiciclo hay dos diodos que están conduciendo, viendo la Fig 2.34 durante un semiciclo están conduciendo

(polarizados directamente) los diodos D1 y D2, mientras que en otro semiciclo se encuentran conduciendo los diodos D3 y D4. Durante ambos semiciclos la tensión en la salida será de la misma polaridad y la corriente de carga circula en la misma dirección. El valor medio que se tendrá a la salida en ambos tipos será:

$$V_{DC} = \frac{2V_p}{\pi} \quad (2.42)$$

La diferencia entre el rectificador de onda completa con punto medio y el de tipo puente, es que el transformador tendrá menos espiras en el caso del rectificador tipo puente, lo que se traduce esto en que el transformador utilizado será de menor tamaño usando un puente de diodos. Otra diferencia importante es el valor de la tensión pico en la salida, ya que en cada semiciclo actúa uno o dos diodos.

En el caso del punto medio se aplica la ecuación

$$V_{p(out)} = 0,5V_{p(in)} - 0,7V \quad (2.43)$$

Y en el caso del puente se aplica la ecuación

$$V_{p(out)} = V_{p(in)} - 1,4V \quad (2.44)$$

También existen otro tipo de rectificadores que son utilizados para aplicaciones donde se requiere más potencia, estos son los rectificadores trifásicos. Estos tipos de rectificadores se pueden clasificar en: No controlado y Controlado.

En este trabajo se empleó un rectificador trifásico de onda completa con diodos no controlado, que a diferencia del tipo puente antes mencionado, este

tendrá un arreglo de 6 diodos no controlados, lo que quiere decir que la tensión de entrada es proporcional a la de salida, como se puede apreciar en la Ec (2.52), además de que en su salida presenta un menor rizado en la señal.

Como es un sistema con una tensión trifásica, existen tres fases de donde el sistema recibirá la tensión de entrada (Ver Fig 2.35) por lo que se pueden calcular el valor de estos valores de tensión de línea a neutro y de línea a línea.

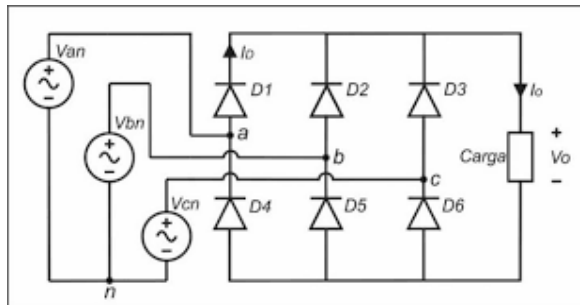


Figura 2.35 – Rectificador trifásico de onda completa con puente de 6 diodos

Calculando la tensión de línea a neutro tenemos:

$$V_{an} = V_m \sin(\omega t) \quad (2.45)$$

$$V_{bn} = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.46)$$

$$V_{cn} = V_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.47)$$

Calculando para la tensión de línea a línea:

$$V_{ab} = \sqrt{3} V_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \quad (2.48)$$

$$V_{bc} = \sqrt{3} V_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \quad (2.49)$$



$$V_{ca} = \sqrt{3}V_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \quad (2.50)$$

Y el valor medido a la salida de la rectificación está dado por las siguientes ecuaciones:

$$V_{DC} = \frac{6}{\pi} \int_{\omega t=0}^{\frac{\pi}{6}} \sqrt{3}V_m \cos(\omega t) d(\omega t) \quad (2.51)$$

$$V_{DC} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \quad (2.52)$$

Donde  $V_m$  es el voltaje pico de fase o voltaje máximo,  $\omega t$  es el ángulo de la tensión.

## 2.6. Convertidor Reductor (Buck) [13]

En la electrónica existen elementos que nos permiten convertir un tipo de electricidad a otro tipo e inclusive del mismo tipo, pero cambiando los valores con los que se está trabajando: Transformadores (AC-AC), Rectificadores (AC-DC), Inversores (DC-AC) y Troceadores (DC-DC).

Los convertidores transforman un valor de voltaje directo ya sea elevándolo (Convertidor Boost), reduciéndolo (Convertidor Buck) o con la capacidad de hacer ambas funciones (Convertidor Buck-Boost) (Ver Fig 2.36). Estas son las principales formas de operar de un convertidor, aunque no son los únicos tipos de convertidores, son los más comúnmente usados.

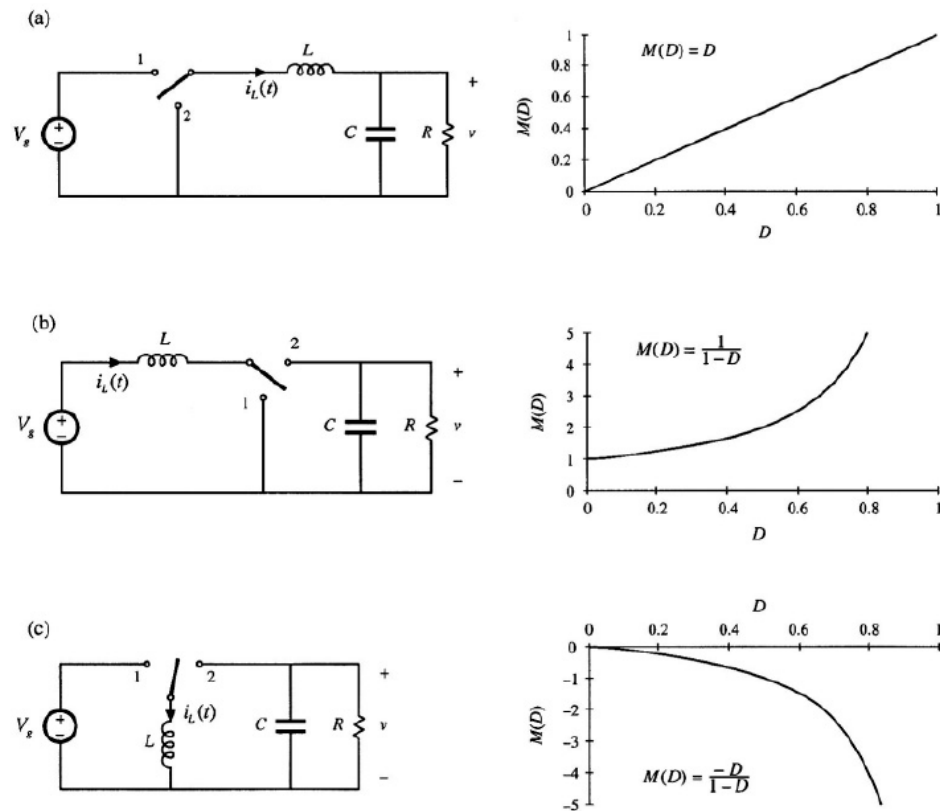


Figura 2.36 – Convertidores Buck, Boost y Buck-Boost

El convertidor Buck transforma un voltaje de entrada en un voltaje de salida igual o menor, donde su forma de trabajo es en un ciclo de dos posiciones, en la primera posición la fuente de voltaje de entrada está conectada al circuito y en su segunda posición se desconecta esta fuente. (Ver Fig 2.37)

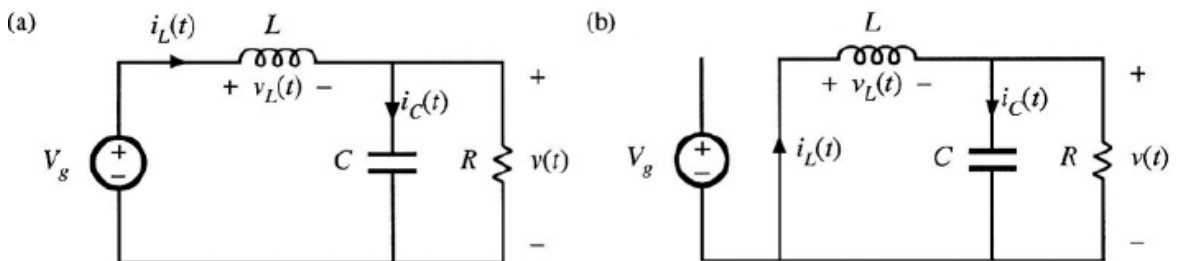


Figura 2.37 – Posiciones del convertidor Buck

Durante la etapa de conversión de voltaje de una magnitud a otra, los cambios de posición en los circuitos hacen que haya un pequeño rizo en el valor de voltaje

final mostrado en la siguiente ecuación:

$$v(t) = V + v_{\text{rizo}} \quad (2.53)$$

Donde este rizo es mucho más pequeño que la componente DC del circuito (Ver Fig 2.38).

$$\| v_{\text{rizo}} \| \ll V \quad (2.54)$$

En base a la Ec (2.54) podemos hacer una aproximación donde la salida  $v(t) = V + v_{\text{rizo}}$  es igual a

$$v(t) \approx V \quad (2.55)$$

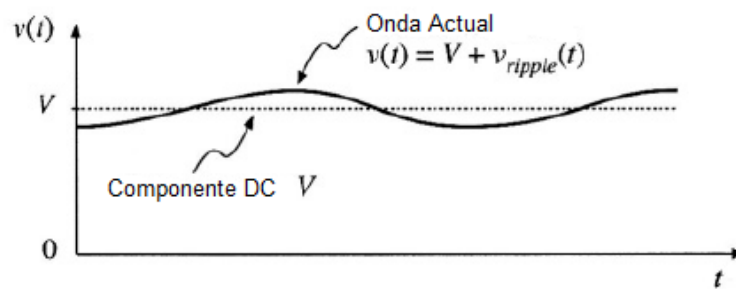


Figura 2.38 – Rizo y componente DC del voltaje de un convertidor

Esta aproximación nos ayuda a facilitar el análisis de un convertidor. En la primera posición del convertidor Buck tenemos que el voltaje en el inductor es:

$$V_L = V_g - v(t) \quad (2.56)$$

Y aplicando la Ec (2.55)

$$V_L = V_g - V \quad (2.57)$$

Mientras que el voltaje en el inductor está definido por:

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} \quad (2.58)$$

Y combinando las Ecuaciones (2.57) y (2.58) la corriente en el inductor durante el primer intervalo del convertidor está dada por:

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{V_L(t)}{L} = \frac{V_g - V}{L} \quad (2.59)$$

Aplicando la misma metodología para la posición 2 tenemos que el voltaje en el inductor está dado por:

$$V_L = -v(t) \quad (2.60)$$

Y haciendo la aproximación de pequeño rizo

$$V_L = -V \quad (2.61)$$

Donde la corriente en la posición 2 está definida por:

$$\frac{di_L(t)}{dt} = -\frac{V}{L} \quad (2.62)$$

En la Fig 2.39 podemos observar como el es transitorio de la corriente en el convertidor Buck, hasta llegar a su estado estacionario (Ver Fig 2.40) donde el comportamiento de la curva de la corriente está descrito por las ecuaciones (2.59) y (2.62).

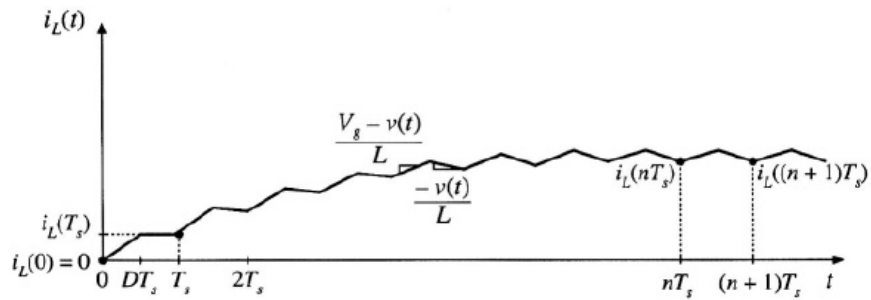


Figura 2.39 – Transitorio de la corriente en el inductor

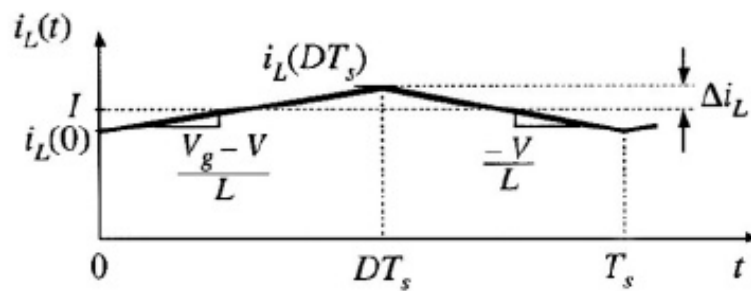


Figura 2.40 – Corriente del inductor en estado estacionario

El comportamiento del voltaje en el convertidor Buck está definido por las ecuaciones (2.57) y (2.61) que es el voltaje en el inductor en la posición 1 y 2, combinando ambas ecuaciones podemos obtener la relación de salida con respecto al voltaje de entrada. En la Fig 2.41 podemos ver que el área en cada posición está relacionada con el voltaje que hay en el inductor en cada posición multiplicado por el tiempo que se encuentre activa cada posición (definido por el valor  $D$  que es el ciclo de trabajo y  $T_s$  que es el tiempo). La suma de ambas áreas debe ser igual a cero para ser un sistema balanceado.

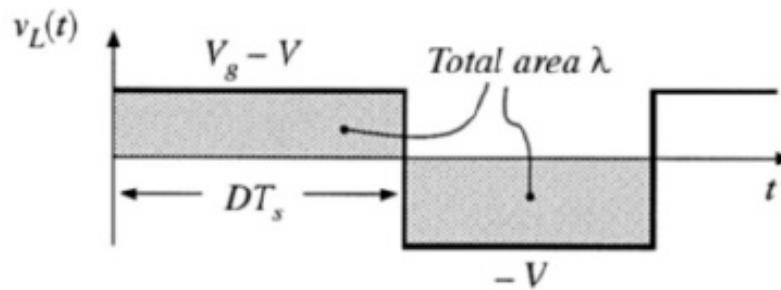


Figura 2.41 – Voltaje del inductor en un ciclo completo

Para poder obtener la ecuación que nos determinara el voltaje de salida necesitaremos la Ec (2.56) y (2.60) para tener un ciclo completo ( $\langle V_L \rangle$ ) de nuestro convertidor, ya que la suma de ambas ecuaciones es el área total, la cual integraremos en un tiempo definido cualquiera ( $T_s$ ).

Desarrollo de la ecuación del voltaje de salida [13]

$$\lambda = \int_0^{T_s} V_L dt = (V_g - V)(DT_s) + (-V)(D'T_s) \quad (2.63)$$

$$\langle V_L \rangle = \frac{\lambda}{T_s} = D(V_g - V) + D'(-V) \quad (2.64)$$

$$0 = DV_g - (D + D')V = DV_g - V \quad (2.65)$$

$$V = DV_g \quad (2.66)$$

Donde el valor de  $D \in [0,1]$  es el ciclo de trabajo,  $V_g$  es el voltaje de entrada y  $V$  es el voltaje de salida.

El voltaje que tendremos en nuestro convertidor Buck estará regido por la Ec (2.66) y cómo podemos observar en la misma ecuación, se cumple con la relación

$$M(D) = D \quad (2.67)$$

Misma que se observa en la Fig 2.36.

## 2.7. Pasividad [18] [9] [25]

La pasividad es una propiedad intrínseca que poseen algunos sistemas, a lo largo del presente trabajo únicamente se utiliza la representación de sistemas en variables de estado, así cómo la representación en BG y en estructura de unión. Suponga el sistema

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, u) \\ y &= h(x, u)\end{aligned}\tag{2.68}$$

Donde  $f : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^p \mapsto \mathbb{R}^n$  es localmente Lipschitz,  $h : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^p \mapsto \mathbb{R}^p$  es un mapeo continuo,  $f(0,0) = 0$  y  $h(0,0) = 0$ , el sistema mostrado en la Ec (2.68) es pasivo si la energía que absorbe en cualquier periodo de tiempo  $[0, t]$  es mayor o igual al incremento en la energía almacenada por el sistema en el mismo periodo de tiempo, esto quiere decir que:

$$\int_0^t u^T(s)y(s)ds \geq V(x(t)) - V(x(0))\tag{2.69}$$

en donde  $V(x)$  es la energía almacenada por el sistema. Debido a que (2.69) debe cumplirse  $\forall t \geq 0$ , el flujo de potencia interno del sistema debe ser mayor o igual a la tasa de cambio de la energía almacenada por el mismo. Lo cual queda expresado en la siguiente definición:

*El sistema (2.68) es pasivo si se tiene una función positiva semidefinida continuamente diferenciable  $V(x)$ , llamada función de almacenamiento, tal que*

$$u^T y \geq \dot{V} = \frac{\delta V}{\delta x} f(x, u), \quad \forall (x, u) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^p\tag{2.70}$$

*Más aún, se dice que un sistema es:*

- *Pasivo si  $u^T y \geq 0$*
- *Sin pérdidas si  $u^T y = 0$*
- *Pasivo por prealimentación de entrada si  $u^T y \geq \dot{V} + u^T \varphi(u)$  para alguna función  $\varphi$*
- *Estrictamente pasivo a la entrada si  $u^T y \geq \dot{V} + u^T \varphi(u)$  con  $u^T \varphi(u) > 0, \forall u \neq 0$*
- *Pasivo por retroalimentación de salida si  $u^T y \geq \dot{V} + y^T \rho(y)$  para alguna función  $\rho$*
- *Estrictamente pasivo a la salida si  $u^T y \geq \dot{V} + y^T \rho(y)$  con  $u^T \rho(y) > 0, \forall u \neq 0$*
- *Estrictamente pasivo si  $u^T y \geq \dot{V} + \phi(x)$  para alguna función positiva definida  $\phi$*

*En todos los casos, las desigualdades deben mantenerse para todo par  $(x, u)$ .*

Existen diferentes tipos de sistemas disipativos, los cuales se definen de acuerdo con el tipo de suministro de entrada (energía de entrada) del sistema. Una importante clase de sistema disipativo es la clase de sistemas pasivos, en los cuales, cómo en el caso de las redes eléctricas, la energía de entrada está dada por el producto de la entrada y la salida del sistema, donde cada par entrada-salida del multipuerto son variables conjugadas cuyo producto es potencia.

Así mismo de [30] tenemos los resultados en cuanto a la interconexión de sistemas pasivos para los casos de que se encuentren en paralelo o estén en retroalimentados (Ver Fig 2.42), siendo  $h_1$  y  $h_2$  sistemas diferentes, si cada uno de estos es pasivo, la unión de estos dos cualquiera que sea la forma, el resultado será pasivo.



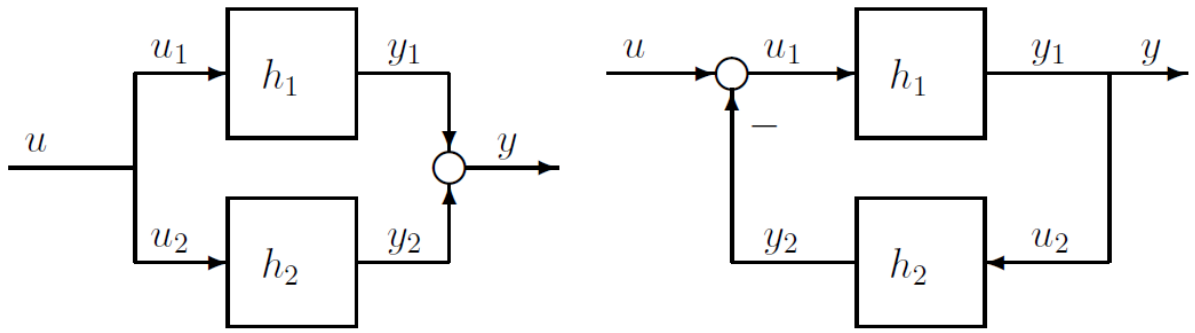


Figura 2.42 – Interconexión en paralelo y retroalimentación de sistemas pasivos

El sistema 1 ( $h_1$ ) tiene entrada  $u_1$  y salida  $y_1$ , mientras que el sistema 2 ( $h_2$ ) tiene entrada  $u_2$  y salida  $y_2$ . Se hacen las siguientes consideraciones:

- Son funciones continuas diferenciables  $V_1(t) \geq 0$  y  $V_2(t) \geq 0$
- Son funciones  $d_1(\cdot)$  y  $d_2(\cdot)$  tales que  $\int_0^t d_1(s)ds \geq 0$  y  $\int_0^t d_2(s)ds \geq 0 \forall t \geq 0$
- Hay constantes  $\delta_1, \delta_2, \epsilon_1$  y  $\epsilon_2$  tales que:

$$\dot{V}_1(t) = y_1^T(t)u_1(t) - \delta_1 u_1^T u_1 - \epsilon_1 y_1^T y_1 - d_1(t) \quad (2.71)$$

$$\dot{V}_2(t) = y_2^T(t)u_2(t) - \delta_2 u_2^T u_2 - \epsilon_2 y_2^T y_2 - d_2(t) \quad (2.72)$$

Para el caso de la conexión en paralelo tenemos que  $u_1 = u_2 = u$ ,  $y_1 + y_2 = y$   
y

$$y^T u = (y_1 + y_2)^T u = y_1^T u + y_2^T u = y_1^T u_1 + y_2^T u_2 \quad (2.73)$$

Usando las ecuaciones (2.71), (2.72) y (2.73), existe una función  $V(\cdot) = V_1(\cdot) + V_2(\cdot) \geq 0$  y  $d_p = d_1 + d_2 + \epsilon_1 y_1^T y_1 + \epsilon_2 y_2^T y_2$  tales que  $\int_0^t d_p(t')dt' \geq 0 \forall t \geq 0$  y

$$\dot{V}(t) = y^T(t)u(t) - \delta u_2^T(t)u_2(t) - d_p(t) \quad (2.74)$$

Donde  $\delta = \delta_1 + \delta_2 \geq 0$ . Esto significa que la interconexión en paralelo es pasiva si tiene una entrada y salida pasiva y estrictamente pasiva si  $\delta_1 \geq 0$  y  $\delta_2 \geq 0$ .

En el caso del sistema en retroalimentación tenemos que  $y_1 = u_2 = y$ ,  $u_1 = u - y_2$  y

$$y^T u = y_1^T (u_1 + u_2) = y_1^T u_1 + y_1^T y_2 = y_1^T u_1 + u_2^T y_2 \quad (2.75)$$

Donde nuevamente usando las ecuaciones (2.71), (2.72) y (2.73), existe una función  $V(\cdot) = V_1(\cdot) + V_2(\cdot) \geq 0$  y  $d_{fb} = d_1 + d_2 + \delta_1 u_1^2$  tales que  $\int_0^t d_{fb}(s) ds \geq 0 \forall t \geq 0$  y

$$\dot{V}(t) = y^T(t)u(t) - \epsilon y^T(t)y(t) - d_{fb}(t) \quad (2.76)$$

Donde  $\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \delta_2$ . Esto quiere decir que la conexión en retroalimentación es pasiva y la salida es estrictamente pasiva si  $\epsilon_1 > 0$ ,  $\epsilon_2 > 0$  y  $\delta_2 > 0$ .

En el siguiente capítulo se verá el proceso de modelado de cada sección del sistema eólico de potencia en Bond Graph, comprendiendo desde el molino hasta el convertidor reductor.

## Modelado en Bond Graph

### 3.1. Modelo General

En el modelo que se muestra en la Fig 3.2 se observa la integración propuesta de todo el sistema eléctrico de un generador eólico, utilizando la técnica de Bond Graph. En el modelo podemos observar desde la parte donde se utiliza una entrada de viento la cual llega en primera instancia a la parte mecánica del modelo que es un molino de tres aspas, posteriormente hay un torque de salida en esa sección el cual es la entrada a nuestro siguiente elemento que es el generador síncrono de imanes permanentes, donde se genera la energía eléctrica. El PMSG produce voltajes y corrientes trifásicas y la energía está asociada con ambas variables. Las corrientes trifásicas son las salidas de estas secciones y llegan como entradas al rectificador y como su nombre puede dar a entender, esta parte tiene la función de rectificar la tensión trifásica que proviene del generador y como salida tiene una tensión rectificada por lo que hace la conversión de AC a DC llegando a la parte del convertidor reductor, elemento donde se aplica el control basado en pasividad que mantiene un voltaje constante a su salida para los propósitos que se puedan desear, que en este caso se consideran alimentar una batería o mandar ese voltaje a un inversor.

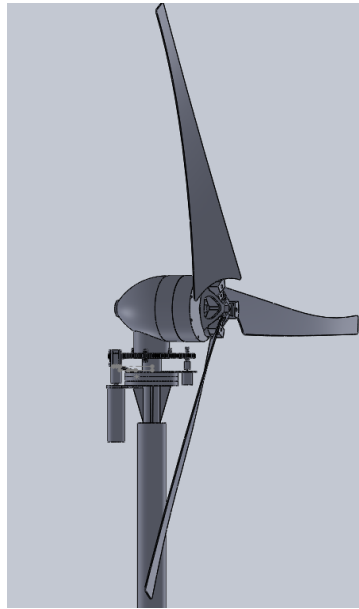


Figura 3.1 – Sistema físico

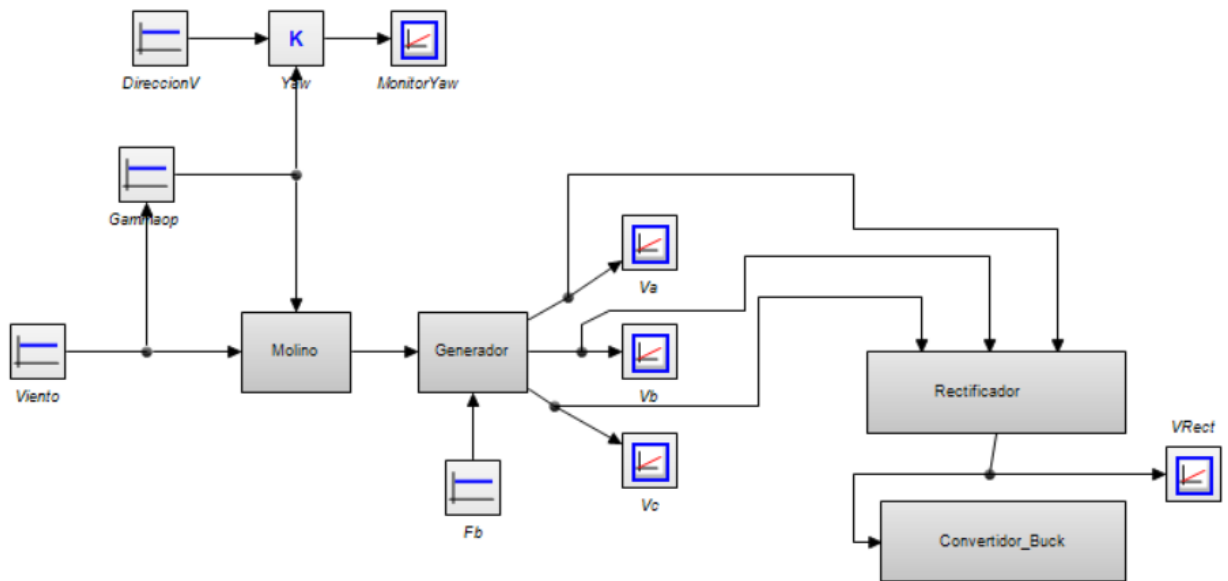


Figura 3.2 – Modelo Completo de Generación de Energía Eólica

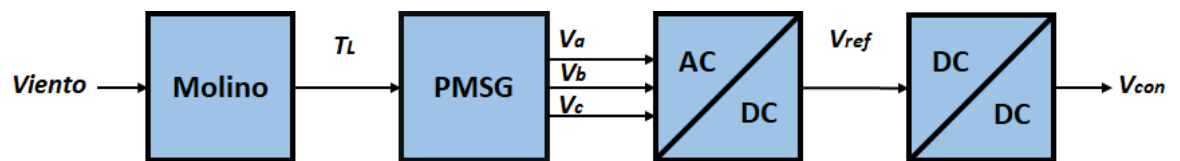


Figura 3.3 – Diagrama a bloques de las partes Mecánica, Generación, Convertidor y Rectificación

## 3.2. Molino

El molino que es utilizado para crear el modelo es del tipo de tres aspas, que como se leyó en el capítulo 2, es de los molinos más comúnmente utilizados por su mayor eficiencia. En la Fig 3.3 se muestra un diagrama de bloques que nos indica las entradas y salidas de la sección del molino.

En la Fig 3.4 se muestra la estructura del modelado del molino de [38] y en la Fig 3.5 se muestra la analogía de cada pieza del molino (Ver Cuadro 3.1) con las diferentes secciones que conforman el modelo. La representación de este modelo obtenido de [38], está conformado por inercias, rigidez y amortiguamientos de los elementos del molino y entre sus uniones. En el modelo mostrado en la Fig 3.4 podemos ver los elementos  $S_f$  que son las entradas de viento de cada aspa del molino, pero antes de llegar al aspa o sus elementos en el modelo pasa por un girador, para transformar el flujo de aire en esfuerzo, posterior a esto tenemos los elementos de cada aspa donde  $J_{B_{123}}$  representa la inercia del aspa en base al material y diseño de esta, el elemento  $D_{B_{123}}$  hace referencia a la rigidez de cada aspa y por último los elementos  $K_{B_{123}H}$  y  $D_{B_{123}H}$  son los elementos que representan el amortiguamiento y rigidez en la unión entre cada aspas con el Hub, que es la sección donde el movimiento de aspa se suma hasta este punto; en el Hub tenemos los elementos de  $J_H$  y  $D_H$  que son la inercia y rigidez de este elementos, respectivamente; continuando tenemos los elementos de  $K_{HGB}$  y  $D_{HGB}$  que representan el amortiguamiento y rigidez entre la unión del Hub y el eje de generador, respectivamente; y para finalizar tenemos a  $J_G$  y  $D_G$  donde representan la inercia y rigidez del eje del generador respectivamente. En la Fig 3.5 se puede ver más claro las secciones en las que se divide este modelo y su representación físicamente, así como el cuadro 3.1 para ver que elemento representa que cosa más claramente.

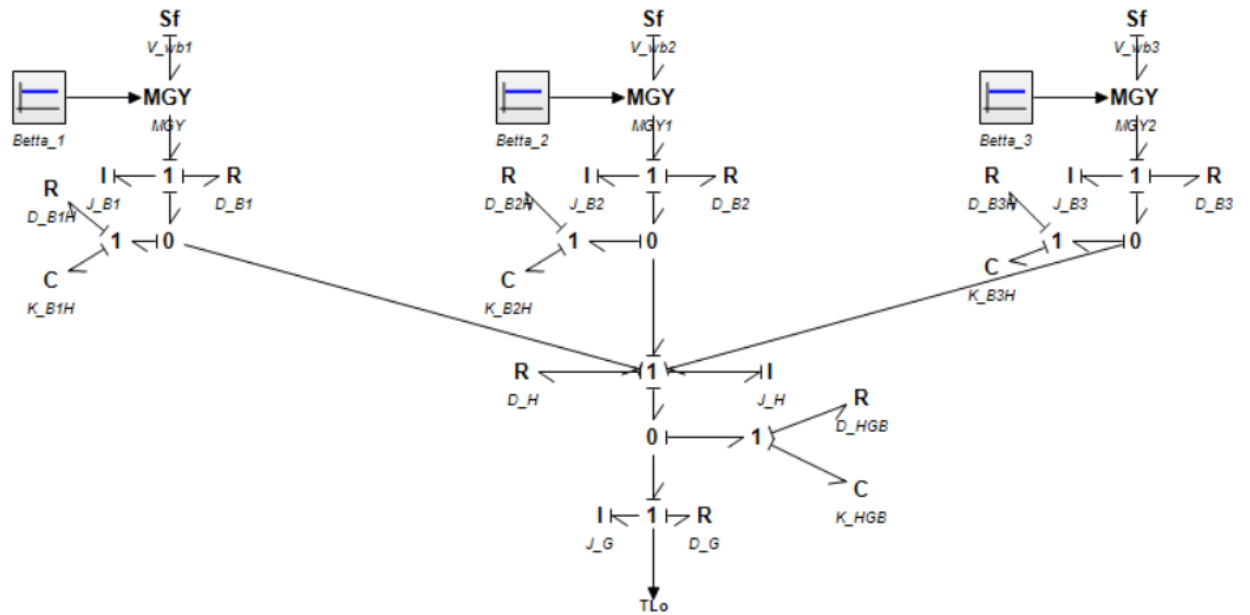


Figura 3.4 – Modelo en Bond Graph del Molino

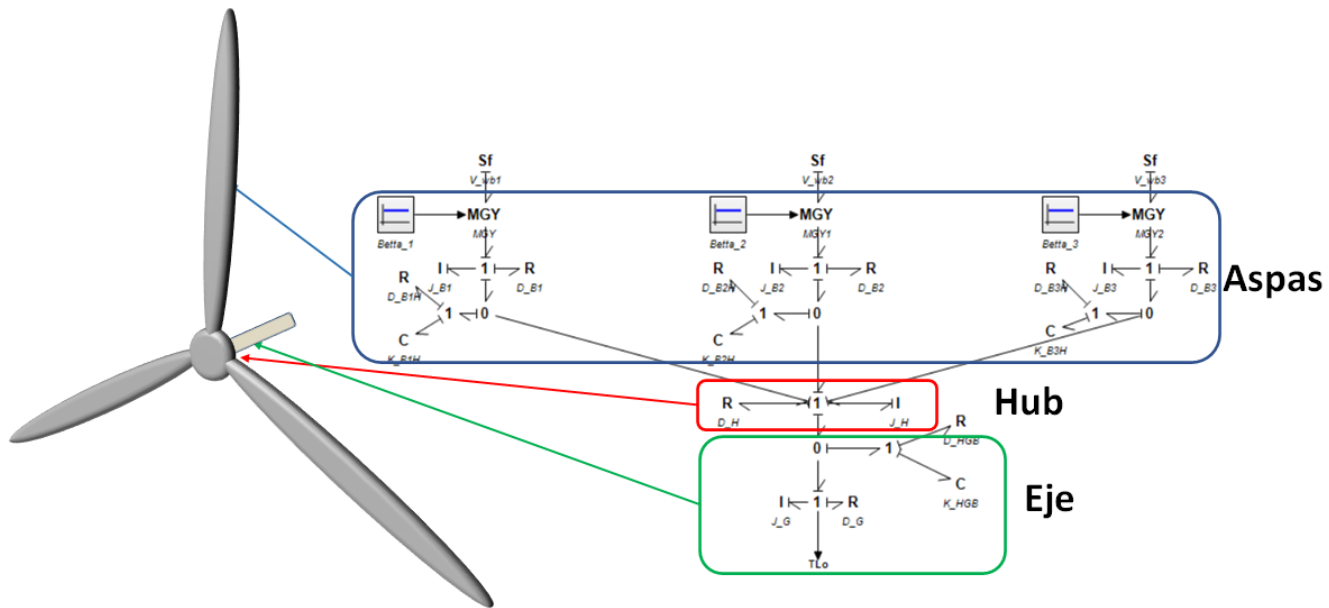


Figura 3.5 – Analogía de un molino con el modelo

Molino	
$J_{B_{1,2,3}}$	Inercia de las aspas
$J_H$	Inercia del Hub
$J_G$	Inercia del eje del Generador
$D_{B_{1,2,3}}$	Amortiguamiento de las aspas
$D_{B_{1,2,3}H}$	Amortiguamiento entre las aspas y el Hub
$D_H$	Amortiguamiento del Hub
$D_{HGB}$	Amortiguamiento entre el eje del Hub y el generador
$D_G$	Amortiguamiento del eje del generador
$K_{B_{1,2,3}H}$	Rigidez entre las aspas y el hub
$K_{HGB}$	Rigidez del eje del generador

Cuadro 3.1 – Representación de cada elemento del Molino

### 3.3. Generador de Imanes Permanentes Síncrono (PMSG)

[39]

En la Fig 3.3 vemos que nuestro siguiente elemento es el generador de energía eléctrica, el cual tiene por entrada un torque  $T_L$  proveniente de la etapa anterior y cuyas salidas son tensiones trifásicas las cuales son las entradas para la siguiente parte. La forma en que se construye este modelo (Ver Fig 3.6) fue por medio de las ecuaciones (2.37), (2.38) y (2.39).

Los bloques T\_P y T\_P\_I contienen la transformación de Park y su inversa respectivamente (Ver Apéndice A) para poder transferir de un marco ABC a un marco DQ0 del modelo hecho en Bond Graph. En [16] el modelo es conectado a un bus infinito donde siempre se está proporcionando un voltaje constante a la transformación de Park que lleva de un marco 'abc' al '0dq' y si la entrada de

torque fuera 0, el generador aún estaría entregando una corriente de salida; para cambiar esto y que el generador pueda entregar valores de corriente variables en base al torque de entrada se propone que en el modelo esté conectado a una carga trifásica balanceada y obtener los voltajes para que estos sean los que entren al bloque T\_P y el generador pueda entregar valores de corrientes y voltajes que estén relacionados con el torque de entrada.

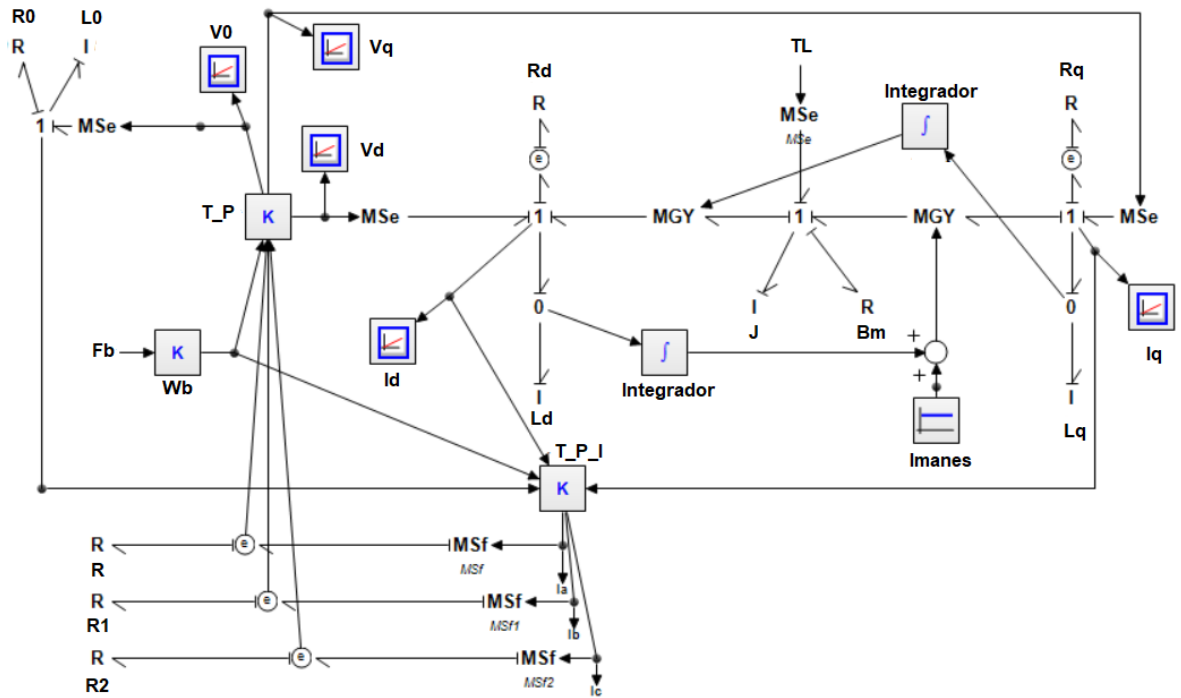


Figura 3.6 – Modelado del Generador



PSGM	
$B_m$	Fricción de la parte mecánica del generador
$I_{manes}$	Flujo de los imanes permanentes
$J$	Inercia del eje
$L_0$	Inductancia 0 del generador
$L_d$	Inductancia d del generador
$L_q$	Inductancia q del generador
$R_0$	Resistencia 0 del generador
$R_d$	Resistencia d del generador
$R_q$	Resistencia q del generador
$R, R_1, R_2$	Resistencia trifásica

Cuadro 3.2 – Representación de cada elemento del PMSG

### 3.4. Rectificador [39] [15]

A continuación tenemos el elemento que será encargado de rectificar las tensiones trifásicas obtenidas por el generador (Ver Fig 3.3) cuyo resultado nos dará una tensión rectificadora, transformando AC a DC.

En las figuras 3.7 y 3.8 observamos un circuito con simbología eléctrica de lo que es un rectificador trifásico y como es que se relaciona con el modelo de Bond Graph y en el cuadro 3.3 podemos ver que elemento representa cada cosa del submodelo, además para que funciones el modelo es necesario una serie de comandos que nos ayudaran a establecer las reglas para activar cada diodo representado en el modelo de manera que cada diodo este conduciendo cuando es polarizado directamente y que no conduzca cuando está polarizado inversamente.

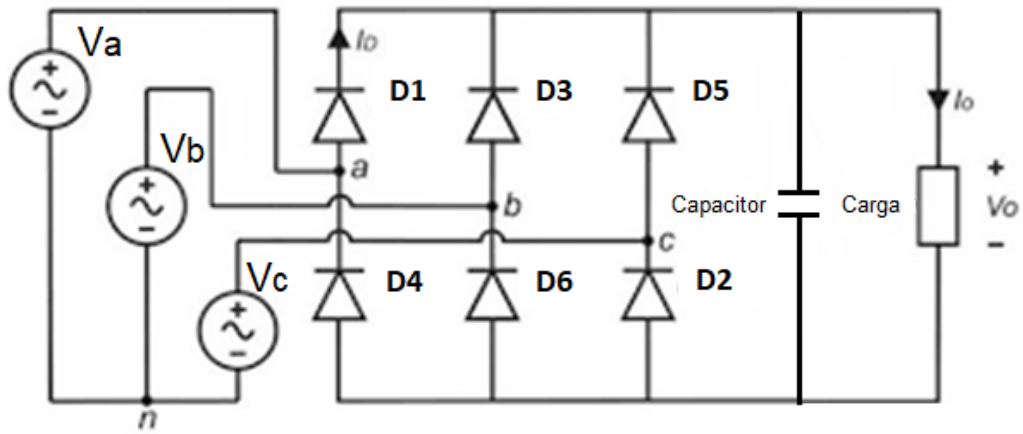


Figura 3.7 – Diagrama de un rectificador trifásico con filtro

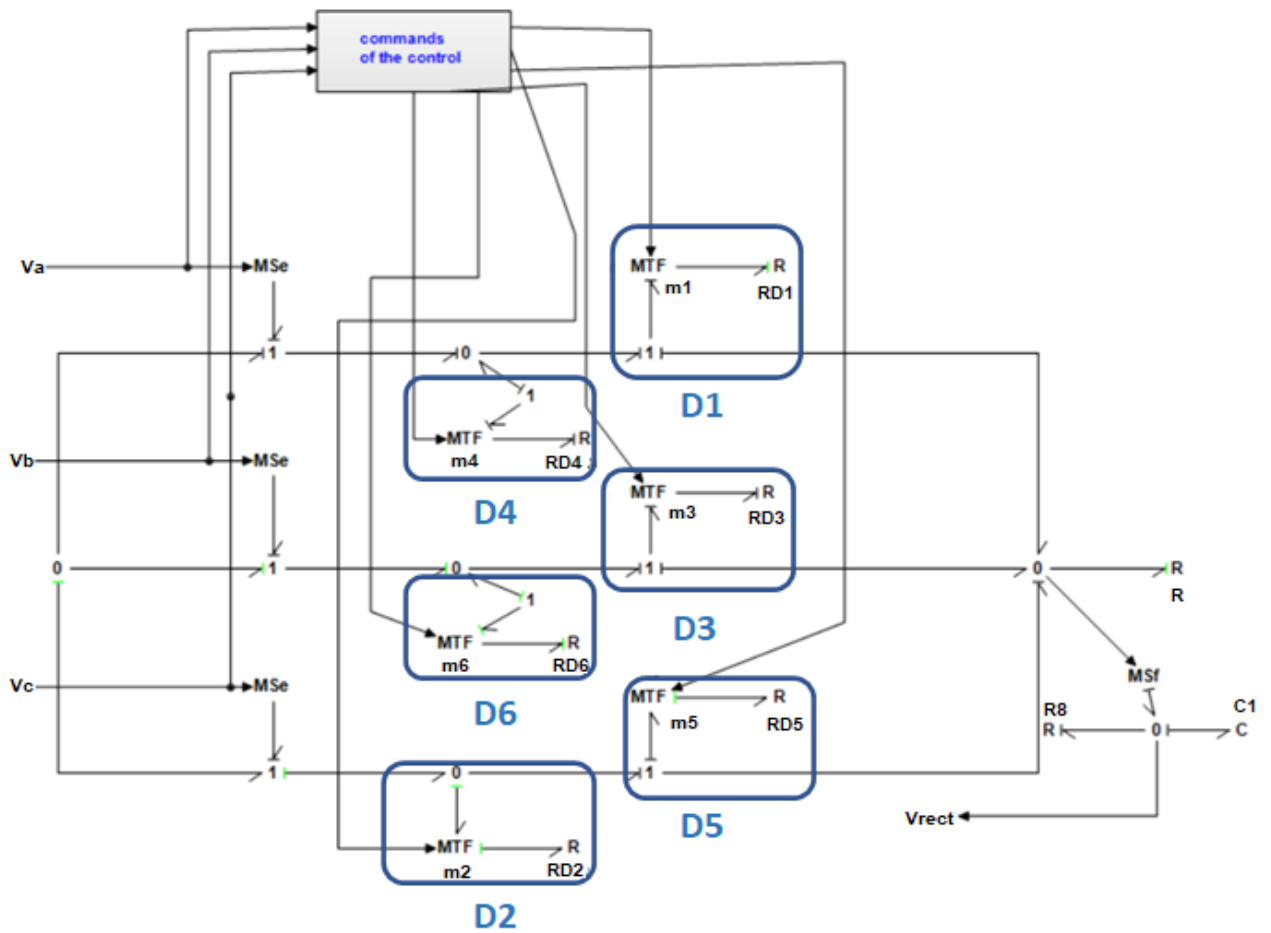


Figura 3.8 – Bond Graph de un rectificador trifásico con filtro

Rectificador	
$R$	Resistencia de unión
$RD_1$	Resistencia del diodo 1
$RD_2$	Resistencia del diodo 2
$RD_3$	Resistencia del diodo 3
$RD_4$	Resistencia del diodo 4
$RD_5$	Resistencia del diodo 5
$RD_6$	Resistencia del diodo 6
$R_g$	Resistencia de carga
$C_1$	Capacitor

Cuadro 3.3 – Representación de cada elemento del Rectificador

En la Figura 3.9 [16] se detalla el modelo de un diodo modelado en BG, donde hay dos opciones; en la Figura 3.9(a) cuando el módulo  $m = 1$  representa que el circuito está cerrado y conduce y cuando  $m = 0$  representa que el circuito está abierto y no conduce; en la Figura 3.9(b)  $1/m = 0$  representa un circuito abierto y  $1/m = 1$  representa un circuito cerrado.

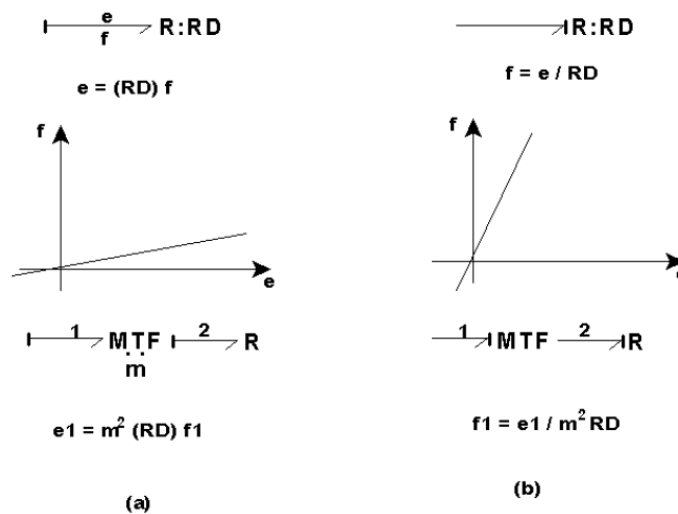


Figura 3.9 – Modelo de conmutación

El código implementado para realizar las conmutaciones de los diodos en BG es el que se muestra a continuación:

```
m1 = if( Va > Vb ) and (Va > Vc) and (m4==0) and (m5==1)
      and (m3==0) then 1 else 0 end;
m4 = if( Va < Vb ) and (Va < Vc) then 1 else 0 end;
m3 = if( Vb > Va ) and (Vb > Vc) then 1 else 0 end;
m6 = if( Vb < Va ) and (Vb < Vc) then 1 else 0 end;
m5 = if( Vc > Va ) and (Vc > Vb) then 0 else 1 end;
m2 = if( Vc < Va ) and (Vc < Vb) then 0 else 1 end;
```

Con el código anterior tenemos la secuencia para que dependiendo las condiciones, se active o desactive cada uno de los transformadores modulados ( $m_1, \dots, m_6$ ) y se realice el trabajo del rectificado del voltaje trifásico.

### 3.5. Convertidor

Y en nuestra última sección está la parte del convertidor DC/DC donde cómo podemos observar en la Fig 3.3 la entrada a este elemento es el voltaje rectificado y su salida una salida de tensión es diferente a la que tenemos de entrada, es aquí donde se aplica un control basado en pasividad (Se verá a detalle en el capítulo 4) para determinar las condiciones de los parámetros para que el controlador implementado pueda cumplir con las características deseadas.

En las figuras 3.10 y 3.11 vemos dos formas de modelar el convertidor buck (Ver Cuadro 4.3), siendo la primera un modelo de promedios o continuo [13] y la segunda una forma discreta [16] ya que simula el efecto del cambio de posiciones del convertidor (Ver Fig 3.9). Así mismo se puede notar en la Fig 3.12 el tensión de salida de cada uno, siendo casi similares con la diferencia que en la forma continua

se nota como una línea recta en estado estacionario y en la forma discreta se ve una forma sinusoidal, provocada por el efecto de conmutación.

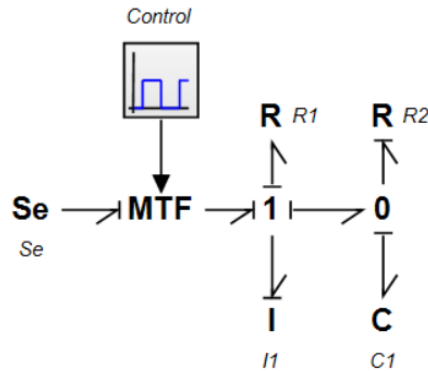


Figura 3.10 – Modelo del Convertidor Buck continuo

En la Fig 3.10 la salida del voltaje de este modelo es como en la Ec (2.53), en el bloque de *constant* está definido el ciclo de trabajo (PWM) que es la proporción de reducción del voltaje de entrada, mismo caso sucede en la Fig 3.11 donde la salida es como describe la Ec (2.54), el bloque *control* proporciona la velocidad de conmutación (Ver Fig 3.9) para que conduzca uno u otro de los elementos *MTF* y reducir el voltaje de entrada. Viendo las figuras 2.38 y 3.12 son parecidas pues un modelo toma en cuenta el pequeño rizo que es provocado por el efecto de conmutación mientras que el otro modelo hace una aproximación en el voltaje de salida.

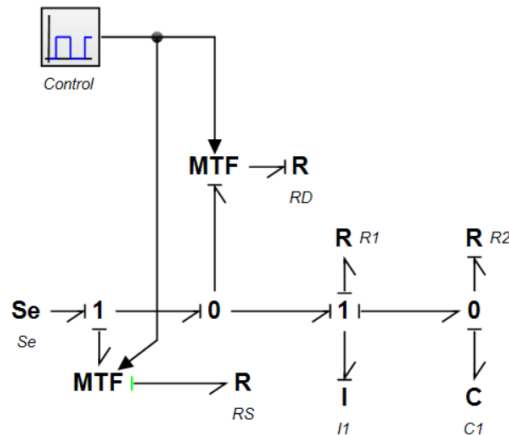


Figura 3.11 – Modelo del Convertidor Buck discreto

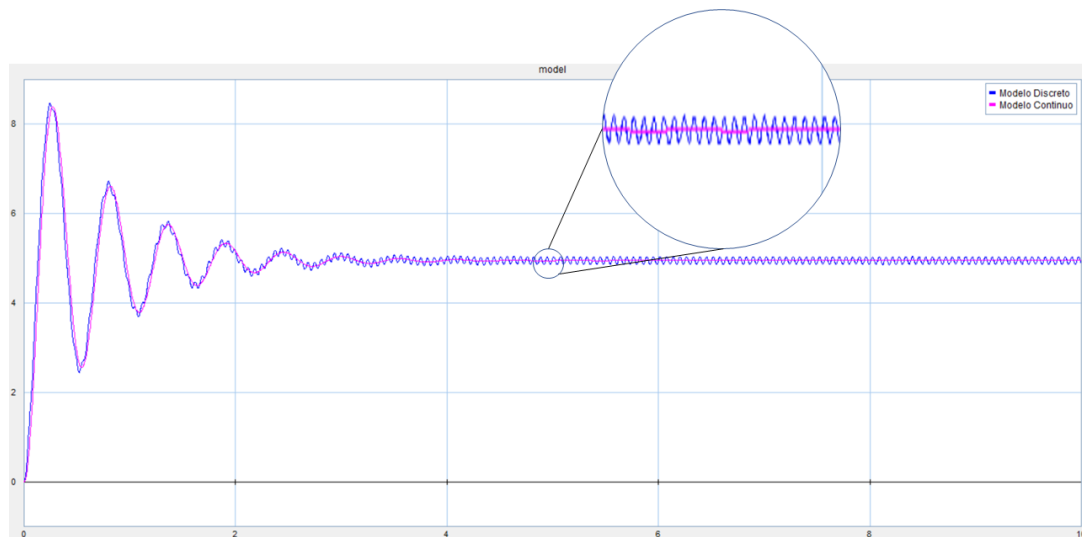


Figura 3.12 – Comparación del modelo continuo y discreto

En el siguiente capítulo se detallará los diferentes controladores propuestos para el convertidor reductor, así como también la implementación de la ley estática para tener un control en la potencia del aerogenerador con la variación del ángulo del Yaw para proteger al equipo ante rachas de vientos fuertes (encima de la nominal) y obtener el PMP o potencia nominal o potencia de operación deseada.

## Controles diseñados e implementados en el sistema

### 4.1. Control de la desviación del aerogenerador (Yaw)

El control implementado en la desviación de aerogenerador con respecto a la dirección de donde proviene el viento tiene como fin el proteger al equipo ante incrementos elevados del viento extrayendo la potencia nominal o menor a esta. Por encima de la velocidad nominal de funcionamiento del aerogenerador entra este control; de lo contrario no entra en acción en el sistema y únicamente se alinea el aerogenerador a la misma dirección del viento. En el capítulo del Marco Teórico en la sección de Potencia Eólica se dan las ecuaciones (2.8) y (2.9) cuyas relaciones son leyes de control estáticas que nos permiten mantener al aerogenerador operando en su potencia nominal o menor a esta, con el fin de proteger al sistema ante vientos fuertes. En la Fig 4.1 podemos ver en el esquema general la parte donde se encuentra enmarcada la ley de control estática que rige la posición del ángulo del Yaw.

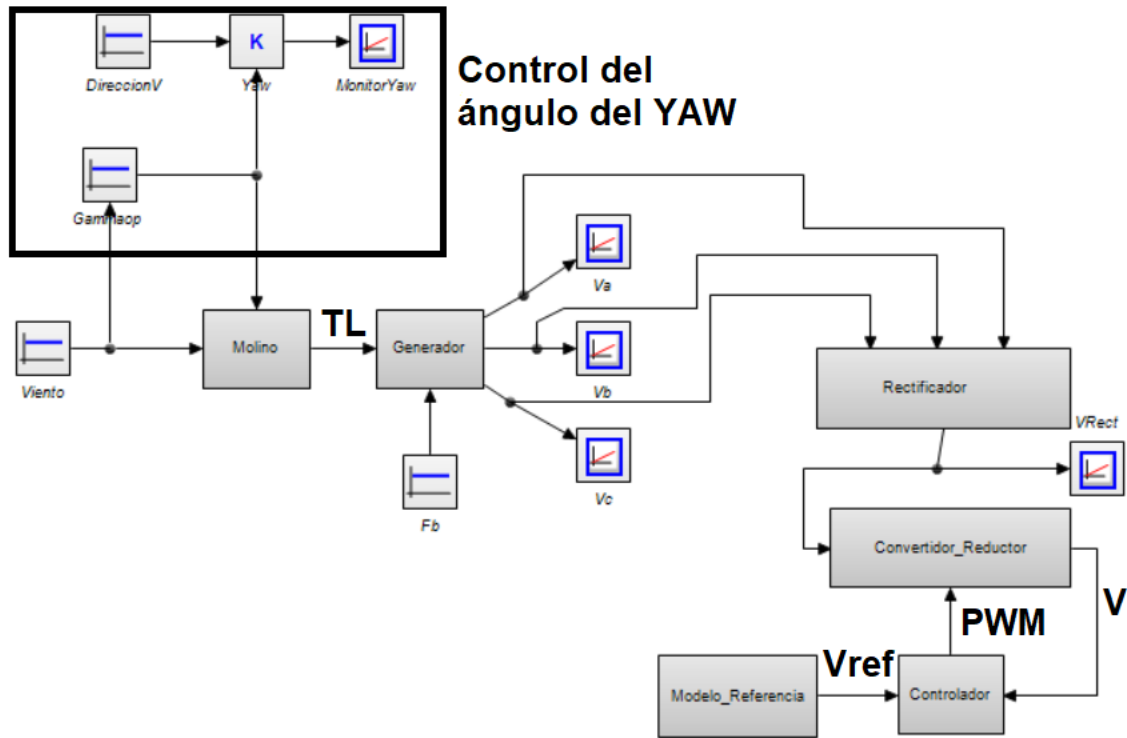
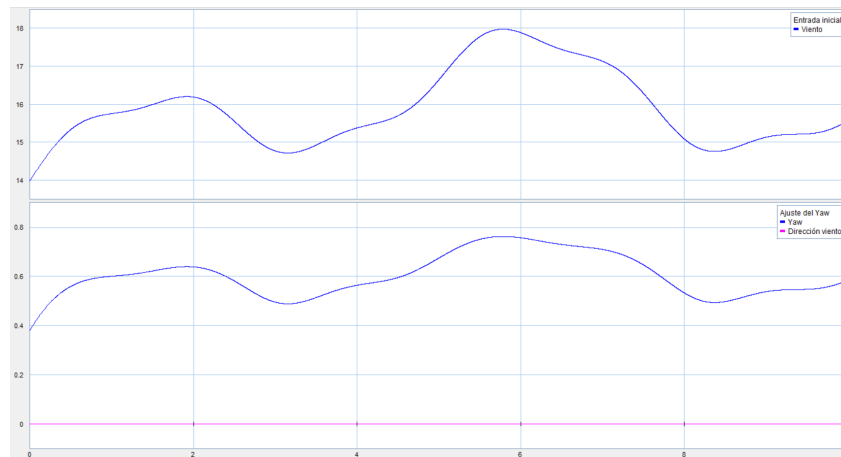


Figura 4.1 – Control de ángulo del Yaw

En la Fig 4.2 podemos ver como aumenta la diferencia del Yaw con respecto al viento de manera proporcional, disminuyendo la potencia, de acuerdo a las ecuaciones (2.8) y (2.9), con lo que la ley de control hace su trabajo de configurar la posición del generador ante vientos mayores al nominal para proteger al equipo; por lo que ante mayores vientos la velocidad se mantiene dentro de una operación segura evitando que se eleve demasiado.





**Figura 4.2** – Corrección del ángulo del Yaw

Sin embargo para tener datos sobre el comportamiento de la  $E_c$  (2.4) se optó por desarrollar un modelo a escala de un aerogenerador donde se utilizan los componentes siguientes: motor DC, aspas de dron, servomotor y un ventilador (ver Fig 4.3) .



**Figura 4.3** – Experimento de la modificación de la potencia mencionada en [34]

El proceso para poder modificar el ángulo de desviación del molino a escala con la ayuda de un servomotor haciendo la función de torre, cuyo servomotor MG995 tiene un rango de giro de 0 a 120 grados con el cual se puede modificar su ángulo y como el molino está conectado al servomotor, se modifica el valor del ángulo del molino también. Para saber con exactitud los grados que está girando el servomotor, se utiliza una tarjeta de control Uno R3 (ver Fig 4.4) de la marca

Arduino y su respectiva interfaz de comunicación para programar el giro cada 10 grados del servomotor



Figura 4.4 – Arduino Uno R3

El código utilizado para este análisis es el que se muestra a continuación:

```
#include <Servo.h>

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  servoMotor.attach(3);
}

void loop() {
  servoMotor.write(120);
  delay(5000);
}
```

Para obtener la potencia que nos entrega el motor se utilizó la  $E_c$  (4.1) de potencia eléctrica donde se utilizan los valores de voltaje entregado y de la resistencia del motor ( $2 \Omega$ ) y se completó la Tabla 4.1. El procedimiento para obtener la tabla requirió aparte de los componentes antes mencionados, una fuente de viento que en este caso se empleó un secador de alta potencia, donde el viento que generaba

era lo suficiente para vencer la inercia del motor y aspas y que este empezara a girar. Teniendo armado todo el experimento, se procedió a realizar una primera medición donde se obtuvo un valor de voltaje para una ángulo del yaw de  $0^\circ$  y se calculó la potencia que generaba el motor con la Ec (4.1). Esta primera medición se tomó como el valor tanto real como teórica; posteriormente para los valores teóricos teniendo el primer valor, se aplicó la relación de  $\cos^3(\gamma)$  para obtener el resto de las potencias teóricas y para las potencias reales se estuvo ajustando el ángulo del Yaw y midiendo con un multímetro los voltajes para aplicar la Ec (4.1) y obtener el resto de los valores reales, mostrados en la Tabla 4.1.

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (4.1)$$

$\gamma$	Voltaje Obtenido	Potencia Real	Potencia Teórica	Diferencia
$0^\circ$	1.29 V	0.832 W	0.832 W	0 %
$10^\circ$	1.25 V	0.746 W	0.794 W	6 %
$20^\circ$	1.1 V	0.648 W	0.69 W	6 %
$30^\circ$	0.96 V	0.507 W	0.54 W	6 %
$40^\circ$	0.6 V	0.351 W	0.37 W	5 %
$50^\circ$	0.27 V	0.207 W	0.22 W	6 %

**Cuadro 4.1** – Tabla de potencias a diferentes valores de la relación de velocidad de punta,  $\gamma$

## 4.2. Control Basado en Pasividad

En esta sección el enfoque se centra en el convertidor reductor al mantener un voltaje de salida constante que estará regido por un modelo de referencia basado en un convertidor reductor con las mismas características que el modelo

del convertidor reductor original pero con la diferencia de que su entrada no es el voltaje generado por el aerogenerador, sino que es una referencia establecida por el usuario. Es aquí donde el control aplicado al convertidor nos permite lograr este objetivo, haciendo un análisis al sistema control-convertidor. Una clase de controladores que surgen del concepto de pasividad son llamados "controladores basados en pasividad", debido a que explotan las propiedades de pasividad ([18] [9] [25]) de las dinámicas del sistema. Comparado con los métodos de linealización por retroalimentación, lo que se espera de estos esquemas, usualmente llamados controladores pasivos, es tener mejores propiedades robustas ya que no dependen de la exacta cancelación de las no-linealidades del sistema como en el caso de la linealización exacta, la que depende de la estructura del modelo (Ver Fig 2.20).

En el diseño de estos controladores, básicamente se intenta preservar las propiedades de entrada-salida y de disipación de energía inherentes del modelo, entonces considere la siguiente condición de pasividad y definiciones que son empleadas en los esquemas de control.

Un sistema pasivo satisface (Ver Fig 2.20) :

$$E_{su} + E_g \leq E_{st} + E_d \quad (4.2)$$

$E_{su}$  = Energía suministrada

$E_g$  = Energía generada internamente

$E_{st}$  = Energía almacenada

$E_d$  = Energía disipada

Donde

$$E_{su} = \int y^T(t)u(t)dt, \quad E_g = \int y_g^T(t)u_g(t)dt$$

$$E_{st} = \int \dot{x}^T(t)z(t)dt, \quad E_d = \int D_i^T(t)D_o(t)dt$$

Siendo  $y_g$  y  $u_g$  un par conjugado asociado a las salidas de las fuentes internas  $MS_e$  y  $MS_f$ . Además se asegura pasividad si  $0 \leq E_d - E_g$  [31]

Para el control dinámico implementado en el convertidor reductor se utilizaron dos variantes de control dinámico utilizando una resistencia y una inductancia, donde una está utilizando una unión 1 (Ver Fig 4.5) y otra donde se está usando una unión 0 (Ver Fig 4.6).

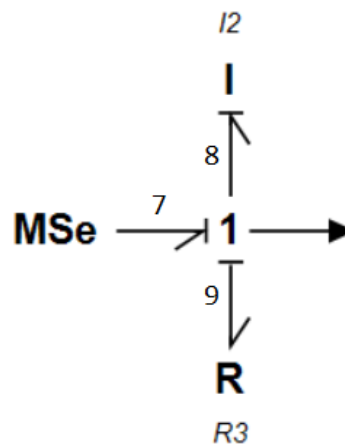


Figura 4.5 – Controlador dinámico con inductancia, resistencia y unión 1

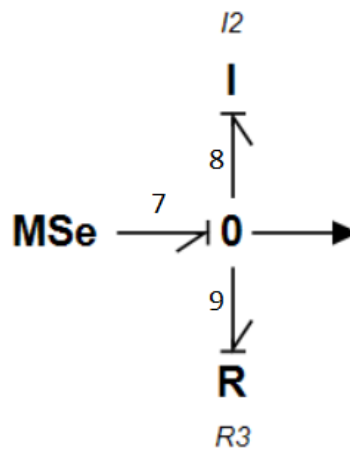


Figura 4.6 – Controlador dinámico con inductancia, resistencia y unión 0

Analizando la función de transferencia en el caso de la forma en la que se utiliza una unión 0 nos queda de la siguiente manera:

$$e_8 = e_7 = e_9 = R_3 f_9$$

$$f_9 + f_8 = f_7$$

$$f_8 = \frac{1}{I_2} \int e_8 dt$$

$$\frac{e_7}{R_3} + \frac{1}{I_2} \int e_7 dt = f_7$$

Aplicando la transformada de Laplace tenemos:

$$\left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{I_2 s}\right) e_7 = f_7$$

$$\frac{e_7}{f_7} = \frac{R_3 I_2 s}{R_3 + I_2 s} \quad (4.3)$$

Y haciendo el análisis para cuando usamos una unión 1 tenemos que:

$$f_7 = f_8 = f_9$$

$$e_7 = e_8 + e_9$$

$$e_7 = I_2 \frac{df_8}{dt} + R_3 f_9$$

$$e_7 = I_2 \frac{df_7}{dt} + R_3 f_7$$

Aplicando la transformada de Laplace tenemos:

$$e_7 = (I_2s + R_3)f_7$$

$$\frac{f_7}{e_7} = \frac{1}{I_2s + R_3} \quad (4.4)$$

Ahora si en lugar de tener una fuente de esfuerzo como entrada tenemos una fuente de flujo y en lugar de una inductancia usamos una capacitancia, las cosas parecieran cambiar un poco en el análisis, pero veremos que son muy similares.

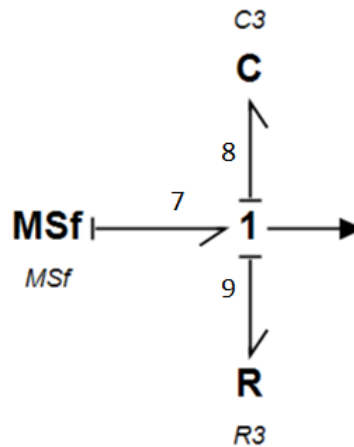


Figura 4.7 – Controlador dinámico con capacitancia, resistencia y unión 1

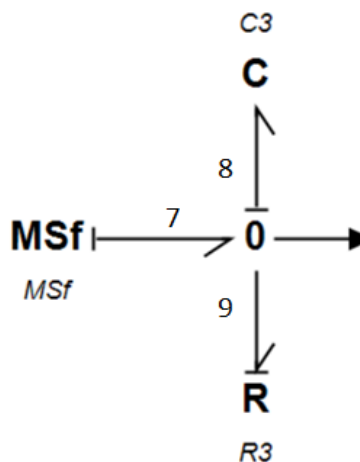


Figura 4.8 – Controlador dinámico con capacitancia, resistencia y unión 0

Analizando la función de transferencia en el caso de la forma en la que se utiliza una unión 0 nos queda de la siguiente manera:

$$e_7 = e_8 = e_9$$

$$f_7 = f_8 + f_9$$

$$f_8 = C_3 \frac{de_8}{dt}$$

$$f_7 = \frac{e_7}{R_3} + C_3 \frac{de_7}{dt}$$

Aplicando la transformada de Laplace tenemos:

$$f_7 = \frac{e_7}{R_3} + C_3 s e_7$$

$$\frac{e_7}{f_7} = \frac{R_3}{1 + R_3 C_3 s} \quad (4.5)$$

Y haciendo el análisis para cuando usamos una unión 1 tenemos que:

$$f_9 = f_8 = f_7$$

$$e_7 = e_8 + e_9$$

$$e_8 = \frac{1}{C_3} \int f_8 dt$$



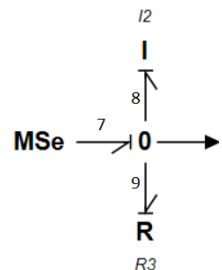
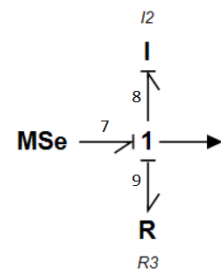
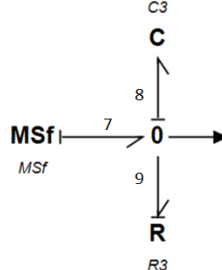
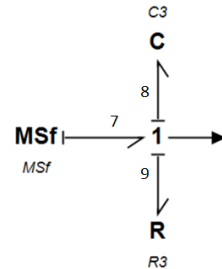
$$e_7 = \frac{1}{C_3} \int f_7 dt + R_3 f_7$$

Aplicando la transformada de Laplace tenemos:

$$e_7 = \left( \frac{1}{C_3 s} + R_3 \right) f_7$$

$$\frac{f_7}{e_7} = \frac{C_3 s}{1 + R_3 C_3 s} \quad (4.6)$$

## Controlador      Función de transferencia

	$\frac{e_7}{f_7} = \frac{R_3 I_2 s}{R_3 + I_2 s}$
	$\frac{f_7}{e_7} = \frac{1}{I_2 s + R_3}$
	$\frac{e_7}{f_7} = \frac{R_3}{1 + R_3 C_3 s}$
	$\frac{f_7}{e_7} = \frac{C_3 s}{1 + R_3 C_3 s}$

**Cuadro 4.2** – Tabla de controladores con su función de transferencia

Un detalle que se encontró al estar probando los controles con diferentes uniones y fuentes de entrada fue que al utilizar un control donde se utiliza una fuente de flujo con unión 1 al tener una inductancia y resistencia, en ese caso la causalidad queda derivativa lo que dificulta el análisis, motivo por el cual se omitió;

mismo caso sucede cuando utilizamos una fuente de esfuerzo como entrada y utilizamos una capacitancia y resistencia con unión 0.

En la Fig 4.9 podemos ver el conjunto del convertidor reductor y del controlador que se encarga de modificar la relación entrada/salida del sistema con la ayuda de un modelo de referencia, donde este modelo es una copia del convertidor para tener las mismas respuestas con la diferencia de que la referencia siempre tiene un valor constante mientras que en el convertidor donde utiliza el controlador, su entrada puede ser variable dependiendo del viento que reciba el molino, pues esto provoca un efecto dominó que modifica las entradas y salidas de los sistemas antes explicados hasta llegar al convertidor.

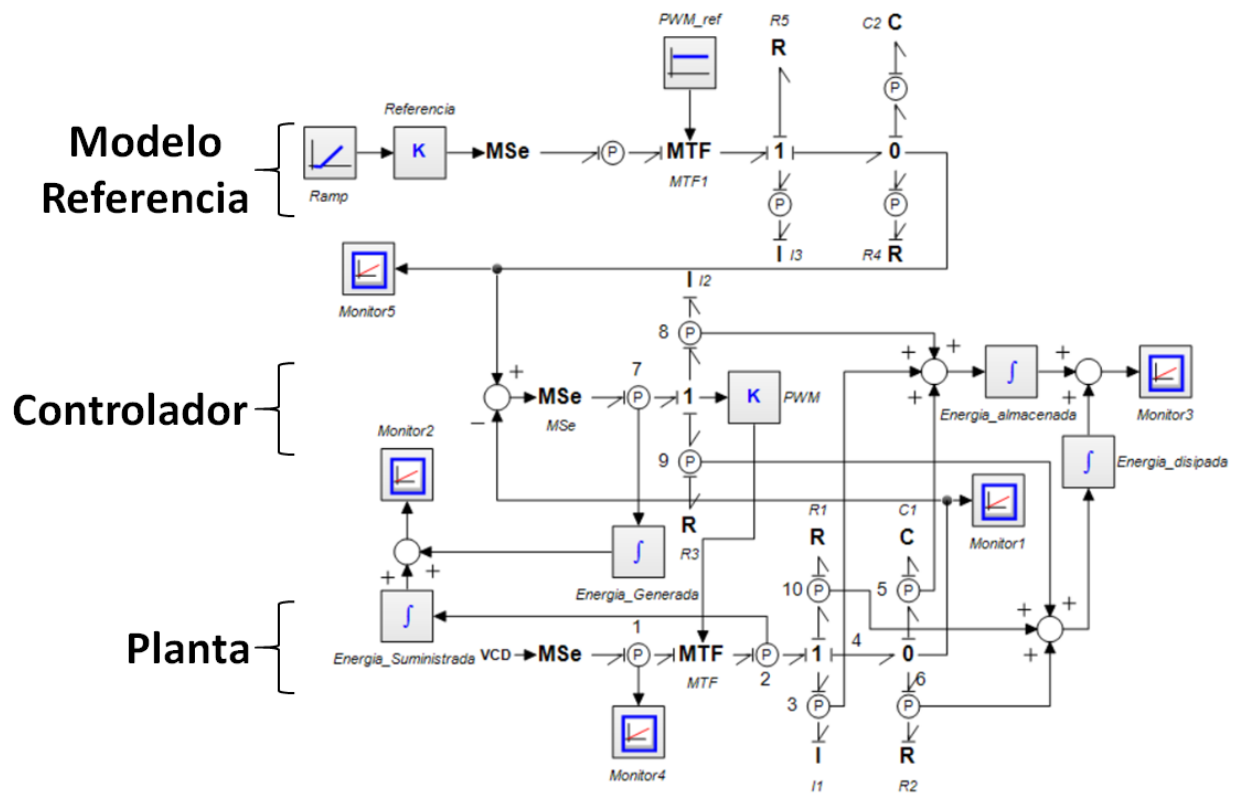


Figura 4.9 – Convertidor Buck con Controlador y Modelo de Referencia

Convertidor Buck	
$R1$	Resistencia del inductor del convertidor
$I1$	Inductancia del convertidor
$C1$	Capacitancia del convertidor
$R2$	Resistencia de carga del convertidor
$R3$	Parámetro proporcional del controlador
$I2$	Parámetro integral del controlador

**Cuadro 4.3** – Representación de cada elemento del Convertidor

En las Ec (4.3), (4.4), (4.5) y (4.6) podemos ver que las funciones de transferencia guardan ciertas similitudes a pesar de que utilizamos diferentes entradas y tipos de unión (0 y 1), a continuación veremos en que influye cada una de estas aplicados ya al convertidor. Primero aplicaremos el control de la Fig 4.5 y analizaremos las condiciones de pasividad de esta manera en el convertidor Buck (Ver Fig 4.10).

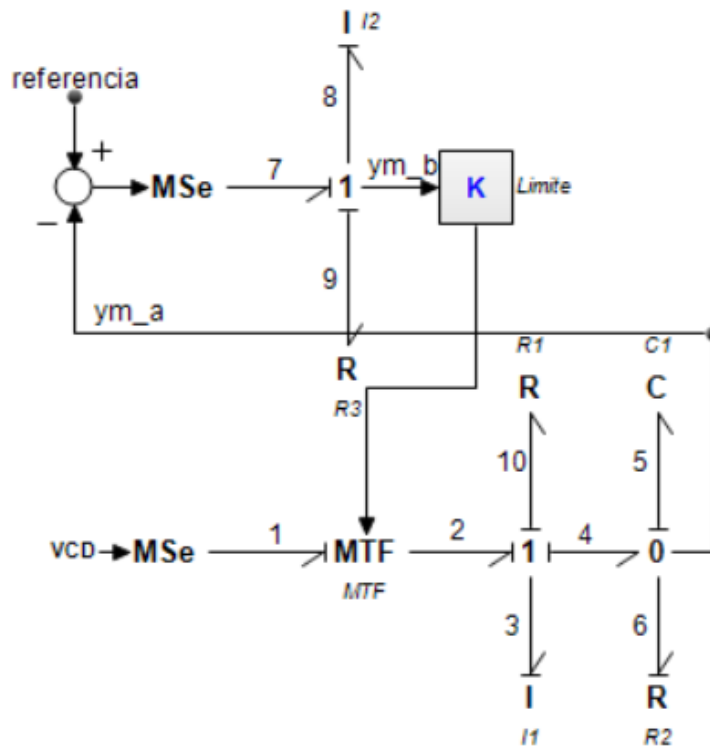


Figura 4.10 – Controlador Dinámico con unión 1

Dado que existe un elemento disipativo por cada elemento que almacena energía, entonces no se requiere aumentar el Bond Graph con elementos parásitos.

Los vectores clave de la Fig 4.10 son:

$$x = \begin{bmatrix} p_3 \\ q_5 \\ p_8 \end{bmatrix} \quad \dot{x} = \begin{bmatrix} e_3 \\ f_5 \\ e_8 \end{bmatrix} \quad z = \begin{bmatrix} f_3 \\ e_5 \\ f_8 \end{bmatrix} \quad D_i = \begin{bmatrix} f_{10} \\ e_6 \\ f_9 \end{bmatrix} \quad D_o = \begin{bmatrix} e_{10} \\ f_6 \\ e_9 \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_{ref} \end{bmatrix} \quad y = \begin{bmatrix} y_m^a \\ y_m^b \end{bmatrix}$$

Utilizando la Ec (2.30) la matriz  $S$  queda de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} e_3 \\ f_5 \\ e_8 \\ f_{10} \\ e_6 \\ f_9 \\ y_m^a \\ y_m^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & MTF & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_3 \\ e_5 \\ f_8 \\ e_{10} \\ f_6 \\ e_9 \\ e_1 \\ e_{ref} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Donde se observa que  $S_{11}$  no cumple con las propiedades de conservación de la energía (Ver capítulo 2), debido a las fuentes internas. Definimos las matrices  $L$  (Campo Disipativo) y  $F$  (Campo acumulativo) por medio de las siguientes ecuaciones:

$$D_o = LD_i \quad (4.8)$$

$$\begin{bmatrix} f_{10} \\ e_6 \\ f_9 \end{bmatrix} = L \begin{bmatrix} e_{10} \\ f_6 \\ e_9 \end{bmatrix}$$

$$z = Fx \quad (4.9)$$

$$\begin{bmatrix} f_3 \\ e_5 \\ f_8 \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} p_3 \\ q_5 \\ p_8 \end{bmatrix}$$

Por lo que los valores para que se cumplan las ecuaciones (4.8) y (4.9) las

matrices  $L$  y  $F$  son las siguientes:

$$L = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_3} \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_2} \end{bmatrix}$$

Aplicando el Lema Ngwompo - Galindo [31] a la Ec (4.7) que tiene la siguiente estructura:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ D_i \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ I_n & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ D_o \\ u \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Tenemos la matriz de la estructura de unión de la Ec (4.11) resultante. El Lema fue aplicado para obtener una pseudo-estructura de unión utilizando un multipuerto con los elementos disipativos y moviendo las fuentes internas a este campo.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ D_i \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -I_n & S_{13} \\ I_n & 0 & 0 \\ S_{31} + S_{32}L & 0 & S_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ \hat{D}_o \\ u \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Donde el multipuerto disipativo es:

$$\hat{D}_o = -(S_{11} + S_{12}L)D_i \quad (4.12)$$

$$\hat{L} = -(S_{11} + S_{12}L) \quad (4.13)$$

$$\hat{L} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} & 1 & 0 \\ -1 & R_2 & 0 \\ 0 & 1 & \frac{1}{R_3} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Para sistemas lineales, la condición de pasividad  $E_d - E_g \geq 0$  equivale a  $\hat{L} > 0$  (Ver [31]). Así, aplicando el criterio el Criterio de Sylvestre a la parte simétrica de la matriz  $\hat{L}$  podemos obtener bajo que condiciones el sistema tiene un comportamiento pasivo y cuando no. Para obtener dicha parte aplicamos la siguiente ecuación:

$$M = \frac{1}{2}(\hat{L} + \hat{L}^T) \quad (4.15)$$

Donde  $M$  es la matriz con la parte simétrica de  $\hat{L}$ , quedando de la siguiente forma:

$$M = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{R_3} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

De la matriz  $M$  obtenemos las siguientes condiciones de pasividad:

$$\frac{1}{R_1} > 0; \quad \frac{R_2}{R_1} > 0; \quad \frac{R_2}{R_1 R_3} > \frac{1}{4R_1} \implies 4R_2 > R_3 \quad (4.17)$$

Donde:

$R_1$  =resistencia del inductor,  $R_2$  = resistencia de la carga

$R_3$  = ganancia del controlador

El control se aplicó a un caso donde la entrada de voltaje es constante, no desde la salida del rectificador, haciendo que el sistema fuera lineal funcionando



de manera ideal; posteriormente la ley obtenida se aplicó al caso más real donde el sistema no es lineal, esto es que la entrada de voltaje al convertidor reductor no es constante en todo momento, por lo que ahora si recibe el voltaje del rectificador. Haciendo pruebas para comprobar las leyes obtenidas anteriormente tenemos el primer caso no pasivo mostrado en las Figuras 4.11 a 4.14 donde utilizando los valores de  $R_1 = 0,0001$ ,  $R_2 = 3$  y  $R_3 = 30$  el controlador no tiene un buen desempeño, puesto que la salida de voltaje del convertidor reductor nunca converge a la referencia, además de que en el análisis de energía podemos ver que la energía generada internamente en un cierto tiempo supera a la disipada. Las Figuras 4.11 y 4.15 se observa la entrada de voltaje del modelo de referencia, donde se utiliza una entrada que sea parecido al voltaje que produce el rectificador hacia el convertidor reductor, donde está involucrado la acción del molino, generador y rectificado.

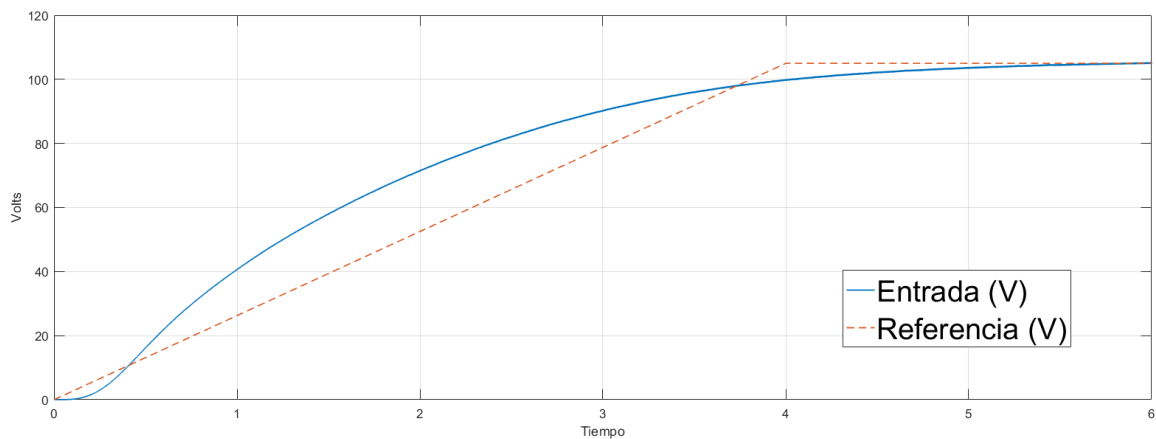


Figura 4.11 – Voltaje de entrada

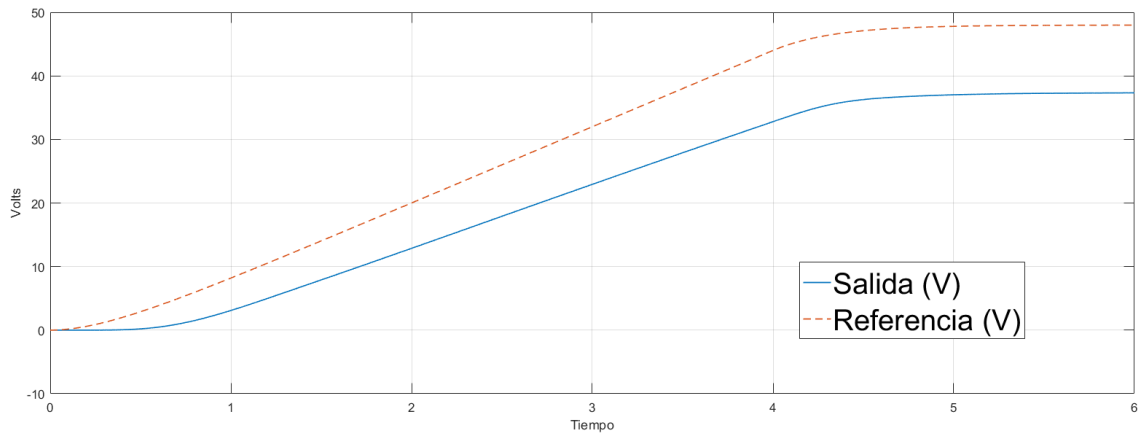


Figura 4.12 – Voltaje de Salida

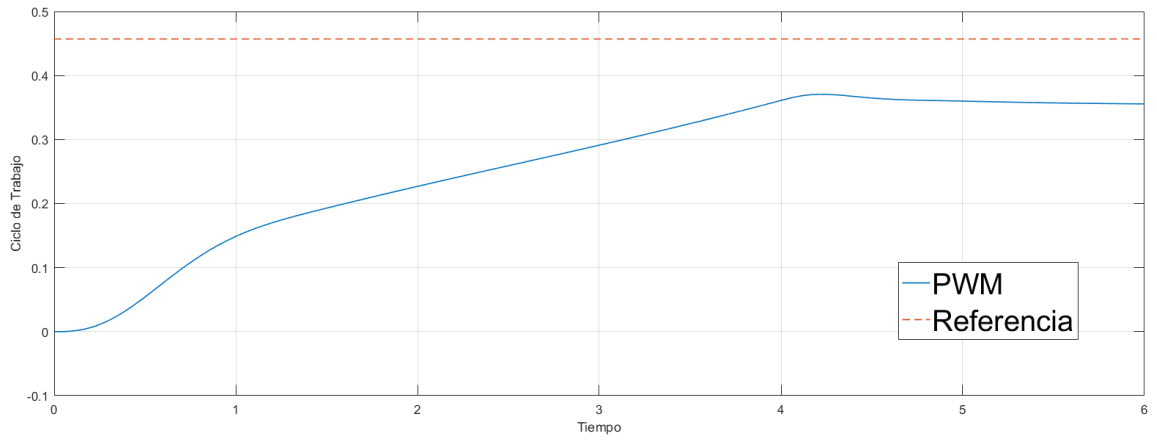


Figura 4.13 – Ciclo de trabajo del controlador

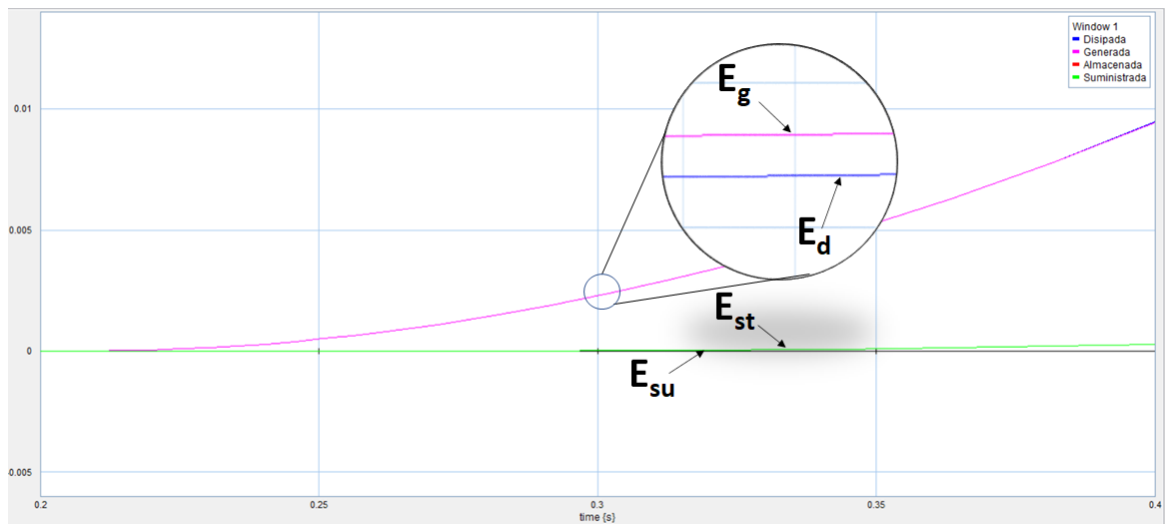


Figura 4.14 – Energías del sistema

En el caso pasivo mostrado de las Figuras 4.15 a 4.18, tenemos el mismo controlador utilizando los valores de  $R_1 = 0,0001$ ,  $R_2 = 3$  y  $R_3 = 1$  y con esto el dispositivo tiene un buen desempeño, ya que la salida de voltaje del convertidor reductor que es de interés que se mantenga en un valor fijo en todo momento se mantiene casi igual a su referencia, caso que cuando tenía un mal desempeño esta salida nunca llegaba a la referencia, además vemos en el análisis de energías que la energía generada internamente nunca es superior a la energía disipada.

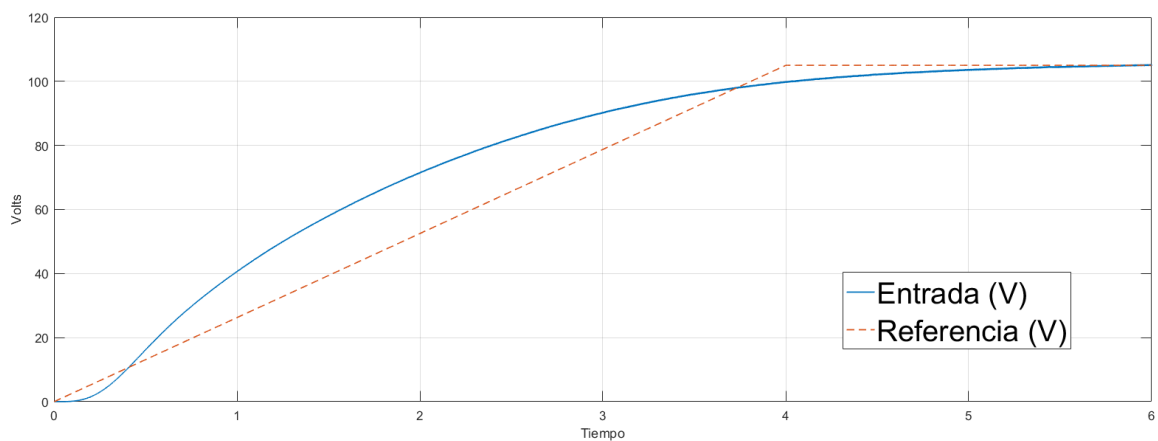


Figura 4.15 – Voltaje de entrada

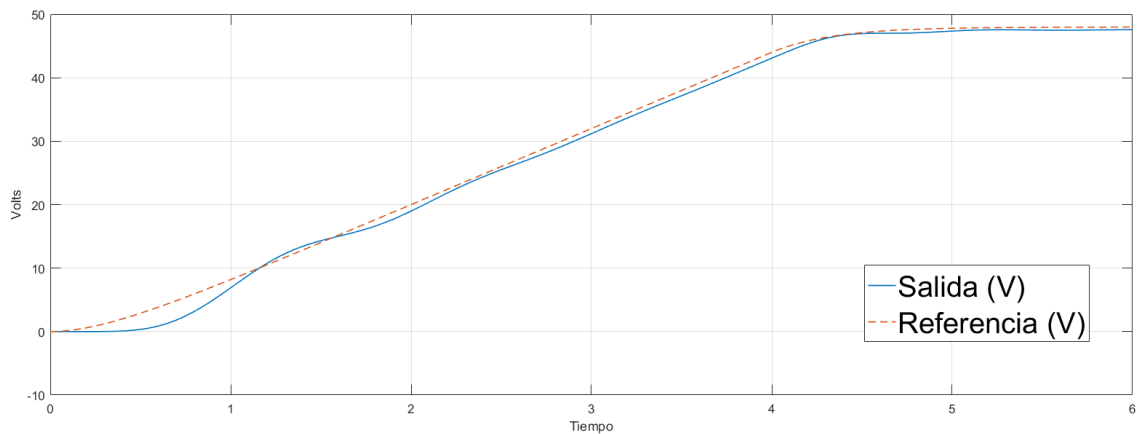


Figura 4.16 – Voltaje de Salida

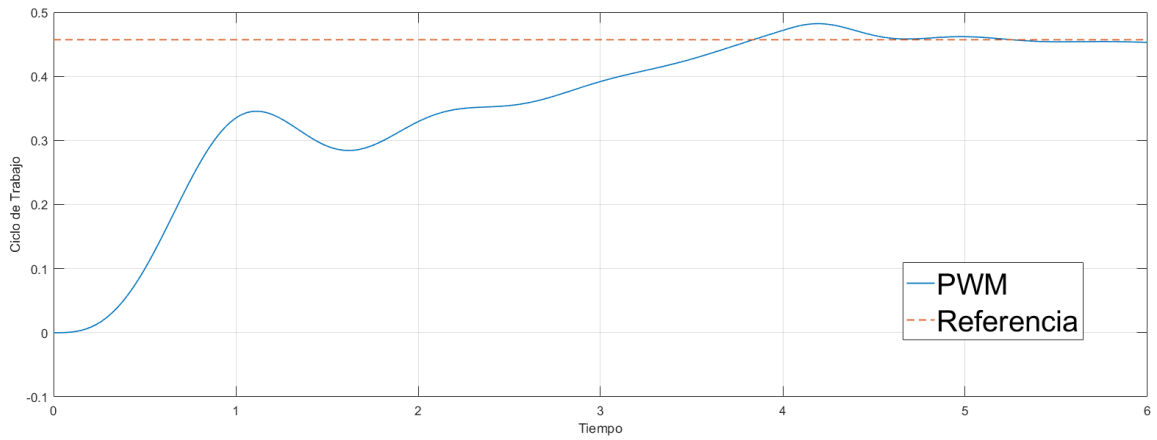


Figura 4.17 – Ciclo de Trabajo del controlador

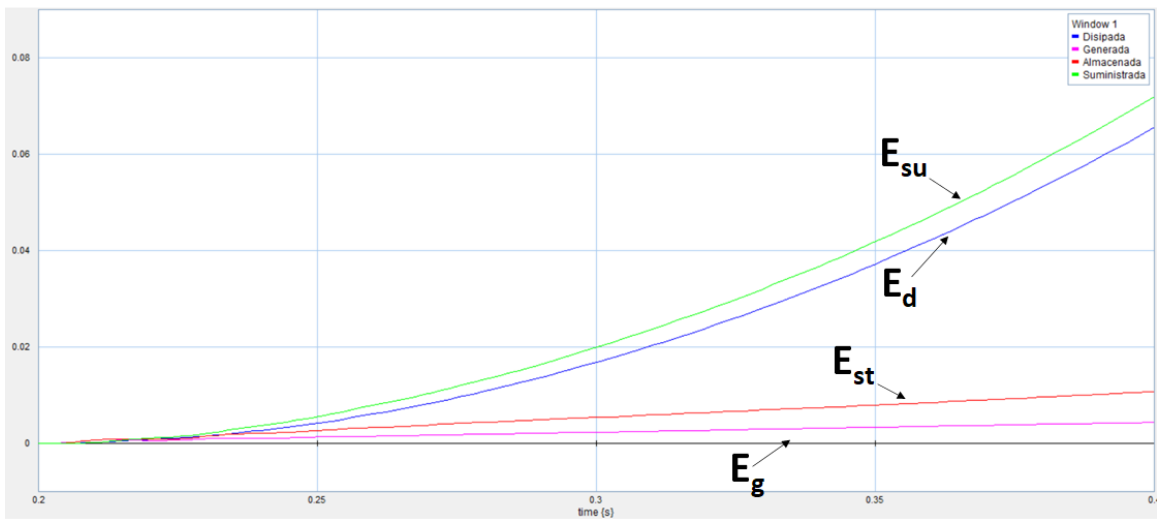


Figura 4.18 – Energías del sistema

Ahora al utilizar el controlador de la forma de la Fig 4.6

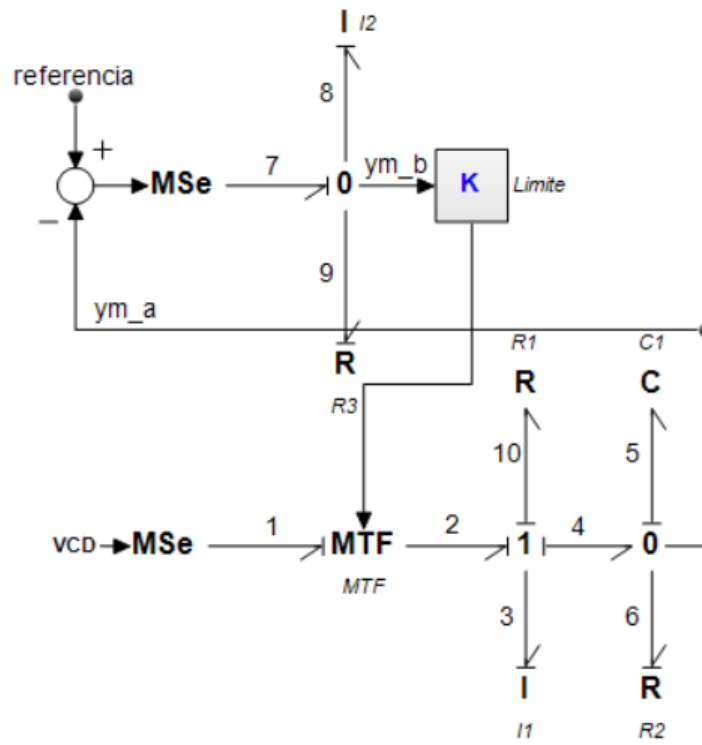


Figura 4.19 – Controlador dinámico con unión 0

$$x = \begin{bmatrix} p_3 \\ q_5 \\ p_8 \end{bmatrix} \quad \dot{x} = \begin{bmatrix} e_3 \\ f_5 \\ e_8 \end{bmatrix} \quad z = \begin{bmatrix} f_3 \\ e_5 \\ f_8 \end{bmatrix} \quad D_i = \begin{bmatrix} f_{10} \\ e_6 \\ e_9 \end{bmatrix} \quad D_o = \begin{bmatrix} e_{10} \\ f_6 \\ f_9 \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_{ref} \end{bmatrix} \quad y = \begin{bmatrix} ym_a \\ ym_b \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} e_3 \\ f_5 \\ e_8 \\ f_{10} \\ e_6 \\ e_9 \\ ym_a \\ ym_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & MTF & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_3 \\ e_5 \\ f_8 \\ e_{10} \\ f_6 \\ f_9 \\ e_1 \\ e_{ref} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Cuando usamos el controlador con la unión 0, la matriz  $S_{12}$  de la Ec (4.18) no cumple con las propiedades que debe tener la matriz de la estructura de unión, por lo que no se puede seguir con el procedimiento para obtener las condiciones de pasividad. Por otro lado, si queremos obtener las condiciones de pasividad con el controlador con unión 0 es necesario aplicar una técnica que se basa en aumentar el bond graph con elementos parásitos y en aumentar la matriz de la estructura de unión.

En el capítulo siguiente se muestran las simulaciones de todo el sistema sección por sección para ver como resultado que el sistema opera de forma como es esperada en un principio. Cabe mencionar un punto importante para el funcionamiento correcto del sistema, es necesario que haya un viento adecuado para que el aerogenerador pueda producir el voltaje (110 V máximo) que requiere el convertidor para que su salida pueda ser igual que la de la referencia (48 V), aunque también se puede optar por otro valor de voltaje menor para que el generador pueda trabajar con menores vientos y el control funcione correctamente, de lo contrario el controlador se estaría forzando para que nuestro voltaje de salida alcance la referencia aunque esto nunca sería posible; en este caso se necesitaría otro tipo de convertidor (elevador).

## Aplicación a un aerogenerador de velocidad variable

### 5.1. Simulaciones y Resultados

Las simulaciones fueron realizadas utilizando el modelo que se muestra en la siguiente figura:

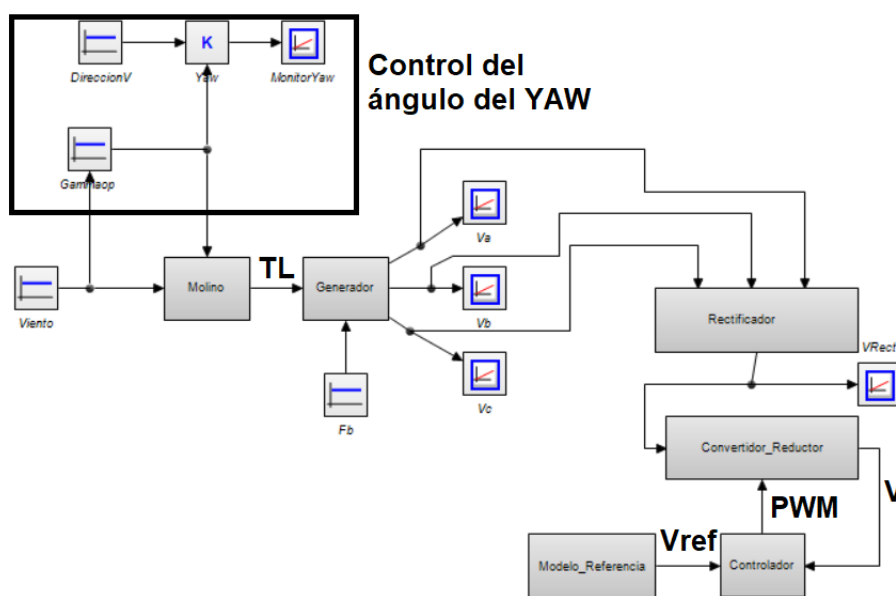


Figura 5.1 – Modelo Completo de Generación de Energía Eólica

Donde los valores para cada sección están descritos en la siguiente tabla:

Molino		PSGM		Rectificador		Convertidor Buck	
$J_{B_{1,2,3}}$	$0.3 \text{ Nms}^2$	$Bm$	$0.053 \text{ Ns/m}$	$R$	$10 \Omega$	$R1$	$0.0001 \Omega$
$J_H$	$0.1 \text{ Nms}^2$	$Imanes$	$0.63 \text{ wb}$	$RD1$	$0.01 \Omega$	$I1$	$0.005 \text{ H}$
$J_G$	$0.05 \text{ Nms}^2$	$J$	$0.05 \text{ Nms}^2$	$RD2$	$1 \Omega$	$C1$	$0.000001 \text{ F}$
$D_{B_{1,2,3}}$	$0.1$	$L0$	$0.007 \text{ H}$	$RD3$	$0.01 \Omega$	$R2$	$3 \Omega$
$D_{B_{1,2,3}H}$	$0.13$	$Ld$	$0.007 \text{ H}$	$RD4$	$0.01 \Omega$	$R3$	$1$
$D_H$	$0.2$	$Lq$	$0.007 \text{ H}$	$RD5$	$1 \Omega$	$I2$	$0.003$
$D_{HGB}$	$0.2$	$R0$	$3 \Omega$	$RD6$	$0.01 \Omega$		
$D_G$	$0.25$	$Rd$	$3 \Omega$	$R8$	$1 \Omega$		
$K_{B_{1,2,3}H}$	$0.3 \text{ Ns/m}$	$Rq$	$3 \Omega$	$C1$	$0.01 \text{ F}$		
$K_{HGB}$	$0.6 \text{ Ns/m}$						

Cuadro 5.1 – Valores de simulación

Tenemos 3 casos de simulación, cuando no hay viento, cuando el viento es el nominal (13 m/s) y cuando el viento está variando por encima del viento nominal.

### 5.1.1. Sin viento

En esta simulación podemos ver en la Fig 5.2 que la entrada de viento es cero, por lo que no hay velocidad en el molino ni tampoco es necesario modificar el ángulo de Yaw (Ver Fig 5.3). En las figuras 5.4 y 5.5 podemos ver que no hay valores para las corrientes generadas en el PMSG ni voltajes en el rectificador, por lo que el convertidor reductor no recibe ningún voltaje de entrada (Ver Fig 5.6) aunque se puede notar que el ciclo de trabajo del control se incrementa para compensar y que el convertidor llegue a la referencia, sin embargo esto nunca sucederá.



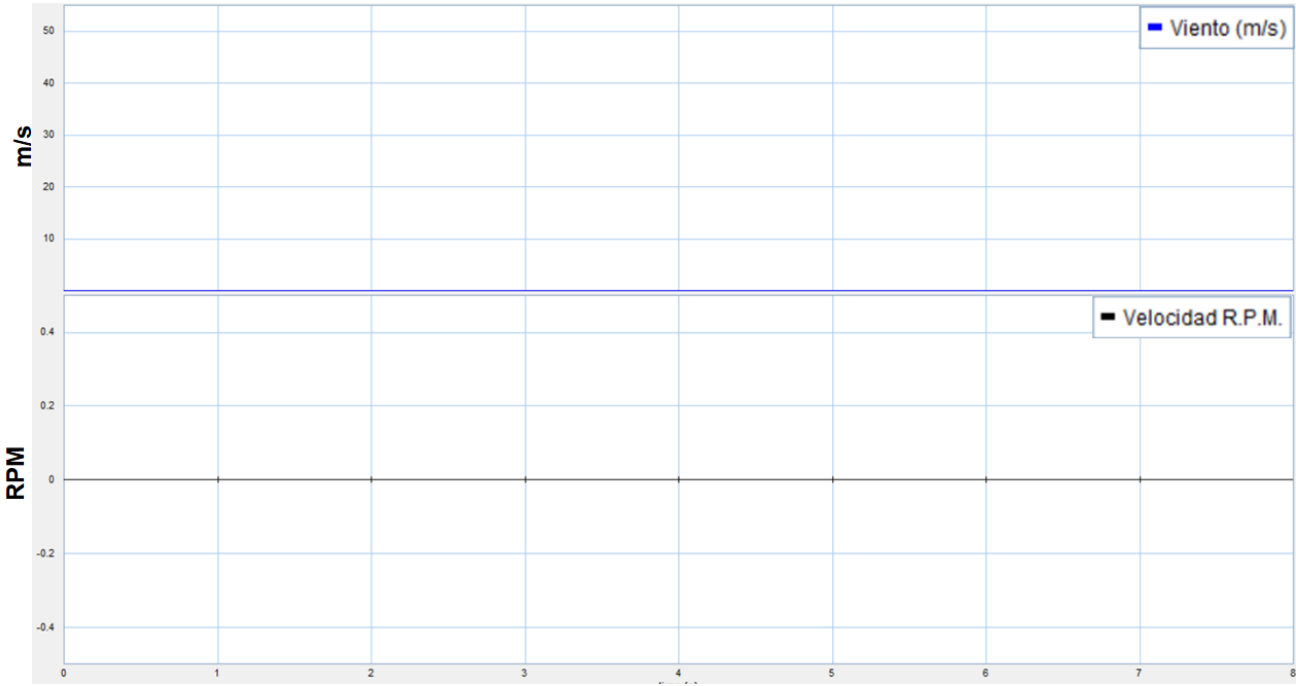


Figura 5.2 – Velocidad de viento y velocidad de Molino

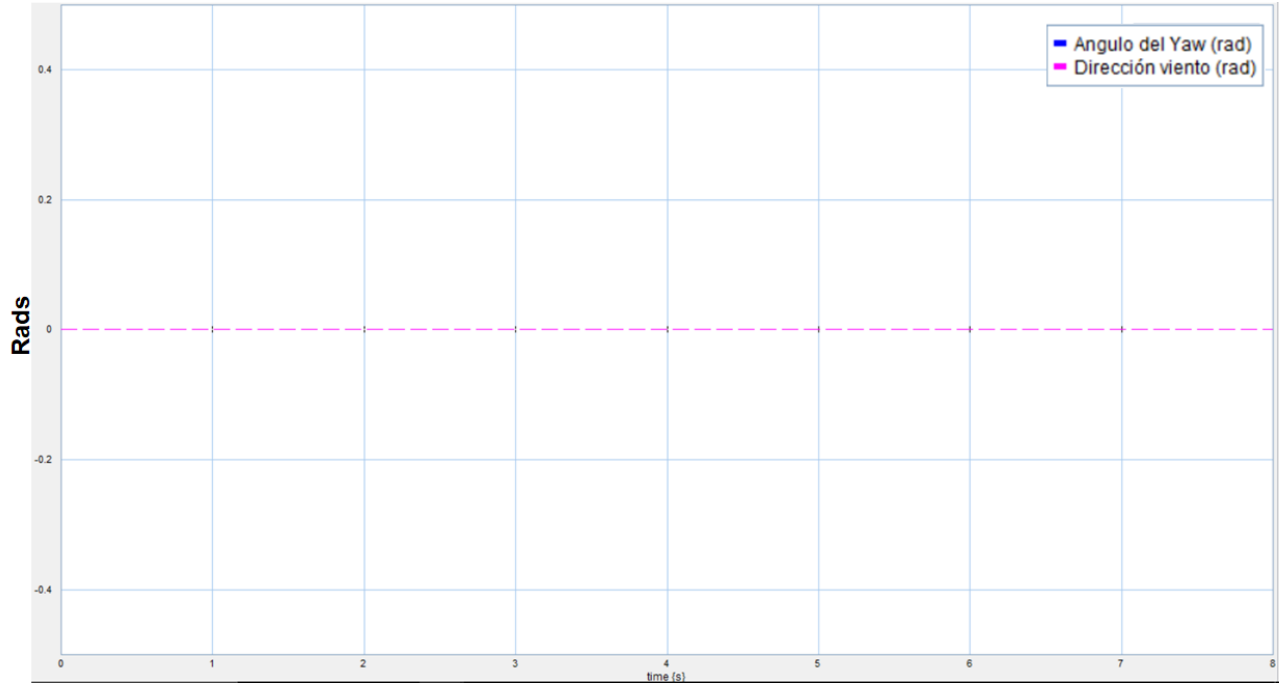


Figura 5.3 – Ajuste del ángulo Yaw

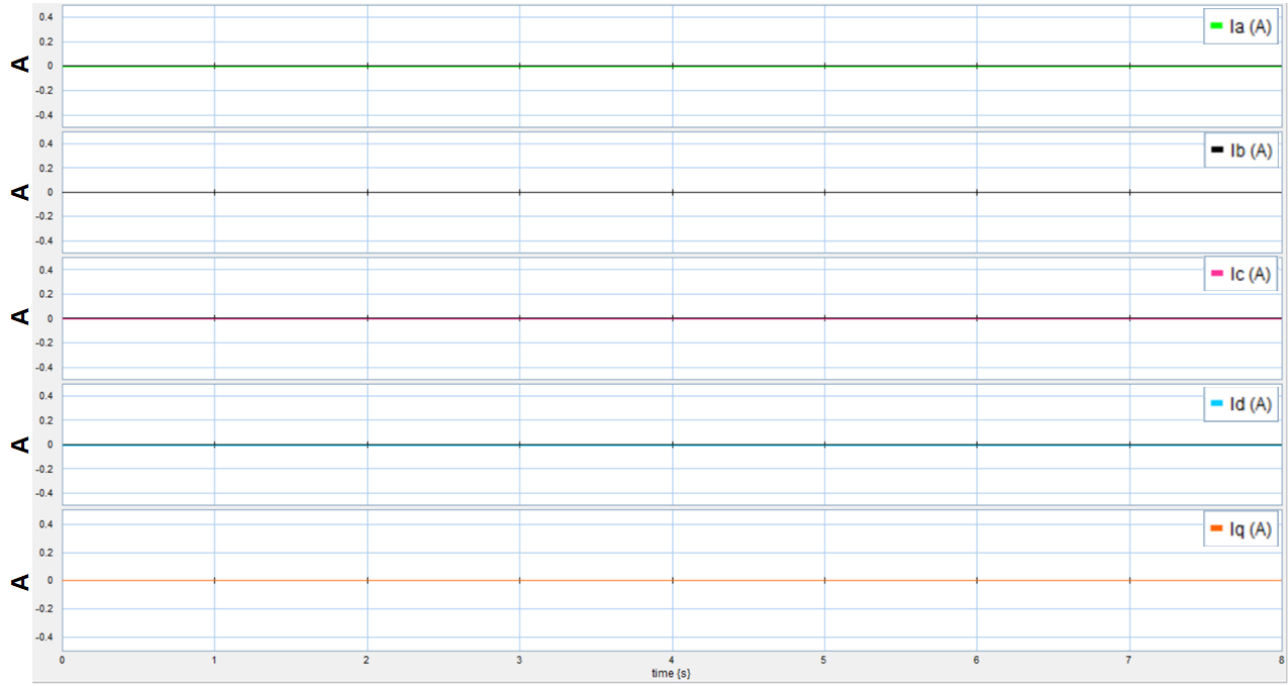


Figura 5.4 – Corrientes del PMSG

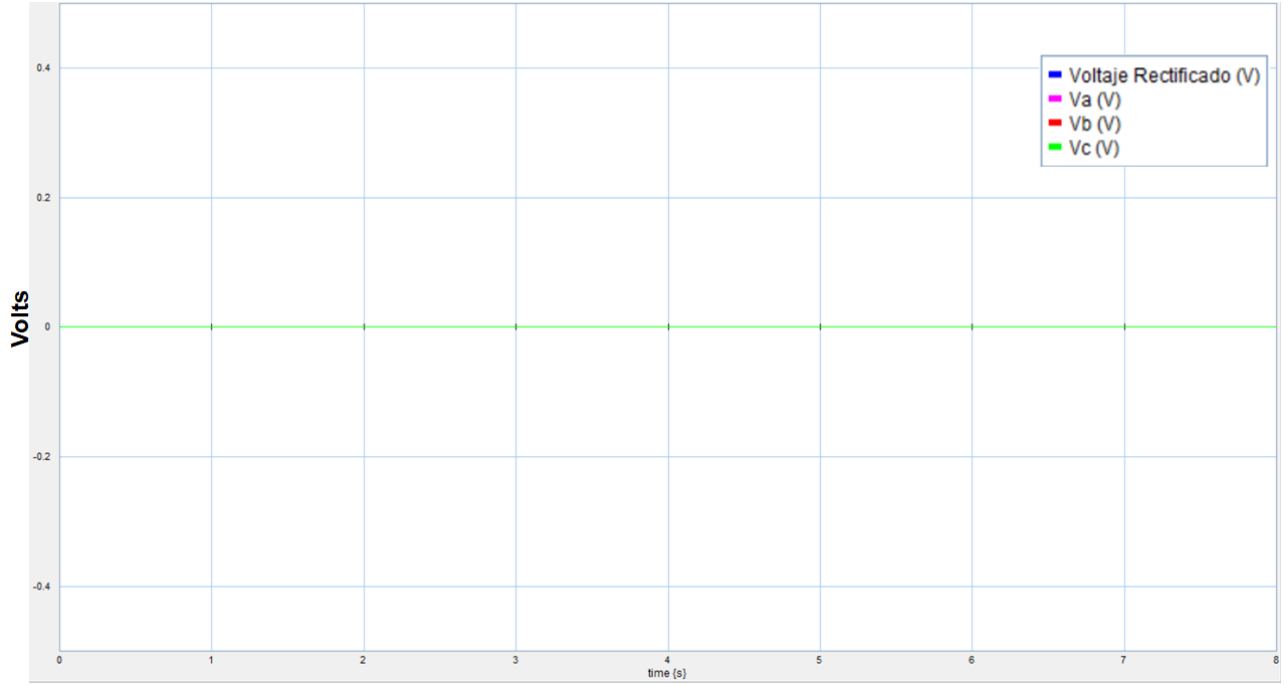


Figura 5.5 – Voltajes trifásicos y Rectificado

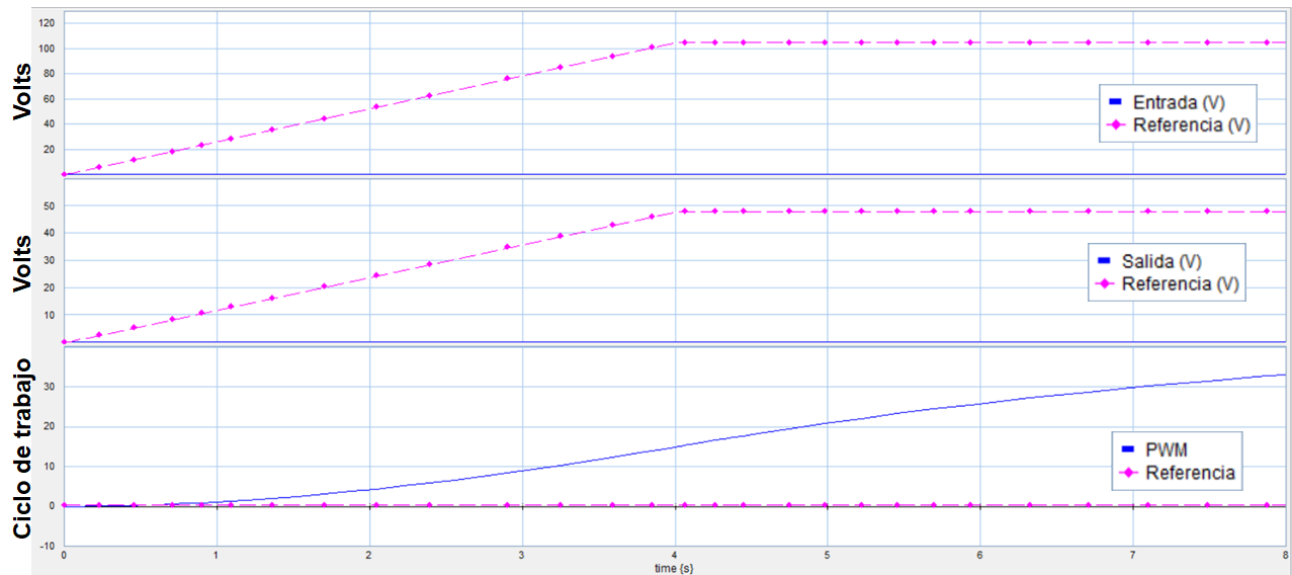


Figura 5.6 – Voltaje de entrada, salida y ciclo de trabajo del Convertidor Reductor

### 5.1.2. Viento de 13 m/s

En esta simulación podemos ver que en la Fig 5.7 hay un viento constante de 13 m/s y así la velocidad del molino está en un valor constante igualmente, al no necesitar de un ajuste en el ángulo de Yaw este se mantiene constante también, por lo que significa que el molino está apuntando a la dirección de donde proviene el viento (Ver Fig 5.8). En la Fig 5.9 podemos ver los valores de corrientes dentro de un rango definido que hay en el generador, mismo suceden en la Fig 5.10 donde el rectificador al tener entradas de voltajes definidas y el voltaje rectificado de salida es constante, por lo que entonces el voltaje de entrada al convertidor reductor también es constante, por lo que el controlador ajusta el ciclo de trabajo hasta que converge en la referencia para que el voltaje de salida sea el que nuestro modelo de referencia nos dicta (Ver Fig 5.11).

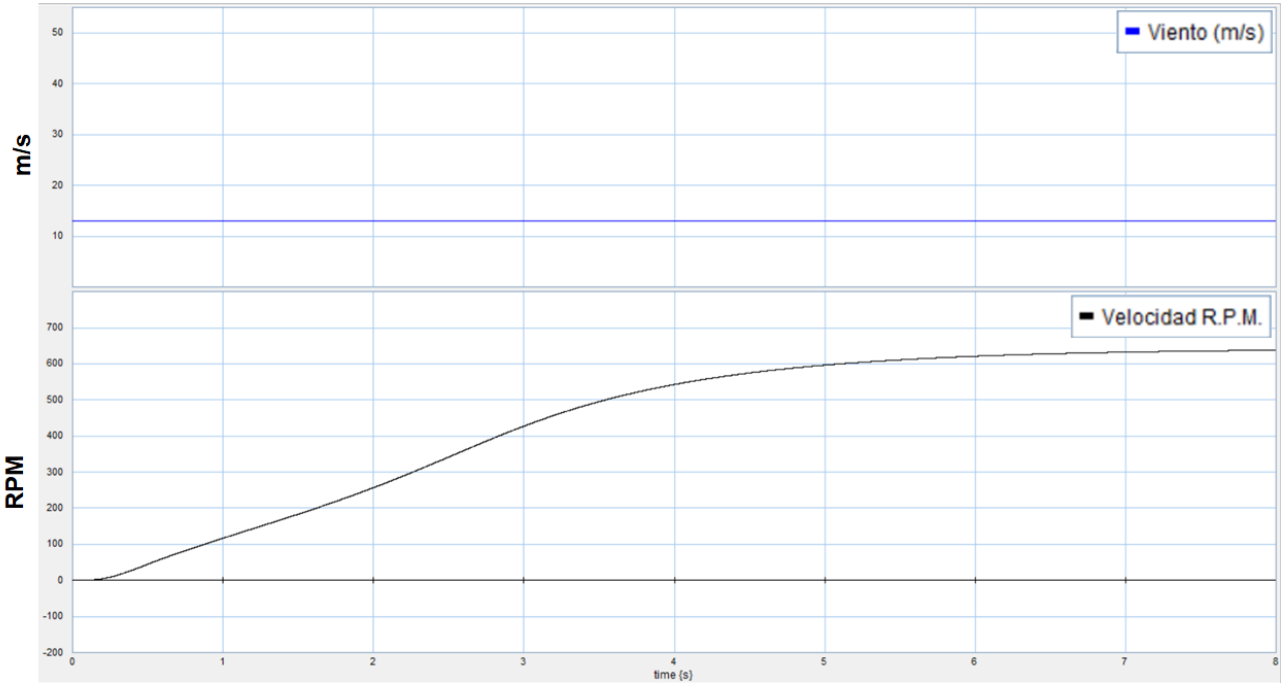


Figura 5.7 – Velocidad de viento y velocidad de Molino

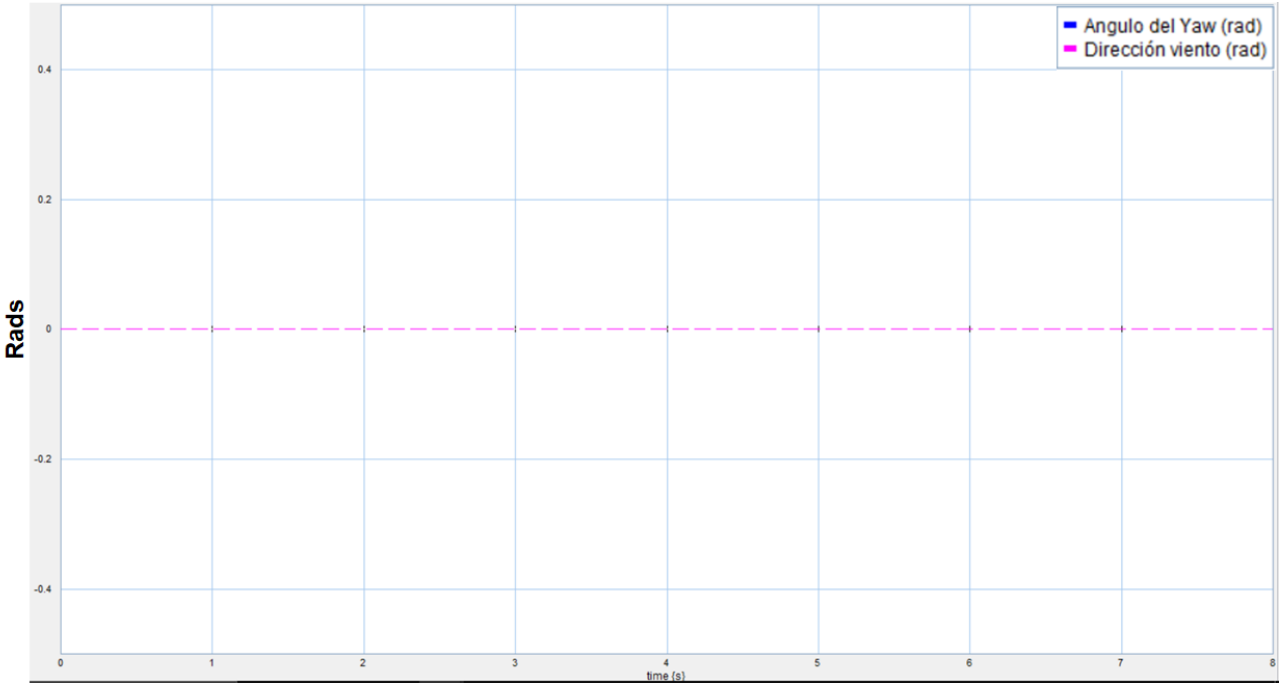


Figura 5.8 – Ajuste del ángulo Yaw

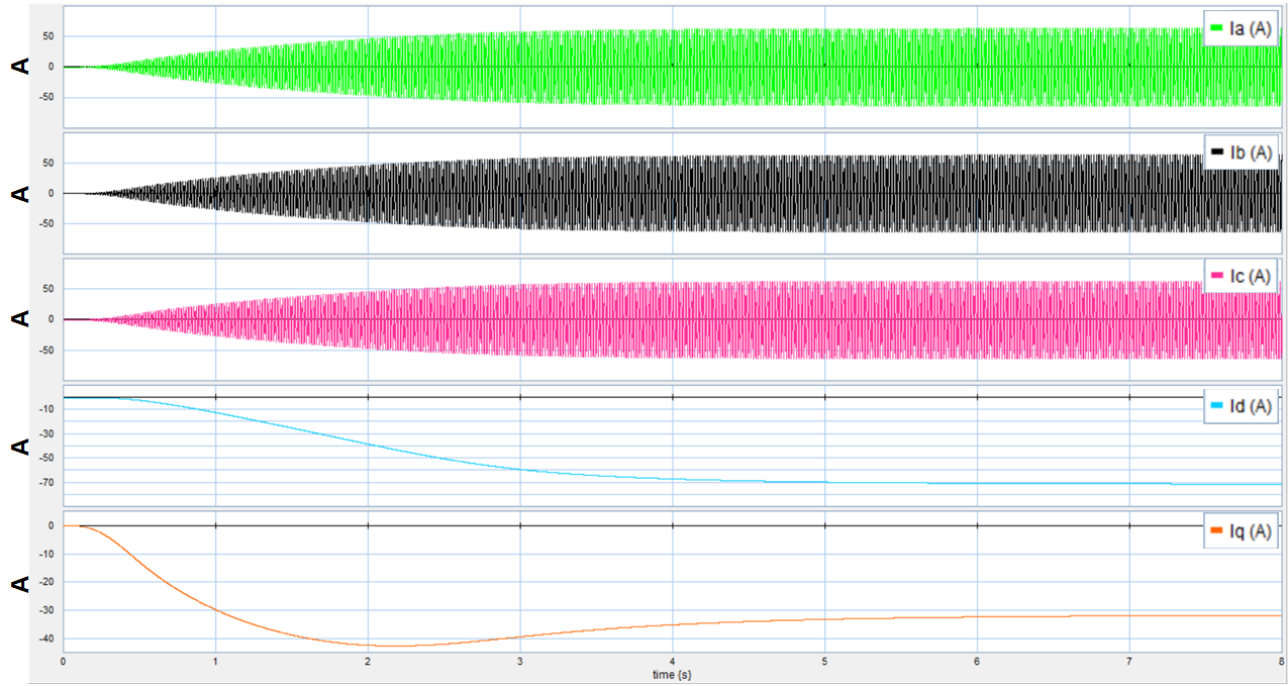


Figura 5.9 – Corrientes del PMSG

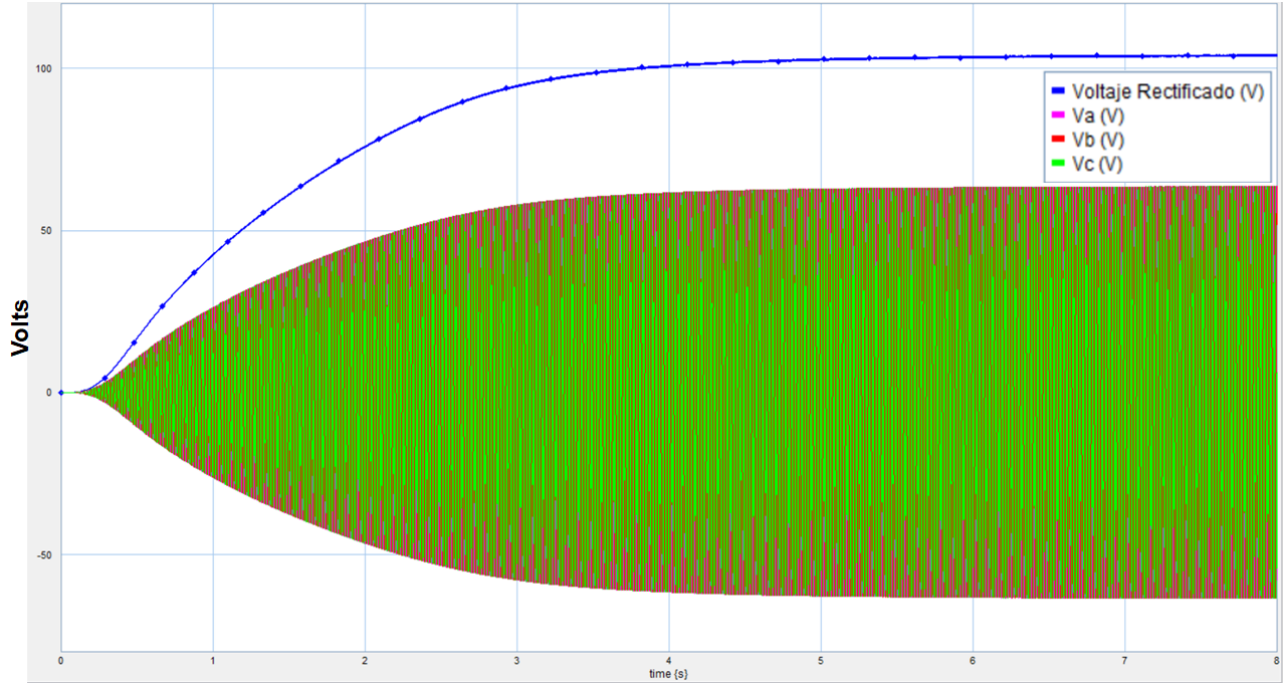


Figura 5.10 – Voltajes trifásicos y Rectificado

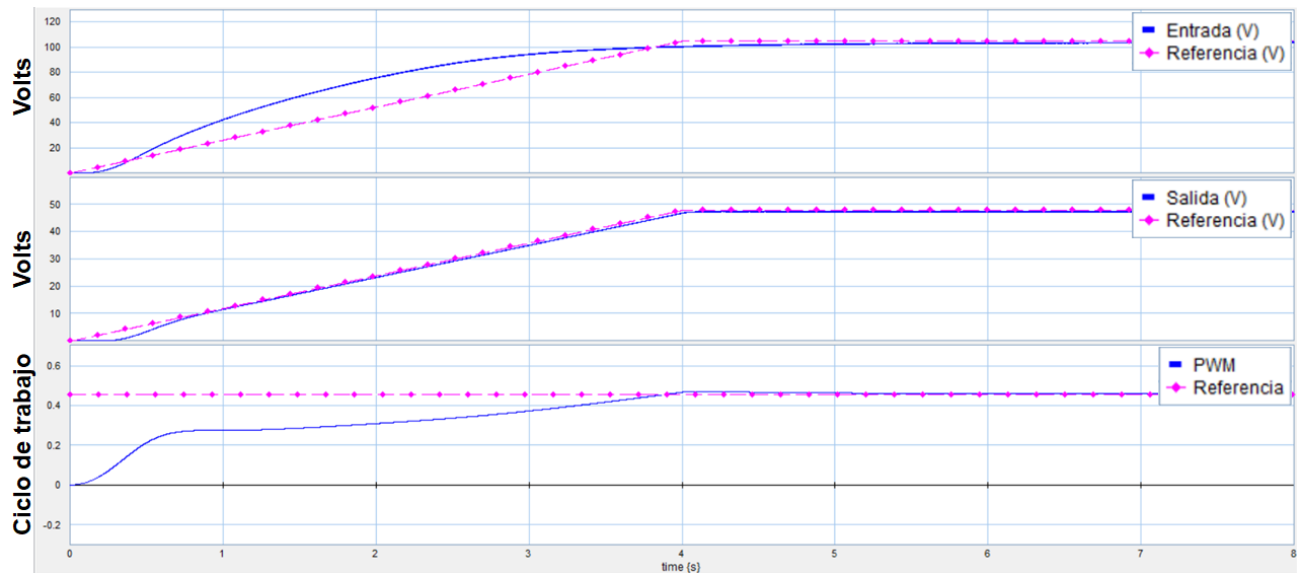


Figura 5.11 – Voltaje de entrada, salida y ciclo de trabajo del Convertidor Reductor

### 5.1.3. Vientos por encima del nominal (mayores a 13 m/s)

En esta simulación podemos ver que en la Fig 5.12 hay un viento variable por encima del nominal y como la velocidad del molino está ajustándose en base a la magnitud del viento modificando el ángulo del Yaw (Ver Fig 5.13). En la Fig 5.14 podemos ver los valores de corrientes que hay en el generador, donde estos se ven modificados pues el molino está siendo ajustado, mismo suceden en la Fig 5.15 donde el rectificador al tener entradas de voltajes variables el voltaje rectificado de salida es variable, por lo que entonces el voltaje de entrada al convertidor reductor también es variable, sin embargo podemos ver que el control ajusta el ciclo de trabajo para que el voltaje de salida del convertidor sea lo más parecido al voltaje de referencia de salida (Ver Fig 5.16).

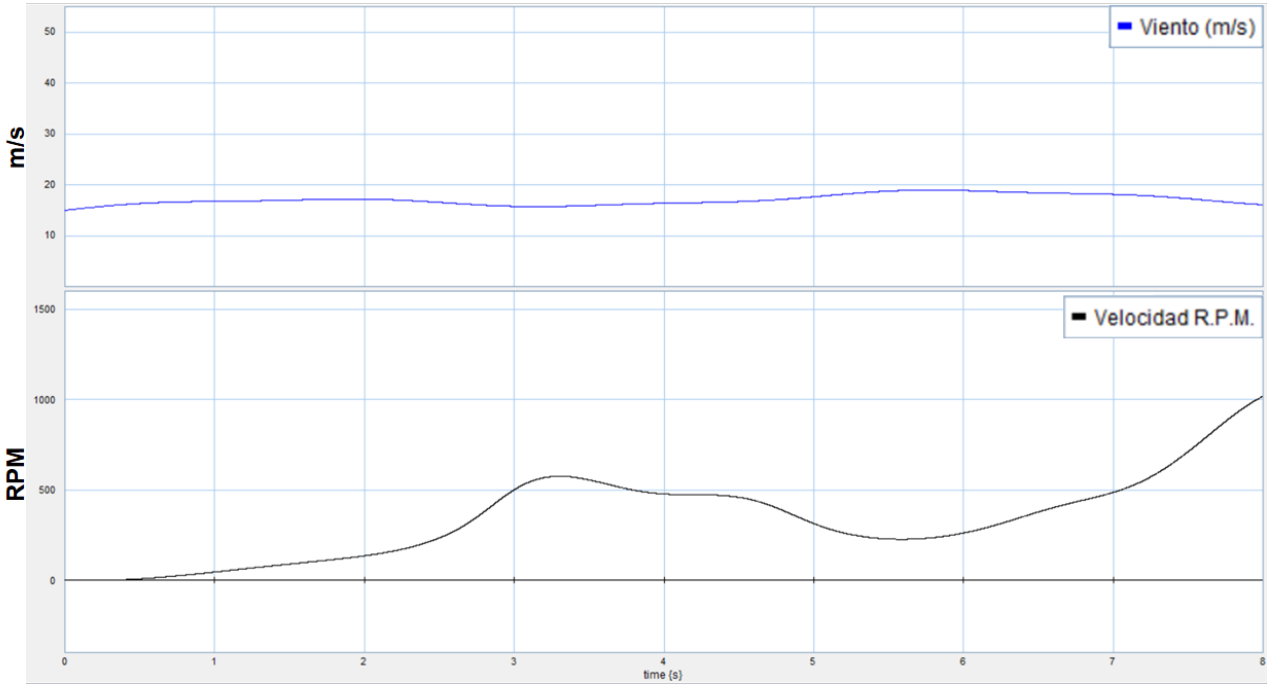


Figura 5.12 – Velocidad de viento y velocidad de Molino

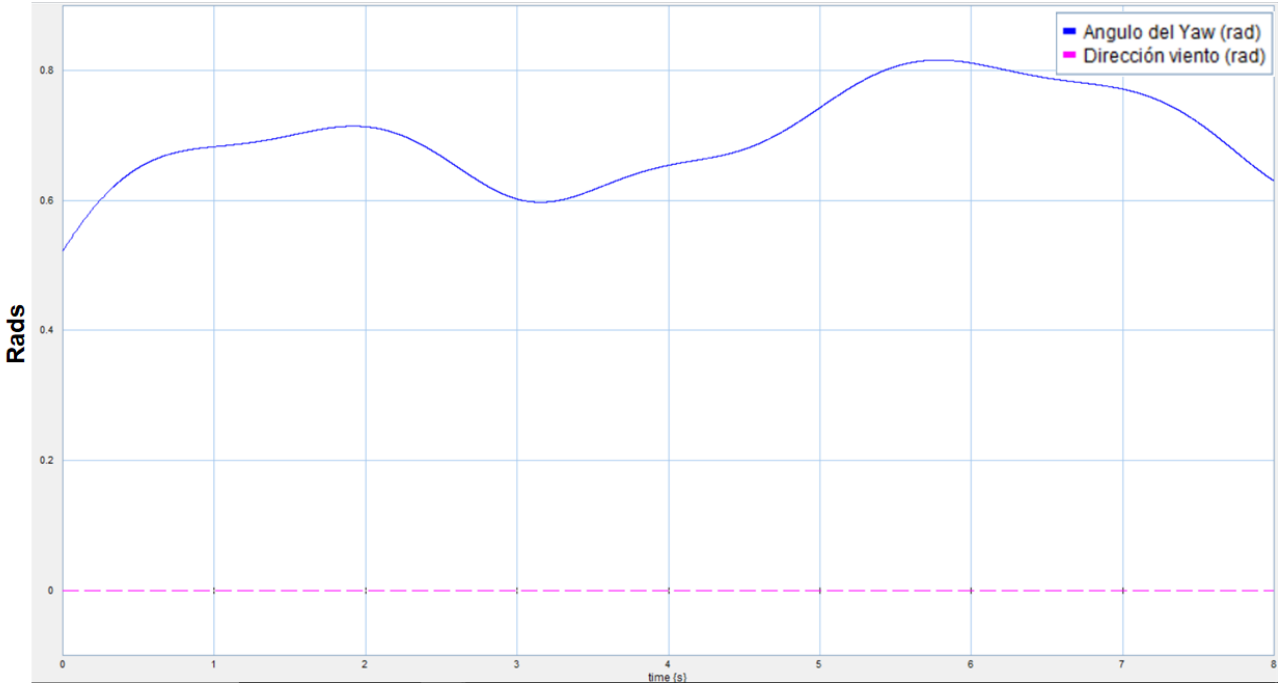


Figura 5.13 – Ajuste del ángulo Yaw

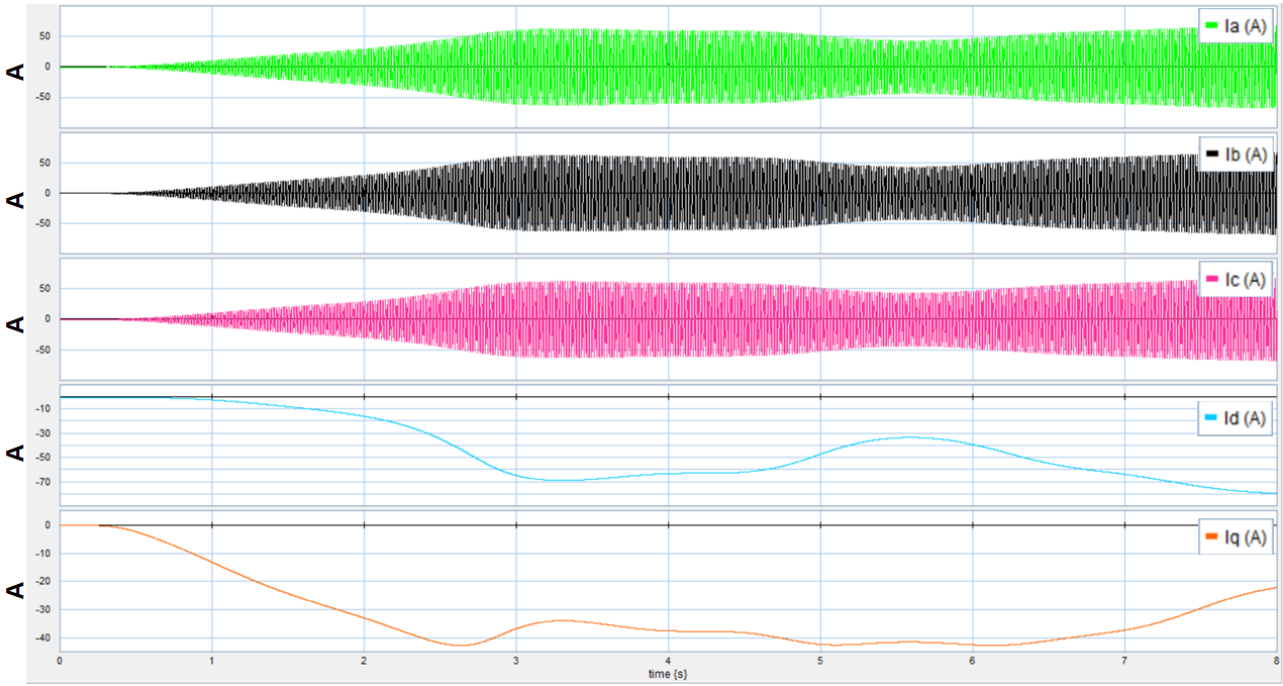


Figura 5.14 – Corrientes del PMSG

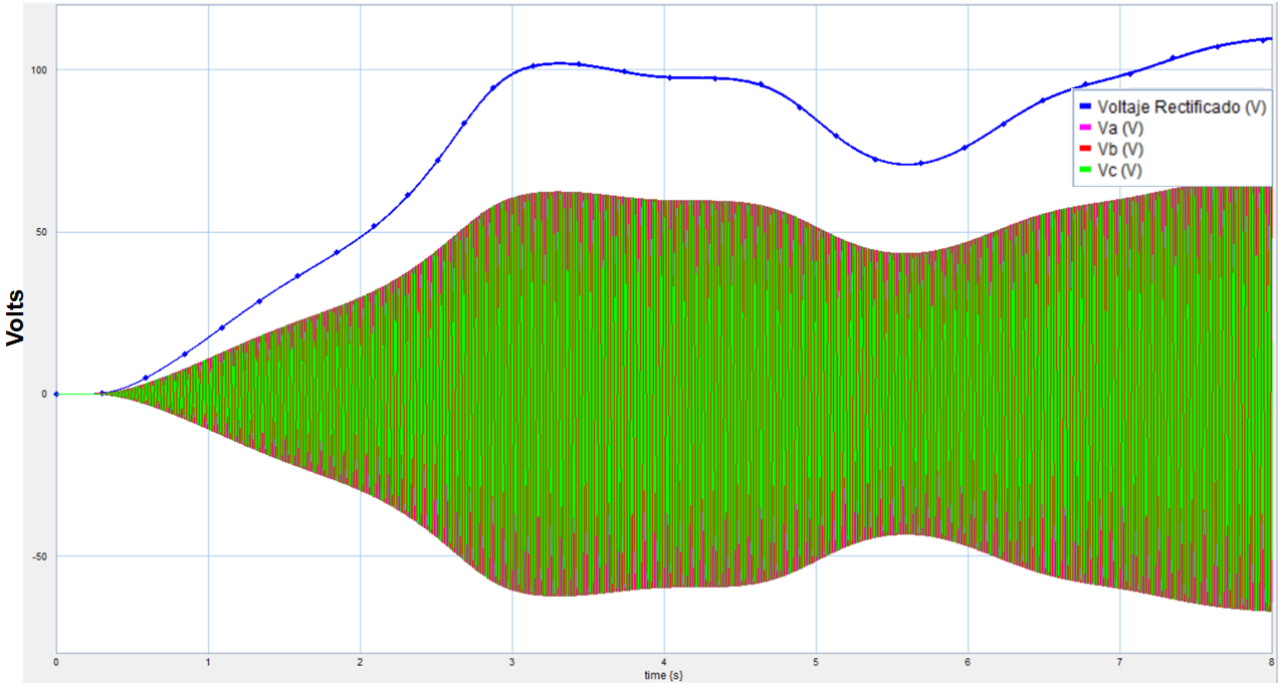


Figura 5.15 – Voltajes trifásicos y Rectificado



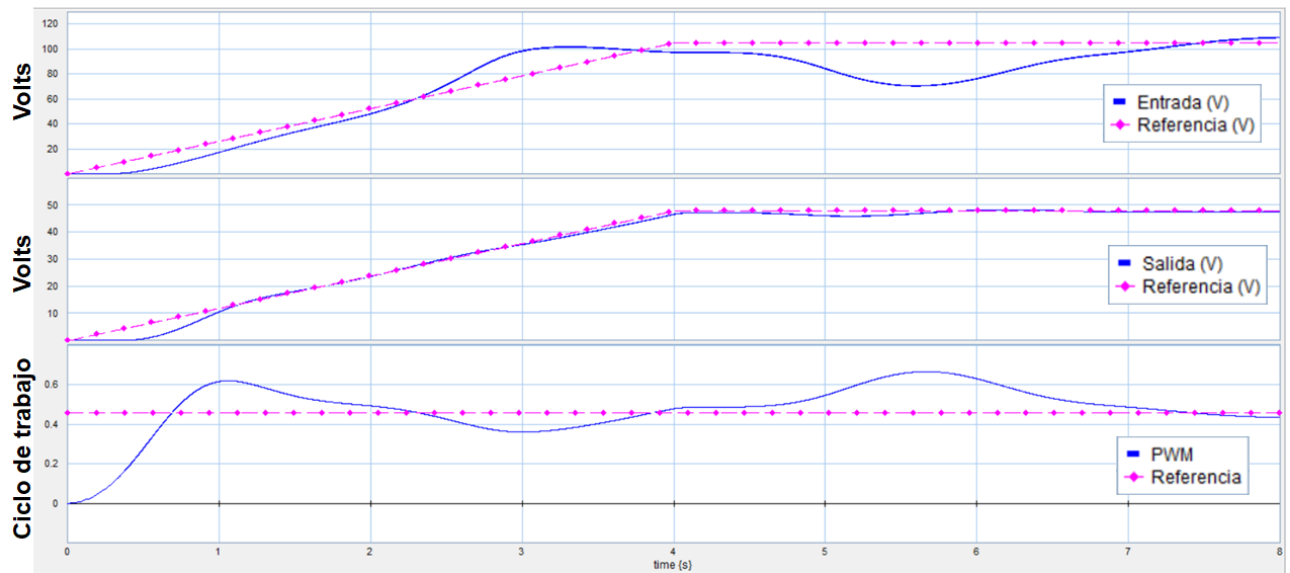


Figura 5.16 – Voltaje de entrada, salida y ciclo de trabajo del Convertidor Reductor

## 5.2. Conclusiones y trabajo a futuro

En el trabajo se realizó la integración de un sistema físico real por medio del método de modelado de Bond Graph y se implementaron dos tipos de controles (uno estático para el Yaw y control de la potencia generada; y otro basado en pasividad para el control del voltaje entregado por el convertidor reductor) utilizando el análisis de energías y las estructuras de unión obtenidas por medio del modelo para establecer las condiciones de pasividad que rigen al sistema. Los resultados de simulación muestran que cuando el sistema es pasivo, el sistema retroalimentado es estable, sigue al modelo de referencia propuesto y converge a la referencia, con una ley de control suave. Esto se logra ante variaciones en el viento y ante las diferencias entre el modelo de promedios y el modelo de conmutación. La energía no supera en ningún momento a la energía inicial, lo que da seguridad al usuario. Por su parte el control del ángulo de desviación logra mantener la potencia generada en la potencia nominal o menor, dando seguridad al equipo. Un

trabajo a futuro inmediato es probar el control con el sistema físico del generador que se cuenta en las instalaciones de la facultad, pues por razones de fuerza mayor no se tuvo el tiempo y disposición para poder realizar experimentos y obtener resultados reales sobre como se comporta el sistema real. Un control más allá de uno estático para el efecto del Yaw donde se pueda también incluir un control que nos permita tener una mejor respuesta en el giro del molino dependiendo la diferencia en que se encuentre la posición del molino con respecto a la dirección del viento.

Así mismo otros posibles trabajos a futuro son:

- Modelo dinámico del ángulo de desviación.
- Control basado en pasividad para un modelo no lineal del aerogenerador.
- Control del aerogenerador con conexión a la red.
- Control híbrido eólico-solar.



## Cambio de coordenadas ABC a 0DQ [36] [7]

### A.1. Transformación de Park

En 1929 R. H. Park introdujo un cambio de sistema de referencia que reemplaza las variables asociadas al estátor por otras variables asociadas con arrollamientos ficticios asociados al rotor, revolucionando el análisis de las máquinas eléctricas. Dicha transformación de Park convierte los componentes ABC del sistema trifásico a otro sistema de referencia 0DQ, donde los elementos ABC son variables senoidales en el tiempo, mientras que los elementos 0DQ son valores constantes en régimen permanente. Por tanto, la transformación 0DQ es un tipo de cambio de variables para convertir un sistema trifásico, sea o no equilibrado, a un nuevo sistema de referencia formado por dos ejes perpendiculares entre sí, que pueden ser giratorios en el espacio, más una tercera variable que contiene el promedio de los valores de las tres fases. Esta idea conduce a referir las variables o magnitudes asociadas a los devanados del rotor y del estator a una referencia común que, según cómo sea elegida, tiene distintas propiedades. Este tipo de transformación tiene más aplicaciones aparte de las máquinas eléctricas y su simulación por ordenador, como puede ser el análisis de la influencia de armónicos en una red o su estabilidad y el análisis de transitorios en la misma.

Podemos expresar este cambio de variables de la siguiente manera. Sea:

$$X_{0DQ} = \begin{bmatrix} X_0 \\ X_D \\ X_Q \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

$$X_{ABC} = \begin{bmatrix} X_A \\ X_B \\ X_C \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

Podemos obtener los valores constantes de los elementos 0DQ como se muestra a continuación:

$$\begin{bmatrix} X_{0DQ} \end{bmatrix} = [P] \begin{bmatrix} X_{ABC} \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

Donde  $\theta$  es el ángulo de referencia rotativa (ejes 0DQ) (Ver Fig A.1), por lo que:

$$\theta = \int_0^t (\omega t) dt + \theta_0 \quad (\text{A.5})$$

Siendo (Ver Fig A.1) :

- $w$  : velocidad angular de referencia DQ
- $\theta_0$  : angulo inicial de la referencia DQ

Cuando la velocidad angular es constante, la expresión de la transformación se puede representar como:

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\omega t + \theta_0) & \cos(\omega t + \theta_0 - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \theta_0 + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \theta_0) & \sin(\omega t + \theta_0 - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \theta_0 + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

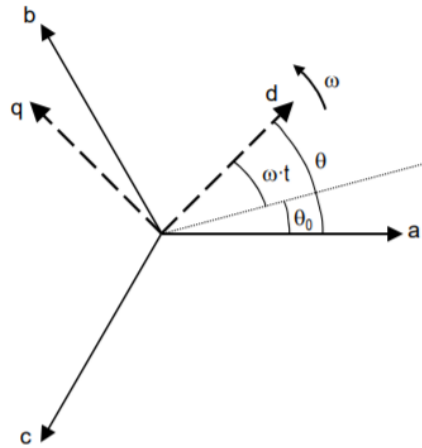


Figura A.1 – Referencias 0DQ y ABC

## A.2. Propiedades de la matriz de transformación

El término que multiplica a la matriz de transformación en A.2 y A.6 puede tener un valor diverso que en este caso es  $\sqrt{\frac{2}{3}}$ , con este valor se consigue que la transformación sea ortogonal al verificar la propiedad de  $[P]^T = [P]^{-1}$  a como se muestra a continuación:

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot P \implies [P]^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot P^T \quad (\text{A.7})$$

$$[P] \cdot [P]^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot P \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot P^T = \frac{2}{3} \cdot P \cdot P^T = [I]_{3 \times 3} \implies [P]^T = [P]^{-1}$$

Las transformaciones ortonormales se caracterizan por mantener invariante

el producto escalar, como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} [x_{1r}] &= [P] \cdot [x_1] \quad ; \quad [x_{2r}] = [P] \cdot [x_2] \\ [x_{1r}]^T \cdot [x_{2r}] &= ([P] \cdot [x_1])^T ([P] \cdot [x_2]) = [x_1]^T \cdot [P]^T \cdot [P] \cdot [x_2] = [x_1]^T \cdot [x_2] \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

Como consecuencia de la propiedad anterior, el valor de la potencia instantánea ( $p$ ) se mantiene invariante, independientemente del dominio donde se calcule 'abc' o '0dq' como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} [v_{fr}] &= [P] \cdot [v_f] \quad ; \quad [i_{fr}] = [P] \cdot [i_f] \\ p &= v_a \cdot i_a + v_b \cdot i_b + v_c \cdot i_c = [v_a \quad v_b \quad v_c] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = [v_f]^T \cdot [i_f] \\ p &= [v_f]^T \cdot [i_f] = ([v_f]^T \cdot [P]^T) \cdot ([P] \cdot [i_f]) = [v_{fr}]^T \cdot [i_{fr}] \\ p &= [v_{fr}]^T \cdot [i_{fr}] = [v_0 \quad v_d \quad v_q] \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = v_0 \cdot i_0 + v_d \cdot i_d + v_q \cdot i_q \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

### A.3. Propiedades del sistema y componentes homopolares

Con las Ec (A.2) y (A.6) obtenemos las siguientes expresiones de la denominada secuencia homopolar o cero:

$$v_0 = \frac{1}{\sqrt{3}}(v_a + v_b + v_c) \quad (\text{A.10})$$

$$i_0 = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_a + i_b + i_c) \quad (\text{A.11})$$

Y en base a las expresiones (A.10) y (A.11) se hacen las siguientes deducciones:

- Si el sistema trifásico está equilibrado, la suma de las tensiones abc es nula en todo momento ( $v_a + v_b + v_c = 0$ ) y la tensión homopolar es cero  $v_0 = 0$
- Si el neutro del sistema trifásico está aislado, la suma de las corrientes abc es nula en todo momento ( $i_a + i_b + i_c = 0$ ) y la corriente homopolar ( $i_0$ ) es nula
- Si el sistema trifásico de tensiones está equilibrado y la impedancia de carga es la misma en todas las fases (carga equilibrada), la suma de las tensiones y corrientes abc son nulas en todo momento y las componentes a secuencia cero son nulas ( $v_0 = 0, i_0 = 0$ )



## Ponencias

**52** Congreso Nacional  
de la Sociedad Matemática  
Mexicana 2019

La Sociedad Matemática Mexicana  
otorga el presente

# RECONOCIMIENTO

A: **ALAN EMILIO OROZCO GALAVIZ**

Por la presentación de la ponencia:  
**Seguimiento basado en pasividad del punto máximo de potencia  
para un aerogenerador modelado en gráficas de ligadura**  
realizada dentro de las Actividades del 52 Congreso Nacional de la  
Sociedad Matemática Mexicana, llevado a cabo  
del 21 al 25 de Octubre de 2019, en Monterrey, Nuevo León.

Octubre de 2019  
Monterrey, Nuevo León.

Dra. María de la Luz Jimena de Teresa de Oteyza  
Presidenta de la Junta Directiva



LI - P - 2873 - 10440



## Bibliografía

- [1] 20-Sim. URL: <https://www.20sim.com/>.
- [2] Badoud A., Khemliche M. y Chermat F. "Investigation Bond Graph to control a variable speed wind turbine with Permanent Magnet Synchronous Generator". En: *International Conference on Control, Engineering Information Technology* (2013), págs. 64-69.
- [3] Malvino A. *Principios de electrónica*. McGraw Hill, 2007.
- [4] Mukherjee A. y Karmakar R. *Modelling and Simulation Enegineering Systems through Bondgraphs*. Narosa Publishing House, 2000.
- [5] Neamen Donald A. *Dispositivos y circuitos electrónicos*. McGraw Hill, 2012.
- [6] Singh A. y Mirafzal B. "A Generator-Converter Topology With Zero DC-Link Impedance for Direct Drive Wind Turbines". En: *IEEE Transactions on Energy Conversion* Vol: 32.Núm: 4 (2017), págs. 1620-1623.
- [7] Pigazo L. Alberto y Moreno S. Victor. *Sistemas Electrónicos de Potencia en el Buque*. Textos Universitarios, 2006.

- [8] BBVA *Open Mind*. URL: <https://www.bbvaopenmind.com/tecnologia/innovacion/historia-de-la-energia-eolica-del-origen-a-la-ii-guerra-mundial/>.
- [9] Pacheco A. Maria del C. "Técnicas de Control Basadas en Pasividad Aplicadas a un Motor de Inducción". Tesis doct. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Universidad Autónoma de Nuevo León, 1994.
- [10] Karnopp D. y Rosenberg R. *System Dynamics: A Unified Approach*. Wiley, 1975.
- [11] *Danish Wind Industry Association*. URL: <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/pictures/brush.htm>.
- [12] *Ekidom*. URL: <http://www.ekidom.com/>.
- [13] Robert W. Erickson y Dragan Maksimovic. *Fundamentals of Power Electronics*. Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [14] Vasca F. y col. "A New Perspective for Modeling Power Electronics Converters: Complementarity Framework". En: *IEEE Transactions on Power Electronics* Vol: 24.Núm: 2 (2009), págs. 456-468.
- [15] Dauphin G. y Rombaut C. "Why a unique causality in the elementary commutation cell bond graph model of a power electronics converter". En: *Proceedings of IEEE Systems Man and Cybernetics Conference* Vol: 1 (1993), págs. 257-263.
- [16] Gonzalez G. y Lopez V. "Modelling and Simulation of a Skystream Wind Turbine in a Bond Graph Approach". En: *Iasted*, 2017, págs. 55-62.
- [17] Cormerais H. y col. "Modelling and Passivity Based Control of switched systems from bond graph formalism: Application to multicellular converters". En: *Journal of the Franklin Institute* Vol: 345 (2008), págs. 468 -488.
- [18] Khalil H. *Non-Linear Systems*. Prentice Hall, 2002.

- [19] Beaman J. J. y Rosenberg R. C. "Constitutive and Modulation Structure in Bond Graph Modeling". En: *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control* Vol: 110 (1988), págs. 395-402.
- [20] Chapman S. J. *Máquinas Eléctricas*. McGraw Hill, 2012.
- [21] Garcia-Gomez J., Rimaux S. y Delgado M. "Bond Graphs in the Design of Adaptive Passivity-Based Controllers for DC/DC Power Converters". En: *IEEE International Conference on Industrial Technology*. 2006, págs. 132-137.
- [22] Gragger J., Haumer A. y Einhorn M. "Averaged Model of a Buck Converter for Efficiency Analysis". En: *Engineering Letters* Vol: 18.Núm: 1 (2010).
- [23] González M. y Vázquez F. "Modelo Matemático y Modos de Operación de un Aerogenerador de Velocidad Variable". En: *IX Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico, CIINDET* (2011), págs. 591-597.
- [24] Jayalakshmi N. y Gaonkar D. "Maximum Power Point Tracking for Grid Integrated Variable Speed Wind based Distributed Generation System with Dynamic Load". En: *International Journal of Renewable Energy Research* Vol: 4 (2014), págs. 464-470.
- [25] Borja R. Luis P. "Control Basado en Pasividad mediante cambio de Coordenadas". Tesis doct. Universidad Nacional Autónoma de México, 2013.
- [26] Gawthrop P. y Smith L. *METAMODELLING: Bond graphs and dynamic systems*. Prentice Hall, 1996.
- [27] Li P. y Ngwompo R. "Power Scaling Bond Graph Approach to the Passification of Mechatronic Systems-With Application to Electrohydraulic Valves". En: *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control* Vol: 127.Núm: 4 (2005), págs. 633-641.

- [28] Wei Q. y col. "A New Configuration Using PWM Current Source Converters in Low-Voltage Turbine-Based Wind Energy Conversion Systems". En: *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* Vol: 6.Núm: 2 (2017), págs. 919-929.
- [29] Galindo R. y Ngwompo R. "Passivity-based control of linear time-invariant systems modelled by bond graph". En: *Int. J. of Control* (2017), págs. 1-17.
- [30] Lozano R. y Brogliato B. *Dissipative Systems Analysis and Control*. Springer, 2007.
- [31] Ngwompo R. y Galindo R. "Passivity analysis of linear physical systems with internal energy sources modelled by bond graphs". En: *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers Part I: J. of Systems and Control Engineering* Vol: 231.Núm: 1 (2017), págs. 14-28.
- [32] Ortega R. y García-Canseco E. "Interconnection and Damping Assignment Passivity-Based Control: A Survey". En: *European Journal of Control* Vol: 10 (2004), págs. 432-450.
- [33] Zrafi R., Ghedira S. y Besbes K. "A Bond Graph Approach for the Modeling and Simulation of a Buck Converter". En: *Low Power Electronics and Applications* Vol: 8.Núm: 2 (2018).
- [34] De Zutter S. y col. "Modeling of active yaw systems for small and medium wind turbines". En: *IEEE*, 2017, págs. 1-6.
- [35] García S. *Mantenimiento de Aerogeneradores*. Renovotec Editorial, 2019.
- [36] Iribarnegaray L. S. *Teoría de los Fasores Espaciales: Introducción y Aplicaciones Industriales*. Marcombo, 2001.

- [37] Sabzevari S. y Karimpour A. "MPPT control of wind turbines by direct adaptive fuzzy-PI controller and using ANN-PSO wind speed estimator". En: *Journal of Renewable and Sustainable Energy* Vol: 9.Núm: 1 (2017), págs. 13302-13314.
- [38] Bakka T. y Reza H. "Wind Turbine Modeling Using The Bond Graph". En: *International Symposium on Computer-Aided Control System Design* (2011), págs. 2008-2013.
- [39] Lopez T. "Modelado y simulacion de un sistema eolico con una turbina Skystream 3.7 basado en Bond Graph". Tesis doct. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2019.
- [40] Petrovic V., Ortega R. y Stankovic A. M. "Interconnection and damping assignment approach to control of PM synchronous motors". En: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* Vol: 9.Núm: 6 (2001), págs. 811-820.
- [41] Khaouch Z. y Zekraoui M. "Mechatronic modeling of a 750 kW fixed-speed wind energy conversion system using the Bond Graph Approach". En: *ISA Transactions* Vol: 65 (2016), págs. 418-436.