

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

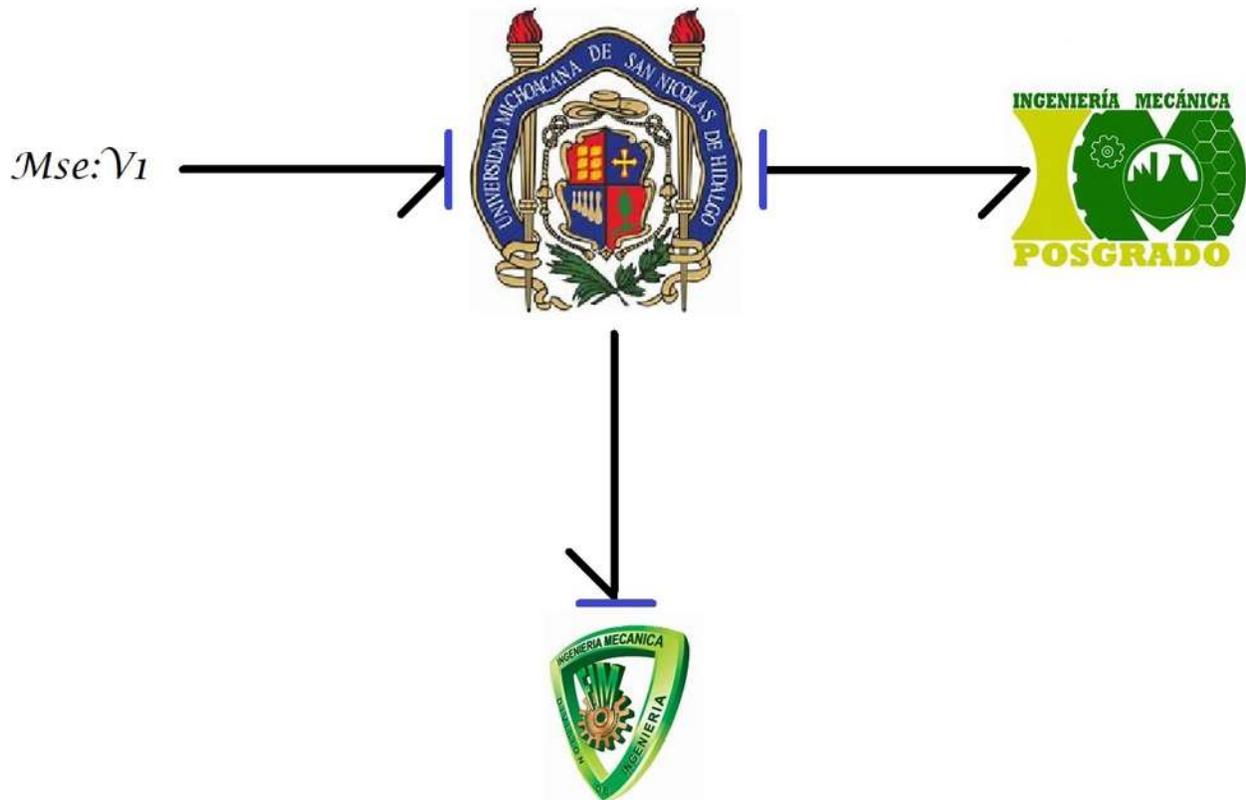
Facultad de Ingeniería Mecánica

División de Estudios de Posgrado

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica

Tesis

Modelado y simulación de un sistema eólico con una turbina
Skystream 3.7 basado en Bond Graph.



Director de tesis: Dr. Gilberto González Avalos

Que para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica

Presenta: Ing. Tizoc López López

Me enseñaron que el camino del progreso no es ni rápido ni fácil.
Marie Curie

Agradecimientos

A la Mujer que logró comunicarse con la naturaleza a través del cuidado, conocimiento y belleza de las flores, el efecto y aroma de las plantas medicinales, la combinación perfecta de ingredientes al cocinar y el dialogo con las gallinas. Mujer inalcanzable de sinuoso caminar, rectitud innata y de sonrisa sincera... Mi Madre.

Dedicatoria

A mi Hijo Tiizoc...

Índice general

Agradecimientos	II
Dedicatoria	III
Resumen	VI
Abstract	VII
1. Introducción	1
1.1. Importancia de las fuentes renovables	1
1.2. Objetivo	2
1.3. Estado del arte	2
1.4. Contribución	4
1.5. Estructura de la tesis	5
2. Modelado de sistemas en Bond Graph	6
2.1. Necesidad de modelar sistemas	6
2.2. Definición de Bond Graph	6
2.2.1. Elementos en Bond Graph	7
2.2.2. Causalidad	12
2.2.3. Procedimiento para asignación de causalidad	14
2.2.4. Causalidad derivativa en Bond Graph	15
2.2.5. Metodología para el modelado de sistemas en Bond Graph	16
2.2.6. Estructura de unión	17
2.2.7. Relaciones de campo, vectores clave y ecuaciones de estado	18
2.2.8. Propiedades	19
2.2.9. Ejemplo sobre el uso de la metodología de Bond Graph en un sistema eléctrico	20
2.2.10. Ejemplo sobre el uso de la metodología de Bond Graph en un sistema mecánico	29
3. La turbina eólica Skystream	35
3.1. Introducción	35
3.2. Características de la turbina Skystream	36
3.2.1. Energía del viento	36
3.2.2. Sustentabilidad	36
3.2.3. Aplicaciones	37
3.2.4. Tecnología	39
3.2.5. Aspecto económico	39
3.3. Diagrama de una turbina Skystream	41
3.4. Álabes	42

3.5. Generador síncrono de imanes permanentes	43
3.6. Rectificador trifásico	45
3.7. Convertidor boost	46
3.8. Inversor monofásico	46
3.9. Aislador de ruido	47
3.10. Sistema de monitoreo	48
3.11. Especificaciones y certificados de la turbina Skystream	53
3.12. Comparativo con turbinas de su clase	55
4. Modelado de la turbina Skystream en Bond Graph	63
4.1. Generador síncrono de imanes permanentes	63
4.1.1. Topología	63
4.1.2. Bond Graph del generador síncrono de imanes permanentes	64
4.1.3. Modelado en Bond Graph del generador síncrono de imanes permanentes en 20Sim	67
4.1.4. Transformación de Park	69
4.1.5. Transformación de Park en 20Sim	70
4.1.6. Transformación inversa de Park	71
4.1.7. Transformación inversa de Park en 20Sim	71
4.2. Rectificador trifásico	72
4.2.1. Topología del rectificador trifásico	73
4.2.2. Rectificador trifásico con filtro	74
4.2.3. Bond Graph del rectificador trifásico con filtro	75
4.2.4. Modelado del rectificador trifásico en Bond Graph mediante 20Sim	79
4.3. Convertidor boost	81
4.3.1. Topología del convertidor boost	82
4.3.2. Bond Graph del convertidor boost	84
4.3.3. Modelado en Bond Graph del convertidor boost en 20Sim	87
4.4. Inversor monofásico de puente completo	89
4.4.1. Topología del inversor monofásico de puente completo	89
4.4.2. Bond Graph del inversor monofásico de puente completo	91
4.4.3. Modelado en Bond Graph del inversor monofásico en 20Sim	94
4.5. Sistema Skystream mediante el software 20Sim	95
4.5.1. Modelo aerodinámico del viento	97
5. Conclusiones y Recomendaciones	101
5.1. Conclusiones	101
5.2. Recomendaciones	102

Resumen

Desde 1957 que el visionario L. Vadot tuvo el interés por desarrollar turbinas eólicas que mediante la generación de energía eléctrica redujeran el costo del servicio eléctrico en aquella época y hasta la fecha, es frecuente encontrar diversas investigaciones con el fin mencionado, una de las cuales es mostrada en el presente escrito. Tal es el caso de la metodología denominada Bond Graph, cuya invención se debe al profesor H. Paynter, quien la desarrolló en 1961. Cabe señalar que es una técnica que permite la unificación de diferentes sistemas de energía, debido a ello, es seleccionada para llevar a cabo la presente investigación para obtener el equivalente en Bond Graph de una turbina eólica modelo Skystream 3.7, previamente a la obtención de los diferentes subsistemas representativos del sistema eólico elegido, se aborda la problemática actual relativa al cambio climático y la importancia del uso de energías alternas. Posteriormente, se hace hincapié en la importancia del modelado de sistemas, para después, definir como tal la técnica de Bond Graph, pasando por las normas que la rigen, así como la ejemplificación de un par de sistemas dinámicos para favorecer la comprensión de la versatilidad del método. Luego, se presentan los detalles propios de la turbina eólica elegida para la investigación, desde sus orígenes, características de fabricación, complementos de monitoreo, certificados y comparativos con turbinas de su clase. Al tener un panorama general de los subsistemas que conforman el sistema de la turbina eólica, se desarrolla cada uno de ellos mediante Bond Graph, además se presenta la simulación de cada uno de los subsistemas planteados mediante el software 20Sim, en donde también se muestra el esquema generalizado que representa al sistema eólico planteado. Finalmente se muestran las conclusiones de la presente investigación, en donde se corrobora tanto la efectividad de la metodología Bond Graph, como de la turbina eólica Skystream 3.7, además de recomendaciones para futuras investigaciones.

Generación eléctrica, energías alternas, cambio climático, software 20Sim, electrónica de potencia.

Abstract

Since 1957, the visionary L. Vadot had the interest to develop wind turbines that, by generating electric power, reduced the cost of electric service at that time and to date, it is common to find various investigations for the aforementioned purpose, one of which is shown in this writing. Such is the case of the methodology called Bond Graph, whose invention is due to professor H. Paynter, who developed it in 1961. It should be noted that it is a technique that allows the unification of different energy systems, because of this, it is selected for To carry out the present investigation to obtain the equivalent in Bond Graph of a wind turbine model Skystream 3.7, prior to obtaining the different representative subsystems of the chosen wind system, the current problems related to climate change and the importance of the use of Alternate energies. Afterwards, the importance of the modeling of systems is emphasized, in order to later define the Bond Graph technique as such, going through the rules that govern it, as well as the exemplification of a pair of dynamic systems to favor the understanding of versatility of the method. Then, the details of the wind turbine chosen for the investigation are presented, from its origins, manufacturing characteristics, monitoring complements, certificates and comparisons with turbines of its kind. By having a general overview of the subsystems that make up the wind turbine system, each of them is developed by Bond Graph, and the simulation of each of the subsystems raised by the 20Sim software is presented, where the generalized scheme that represents the proposed wind system. Finally, the conclusions of the present investigation are shown, which corroborates both the effectiveness of the Bond Graph methodology and the Skystream 3.7 wind turbine, as well as recommendations for future research.

Capítulo 1

Introducción

La naturaleza inspira, cura, consuela, fortalece y prepara para la virtud al hombre. . .
José Martí

1.1. Importancia de las fuentes renovables

Múltiples aristas se encuentran inmersas en la importancia de las fuentes renovables, ya que cada ser humano tiene un interés diferente al respecto. En 1957 ya se tenía el interés de reducir el costo de la energía eléctrica [VADOT, L., 1957], era de suma importancia el diseñar y construir turbinas eólicas que aportaran económicamente en la generación de energía eléctrica y se ignoraba el aporte ambiental que se estaba cimentando, ya que en aquel entonces no se había detonado un cambio climático descomunal como el actual. Para los pioneros en el ramo de generadores eólicos, había dos problemas que no resolvieron en aquellos tiempos: El control de la velocidad para acoplarlo a un generador eléctrico y la manufactura de los perfiles aerodinámicos que requerían. Para lograr lo anterior, se llevó a cabo un desarrollo considerable en electrónica de potencia y manufactura, con lo cual, ya se tienen sistemas eólicos eficientes. Sin embargo, no se ha desarrollado una cultura ambiental con el mismo ahinco de las investigaciones tecnológicas, es decir se avanza en tecnología y se retrocede en cuidado ambiental. Además, muchas de las investigaciones mencionadas, se centran en resolver problemas con un aporte nulo a la conservación natural y por lo tanto, desafortunadamente no se tiene un frente común hacia la mejora del medio ambiente.

La cultura ambiental carente de estos días no es de la generación actual solamente, es un error enorme que se viene cometiendo de generación en generación, en donde se transfieren aspectos de competencia, enriquecimiento, lujo, comodidad, consumismo, etc. Así, las energías renovables tienen un papel sumamente importante en el planeta, son la clave (junto con la cultura ambiental) para lograr un equilibrio entre la tecnología y el medio ambiente, para así lograr la reducción de contaminantes por la quema de recursos fósiles y tener un crecimiento económico sin afectar los recursos naturales.

Para lograr lo anterior, se requiere poner empeño en la educación de niños y jóvenes, ya que es alarmante la ignorancia que se tiene sobre la importancia de las energías renovables y el cambio climático, así lo demuestran algunas de las pocas encuestas al respecto que se han llevado a cabo en instituciones de nivel superior [Oduardo, 2018]. Es indispensable que se valore el alcance de las energías renovables, cada persona capta, transfiere, comparte, refleja o expresa de forma diferente la energía que hay en sí, ya que la naturaleza tiene alcances insospechados. Por ejemplo, para

el cineasta italiano Roberto Benigni [Merino Bobillo, 2008]: *Si no recuerdas la formula, el Amor de mi vida morirá, y sin Ella: Pueden apagar la luz de este mundo, pueden llevarse, descolgar las estrellas, enrollar el cielo y ponerlo en un autobus, pueden apagar este Sol, la oscuridad, si Ella muere ya nada más importará. Esta luz es bellisima, el Sol que Amo tanto, sabe porqué lo Amo tanto? Porque la Amo cuando la ilumina la luz del Sol, tanto que, pueden llevarse todo: estas columnas, estos palacios, la arena, el viento, las ranas, las sandias maduras, el granizo, las siete de la mañana, mayo, junio, julio, la albahacar, las abejas, el mar, las calabazas, calabazas...*

En sí, las energías renovables son tan importantes que aún el ser humano ignora el aporte que tiene en todas las facetas de la vida cotidiana.

1.2. Objetivo

El objetivo primordial es modelar y simular mediante Bond Graph un sistema eólico utilizando una turbina Skystream 3.7 y determinar el efecto que tienen entre si los diferentes subsistemas que conforman dicho sistema de generación eléctrica. Lo anterior para aportar información más precisa para el diseño eficiente de sistemas de generación eólicos de calidad.

1.3. Estado del arte

La turbina Skystream (corriente en el cielo), al igual que otras turbinas eólicas de diversos tamaños han tenido que pasar por un proceso de aceptación por parte de la sociedad; ya que a pesar de su comprobada utilidad energética su uso ha sido de manera gradual. Europa fue el continente pionero en optar por la disminución de su producción energética mediante combustibles fósiles y a su vez, ha aumentado la producción mediante energías renovables, entre ellas mediante energía eólica.

Durante el proceso de aceptación, se puede citar por ejemplo, el caso del país de España; en el cual, al inicio se encontraban renuentes algunos habitantes por el impacto ambiental y paisajístico de las energías renovables, sin embargo, poco después al comprobar sus beneficios y saber que el impacto ambiental es menor que con las energías convencionales, adoptaron positivamente las nuevas tecnologías [Frolova, 2010].

Uno de los países europeos con mayor potencial eólico es Irlanda, en donde se tiene en promedio cuatro veces más potencial eólico que en otros lugares de Europa. Sin embargo, ha sido lento el uso de sistemas eólicos por múltiples factores; políticos, legislación y regulación sobre la implementación, mercado reducido, etc. Cabe señalar que en dicho mercado Irlandés, la turbina Skystream se encuentra disponible, además de que cuenta con certificación tanto en Irlanda como en Ucrania. Se ha demostrado la viabilidad para su uso en dichos países [Li et al., 2012].

En EUA también ha sido notable el uso de turbinas eólicas para generar energía eléctrica, han realizado estudios eólicos en gran parte del país con el fin de encontrar zonas con potencial eólico y analizar las consecuencias económicas que propician la instalación de dichos sistemas, tal es el caso de un estudio realizado en Oklahoma, en el cuál se eligieron cinco sitios diferentes del estado para obtener las características antes mencionadas [Ghaith et al., 2017].

En México actualmente se tienen 46 campos eólicos y 2140 turbinas eólicas, principalmente en los estados de Baja California, Zacatecas, Chiapas, Jalisco, Nuevo León, Oaxaca, San Luis Potosí, Tamaulipas y Puebla. En conjunto representan una capacidad instalada de 4005 MW, con lo cual se contribuye con el 4% del consumo total de energía eléctrica del país, esto avalado por el Global Wind Report, realizado en Bruselas en el 2018. A pesar del desarrollo de campos eólicos, se tiene la problemática añeja que afecta a las comunidades cercanas a los parques eólicos, ya que aunque van en aumento las ganancias obtenidas por la generación de energía eléctrica mediante campos eólicos, los pobladores de las comunidades continúan con carencias sociales que se pensaba disminuirían al entrar en funcionamiento dichos campos eólicos. Se ha convertido en un excelente negocio pero solamente para unos cuantos [Juárez-Hernández and León, 2014].

A nivel global, China lidera la generación de energía eléctrica con 19.7 GW mediante sistemas eólicos, seguida por la Unión Europea con 16.8 GW, que cuenta con múltiples sistemas eólicos ya sea conectados a la red o aislados del sistema eléctrico, cabe destacar el crecimiento considerable que ha tenido la India que ya cuenta con 4 GW instalados en el año 2017, por su parte, los EUA mantienen una sólida capacidad instalada de 7 GW en el mismo año.

La energía eólica es parte fundamental del sistema híbrido (eólico, solar y de almacenamiento) que se pretende sea el sustento energético para las necesidades de la humanidad. Lo anterior es sabido por todos y cada uno de los países del mundo, algunos de ellos ya tienen considerables avances al respecto, incluso hay quienes ya cuentan con los beneficios de dichos sistemas híbridos. Sin duda, será un reto considerable avanzar rápidamente en la implementación de los sistemas mencionados, para contribuir con el alto a la degradación de la naturaleza por el uso de combustibles fósiles para la obtención de energía eléctrica.

A nivel mundial, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) trabaja en un acuerdo para sustituir el protocolo de Kioto, ya que de acuerdo a investigaciones de especialistas, no se llegará al objetivo de limitar el aumento de la temperatura a dos grados a finales de siglo. Ahí se reconoce que no es posible que se siga dotando de subsidios a las energías fósiles por parte del gobierno, ya que no tiene sentido seguir apoyando algo contrario a las energías renovables [Le Quéré et al., 2018].

Respecto a las cuestiones técnicas de la turbina Skystream 3.7, se han realizado investigaciones respecto a la respuesta dinámica de la turbina a diferentes velocidades del viento, así se muestra en investigaciones como en [Cultura and Salameh, 2012], en donde se aprecian los aumentos de corriente de salida al incrementar subitamente los valores de velocidad del viento, además, se concluye que se tiene una salida estable de energía a la salida de la turbina.

En [Rolan et al., 2009], se presenta un modelo de una turbina eólica con un Generador Síncrono de Imanes Permanentes (GSIP), en donde se analizan entradas de velocidad del viento como son: señal tipo rampa, señal tipo ráfaga y señal tipo ruido aleatorio. Cabe mencionar que se utiliza el software de Matlab Simulink como apoyo para la simulación de diversas partes que conforman a una turbina eólica. Al igual en [Stroe et al., 2011], se realiza el modelado y control de velocidad para una turbina eólica con capacidad de generación eléctrica de 2 MW, además de ofrecer una explicación sobre las bondades del GSIP que lo hacen mejor opción frente a otros generadores eléctricos.

Existen múltiples investigaciones sobre el GSIP debido a su eficiencia y ventajas sobre un generador de inducción. En [Patil and Mehta, 2014], se presenta el modelado en Simulink de un GSIP con capacidad de generación de 6 KW, además se indica que su análisis es en un marco de referencia

directo y de cuadratura (dq), similar al optado para la presente investigación.

Al desarrollar una turbina eólica se opta por uno de los tres posibles generadores síncronos existentes en el mercado, para ello, en [Okedu, 2011], se muestran las características de cada uno de ellos, en donde se realiza el modelo de un generador síncrono de 3 MVA con el objetivo de generar hidrogeno a partir de la velocidad del viento. Cabe mencionar que vuelve a sobresalir GSIP, el cual es parte del presente escrito y que además, como se indica en [Ghictua et al., 2008], los GSIP serán utilizados en todo el mundo.

Para el diseño y fabricación de un GSIP, se tiene de referencia [Nanda and Sengupta, 2014], en donde se realiza una investigación analítica y finalmente se construye un GSIP con una capacidad de generación eléctrica de 2 KW. Por otro lado, en [Merzoug et al., 2011] se ofrece el análisis y diseño de un control no lineal para un GSIP utilizando retroalimentación. También, en [Aliprantis et al., 2000], se presenta el modelado y control de una turbina eólica equipada con un GSIP, en donde se enfoca de manera especial en el aspecto eléctrico.

Una variante del modelo de una turbina eólica de pequeña escala, en donde además del modelado y simulación de las diferentes partes que conforman la turbina eólica, se utiliza un controlador a base de un rastreo del punto máximo de potencia (MPPT), se presenta en [Kuldipsinh I Rathod, 2014]. Por otro lado, en [Wang et al., 2014], se presenta un modelo de un control para un GSIP, en donde es sometido a un transitorio electromecánico mediante un corto circuito trifásico.

Una investigación en donde se aborda el control para la velocidad del viento en una turbina eólica con GSIP mediante la metodología de Bond Graph se presenta en [Badoud et al., 2013], en donde también se menciona la importancia de utilizar energías alternas como la eólica.

Respecto a la diversidad de modelos matemáticos existentes y al tipo de solución en base a la problemática, se muestra en [Cellier, 1991] un resumen de modelos matemáticos y la calidad de ellos, así se logra un comparativo con otras técnicas para obtener la solución a un sistema dinámico.

1.4. Contribución

Con el presente trabajo, se contribuye en diferentes aspectos: Primeramente, se realiza un aporte de concientización relativo al cambio climático que requiere atención y contribución inmediata de la humanidad en general. Por otra parte, se logra la difusión de una técnica relativamente nueva en el país, para la solución de sistemas dinámicos como lo es la metodología de Bond Graph. Además, se aporta el modelo en Bond Graph de los los diferentes subsistemas mecánico, eléctrico y electrónico, presentes en la turbina Skystream 3.7; dichos subsistemas, son la apertura a nuevas investigaciones que tengan como objetivo principal, la mejora y manufactura de los sistemas eólicos similares a la tubina Skystream.

1.5. Estructura de la tesis

En este primer Capítulo, se aborda la introducción a las energías renovables, mostrando un panorama tecnológico, social y cultural, haciendo énfasis en la importancia de las mismas. Se indica el objetivo esencial del presente trabajo. También, se da una reseña del estado del arte que guarda la turbina Skystream y la energía eólica a nivel mundial y en específico, algunos datos relevantes de nuestro país. Después, se especifica la contribución de la investigación y finalmente, se define la estructura de la misma.

En el segundo Capítulo, se analiza el modelado de sistemas en Bond Graph; se parte de la importancia de realizar modelado de sistemas, después se define la técnica de Bond Graph, se indican los elementos propios del método, se establece la normativa que rige la metodología en cuestión; así como sus propiedades. También, se indica el procedimiento para la obtención del modelo en Bond Graph de un sistema dinámico y se ejemplifica en diversos campos de energía.

Para el tercer Capítulo, se tienen los por menores de la turbina eólica Skystream; se presenta una breve introducción sobre sus orígenes y utilización a nivel mundial, se indican las características tecnológicas y aspectos económicos de viabilidad, sustentabilidad, áreas de aplicación y certificaciones con que cuenta la turbina, así como algunas muestras de las lecturas de generación en tiempo real de la turbina ubicada en el edificio *Omega I* de la *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en Morelia, México*. Finalmente, se muestra un comparativo entre la turbina Skystream y turbinas de su clase.

El Capítulo cuatro, se presenta la parte medular del presente trabajo llamado *Modelado de la turbina Skystream en Bond Graph*. Se inicia analizando el GSIP, seguido de la técnica matemática denominada *transformación de Park*, para luego hacer uso de la técnica *transformación inversa de Park*, después se muestra el desarrollo en Bond Graph de un *rectificador trifásico de onda completa*, seguido a ello, es presentado un *convertidor boost* y finalmente se presenta un *inversor monofásico tipo puente*. Cabe mencionar que para las diferentes etapas mencionadas para representar la turbina eólica Skystream se muestra: su topología, así como el desarrollo de su modelo equivalente en Bond Graph y su comprobación mediante el software 20Sim.

En el Capítulo número cinco, se presentan las conclusiones y recomendaciones de la presente investigación.

Capítulo 2

Modelado de sistemas en Bond Graph

No podíamos darnos el lujo de echar a la basura un cohete que nos costó millones de dolares.

Elon Musk

2.1. Necesidad de modelar sistemas

Actualmente, al realizar cualquier investigación formal que tenga como fundamento la aplicación del método científico para lograr los resultados esperados, debe apoyarse en el modelado de sistemas, ya que al hacer uso de ellos, se logran mejoras considerables que potencializan la calidad de la investigación. Algunas de las ventajas al modelar sistemas son: reducción considerable del tiempo en el cual se obtienen los resultados de la investigación, se aumenta la seguridad durante la obtención de resultados, ya que no se requiere de exposiciones considerables que pongan en riesgo la integridad del investigador como en investigaciones pioneras de la ciencia en [Ron, 2011]. También, se reducen los costos económicos de la investigación, al realizar simulaciones de los sistemas modelados y no gastar en material y equipo difícil de adquirir.

Cabe mencionar que al modelar sistemas es benéfico el uso de simuladores que realizan de manera óptima los cálculos necesarios para proporcionar el resultado más cercano al real, en si, dichos simuladores realizan una aproximación del sistema físico. Por lo tanto, los simuladores de sistemas, tienen una base matemática que garantiza la obtención de resultados mediante métodos numéricos que han demostrado precisión y exactitud.

2.2. Definición de Bond Graph

Bond Graph es una representación gráfica de un modelo dinámico determinado, dicha técnica fue definida en 1961 por el profesor H. Paynter [Paynter, 1961], formalizada por Karnopp [Karnopp, 1983], Breedvel(1984)[Breedveld, 1984], Rosenberg(1989)[Birkett and Roe, 1989] y Thoma(1991) [Thomas, 1991]. Esta plataforma de modelado se sitúa entre el sistema físico y los modelos matemáticos asociados. La relación anterior se logra mediante elementos conectados entre sí, con los cuales se produce una interacción energética. A dichos elementos se les denomina puertos. Es importante recalcar que la representación gráfica tiene bases matemáticas que garantizan la equivalencia del modelo dinámico en cuestión.

La mayor aportación que tiene Bond Graph en la obtención de modelos dinámicos, es la unificación de sistemas de energía, es decir, mediante un solo Bond Graph se pueden analizar sistemas de diferentes campos de energía. Por ejemplo, un sistema complejo que contenga subsistemas de

naturaleza diferente, se logra con un sólo Bond Graph de manera generalizada. Además, las ecuaciones obtenidas son directamente las variables de energía que se seleccionen al inicio del análisis y no Ecuaciones Diferenciales Ordinarias (EDO) o diagramas de bloques como en otros análisis de modelos dinámicos, en los que incluso es difícil obtener dichas EDO porque se requiere de mucho trabajo algebraico y en ocasiones no se pueden acoplar sistemas complejos, al igual, los modelos obtenidos no guardan similitud con los esquemas originales.

2.2.1. Elementos en Bond Graph

El elemento fundamental de un Bond Graph, es el *Bond*, Figura 2.1, el cual es una semi flecha con la que se interconectan los elementos presentes en la representación gráfica del modelo dinámico e indica el intercambio de potencia entre los puertos del gráfico.

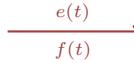


Figura 2.1: Bond con variables de potencia.

La relación anterior de variables de *esfuerzo* $e(t)$ y *flujo* $f(t)$ se puede encontrar en múltiples sistemas dinámicos, por ejemplo al analizar un sistema eléctrico se tendrían variables de voltaje y corriente respectivamente. Por otro lado, al analizar un sistema mecánico se tendrían variables de fuerza y velocidad. Así, a dichas variables se les denomina *variables de bond generalizadas*, ya que pueden ser utilizadas en todos los dominios de energía. La relación de las variables mencionadas esta dada por la ecuación (2.1), en donde se define la potencia, que se encuentra en todos los sistemas dinámicos, lo cual aprovecha la metodología de Bond Graph al existir de manera analoga en todos los sistemas dinámicos.

$$P(t) \triangleq e(t)f(t) \quad (2.1)$$

Así, al existir analogías en cuestión de potencia para los diferentes sistemas dinámicos, se presenta la Tabla 2.1, en donde se aprecian las analogías para diferentes dominios de energía.

Tabla 2.1: Variables generalizadas de diversos dominios de energía.

Dominio	Esfuerzo e	Flujo f	Momento p	Desplazamiento q
M. translacional	Fuerza F	Velocidad v	M. rotacional p_R	Distancia x
M. rotacional	Par M	V angular ω	M. angular h_R	Desp. angular θ
Eléctrico	Voltaje v	Corriente i	Enlace de flujo λ	Carga q
Hidráulico	Presión p	V de flujo Q	M. de flujo Γ	Volumen V

Puertos-1 pasivos

Estos elementos se consideran ideales, los cuales representan disipación de potencia (R) y dos formas de almacenamiento de energía (L y C).

Puertos-1 activos o fuentes

Los elementos que proporcionan energía al sistema se denominan activos, existen dos tipos de fuentes, las cuales son: de esfuerzo (voltaje, fuerza o presión), Figura 2.2 y de flujo (corriente, velocidad o caudal), Figura 2.3. Estos elementos son denotados como MS_e y MS_f .

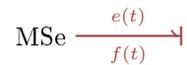


Figura 2.2: Bond con puerto-1 activo MS_e .

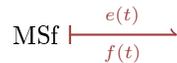


Figura 2.3: Bond con puerto-1 activo MS_f .

Elementos ideales de puerto-2

Se consideran únicamente dos elementos ideales en este rubro, los denominados *transformadores (TF)* y *los giradores (GY)*. Estos elementos, son sistemas lineales que cambian la relación entre las variables de flujo y esfuerzo.

La representación gráfica de los transformadores, Figura 2.4 y giradores, Figura 2.5 en Bond Graph, contiene un elemento modulador, donde n y r son los módulos del transformador y del girador, respectivamente.



Figura 2.4: Bond Graph representativo de un transformador.



Figura 2.5: Bond Graph representativo de un girador.

Las relaciones de las variables de bond generalizadas para el transformador TF , se tienen en las ecuaciones (2.2) y (2.3).

$$e_1(t) = ne_2(t) \quad (2.2)$$

$$f_1(t) = \frac{1}{n}f_2(t) \quad (2.3)$$

Las relaciones de las variables de bond generalizadas para un girador GY, se tienen en las ecuaciones (2.4) y (2.5).

$$e_1(t) = re_2(t) \quad (2.4)$$

$$f_1(t) = \frac{1}{r}f_2(t) \quad (2.5)$$

Es necesario señalar que los dos elementos anteriores juegan un papel de suma importancia dentro del ámbito de Bond Graph, ya que son los encargados de la conversión de potencia de un dominio físico a otro.

Elementos de unión de puerto-3

Son llamados uniones o puertos-3, ya que sirven para conectar 3 o más puertos de energía dentro de un subsistema y representan una de las ideas fundamentales del formalismo de Bond Graph. En forma de multipuerto representan dos tipos de conexiones, serie y paralelo.

La unión de flujo, unión-0 o unión de esfuerzo común para representar una conexión en paralelo se muestra en la Figura 2.6.

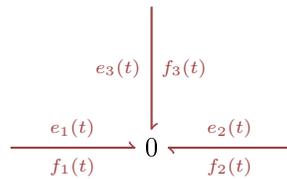


Figura 2.6: Unión -0.

Las relaciones de interconexión para el elemento de la unión -0 se muestran en las ecuaciones (2.6) y (2.7). Es notorio que en la unión -0 los bonds incidentes tienen un esfuerzo común, mientras que la suma de los flujos es igual a cero.

$$e_1(t) = e_2(t) = e_3(t) \quad (2.6)$$

$$f_1(t) + f_2(t) + f_3(t) = 0 \quad (2.7)$$

La Figura 2.7, muestra la unión-1, la cual representa la conexión serie, unión de esfuerzo o flujo común.

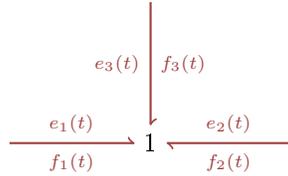


Figura 2.7: Unión -1.

Las relaciones de interconexión para el elemento de la unión -1 se muestran en (2.8) y (2.9). Es notorio que en la unión -1 los bonds incidentes tienen un flujo común y la suma de los esfuerzos es igual a cero.

$$f_1(t) = f_2(t) = f_3(t) \quad (2.8)$$

$$e_1(t) + e_2(t) + e_3(t) = 0 \quad (2.9)$$

Bond activo

Un bond activo, Figura 2.8, es a diferencia de un bond normal, una flecha completa. Dicho bond se utiliza para enlazar alguna de las dos señales presentes en alguna unión, es decir, puede enlazar esfuerzo $e(t)$ o flujo $f(t)$. Además, se considera que un bond activo tiene un consumo nulo de potencia, así el uso de un bond activo no afecta el balance de energía presente en el Bond Graph del modelo que se este analizando.



Figura 2.8: Bond activo.

En la Figura 2.9, se muestra un ejemplo del uso de un bond activo, en el cual se tiene en la parte izquierda una unión-0 con tres bonds normales, seguida del bond activo que transfiere el esfuerzo $e_4(t)$ hacia la fuente MS_e que se encuentra interconectada en la unión-1 conformada de cuatro bonds normales. En la unión-0 los esfuerzos son iguales incluyendo el esfuerzo $e_4(t)$ que representa al bond activo, sin embargo la suma de los flujos en dicha unión no considera el valor de $f_4(t)$, ya que se considera que un bond activo no genera modificación en la potencia o energía en el sistema analizado.

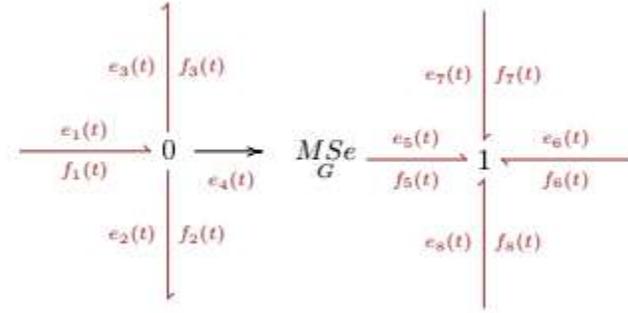


Figura 2.9: Bond Graph con un bond activo.

El valor del esfuerzo $e_5(t)$ es modulado por el esfuerzo $e_4(t)$ transferido por el bond activo, así el valor del esfuerzo $e_5(t)$ se obtiene:

$$e_5(t) = Ge_4(t) \quad (2.10)$$

donde G , representa la ganancia de voltaje.

La ecuación (2.11), corresponde a los esfuerzos presentes en la unión-0, en donde se observa que todos los esfuerzos son iguales incluyendo el bond activo $e_4(t)$.

$$e_1(t) = e_2(t) = e_3(t) = e_4(t) \quad (2.11)$$

Para obtener los flujos en la unión-0, se presenta la ecuación (2.12), en donde se observa que no influye el flujo $f_4(t)$, ya que se desprecia el consumo de potencia y energía que el bond activo tiene.

$$f_1(t) = f_2(t) + f_3(t) \quad (2.12)$$

Analizando los flujos presentes en la unión-1, ecuación (2.13), se observa que los flujos son iguales.

$$f_5(t) = f_6(t) = f_7(t) = f_8(t) \quad (2.13)$$

Por otro lado, la suma de los esfuerzo en la unión-1 para este caso, es igual a cero como se observa en la ecuación (2.14).

$$e_5(t) + e_6(t) + e_7(t) + e_8(t) = 0 \quad (2.14)$$

2.2.2. Causalidad

Los componentes presentes en un Bond Graph se rigen por leyes constitutivas, para ello es necesario definir relaciones de causa y efecto. Las relaciones de causa-efecto para esfuerzos y flujos son representadas en direcciones opuestas y para lograr identificar la causalidad, se hace uso de una marca en un bond, a la cual se le denomina *trazo causal*. A continuación, se muestran algunos ejemplos de causalidad.

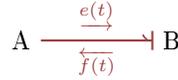


Figura 2.10: Ejemplo 1 de asignación de causalidad.

En la Figura 2.10, se observa un bond con un esfuerzo $e(t)$ en sentido AB y un flujo $f(t)$ con sentido BA con la causalidad asignada en la parte final del bond.

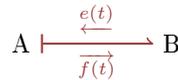


Figura 2.11: Ejemplo 2 de asignación de causalidad.

En la Figura 2.11, se observa un bond con un esfuerzo $e(t)$ en sentido BA y un flujo $f(t)$ con sentido AB con la causalidad asignada en la parte inicial del bond.

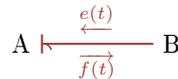


Figura 2.12: Ejemplo 3 de asignación de causalidad.

En la Figura 2.12, se observa un bond con un esfuerzo $e(t)$ en sentido AB y un flujo $f(t)$ con sentido BA con la causalidad asignada en la parte final del bond.

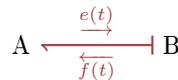


Figura 2.13: Ejemplo 4 de asignación de causalidad.

En la Figura 2.13, se observa un bond con un esfuerzo $e(t)$ en sentido BA y un flujo $f(t)$ con sentido AB con la causalidad asignada en la parte inicial del bond. Es importante notar que el esfuerzo siempre apunta hacia la causalidad.

A continuación se muestra un ejemplo en donde se tiene una unión-0, Figura 2.14, sin asignar un trazo causal. Las ecuaciones de esfuerzo (2.15) y flujo (2.16) se obtienen únicamente en base a la dirección de los bonds.

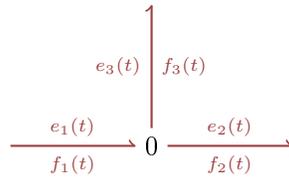


Figura 2.14: Unión -0 sin causalidad.

$$e_1(t) = e_2(t) = e_3(t) \quad (2.15)$$

$$f_1(t) - f_2(t) - f_3(t) = 0 \quad (2.16)$$

Al asignar un trazo causal a la unión-0, Figura 2.15, se observa que los esfuerzos, por regla, siguen siendo los mismos, sin embargo el flujo ($f_1(t)$), ahora sale de la unión-0, lo que arroja una lectura clara de la obtención correcta de las ecuaciones de esfuerzo (2.17 y 2.18) y flujo (2.19).

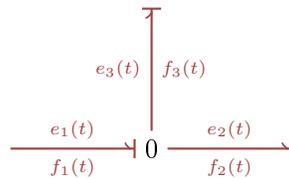


Figura 2.15: Unión -0 con causalidad.

$$e_2(t) = e_1(t) \quad (2.17)$$

$$e_3(t) = e_1(t) \quad (2.18)$$

$$f_1(t) = f_2(t) + f_3(t) \quad (2.19)$$

En la Figura 2.16, se muestran las consideraciones que se deben tener para cada uno de los elementos presentes en un diagrama de Bond Graph.

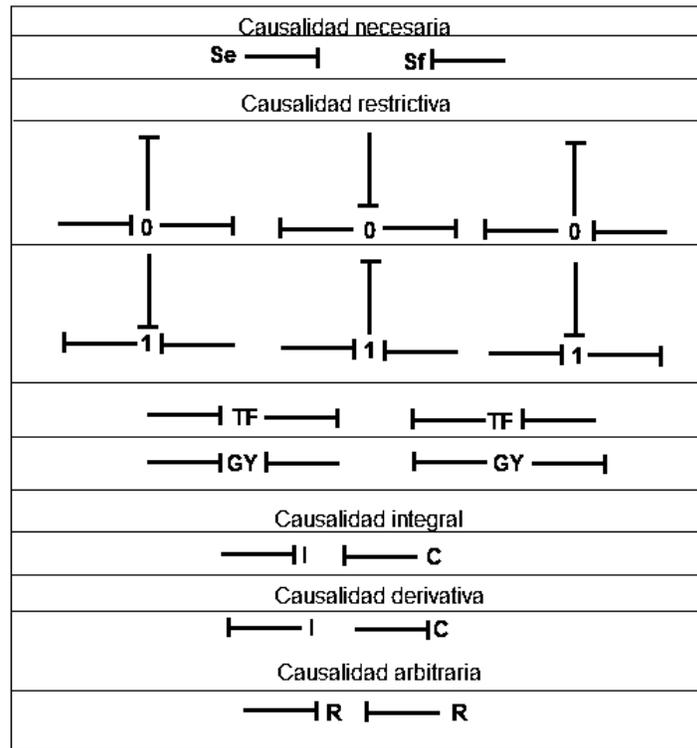


Figura 2.16: Consideraciones de causalidad para elementos en Bond Graph.

2.2.3. Procedimiento para asignación de causalidad

1. Identificar primeramente cualquier elemento fuente de esfuerzo (MS_e) o de flujo (MS_f) y asignarle su causalidad requerida, para después, asignar la causalidad de los demás elementos ($0, 1, TF$ Y GY) haciendo uso de las restricciones de cada uno de ellos, como se muestra en la Figura 2.16.
2. Asignar causalidad integral a los elementos C e I , tomando en cuenta las restricciones para cada elemento tal y como se muestra en la Figura 2.16.
3. Para los elementos disipadores R , la asignación de causalidad se realiza después de todos los elementos mencionados en los puntos 1 y 2, ya que pueden tener causalidad arbitraria, es decir, resistencia o conductancia. Se dejan al final los elementos R con la finalidad de procurar asignar la mayor cantidad de causalidades integrales en los elementos de almacenamiento.

Un Bond Graph es causalmente correcto, cuando no existe conflicto de causalidad entre los elementos o uniones del Bond Graph.

2.2.4. Causalidad derivativa en Bond Graph

Si al realizar la asignación de causalidad a cada uno de los elementos de un diagrama de Bond Graph y se tiene un conflicto debido a que no es posible asignar causalidad integral a todos los elementos almacenadores de energía, se requiere asignar una causalidad derivativa, esto lo propician elementos almacenadores de energía que no son dinámicamente independientes, por ejemplo, al tener dos capacitores conectados en paralelo en un circuito eléctrico se produce el caso en el cual se requiere la aplicación de causalidad derivativa, en la Figura 2.17, se encuentra ejemplificado el caso mencionado.

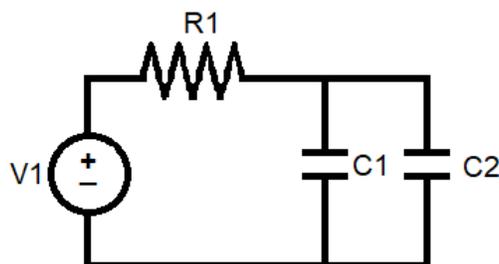


Figura 2.17: Circuito con características para asignación de causalidad derivativa.

En la Figura 2.18, se observa que el elemento almacenador de energía $C1$ tiene asignación de causalidad derivativa.

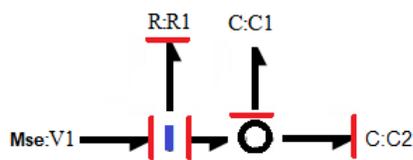


Figura 2.18: Diagrama de Bond Graph con causalidad derivativa en $C1$.

En la Figura 2.19, se observa que el elemento almacenador de energía $C2$ tiene asignación de causalidad derivativa, por lo que solamente uno de los dos elementos almacenadores puede tener causalidad integral, en este caso $C1$.

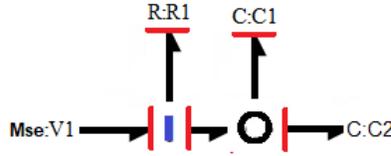


Figura 2.19: Diagrama de Bond Graph con causalidad derivativa en $C2$.

Cabe señalar que al asignar la causalidad del diagrama de Bond Graph, se puede observar el número y tipo de ecuaciones que tendrá el modelo matemático del sistema dinámico. Se define que el número de elementos con causalidad integral es igual al número de ecuaciones diferenciales linealmente independientes y el número de elementos almacenadores con asignación de causalidad derivativa corresponden al número de ecuaciones diferenciales linealmente dependientes.

2.2.5. Metodología para el modelado de sistemas en Bond Graph

Existe una metodología base para obtener el modelo en Bond Graph de un sistema dinámico, por ejemplo: sistema mecánico, eléctrico, magnético, químico, hidráulico, neumático, etc. Para ello, se hace uso de los elementos y simbología mostrada con anterioridad. A continuación se enumeran los pasos para realizar el Bond Graph de un sistema elegido para analizar.

1. Colocar una unión-0 en cada punto dentro del esquema en donde las trayectorias paralelas coincidan.
2. Colocar una unión-1 en cada punto en una trayectoria serie y conectar el elemento apropiado de Bond Graph mediante un bond en esa unión. La dirección de la semiflecha en cada bond indica la dirección que se asume de la potencia, se parte de fuentes hacia elementos almacenadores y elementos disipadores.
3. Dibujar bonds entre las uniones adyacentes siguiendo con la asignación de una dirección para cada bond que indique el flujo de potencia.
4. Se elimina la unión-0 que represente la referencia, así mismo, se remueven los bonds conectados a dicha unión de referencia.
5. El Bond Graph se simplifica tomando en cuenta las equivalencias de la Figura 2.20.



Figura 2.20: Simplificación en uniones de Bond Graph.

2.2.6. Estructura de unión

Cuando se ha desarrollado un Bond Graph, se pueden clasificar los bonds en externos e internos. Para los primeros, son válidos los bonds asociados con elementos o puertos (R , C , I , MS_e , MS_f y D), y para los bonds internos se consideran los bonds asociados con los elementos (0 , 1 , TF y GY). Así, se puede resumir lo anterior en la Figura 2.21, en donde se tiene un diagrama de bloques que representa la estructura de unión del Bond Graph en general.

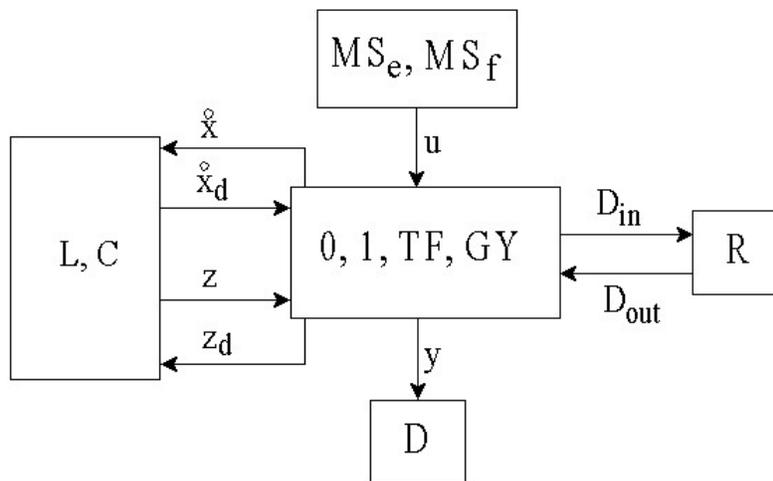


Figura 2.21: Diagrama de bloques de la estructura de unión de un Bond Graph.

Los vectores representativos del sistema mostrado en la Figura 2.21, son llamados *vectores clave*, donde $u(t) \in \mathcal{R}^p$ contiene las variables de entrada, es decir, los esfuerzos y flujos impuestos por los elementos de las fuentes de la estructura de unión. Los estados $x(t) \in \mathcal{R}^n$ y $x_d(t) \in \mathcal{R}^m$ se componen de variables de energía, momento generalizado $p(t)$ en elementos almacenadores I en causalidad integral y desplazamiento generalizado $q(t)$ en elementos almacenadores C en causalidad integral; $z(t) \in \mathcal{R}^n$ y $z_d(t) \in \mathcal{R}^m$ son variables de co-energía en causalidad integral y derivativa, respectivamente, además $D_{in}(t) \in \mathcal{R}^r$ y $D_{out}(t) \in \mathcal{R}^r$ son flujos y esfuerzos que denotan los intercambios energéticos entre el campo de disipación y la estructura de unión.

2.2.7. Relaciones de campo, vectores clave y ecuaciones de estado

Las relaciones de campo no lineales de almacenamiento y disipación se muestran en las ecuaciones (2.20), (2.21) y (2.22).

$$z(t) = \Phi_F(t) \quad (2.20)$$

$$z_d(t) = \Phi_{F_d}(x_d) \quad (2.21)$$

$$D_{out}(t) = \Phi_L(D_{in}) \quad (2.22)$$

donde:

Φ_F Denota una función que relaciona cada z_i con x_i para $i = 1, \dots, n$.

Φ_{F_d} Denota una función que relaciona cada z_{di} con x_{di} para $i = 1, \dots, m$.

Φ_L Denota una función que relaciona cada D_{outi} con D_{ini} para $i = 1, \dots, r$.

Una relación constitutiva es aquella que describe el comportamiento de un elemento específico mediante una ley física. Así, si las relaciones constitutivas son lineales, se tienen las ecuaciones (2.23), (2.24) y (2.25).

$$z(t) = Fx(t) \quad (2.23)$$

$$z_d(t) = F_d x_d(t) \quad (2.24)$$

$$D_{out}(t) = LD_{in}(t) \quad (2.25)$$

donde L , F y F_d son matrices reales de dimensión rxr , nxn y mxm , respectivamente.

Las relaciones de la estructura de unión están dadas por (2.26) y (2.27).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ D_{in}(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} z(t) \\ D_{out}(t) \\ u(t) \\ \dot{x}_d(t) \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$z_d(t) = -S_{14}^T z(t) \quad (2.27)$$

donde la estructura de unión está formada por:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ D_{in} \\ y \\ z_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 \\ S_{41} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ D_{out} \\ u \\ \dot{x}_d \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Las relaciones de la estructura de unión están dadas en (2.28), en donde los elementos de la estructura de unión S , toman valores de $(0, \pm 1, \pm n, \pm r)$, donde n y r son los módulos del transformador y del girador, respectivamente.

2.2.8. Propiedades

Para saber si un diagrama de Bond Graph es correcto, las submatrices S_{ij} de (2.28) deben de cumplir con dos propiedades, las cuales tienen presentes elementos propios del sistema de ecuaciones generado.

$$P1. - S_{11} \text{ y } S_{22} \text{ Son matrices cuadradas antisimétricas.} \quad (2.29)$$

$$P2. - S_{12} \text{ Es la matriz transpuesta negativa de } S_{21} \text{ y viceversa.} \quad (2.30)$$

Dichas propiedades tienen fundamento en base a la ley de conservación de la energía, por lo que, al cumplir tanto $P1$ como $P2$ es certeza de la validez del diagrama planteado el cual representa al sistema dinámico en análisis.

Las ecuaciones (2.31) y (2.32), representan las ecuaciones de estado del sistema dinámico, las cuales contienen las variables de estado que representan directamente a las variables físicas del sistema de energía en cuestión, lo que favorece un análisis rápido y seguro del modelo matemático.

$$\dot{x}(t) = A_p x(t) + B_p u(t) \quad (2.31)$$

$$y(t) = C_p x(t) + D_p u(t) \quad (2.32)$$

donde:

$$A_p = E^{-1}(S_{11} + S_{12}MS_{21})F \quad (2.33)$$

$$B_p = E^{-1}(S_{13} + S_{12}MS_{23}) \quad (2.34)$$

$$C_p = (S_{31} + S_{32}MS_{21})F \quad (2.35)$$

$$D_p = (S_{33} + S_{32}MS_{23}) \quad (2.36)$$

siendo,

$$E = I + S_{14}F_d^{-1}S_{14}^T F \quad (2.37)$$

$$M = L(I - S_{22}L)^{-1} \quad (2.38)$$

2.2.9. Ejemplo sobre el uso de la metodología de Bond Graph en un sistema eléctrico

A continuación se presenta el uso de la metodología de Bond Graph para resolver un sistema dinámico, en este caso, un circuito eléctrico, Figura 2.22. Dicho sistema consta de un total de siete elementos, entre los cuales se tienen elementos de unión-1 pasivos ($R1$, $R2$, $R3$, $C1$, $L1$) y elementos de unión-1 activos ($V1$ y $V2$).

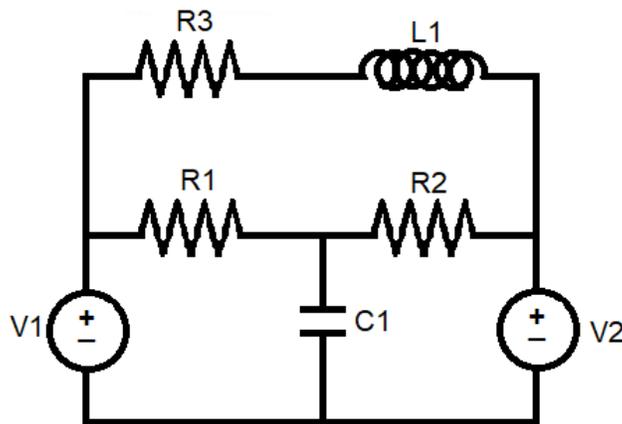


Figura 2.22: Circuito eléctrico para aplicar la metodología de Bond Graph.

Como se mencionó en este mismo capítulo, el primer paso para realizar un diagrama de Bond Graph es asignar una unión-0 en cada punto en donde las trayectorias paralelas coincidan; para el ejemplo en cuestión se tienen cinco puntos de coincidencia, Figura 2.23. Así, se colocan las uniones-0 y se les asigna una variable para mejor ubicación dentro del esquema.

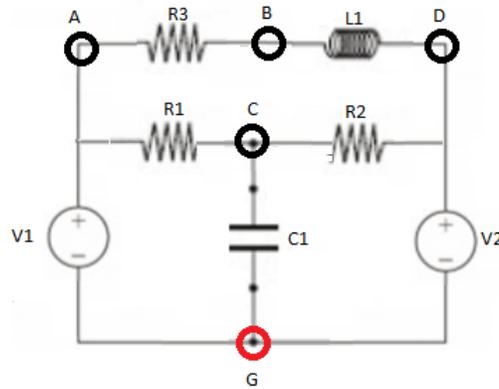


Figura 2.23: Colocación de uniones-0 para iniciar el Bond Graph.

Como segundo paso se asigna una unión-1 en cada punto en una trayectoria serie, Figura 2.24, además de conectar el elemento apropiado de Bond Graph en esa unión. Se debe recordar que el sentido de la semiflecha indica la dirección de la potencia de cada bond se asume en base al tipo de elemento, primeramente se inicia de las fuentes hacia elementos almacenadores y elementos disipadores respectivamente.

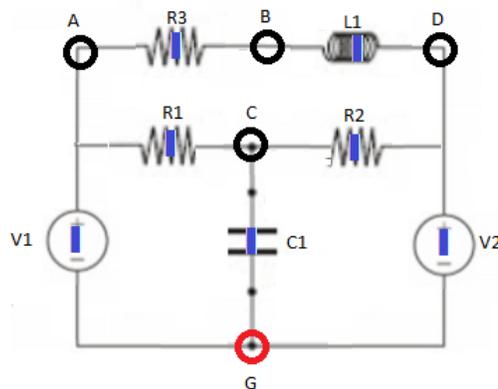


Figura 2.24: Colocación de uniones-1 para iniciar el Bond Graph.

También se dibujan bonds entre las uniones adyacentes manteniendo una dirección en cada bond que indique el flujo de potencia como se muestra en la Figura 2.25.

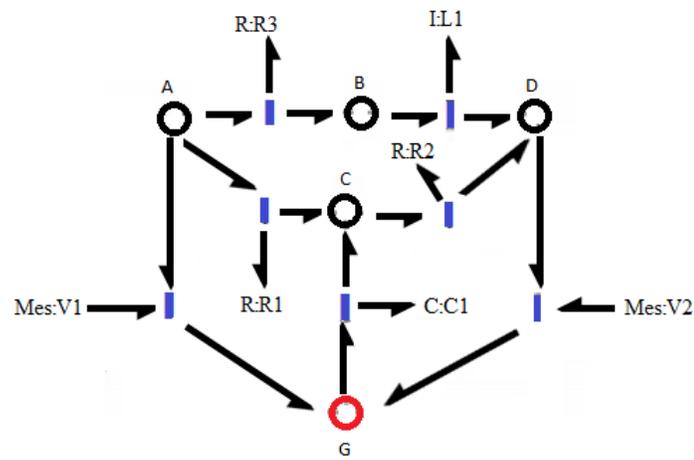


Figura 2.25: Colocación de bonds adyacentes en el diagrama de Bond Graph.

Como paso siguiente se elimina la unión-0 de referencia, así como cada uno de los bonds conectados a dicha unión, Figura 2.26.

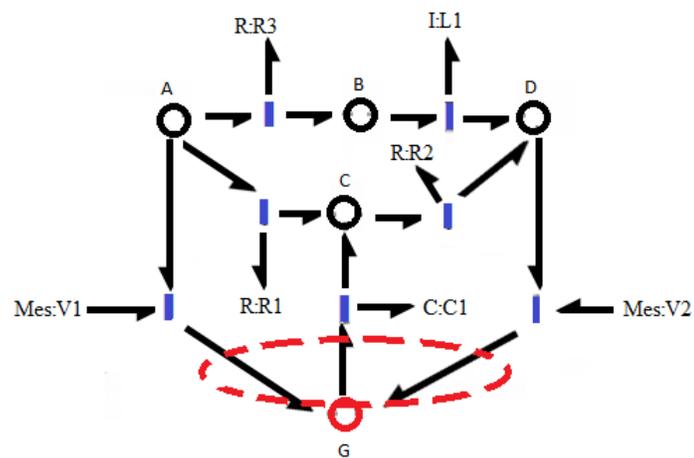


Figura 2.26: Removiendo unión-0 de referencia en el diagrama de Bond Graph.

Al reducir el diagrama de Bond Graph se obtiene un modelo simplificado como se muestra en la Figura 2.29. Notese que dicho diagrama aún no cuenta con causalidad alguna.

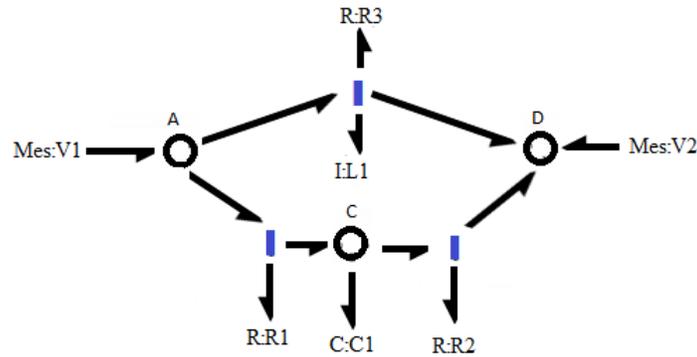


Figura 2.29: Diagrama simplificado en Bond Graph representativo del circuito eléctrico.

Ya que se tiene el diagrama de Bond Graph simplificado se asigna causalidad a todos los elementos del diagrama, Figura 2.30. Para ello se inicia con los elementos fuente de esfuerzo MS_e , después se le asigna causalidad a las uniones 0 y 1 con sus debidas restricciones. Finalmente se le asigna causalidad integral a los elementos C e I. Al terminar de asignar la causalidad al digrama de Bond Graph es conveniente asignar un número a cada uno de los bonds presentes en el diagrama, lo anterior como referencia para los pasos siguientes en la obtención del modelo en ecuaciones de estado. Para este ejemplo se tiene un total de trece bonds, los cuales se enumeran de manera arbitraria.

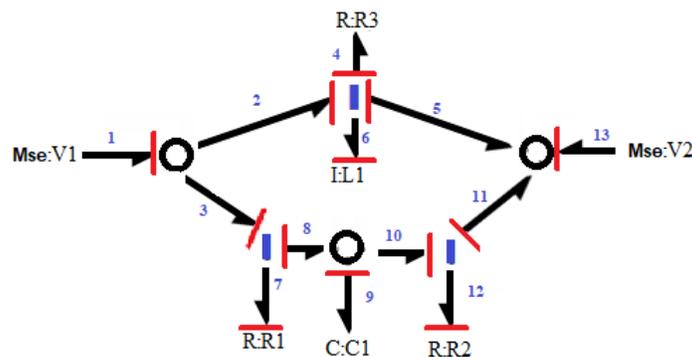


Figura 2.30: Diagrama de Bond Graph con causalidad asignada.

A partir del diagrama de Bond Graph se obtienen los vectores clave representativos del sistema para obtener las ecuaciones de estado equivalentes al sistema dinámico del circuito eléctrico.

$$u = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_{13} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

$$x = \begin{bmatrix} p_6 \\ q_9 \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} e_6 \\ e_{f9} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

$$z = \begin{bmatrix} f_6 \\ e_9 \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

$$D_{in} = \begin{bmatrix} f_4 \\ e_7 \\ e_{12} \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

$$D_{out} = \begin{bmatrix} e_4 \\ f_7 \\ f_{12} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

Al utilizar la ecuación (2.20) se requiere definir F de la ecuación (2.45) en base a la información del Bond Graph, así, se define como la matriz representativa de los elementos almacenadores de energía, en este caso solamente se tienen dos, el elemento L1 y el C1.

$$F = \text{diag} \{1/L_1, 1/C_1\} \quad (2.45)$$

$$\begin{bmatrix} f_6 \\ e_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/L_1 & 0 \\ 0 & 1/C_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_6 \\ q_9 \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

$$L = \text{diag} \{1/R_1, 1/R_2, R_3\} \quad (2.47)$$

$$\begin{bmatrix} e_4 \\ f_7 \\ f_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/R_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/R_2 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_4 \\ e_7 \\ e_{12} \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

$$\begin{bmatrix} e_6 \\ f_9 \\ f_4 \\ e_7 \\ e_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_6 \\ e_9 \\ e_4 \\ f_7 \\ f_{12} \\ e_1 \\ e_{13} \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

Para saber si el Bond Graph planteado es correcto es necesario cumplir con las dos propiedades mencionadas con anterioridad, para ello, se presenta la Figura 2.31, en donde se observa la selección de cada una de las submatrices de interés.

$$\begin{bmatrix} e_6 \\ f_9 \\ f_4 \\ e_7 \\ e_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boxed{\begin{matrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{matrix}}_{S_{11}} & -1 & \boxed{\begin{matrix} 0 & 0 \\ 1 & -1 \end{matrix}}_{S_{12}} & \boxed{\begin{matrix} 1 & -1 \\ 0 & 0 \end{matrix}}_{S_{13}} \\ \boxed{1} & 0 & \boxed{\begin{matrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{matrix}}_{S_{22}} & \boxed{\begin{matrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{matrix}}_{S_{23}} \\ \boxed{0} & \boxed{-1}_{S_{21}} & \boxed{\begin{matrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{matrix}}_{S_{32}} & \boxed{\begin{matrix} 0 & -1 \end{matrix}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_6 \\ e_9 \\ e_4 \\ f_7 \\ f_{12} \\ e_1 \\ e_{13} \end{bmatrix}$$

Figura 2.31: Verificación de propiedades en Bond Graph.

En la Figura 2.31, se muestra que tanto la submatriz S_{11} y S_{22} son cero, así que la propiedad número uno referente a la simetría queda cumplida. Además, se aprecia que la submatriz S_{21} es la transpuesta negativa de S_{12} , así, ambas propiedades quedan cumplidas y se puede seguir con el proceso para la obtención del modelo en Bond Graph del circuito eléctrico planteado.

Para obtener el equivalente de M se toma de referencia la ecuación (2.38), sin embargo al observar que la submatriz $S_{22} = 0$ se simplifica su obtención, la cual corresponde directamente al valor de L , así $M=L$.

Utilizando la ecuación (2.38) y la información de los vectores provenientes de los vectores clave del diagrama de Bond Graph, se obtiene la matriz A , presentado en la ecuación (2.50).

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{-R_1 L_1} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_1 R_2} - \frac{R_3}{C_1} \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

Para la obtención de la matriz B, se utiliza la ecuación (2.34)

$$B = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -\frac{1}{R_2} & R_3 \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

Finalmente, al mostrar las matrices anteriores como parte de las ecuaciones de estado tal y como se muestra en la ecuación (2.31), se obtiene el modelo matemático que representa el comportamiento del sistema eléctrico planteado, se muestra en la ecuación (2.52).

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_1 L_1} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_1 R_2} - \frac{R_3}{C_1} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -\frac{1}{R_2} & R_3 \end{bmatrix} u \quad (2.52)$$

Después de obtener el modelo matemático del sistema dinámico es recomendable el uso de un software de modelado especializado para la metodología Bond Graph, para ello, se utiliza el software 20Sim, Figura 2.32, en donde se observa la versión y lugar de creación.



Figura 2.32: Software 20Sim.

En la Figura 2.33, se presenta el aspecto del software 20Sim, en donde se realiza la simulación del diagrama de Bond Graph.

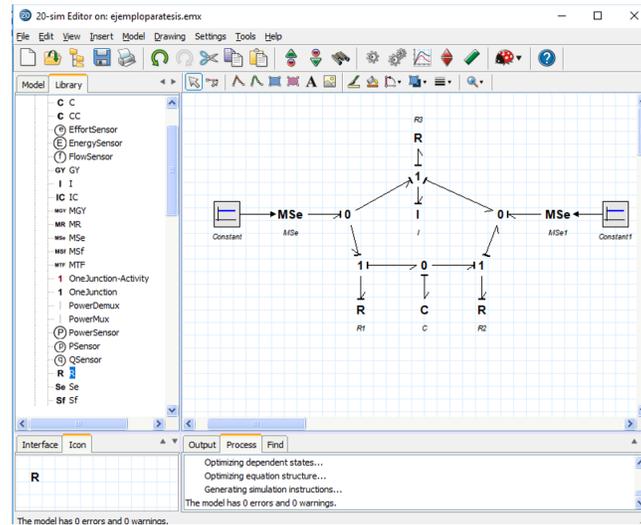


Figura 2.33: Bond Graph del circuito eléctrico en 20Sim.

Al compilar el programa y verificar la ausencia de errores es posible obtener de manera gráfica o numérica cualquiera de las variables presentes en el circuito planteado inicialmente. En este caso, se observa el comportamiento de la corriente en el inductor $L1$ y el comportamiento del voltaje en el elemento $C1$, Figura 2.34.

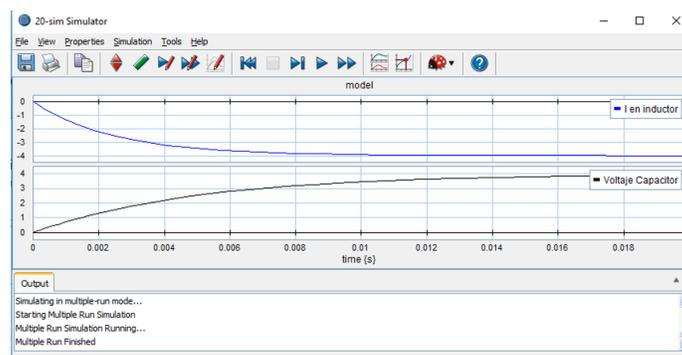


Figura 2.34: Prueba del Bond Graph planteado sobre el circuito eléctrico en 20Sim.

2.2.10. Ejemplo sobre el uso de la metodología de Bond Graph en un sistema mecánico

A continuación se presenta un sistema mecánico, con el cual se ejemplifica la metodología de Bond Graph, con el objetivo de comprobar las analogías existentes de potencia en los diferentes sistemas dinámicos. El sistema mecánico por desarrollar en Bond Graph, consta de tres elementos móviles denotados como 1, 2 y 3. Estos a su vez, se encuentran entrelazados mediante elementos almacenadores de energía como lo son los resortes, además de elementos que producen fricción. Cabe mencionar, que también se tiene un elemento fuente de esfuerzo, en este caso, la fuerza $F(t)$ aplicada en el sentido que indica la Figura 2.35.

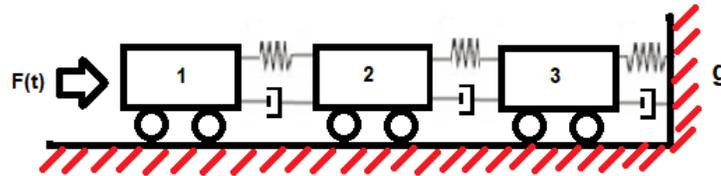


Figura 2.35: Sistema mecánico para analizar en Bond Graph.

Al iniciar el Bond Graph representativo del sistema mecánico, se colocan tanto las uniones-0 como las uniones-1, Figura 2.36, en donde las uniones-1 representan el punto en donde interesa conocer la velocidad, por lo tanto, se tiene desde V_1 hasta V_g . Las uniones-0 representan los elementos interconectados entre las uniones-1, en este caso los elementos almacenadores de energía C y los elementos disipadores.

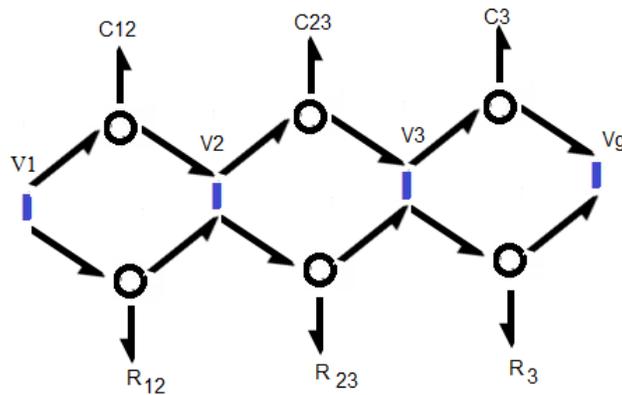


Figura 2.36: Bond Graph inicial para uniones-0 y uniones-1.

En la Figura 2.37, se observa la inclusión de los elementos almacenadores I pertenecientes a cada una de las inercias de los tres vehículos. Además, se muestra el lugar de donde se elimina la referencia Vg , ya que en ese punto se tiene una velocidad cero por estar sujeta al muro. También, se agrega el elemento fuente de esfuerzo representativo de la fuerza aplicada $F(t)$ al sistema.

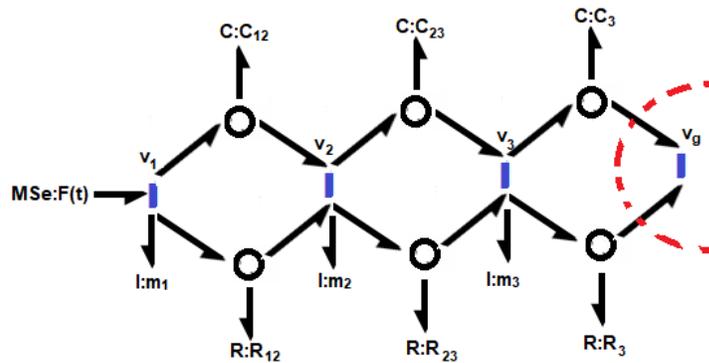


Figura 2.37: Bond Graph con referencia.

Luego de retirar la referencia y los bonds aledaños a esta, se presenta el diagrama reducido, Figura 2.38, en donde únicamente se encuentran tres elementos unión-1 relativos a las tres velocidades en cuestión.

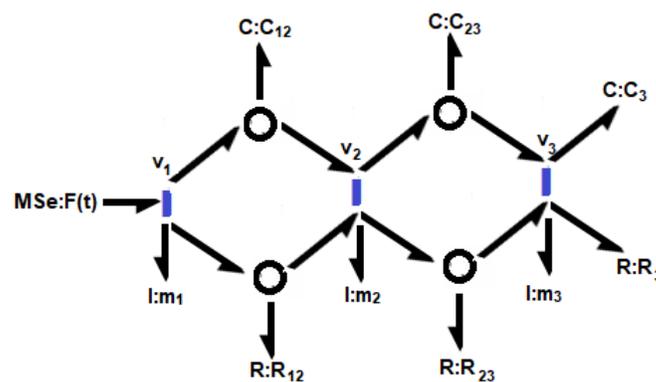


Figura 2.38: Bond Graph sin referencia .

En la Figura 2.38, se observa que las uniones-0 pueden reducirse, así, se obtiene el Bond Graph reducido como se muestra en la Figura 2.39.

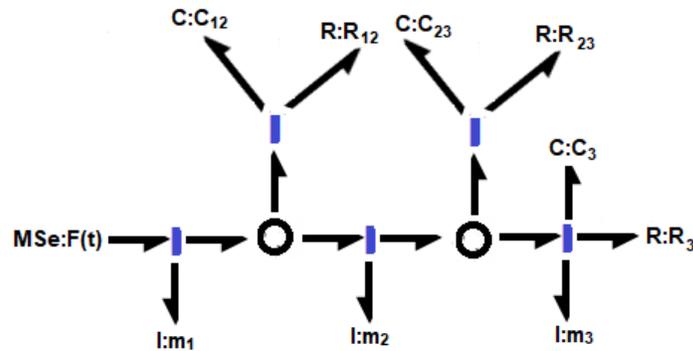


Figura 2.39: Bond Graph reducido acausal.

Para obtener el diagrama completo de Bond Graph que representa al sistema mecánico, es necesario colocar la causalidad a cada uno de los bonds, tal y como se muestra en la Figura 2.40, en donde se tiene un diagrama con un total de dieciséis bonds.

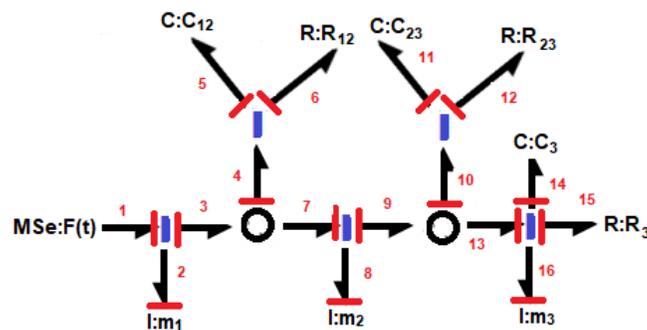


Figura 2.40: Bond Graph causal del sistema mecánico planteado.

Luego de obtener el diagrama completo de Bond Graph del sistema mecánico, se obtienen los vectores clave. El primer vector es referente al elemento fuente de esfuerzo u , el cual aparece en la ecuación (2.53).

$$u = e_1 \quad (2.53)$$

El vector x referente a los elementos almacenadores se presenta en (2.54).

$$x = \begin{bmatrix} p_2 \\ p_8 \\ p_{16} \\ q_5 \\ q_{11} \\ q_{14} \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

El vector de estados \dot{x} , queda como se muestra en (2.55).

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} e_2 \\ e_8 \\ e_{16} \\ f_5 \\ f_{11} \\ f_{14} \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

El vector de estados z , queda como se muestra en (2.56).

$$z = \begin{bmatrix} f_2 \\ f_8 \\ f_{16} \\ e_5 \\ e_{11} \\ e_{14} \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

Al obtener los vectores clave que representan a los elementos disipadores, se obtienen (2.57) y (2.58).

$$D_{in} = \begin{bmatrix} f_6 \\ f_{12} \\ f_{15} \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

$$D_{out} = \begin{bmatrix} e_6 \\ e_{12} \\ e_{15} \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

Previo a la obtención del modelo matemático que representa al sistema mecánico, se obtienen las matrices F y L , relativas a los elementos almacenadores de energía y disipadores respectivamente, las cuales se muestran en (2.59) y (2.60).

$$F = \text{diag}\left\{\frac{1}{m_1}, \frac{1}{c_{12}}, \frac{1}{m_2}, \frac{1}{c_{23}}, \frac{1}{m_3}, \frac{1}{c_3}\right\} \quad (2.59)$$

$$L = \text{diag}\{R_{12}, R_{23}, R_3\} \quad (2.60)$$

Al unir los vectores para obtener la estructura de unión en base a la ecuación (2.26), se tiene (2.61).

$$\begin{bmatrix} e_2 \\ e_8 \\ e_{16} \\ f_5 \\ f_{11} \\ f_{14} \\ f_6 \\ f_{12} \\ f_{15} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_2 \\ f_8 \\ f_{16} \\ e_5 \\ e_{11} \\ e_{14} \\ e_6 \\ e_{12} \\ e_{15} \\ e_1 \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

Para corroborar el diagrama de Bond Graph planteado, se requiere verificar la estructura de unión obtenida mediante las dos propiedades relativas a la conservación de energía mencionadas en (2.29) y (2.30). Así, se obtiene la estructura mostrada en la Figura 2.41.

$$\begin{bmatrix} e_2 \\ e_8 \\ e_{16} \\ f_5 \\ f_{11} \\ f_{14} \\ f_6 \\ f_{12} \\ f_{15} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_2 \\ f_8 \\ f_{16} \\ e_5 \\ e_{11} \\ e_{14} \\ e_6 \\ e_{12} \\ e_{15} \\ e_1 \end{bmatrix}$$

Figura 2.41: Verificación de las propiedades de conservación de la energía.

Finalmente, al revisar que la estructura de unión es correcta, se obtiene el modelo matemático del diagrama en Bond Graph que representa al sistema mecánico planteado, el cual se muestra en la ecuación (2.62).

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -R_{12}/m_1 & R_{12}/C_{12} & 0 & -1/C_{23} & 0 & 0 \\ R_{12}/m_1 & -(R_{12} + R_{23})/C_{12} & R_{23}/m_2 & 1/C_{23} & -1/m_3 & 0 \\ 0 & R_{23}/C_{12} & -(R_3 + R_{23})/m_2 & 0 & 1/m_3 & -1/C_3 \\ 1/m_1 & -1/C_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/C_{12} & -1/m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/m_2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (2.62)$$

Capítulo 3

La turbina eólica Skystream

Solo si nos detenemos a pensar en las pequeñas cosas llegaremos a comprender las grandes.
José Saramago

3.1. Introducción

La turbina eólica Skystream pertenece a las turbinas pequeñas de generación eléctrica, ya que logra generar 2.4 KWH, sin embargo, tiene múltiples cualidades que la catalogan como una de las mejores en su ramo. Fue desarrollada en Colorado, EUA y desde su fabricación ha ido en aumento su comercialización a nivel mundial. En agosto de 2006 que inició su comercialización en Arizona, aún se pensaba que la energía eólica solamente se generaba a gran escala con enormes rotores y lugares remotos fuera de las ciudades. Sin embargo, la turbina Skystream rompió con esos esquemas, ya que empezó a aparecer en los jardines de las residencias, Figura 3.1, en plazas públicas, en oficinas de gobierno, etc. Lo más sorprendente de esta turbina, era que a parte aportaba múltiples beneficios, ya que contaba con una eficiencia mayor que las turbinas tradicionales, además de que esteticamente no contrastaba con la apariencia de los lugares donde se colocaba y lo más importante, aminoraba el costo de la energía eléctrica [Jones, 2006].

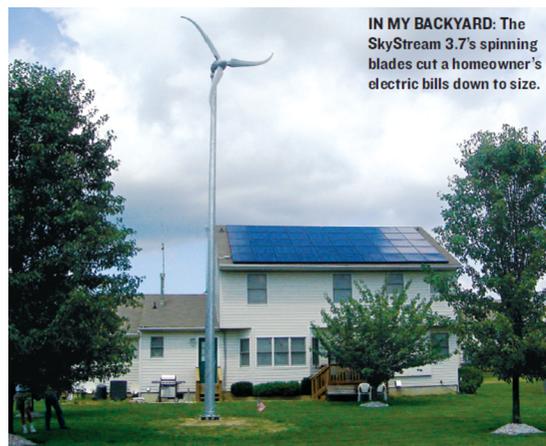


Figura 3.1: Turbina eólica Skystream en jardines de EUA.

3.2. Características de la turbina Skystream

A continuación se presenta la información que representa y define a una de las turbinas eólicas por excelencia en el mercado de energías renovables de baja potencia, tal como lo es, la turbina eólica Skystream 3.7, la cual se ha posicionado gracias a su calidad y eficiencia comprobadas por usuarios e investigadores de diversas ramas.

3.2.1. Energía del viento

Al analizar las características de una turbina eólica, es fundamental especificar que la transformación de energía mecánica en energía eléctrica, parte del aprovechamiento de la energía cinética del viento; provocada por las corrientes de aire. Así, esta energía es canalizada a través de los álabes de la turbina, los cuales se encuentran acoplados a un generador eléctrico, el que a su vez interactúa con elementos de electrónica de potencia; que permiten acondicionar la energía generada, con el fin de suministrarla con características adecuadas para su consumo, Figura 3.2. Por lo anterior, es necesario que todas las partes involucradas en la transformación de energía sean eficientes; como lo son los elementos que conforman a la turbina eólica Skystream, ya que cumple cabalmente con lo antes mencionado.



Figura 3.2: Esquema simplificado de generación eólica.

3.2.2. Sustentabilidad

Al abordar la cuestión de sustentabilidad, la turbina Skystream al igual que otras turbinas eólicas, reducen la emisión de gases de efecto invernadero. Lo cual contribuye a la reducción de problemas ocasionados por el cambio climático. Cabe mencionar, que la turbina eólica Skystream cuenta con un sistema que a raíz de la generación de energía eléctrica que se está generando, muestra de manera automática la cantidad de contaminantes que se están evitando si la generación fuera mediante la combustión de elementos fósiles.

3.2.3. Aplicaciones

El campo de aplicación de la turbina Skystream es amplio, ya que se puede encontrar en: zonas residenciales, centros educativos, Figura 3.3 [Baqersad et al., 2015], sistemas de telecomunicaciones en áreas remotas, zonas comerciales, sistemas de electrificación aislada, sistemas híbridos, zonas públicas, electrificación comunitaria, y en aplicaciones especiales. Las aplicaciones anteriores son gracias a el diseño en base al rendimiento con que fue desarrollada la turbina.

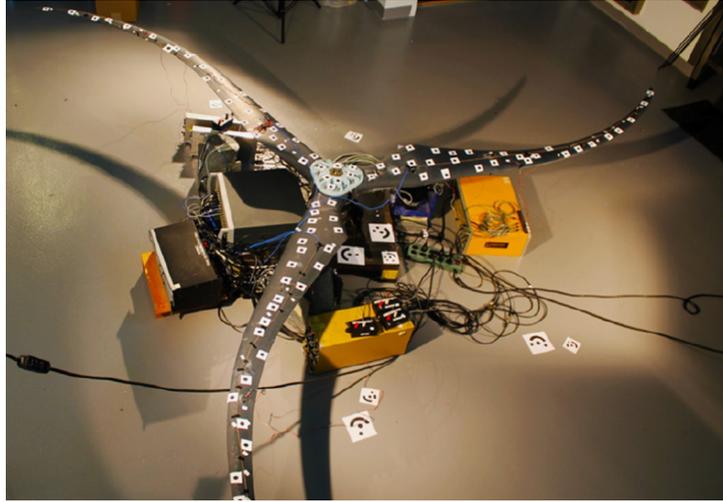


Figura 3.3: Turbina Skystream con fines educativos.

Es común encontrar en residencias de EUA turbinas Skystream que adornan los jardines, Figura 3.4, de los habitantes, lo anterior sin desentonar con la arquitectura o estilo de las construcciones y con la ventaja de que se reduce considerablemente el pago de energía eléctrica por parte de los usuarios.



Figura 3.4: Turbina Skystream en zonas residenciales.

Una de las principales aplicaciones de la turbina Skystream es en sistemas de telecomunicaciones, Figura 3.5, ya que gracias a su diseño, es sumamente conveniente su uso para suministrar energía eléctrica a los sistemas de comunicación, además la altura en donde se encuentran dichos sistemas favorece la generación eléctrica de la turbina debido a las corrientes de viento presentes a esas alturas.



Figura 3.5: Turbina Skystream en sistemas de telecomunicaciones.

La turbina Skystream ha sido seleccionada de manera favorable para conformar sistemas híbridos de generación eléctrica, Figura 3.6, así, se aprovecha tanto la energía del viento, así como la energía solar, la cual mediante paneles fotovoltaicos produce energía eléctrica. Lo anterior constituye una excelente dupla energética, que además no contamina.



Figura 3.6: Turbina Skystream en sistemas híbridos.

Para lugares remotos, Figura 3.7, en donde se requiere alguna fuente de energía eléctrica y que no existe sistema eléctrico disponible, es conveniente el uso de la turbina Skystream para generar energía eléctrica. Cabe mencionar que la fabricación de la turbina asegura un óptimo desempeño aún en zonas remotas, lo cual favorece su elección.



Figura 3.7: Turbina Skystream en sistemas remotos.

3.2.4. Tecnología

Gracias a la tecnología moderna con que cuenta la turbina Skystream es posible una producción efectiva de energía; ya que con la electrónica dotada en la turbina, es viable generar energía desde velocidades bajas de viento. Lo anterior permite ampliar el campo de aplicación de la turbina en sitios donde no se tenía contemplado generación de energía eléctrica a base de energías renovables como la energía eólica.

3.2.5. Aspecto económico

Económicamente, la turbina eólica Skystream ofrece un retorno rápido de inversión, lo que es atractivo, tomando en cuenta que la vida útil de la turbina es por más de 20 años. Además, dicho sistema de generación sustentable ofrece un menor riesgo de inversión que los sistemas convencionales.

Previamente a la inversión, los proveedores de dicha turbina, ofrecen un análisis de viabilidad para la instalación de la turbina. Dicho estudio consiste en la ubicación de la zona vía satélite a través de GoogleMaps, Figura 3.8 y búsqueda sobre las características del lugar en cuestión. En pocos segundos se ubica la zona y arroja el resultado del promedio de la velocidad a la cual estaría sometida la turbina, Figura 3.9.

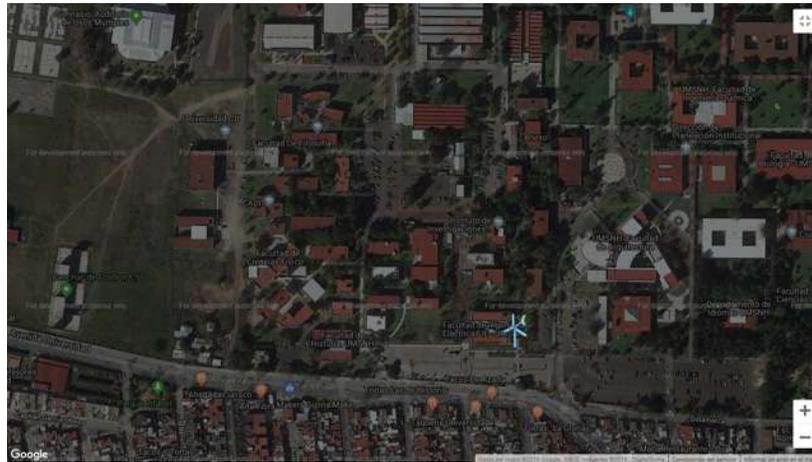


Figura 3.8: Ubicación geográfica de la turbina.

A continuación se muestra la imagen del reporte local sobre el potencial eólico al cual se encuentra sometida la turbina eólica Skystream, a pesar que indica que la velocidad del viento promedio se encuentra por debajo del valor que ellos recomiendan, que es de 10 mph, el valor de la zona es muy cercano al recomendado.

Your Estimated Wind Resource is

9.2 mph

We only recommend XZERES wind turbines to site locations with more than 10mph



Performance Based Wind Turbines Maximizing Production with Efficiency

Thank you for your inquiry

XZERES Wind Corp is committed to providing accurate information to our potential wind energy customers. The wind data for your site location is lower than our recommended wind speed for successful energy production. We are aware of sites where this information is inaccurate.

YOU MAY HAVE SUFFICIENT WIND FOR ENERGY PRODUCTION

If you have additional information about your site location's wind resource then please **contact us**. We are here to help. An on site evaluation for wind speed will always be more accurate than our tools indicate.

Contact Us

Figura 3.9: Viabilidad estadística sobre la ubicación geográfica de la turbina.

El fabricante provee las curvas de energía y potencia, Figura 3.10, para poder definir la generación de energía eléctrica mensual posible, en base a las lecturas previas de la velocidad promedio del viento.

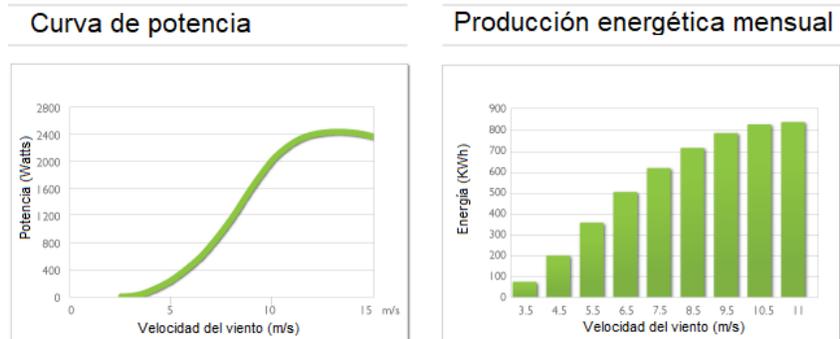


Figura 3.10: Curvas de potencia y energía de la turbina Skystream .

3.3. Diagrama de una turbina Skystream

En la Figura 3.11, se muestran los bloques principales representativos de cada uno de los elementos que conforman una turbina Skystream. Se inicia con los álabes y hub, para después enviar la energía mecánica al GSIP, el cual transforma la energía mecánica en energía eléctrica con características de alternancia, que después el rectificador trifásico convierte en corriente directa, que a su vez alimenta al convertidor boost que aumenta el voltaje de CD y lo envía al inversor quien finalmente entrega al Sistema Eléctrico Nacional (SEN), una energía de corriente alterna con características apropiadas de frecuencia y voltaje.

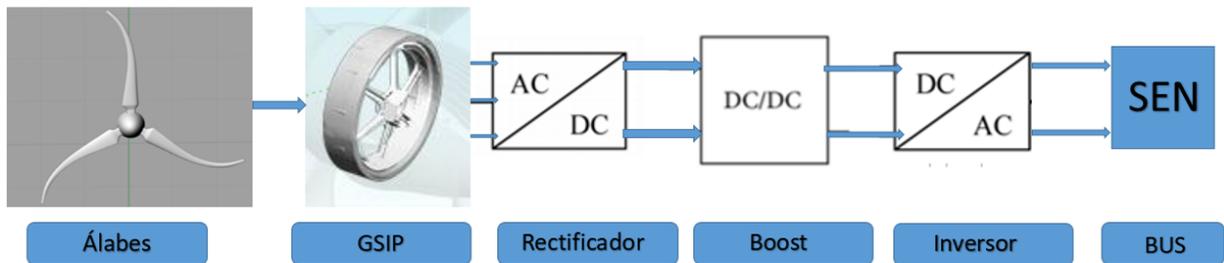


Figura 3.11: Diagrama de bloques simplificado de una turbina Skystream 3.7.

3.4. Álabes

El primer elemento que tiene contacto con el viento en un sistema de generación eólica es el álabes, Figura 3.12. Cabe mencionar que los álabes de la turbina Skystream son de fibra de vidrio compuesto, lo que los convierte en fuertes y ligeros a la vez.

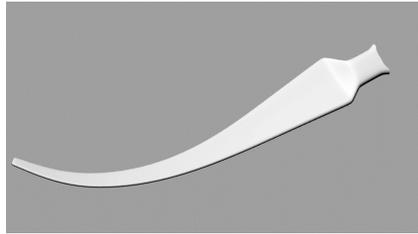


Figura 3.12: Álabes de fibra de vidrio compuesto de la turbina Skystream.

Para la turbina eólica Skystream se tienen tres álabes distribuidos uniformemente en un diámetro de 3.72 m y son los encargados de aprovechar la energía cinética del aire para suministrarla como energía mecánica hacia el generador de imanes permanentes, Figura 3.13.

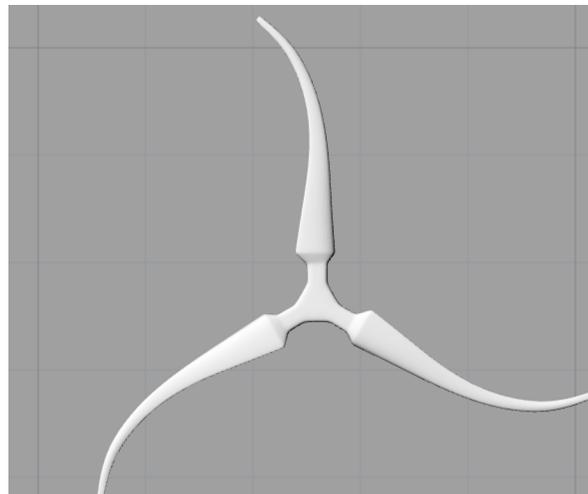


Figura 3.13: Sistema de álabes de la turbina Skystream .

Otro elemento cercano a los álabes es el hub, Figura 3.14, colocado en la parte central del sistema de álabes y cuya función es distribuir hacia los mismos el viento que incide en la parte central de la turbina, así, ese aire incidente produce pequeñas cantidades de par mecánico al dispersarse sobre los álabes.

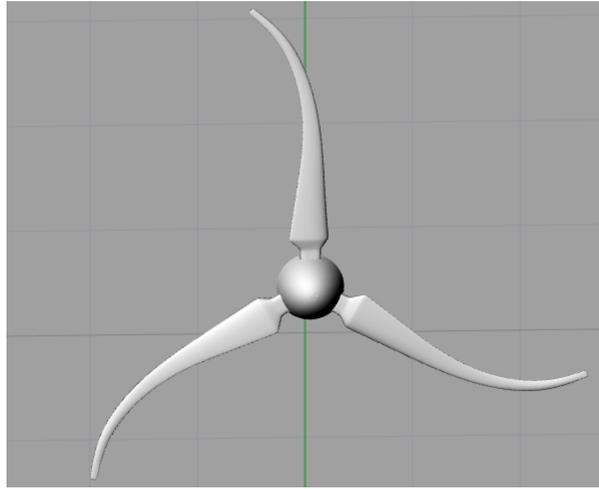


Figura 3.14: Sistema de álabes y hub de la turbina Skystream .

3.5. Generador síncrono de imanes permanentes

Debido a las ventajas que ofrece un rotor de imanes permanentes, Figura 3.15, también se han fabricado GSIP en otros tipos de conversión de energía. Por ejemplo, en pequeñas hidroeléctricas ya se cuenta con generadores de dichas características acoplados a turbinas Kaplan, además en turbinas de alta velocidad para generación mediante vapor, se tienen generadores con rotor de imanes permanentes y fibra de carbono [Binder and Schneider, 2005].

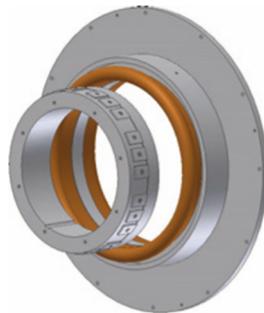


Figura 3.15: Rotor de imanes permanentes.

Los mejores imanes permanentes actualmente son imanes de neodimio cobalto, Figura 3.16, dicha combinación provee una excelente fuerza magnética que genera el neodimio perteneciente a las tierras raras de la tabla periódica de elementos, por otro lado, el cobalto evita que el neodimio se oxide y corroa.



Figura 3.16: Imán de neodimio cobalto.

El generador de la turbina eólica Skystream se encuentra dotado de imanes permanentes de neodimio cobalto, Figura 3.17, con lo cual, se logra obtener generación de energía eléctrica de una manera más eficiente, ya que no se requiere una excitación de corriente directa como en los tradicionales generadores de inducción. Dichos imanes permanentes se encuentran alojados en el rotor del generador, para el caso de la turbina eólica Skystream, se tienen 21 pares de polos, es decir 42 imanes permanentes distribuidos a través del rotor.



Figura 3.17: Generador de imanes permanentes.

Al observar la parte interior del generador eólico, Figura 3.18, se observan de manera compacta los componentes electrónicos necesarios para realizar el acondicionamiento y conversión de energía, como lo son: el rectificador trifásico, el convertidor boost y el inversor monofásico, los cuales se describen a fondo en próximas secciones del presente trabajo.



Figura 3.18: Vista interior del generador.

3.6. Rectificador trifásico

Después del generador de imanes permanentes con que cuenta la turbina eólica Skystream se encuentra conectado un rectificador trifásico, Figura 3.19, lo anterior con el objetivo de convertir la energía alterna proveniente del generador en energía de corriente directa.



Figura 3.19: Tarjeta electrónica que contiene el rectificador trifásico.

3.7. Convertidor boost

Conectado al rectificador trifásico se tiene un convertidor boost, el cual eleva el voltaje de corriente directa que proviene del rectificador. Ambas etapas, el rectificador y el convertidor boost se encuentran en la misma tarjeta, así como también el inversor monofásico. Lo anterior permite tener una turbina sumamente compacta, Figura 3.20 y bien lograda en cuanto al diseño electrónico, ya que además de las etapas mencionadas, también se tienen otras etapas como la parte electrónica referente al freno mediante relevadores electromagnéticos y algunos filtros electrónicos.



Figura 3.20: Vista interior de la colocación de la tarjeta electrónica.

3.8. Inversor monofásico

El equipo electrónico que se encuentra al final del sistema de generación eólica es el inversor electrónico, Figura 3.20, el cual, para el caso de la turbina eólica Skystream es monofásico. Dicho inversor es el elemento que puede interconectarse con el SEN o directamente a la carga si se tuviera un sistema aislado tipo isla. Cabe mencionar que el inversor monofásico de la turbina eólica Skystream se encuentra ubicado en una posición estratégica, Figura 3.21, que permite una adecuada disipación de calor al realizar la conversión de energía.



Figura 3.21: Inversor electrónico.

3.9. Aislador de ruido

A pesar de que la turbina eólica Skystream sea colocada a una altura mayor que la altura promedio de las residencias, se genera un ruido debido a la dinámica de la interacción entre el viento y los álabes de la turbina, lo anterior, se minimiza dotando a la turbina de un sistema anti ruido, como se muestra en la Figura 3.22, cuya función es aislar la parte superior de la turbina con la torre a la cual se encuentra sujeta la turbina.



Figura 3.22: Sistema antiruido.

En la Figura 3.23, se muestra a detalle el sistema aislador de ruido, el cual consta de múltiples cojinetes que evitan que el ruido se transfiera a través de la torre de la turbina eólica Skystream.



Figura 3.23: Aislador de ruido.

3.10. Sistema de monitoreo

Cuando además de proveer energía eléctrica a través de la turbina eólica Skystream se requiere un monitoreo frecuente de dicha generación, la turbina cuenta con un sistema de adquisición de datos, el cual se denomina Skyview, Figura 3.24 y se basa en la plataforma del lenguaje de programación gráfica LabVIEW, además de que logra la comunicación desde la turbina hacia la estación de monitoreo mediante elementos con tecnología xbee, la cual hace más eficiente la lectura de generación. Así, cuando se requiera un análisis preciso de la generación efectiva de la turbina, se tiene a disposición los datos en la estación de monitoreo.

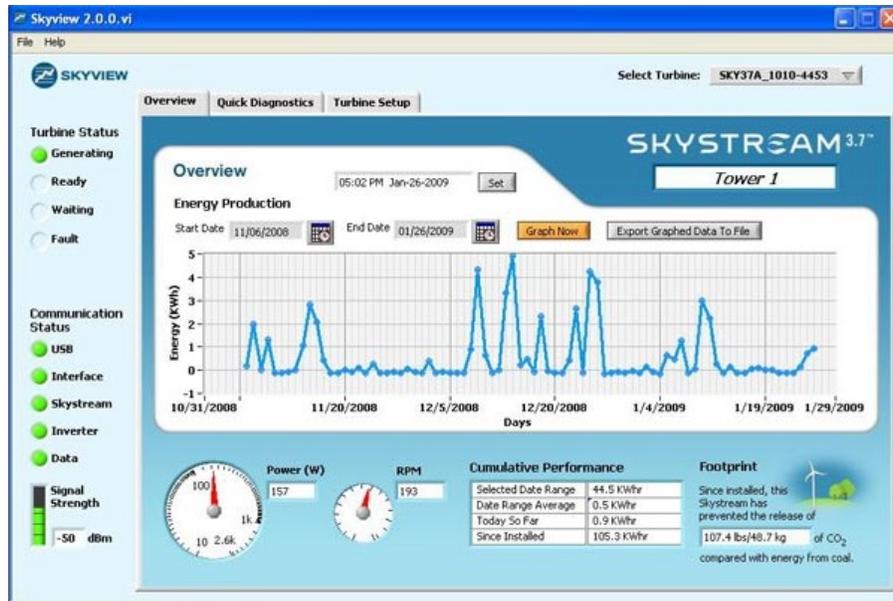


Figura 3.24: Sistema de monitoreo Skyview.

En la parte superior izquierda de la Figura 3.24, se muestra el estado que guarda la turbina, se puede apreciar que para esa lectura de pantalla se tiene un estado de generación eléctrica. En la parte inferior izquierda de la misma imagen, se puede observar también el estado de comunicación que guardan algunos de los elementos presentes en la turbina eólica Skystream. Cabe mencionar que en la parte central de la imagen se observa el comportamiento gráfico de generación de un período entre el año 2008 y 2009.

Cuando no existe una velocidad del viento que logre producir una generación de energía eléctrica el sistema de monitoreo continúa funcionando de manera normal, así se hace notar en la Figura 3.25, en donde se puede observar que el estado de la turbina es listo para generar. A pesar de no estar generando en el tiempo de adquisición de dicha imagen, en la parte central se puede observar la generación eléctrica correspondiente a un período entre el mes de diciembre de 2018 y enero de 2019.

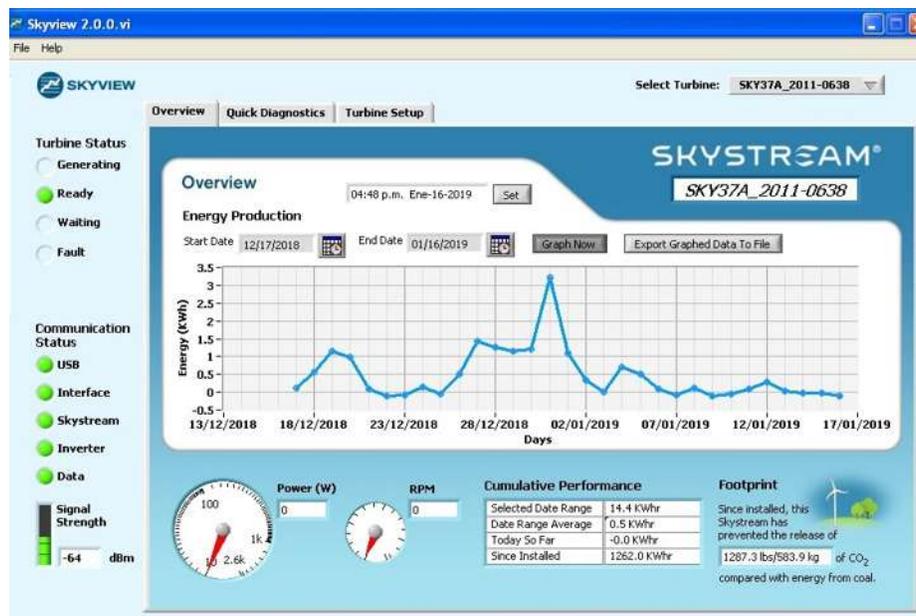


Figura 3.25: Gráfica de generación eléctrica mediante Skyview.

Otra de las secciones del sistema de monitoreo es la correspondiente al diagnóstico rápido, Figura 3.26, en donde se aprecia la potencia generada, las RPM, la temperatura al interior de la turbina y la versión del software. También, se tiene un monitoreo de los valores de voltaje, Figura 3.26 y frecuencia del SEN al cual se encuentra interconectada la turbina mediante el inversor, así, cuando existe un desbalance entre líneas o no se cumpla la tolerancia de frecuencia respecto a los límites de la turbina, esta se protegerá de manera automática para evitar el daño de alguno de los elementos propios de la turbina.



Figura 3.26: Sección de diagnóstico rápido en Skyview.

Cuando se tienen múltiples turbinas eólicas Skystream, es posible monitorearlas mediante el mismo sistema Skyview, simplemente se localiza cada una de las turbinas presentes en el parque eólico y se agregan al monitoreo, Figura 3.27 y adquisición de datos, así, es posible tener el control de los datos de generación eléctrica de todo el parque eólico Skystream.

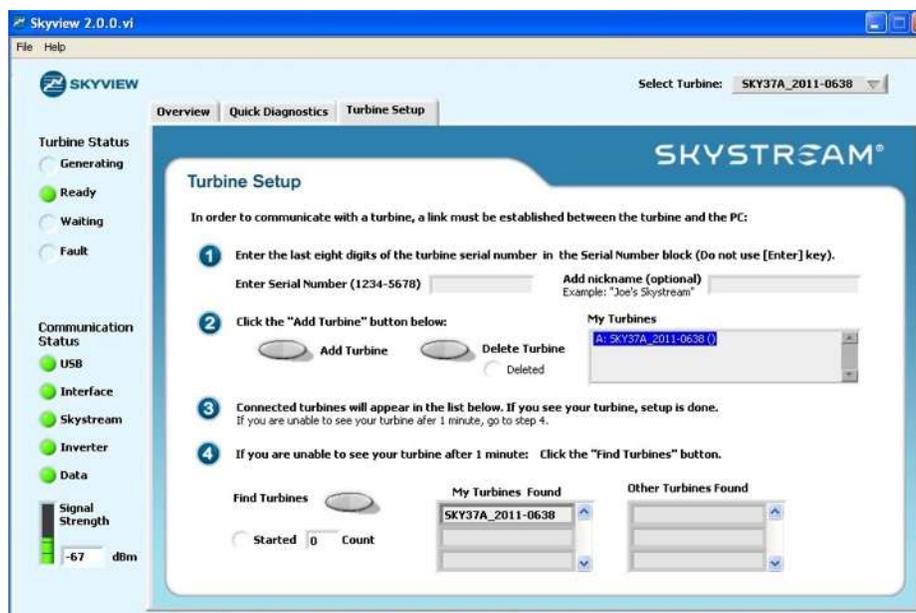


Figura 3.27: Apartado para búsqueda y agregado de turbinas Skystream mediante Skyview.

Para monitorear la generación eléctrica en tiempo real de la turbina Skystream, se tiene un apartado para obtener las curvas al instante de potencia eléctrica respecto a la velocidad del viento que incide sobre los álabes de la turbina, Figura 3.28.

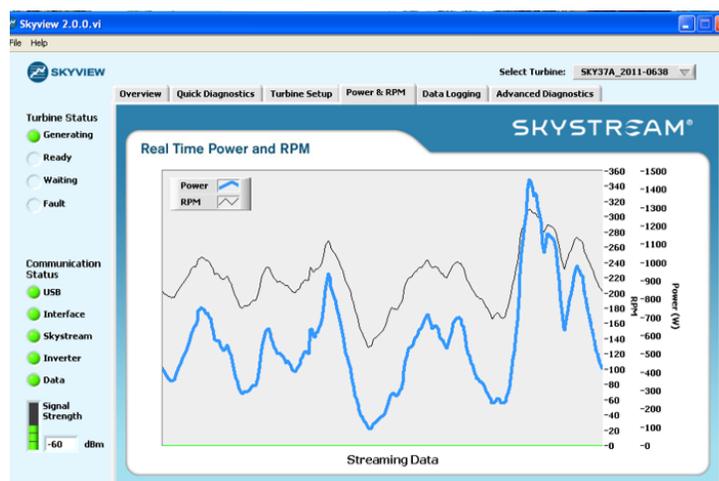


Figura 3.28: Sistema de monitoreo en tiempo real con la interfaz Skyview.

Una de las secciones más relevantes de la interfaz del sistema de monitoreo Skyview es la referente al diagnóstico avanzado, Figura 3.29, en donde se tienen prácticamente todas las variables de interés de la turbina Skyview. En dicha sección, se muestran desde el tiempo de operación de la turbina, la versión del software, el voltaje en corriente directa, la corriente, la temperatura dentro de la turbina, las RPMs, etc. Además, muestra tres apartados sobre el estado del sistema eléctrico, el estado del sistema de monitoreo y el estado de la turbina.



Figura 3.29: Sección de diagnóstico avanzado en Skyview en modo listo.

En la Figura 3.30, se muestra el diagnóstico avanzado cuando la turbina se encuentra generando energía eléctrica, a diferencia de la imagen anterior en donde se encuentra en modo listo para generar.

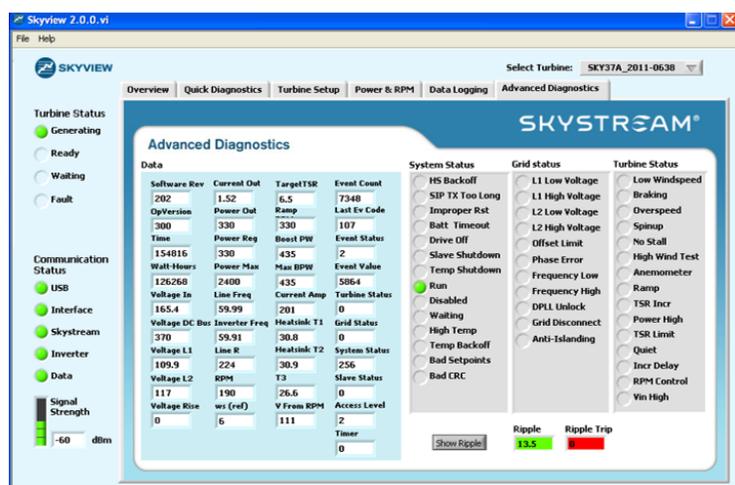


Figura 3.30: Sección de diagnóstico avanzado en Skyview generando.

En la Figura 3.31, se puede observar la generación eléctrica correspondiente al mes de enero de 2019, es la lectura más actualizada que se tiene en el sistema de monitoreo de la turbina Skystream.

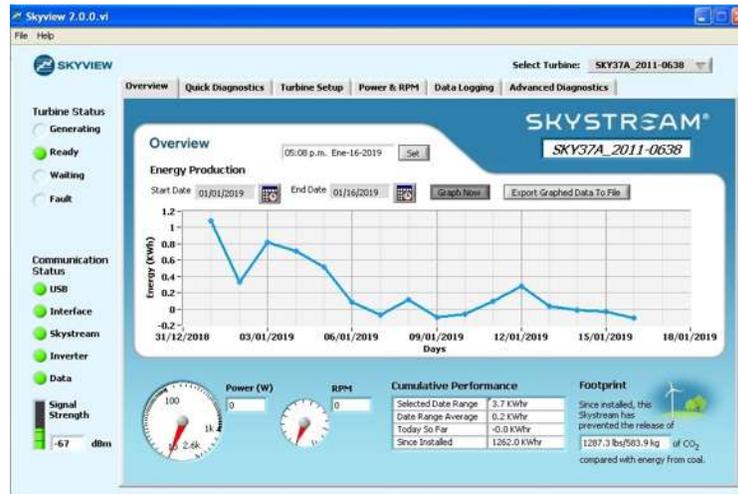


Figura 3.31: Periodo de generación eléctrica mediante Skyview.

Además de mostrar y almacenar la información de la energía generada por la turbina Skystream, el sistema de monitoreo Skyview tiene una sección en la parte inferior derecha, Figura 3.31, en la cual se observa una sección en la que se indica la cantidad de dióxido de carbono que se evita mediante la producción de energía eléctrica a través de la turbina Skystream.



Figura 3.32: Ubicación de antena para sistema de monitoreo.

Cuando la turbina eólica Skystream se encuentra alejada de la estación de monitoreo, es posible colocar repetidores de señal cada 25 m, así, la antena de la turbina, Figura 3.32, se comunica a través del primer repetidor a su alcance, con el objetivo de lograr la comunicación entre la turbina y el sistema de monitoreo Skyview.

3.11. Especificaciones y certificados de la turbina Skystream

En la Tabla 3.1, se muestran las especificaciones de la turbina Skystream [Windpower, 2011], en donde se observan la mayoría de datos relativos a la potencia de generación, al tipo de generador, el peso de la turbina, número y material de construcción de los álabes, voltajes de conexión, años de garantía, etc.

Tabla 3.1: Características de la turbina Skystream.

Modelo	Skystream 3.7
Potencia	1.8 KW, 2.44 KW máxima
Salida del inversor	120/240volts 50/60 Hz
Velocidad de arranque del viento	3.5 m/s
Velocidad nominal del viento	9.4 m/s
Máxima velocidad del viento	63 m/s
Área de barrido	10.87 m ²
Protección de sobre velocidad	Electrónico
Díametro del rotor	3.72 m
Velocidad del rotor	325 rpm
Número de álabes	3
Material de los álabes	Fibra de vidrio compuesto
Peso de la turbina	77 kg
Generador	Síncrono de imanes permanentes
Garantía	5 años

Los creadores de la turbina Skystream decidieron que sus productos fueran probados y certificados de manera independiente por diferentes unidades de verificación a nivel mundial, Figura 3.33. Ellos lo quisieron así, porque querían que los clientes tuvieran la certeza de que la turbina Skystream es un producto totalmente seguro y efectivo.



Figura 3.33: Certificados obtenidos de la turbina Skystream.

A continuación se muestran algunas de las pruebas realizadas a la turbina Skystream, entre ellas, la prueba de lluvia perteneciente al standar IEC60529, Figura 3.34, la cual consiste en aplicar chorros de agua a presión de todas direcciones hacia la turbina con el objetivo de poner a prueba el aislamiento que tienen las partes eléctricas respecto al exterior.



Figura 3.34: Pruebas para certificación de la turbina Skystream.

La prueba anterior se lleva a cabo durante un periodo de cuatro minutos, Figura 3.35, después por un minuto se realizan pruebas de aislamiento dieléctrico para corroborar que no existan problemas de aislamiento. Luego de las pruebas anteriores, se abre la turbina para una inspección visual que arrojó nula invasión de agua hacia el interior de la turbina, lo cual cumple cabalmente con dicho standar.



Figura 3.35: Pruebas para certificación de la turbina Skystream.

Para la realización de las pruebas pertenecientes al standar IEC60529, fue utilizado equipo especializado de medición eléctrica, en este caso, equipos de la marca Fluke y equipo de aislamiento dieléctrico de la marca HIGH VOLTAGE debidamente calibrados, Figura 3.36.



Figura 3.36: Pruebas para certificación de la turbina Skystream.

Cabe mencionar que a raíz de la creación de la turbina Skystream, los creadores se unieron con otros fabricantes para trabajar en conjunto y mejorar los standares de calidad respecto a las turbinas eólicas.

3.12. Comparativo con turbinas de su clase

La turbina Skystream se encuentra ubicada en el ramo de las turbinas eólicas pequeñas y al igual que ella, existe variedad en el mercado. Sin embargo, se pueden observar algunas diferencias; desde la potencia generada, geometría, el peso, el costo. Incluso algunas de ellas ya se encuentran descontinuadas del mercado. A continuación, se muestran algunas de las turbinas eólicas que compiten en el mercado con la turbina Skystream.

a) Turbina eólica Flexienergy 2 KW

La turbina eólica Flexienergy, Figura 3.37, es de fabricación italiana, cuenta con un diseño atractivo, ya que se cuidaron los detalles de fabricación; el diseño cumple con el standar IEC61400-2 relativo al diseño de turbinas pequeñas. Además, cada componente fue diseñado mediante sistemas avanzados CAD y manufacturados mediante maquinaria con tecnología CNC.



Figura 3.37: Turbina eólica Flexienergy de 2 KW.

La turbina cuenta con un GSIP que garantiza una alta eficiencia y puede generar 2 KW de potencia, Figura 3.38, respecto a los álabes, son fabricados con multi capa, lo que los hace fuertes y además cuentan con protección de resina epóxica.

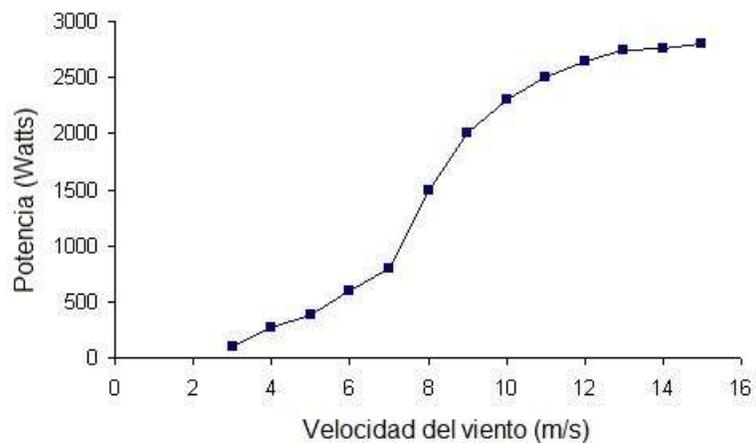


Figura 3.38: Gráfica de la potencia de la turbina eólica Flexienergy de 2 KW.

Algunas otras características de la turbina eólica Flexienergy se muestran en la Tabla 3.2, en donde se puede observar: el voltaje de salida, el peso de la turbina, tipo de generador, el material de los álabes, etc.

Tabla 3.2: Características de la turbina Flexienergy.

Potencia nominal	2 KW
Máxima potencia	2.6 KW
Salida de voltaje CD	220 volts
Velocidad de arranque del viento	3 m/s
Velocidad nominal del viento	9 m/s
Máxima velocidad del viento	40 m/s
Protección de sobre velocidad	Automática
Rango de temperatura	-40 a 60 Grados Celsius
Díametro del rotor	3.7 m
Velocidad del rotor	400 rpm
Número de álabes	3
Material de los álabes	Fibra de vidrio reforzado
Peso por álabes	18 kg
Altura de la torre	9 m
Peso de la torre	120 kg
Díametro del tubo de la torre	140 mm
Peso de la turbina	52 kg
Generador	Trifásico de imanes permanentes
Salida del inversor	110V/220Volts, 50/60 Hz

b) Turbina eólica Leading Edge LE-3000 48 V 3 KW

La turbina Leading Edge LE-3000, Figura 3.39, tiene la capacidad de generar entre 1.8 y 3.2 KW de energía eléctrica dependiendo de la velocidad del viento, es una turbina bastante robusta. Tiene un diámetro de rotor de 3.3 m por lo que mantiene una larga área de barrido bajo control y protección durante altas velocidades del viento.



Figura 3.39: Turbina eólica Leading Edge LE-3000.

El rotor del generador tiene imanes de neodimio, lo que favorece la generación de energía eléctrica aún en velocidades del viento relativamente bajas, Figura 3.40, lo que favorece la eficiencia de la turbina.

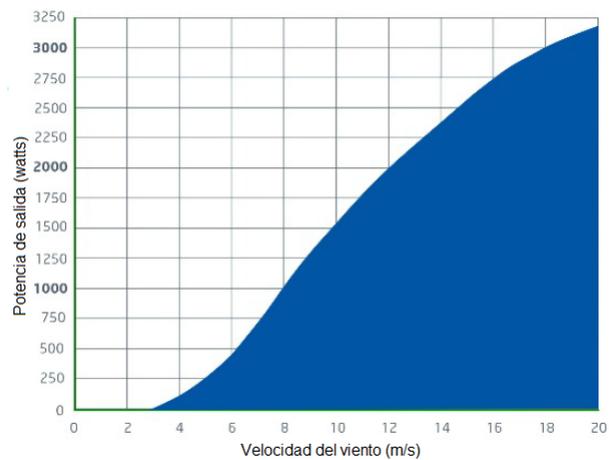


Figura 3.40: Potencia vs velocidad de la turbina eólica Leading Edge LE-3000.

A continuación se muestran algunas de las características de la turbina Leading edge LE-3000, Tabla 3.3, en donde se aprecia que debido a su robustez cuenta con un peso de 80 kg. Cabe mencionar que los fabricantes ofrecen dos años de garantía de la turbina eólica.

Tabla 3.3: Características de la turbina Leading Edge LE-3000.

Potencia nominal	1.1 KW a 7.8 m/s
Máxima potencia	3.2 KW
Salida de voltaje CD	24/28 Volts
Velocidad de arranque del viento	3 m/s
Díámetro del rotor	3.3 m
Número de álabes	3
Material de los álabes	Fibra de vidrio reforzado
Peso de la turbina	80 kg
Garantía	2 años

En la Figura 3.41, se observa una vista lateral del diseño de la turbina Leading Edge, en donde se aprecian a detalle las partes esenciales que la conforman.

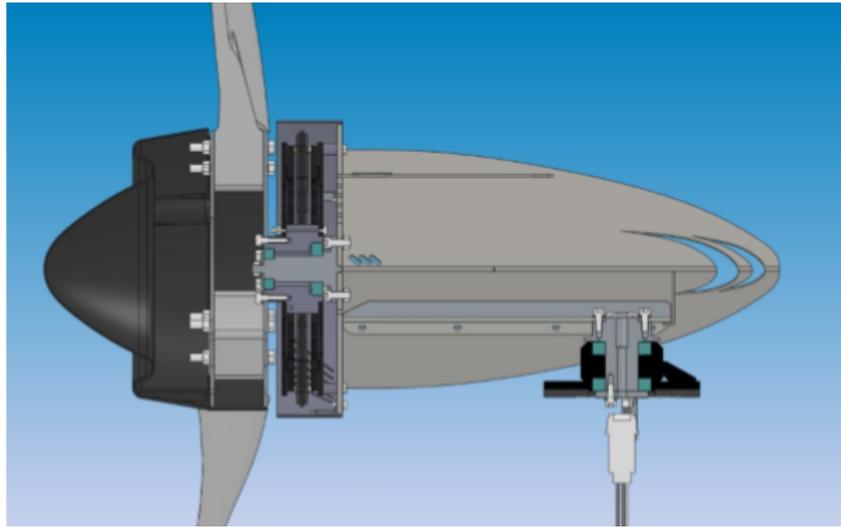


Figura 3.41: Vista lateral de la turbina eólica Leading Edge LE-3000.

c) Turbina eólica Aquitaine Aerogenerateurs WM-2000 2 KW

La turbina Aquitaine WM-2000, Figura 3.42, tiene un generador trifásico de imanes permanentes, además de un sistema de regulación mediante aleta y control electrónico, también tiene freno manual y electrónico. Esta turbina se recomienda instalarla mediante una torre de 9 m.



Figura 3.42: Turbina eólica Aquitaine WM-2000.

La curva de potencia que puede generar la turbina Aquitaine, se muestra en la Figura 3.43, en donde se aprecian potencias de hasta 3.2 KW a una velocidad del viento de 15 m/s. Además, se nota que la generación de energía eléctrica inicia desde 4 m/s.

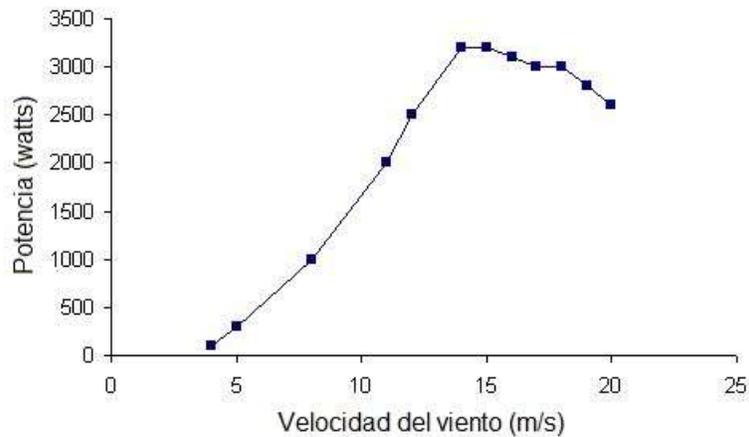


Figura 3.43: Potencia vs velocidad del viento de la turbina eólica Aquitaine WM-2000.

d) Turbina eólica ARI 2.5 KW

La turbina ARI 2.5 KW, Figura 3.44 tiene una generación de energía eléctrica similar a la turbina Skystream, ya que solamente hay una diferencia de 100 W de generación. El cuerpo principal de la ARI es fabricado en aluminio mediante un riguroso proceso de fundición, además para otros componentes de la turbina se utiliza acero. Así, se convierte en una turbina sumamente fuerte y a la vez ligera.

Es una turbina fácil de instalar y es libre de mantenimiento, además, tiene un diseño único que puede proporcionar energía eléctrica tanto en días soleados como nublados. Otro factor a considerar es el diámetro que forman sus álabes, el cual es de 2.9 m. Cabe mencionar que solo tiene un peso de 39 kg y diez años de garantía.



Figura 3.44: Turbina eólica Ari 2.5 KW.

A continuación se muestra la Figura 3.45, en donde se observa la relación de generación de potencia eléctrica respecto a la velocidad del viento.

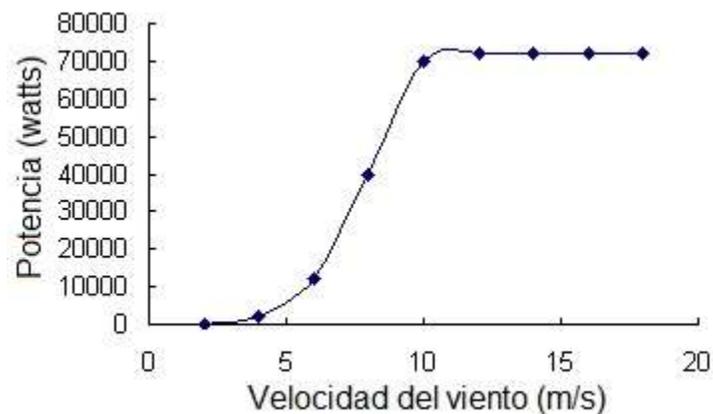


Figura 3.45: Potencia vs velocidad del viento de la turbina eólica Ari 2.5 KW.

e) Turbina eólica Aeolos-H 2000W 2 KW

Otra de las turbinas existentes en el mercado es la turbina Aeolos-H 2000 W, es una de las turbinas más populares en sistemas de generación eléctrica residencial. Es de fácil instalación y libre de mantenimiento, tiene una alta eficiencia y puede generar energía eléctrica a partir de bajas velocidades del viento.

Un aspecto interesante de esta turbina es el diámetro que forman sus álabes, el cual es de 4.0 m, con lo que se tiene un área de captura mayor que otras turbinas. Tiene un peso de 125 kg y el proveedor ofrece cinco años de garantía..



Figura 3.46: Turbina eólica Aeolos 2 KW.

La potencia eléctrica generada de la turbina Aeolos puede tener picos de generación de hasta 3 KW, Figura 3.47, con lo cual puede proveer de energía a una vivienda o interconectarla al SEN mediante un inversor Aurora 3000 W.

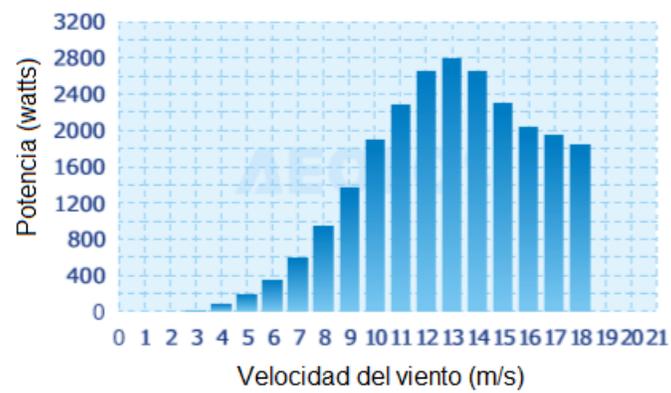


Figura 3.47: Potencia vs velocidad del viento de la turbina eólica Aeolos 2 KW.

Capítulo 4

Modelado de la turbina Skystream en Bond Graph

Lo importante es no dejar de hacerse preguntas.

Albert Einstein

4.1. Generador síncrono de imanes permanentes

Los GSIP han incrementado su uso en diversas aplicaciones, tanto en sistemas de generación con fines de distribución, como en sistemas aislados de generación [Chan et al., 2010]. En los sistemas de generación de energía eléctrica mediante sistemas eólicos, es posible encontrar dos tipos de generadores eléctricos: El generador de inducción con doble excitación independiente y el GSIP [Badoni and Prakash, 2014]. Al utilizar un GSIP, es posible reducir el costo de generación, debido a que no se requiere una excitación externa para inyectar corriente al rotor del generador, además, no se requiere un mantenimiento a corto plazo como se realiza en generadores de inducción convencionales y también se evita el uso de una caja de engranes para controlar la velocidad de la turbina eólica [Kumar et al., 2015]. Otras ventajas sobre generadores de inducción convencionales son: mayor eficiencia, mejores características térmicas debido a que no se tienen pérdidas por el campo, alta fiabilidad debido a la ausencia de componentes mecánicos como los anillos deslizantes y generadores más ligeros [Reddy et al., 2012]

4.1.1. Topología

Al definir el tipo de generador con el que cuenta la turbina eólica Skystream se presenta el circuito eléctrico equivalente, el cual como se aprecia en la Figura 4.1, contiene menos elementos que un generador tradicional de inducción. En la parte superior de la Figura 4.1, se observa el circuito eléctrico que representa al eje directo y el devanado de campo, en la parte inferior se aprecia el circuito eléctrico equivalente al eje de cuadratura. Cabe señalar que en esta representación tanto las inductancias propias como mutuas, así como el tiempo, se consideran constantes. A diferencia de la representación cotidiana de un generador síncrono de inducción en donde se tienen múltiples variables.

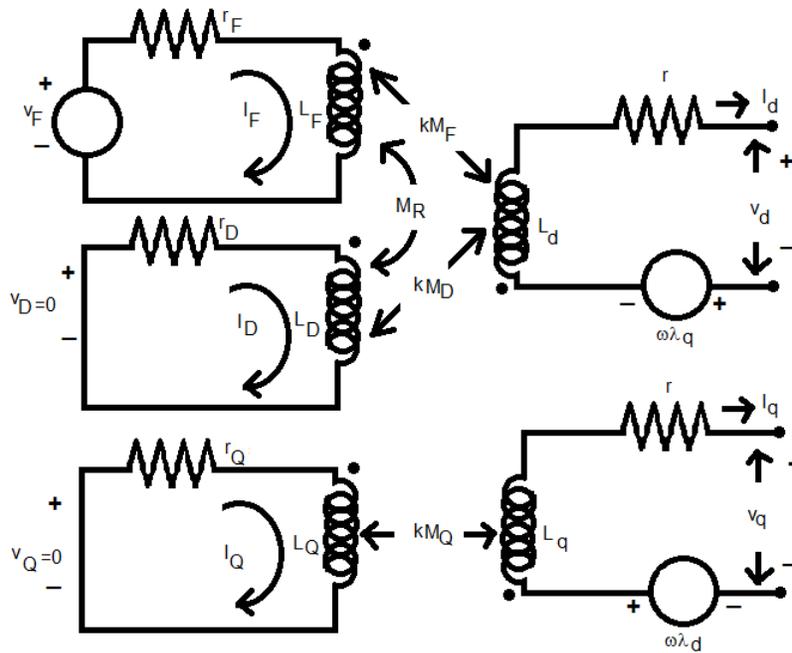


Figura 4.1: Circuito equivalente de la topología del GSIP.

El motivo de los pocos elementos presentes en la topología del GSIP es su representación en un marco de referencia $dq0$, Figura 4.5 con lo cual se logra un análisis de operación continuo y no sinusoidal.

4.1.2. Bond Graph del generador síncrono de imanes permanentes

En la Figura 4.2, se observa el diagrama de Bond Graph correspondiente al GSIP, en donde se aprecian tres elementos fuente; un elemento relativo al eje directo ($Ms_e : V_d$), uno al eje de cuadratura ($Ms_e : V_q$) y un elemento fuente representativo del par mecánico proveniente de los álabes de la turbina ($Ms_e : \tau_L$). También se tienen tres elementos disipadores; el elemento de disipación del eje directo ($R : R_d$), el elemento disipador del eje de cuadratura ($R : R_q$) y el elemento disipador por fricción ($R : B_m$). Además, se tiene un elemento girador por cuadrante (MGY) y finalmente tres elementos almacenadores de energía; el elemento almacenador del eje directo ($I : L_d$), el elemento del eje de cuadratura ($I : L_q$) y finalmente el elemento almacenador que representa el par eléctrico generado ($I : J$).

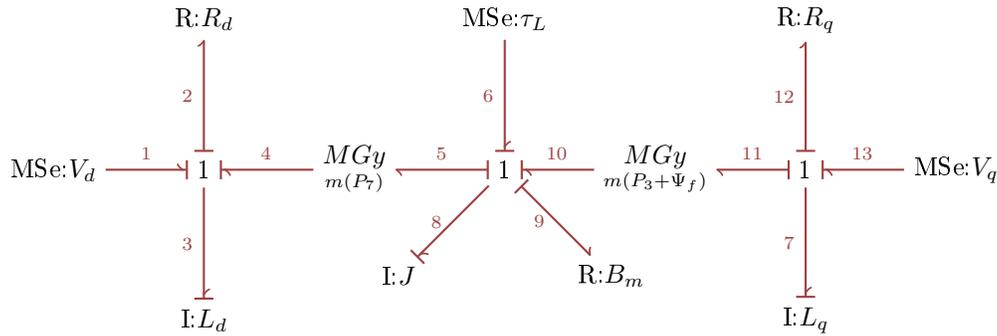


Figura 4.2: Bond Graph del GSIP.

En la obtención de los vectores clave referentes al GSIP, se inicia tomando como base la metodología mostrada en el capítulo 2, así, el vector u se llena de acuerdo a la información presente en el Bond Graph del GSIP en donde se tienen tres elementos fuente de esfuerzo mencionados con anterioridad, notese que estos elementos se ubican en los bonds: 1, 6 y 13 de la Figura 4.2.

$$u = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_6 \\ e_{13} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Para el vector x que contiene los bonds relativos a los elementos almacenadores de energía, se tienen los bonds: 3, 7 y 8 del diagrama de Bond Graph (4.2).

$$x = \begin{bmatrix} p_3 \\ p_8 \\ p_7 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Al obtener el vector \dot{x} queda como se muestra en (4.3), en donde se aprecia el esfuerzo relativo a los elementos almacenadores de energía.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} e_3 \\ e_8 \\ e_7 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

El vector z queda como se muestra en la ecuación (4.4) en donde se aprecia el flujo relativo a los elementos almacenadores de energía.

$$z = \begin{bmatrix} f_3 \\ f_8 \\ f_7 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Para incluir los elementos de flujo del vector D_{in} se utilizan los bonds: 2, 9 y 12 mostrado en la ecuación (4.5).

$$D_{in} = \begin{bmatrix} f_2 \\ f_9 \\ f_{12} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Para incluir los elementos de esfuerzo del vector D_{out} se utilizan los bonds: 2, 9 y 12, ecuación (4.6).

$$D_{out} = \begin{bmatrix} e_2 \\ e_9 \\ e_{12} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Al definir L con de los elementos disipadores se tiene la ecuación (4.7).

$$L = diag \{1/R_d, 1/B_m, 1/R_q\} \quad (4.7)$$

Igualmente, para definir F con de los elementos almacenadores de energía se tiene la ecuación (4.8).

$$F = diag \{1/L_d, 1/J, 1/L_q\} \quad (4.8)$$

Utilizando la información de los vectores clave se obtiene la ecuación (4.9), en donde se tiene toda la información relativa al diagrama de Bond Graph planteado para el GSIP.

$$\begin{bmatrix} e_3 \\ e_8 \\ e_7 \\ f_2 \\ f_9 \\ f_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & p_7 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -p_7 & 0 & p_3 + V_f & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -p_3 - V_f & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_3 \\ f_8 \\ f_7 \\ e_2 \\ e_9 \\ e_{12} \\ e_1 \\ e_6 \\ e_{13} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Después de comprobar que el sistema de la ecuación (4.9) cumple con las dos propiedades de conservación de energía, se obtiene la equivalencia de M utilizando la ecuación (2.38), en donde se observa que debido a la naturaleza del diagrama planteado, la equivalencia de M es igual a L que se muestra en la ecuación (4.10).

$$M = L = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{B_m} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_q} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Definiendo A en base a la ecuación (2.33), se obtiene la ecuación (4.11), que es parte importante del modelo matemático que define al sistema dinámico del GSIP.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-1}{R_d L_d} & \frac{P_{14}}{j} & 0 \\ \frac{-P_{14}}{L_d} & \frac{-1}{B_m j} & \frac{P_3 + V_f}{L_q} \\ 0 & \frac{-P_3 - V_f}{j} & \frac{-1}{R_q L_q} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Al definir B en base a la ecuación (2.34), se obtiene la ecuación (4.12) y se observa que tiene como equivalencia una matriz identidad.

$$B = S_{13} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Finalmente se obtiene el modelo matemático (4.13), que define el comportamiento del sistema dinámico perteneciente al GSIP.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{R_d L_d} & \frac{P_{14}}{j} & 0 \\ \frac{-P_{14}}{L_d} & \frac{-1}{B_m j} & \frac{P_3 + V_f}{L_q} \\ 0 & \frac{-P_3 - V_f}{j} & \frac{-1}{R_q L_q} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} u \quad (4.13)$$

4.1.3. Modelado en Bond Graph del generador síncrono de imanes permanentes en 20Sim

En la Figura 4.3, se muestra la programación gráfica del diagrama de Bond Graph planteado que representa al GSIP, lo anterior mediante el software 20Sim.

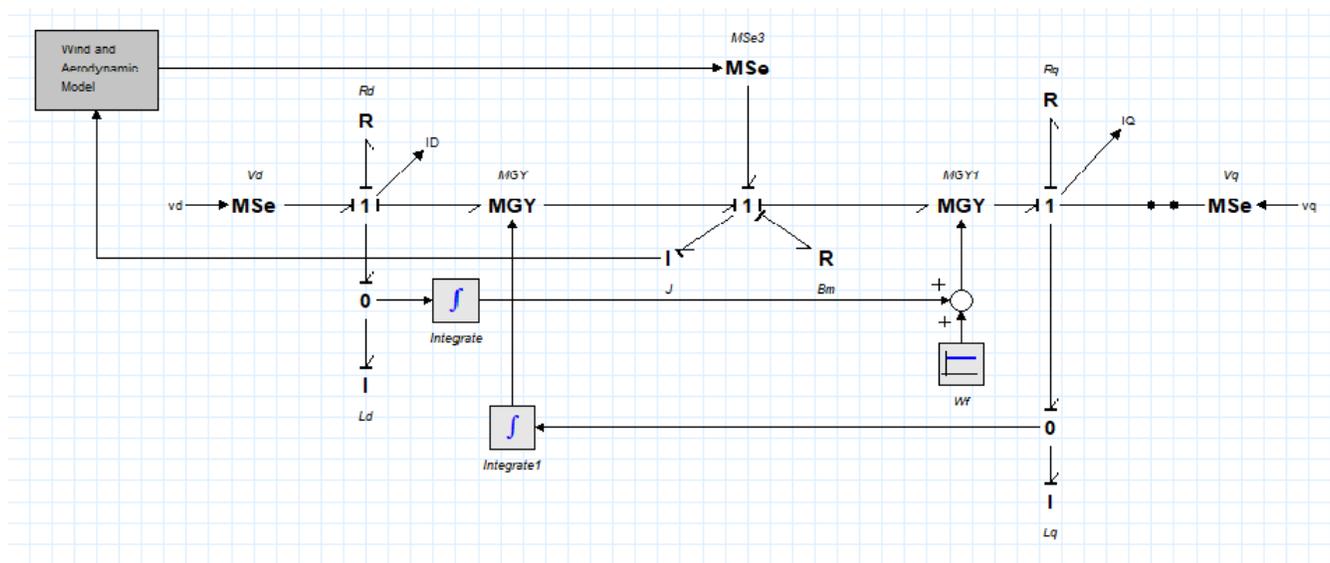


Figura 4.3: Bond Graph del GSIP en 20Sim.

Luego de realizar la programación del diagrama de Bond Graph se compila y se verifican posibles errores, para después, analizar las formas de onda de interés, Figura 4.4, en este caso se observan las tres fases de voltaje, el esfuerzo y el flujo del GSIP.



Figura 4.4: Formas de onda del GSIP en 20Sim.

Cabe mencionar que los parámetros programados en el GSIP son los pertenecientes al generador

de la turbina eólica Skystream, los cuales se presentan en la siguiente Tabla:

Tabla 4.1: Parámetros del GSIP de la turbina Skystream [Zhang et al., 2013].

Número de polos	p	21
Enlaces de Flujo Magnético	Ψ_m	$0.2532 \text{ V} \cdot \text{s}$
Resistencia del Estator	R_s	1.5Ω
Inductancia eje d	L_d	0.87 mH
Inductancia eje q	L_q	0.91 mH

4.1.4. Transformación de Park

La transformación de *Park* es una gran simplificación matemática de la descripción de la máquina síncrona. Dicha técnica consiste en la obtención de un grupo de variables del estator, las cuales se obtienen de la proyección de tres nuevos ejes; eje directo relativo al rotor (d), eje de cuadratura (q) a lo largo del devanado de campo y eje estacionario cero [Anderson and Fouad, 2008], así, se logra un sistema de referencia diferente, Figura 4.5. Cabe mencionar que la técnica de la transformación de *Park* usualmente es aplicada en sistemas de potencia, tal es el caso de [Ferraz et al., 2012], en donde se analiza el comportamiento de sistemas eléctricos tomando de base dicha técnica. Además, en el aspecto computacional, la transformación de *Park*, favorece la convergencia del cálculo computacional de un sistema, ya que al tener un sistema en coordenadas $dq0$ se requiere de menos recursos informáticos [Kulkarni and Thosar, 2013].

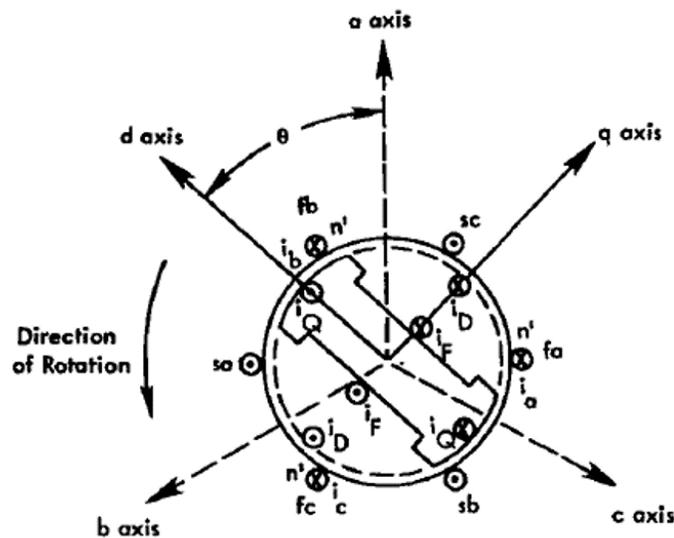


Figura 4.5: Representación pictórica del marco de referencia $dq0$.

Al analizar las corrientes del GSIP en un marco de referencia como el que ofrece la técnica de la transformación de *Park*, queda de manera simplificada como se muestra en la ecuación (4.14),

en donde se indica que las corrientes i_{dq0} se pueden representar en base a las corrientes i_{abc} al multiplicarse por la transformación de *Park*.

$$i_{0dq} = P i_{abc} \quad (4.14)$$

Cuando se definen los vectores de corriente, se tiene (4.15).

$$i_{0dq} = \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix}; i_{abc} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Así, matemáticamente la transformada de *Park* se define como (4.16)

$$P = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \Theta & \cos(\Theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\Theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \Theta & \sin(\Theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\Theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

4.1.5. Transformación de Park en 20Sim

Para comprobar el uso de la transformación de *Park*, se utiliza el software 20Sim, en el cual se programa dicha técnica y se analiza el resultado, Figura 4.6. Notese que en las gráficas de interés se encuentran al inicio las fases sinusoidales *abc* y también los valores *Park* continuos de V_d y V_q con lo que se demuestra una adecuada aplicación de la transformación de *Park*.

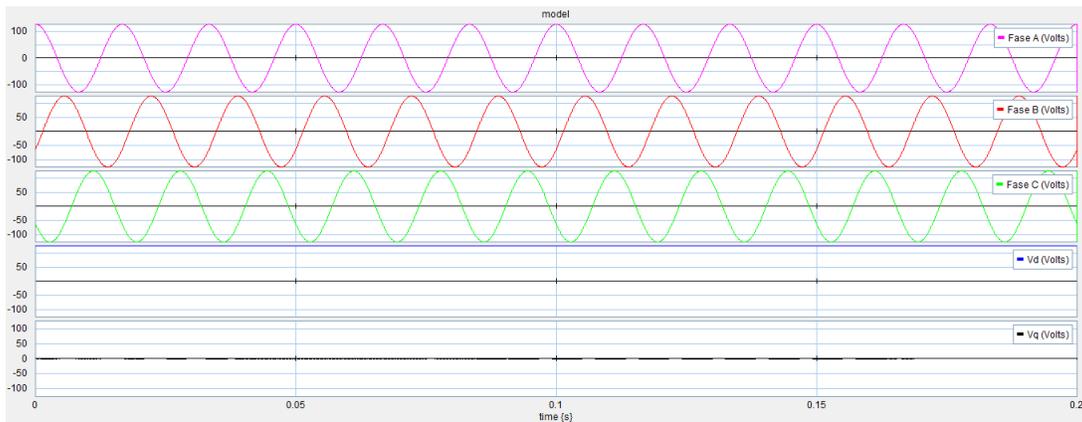


Figura 4.6: Resultados de la transformación de Park en 20Sim.

4.1.6. Transformación inversa de Park

Al comprobar el correcto uso de la técnica de Park se utiliza los valores V_d y V_q , los cuales son conectados al GSIP. Sin embargo, la energía generada por el GSIP es de naturaleza alternante, así que se requiere nuevamente tener los valores abc para conectarlos al rectificador trifásico. Para lograr nuevamente esos valores abc , se realiza la transformación inversa de *Park* (4.17).

$$P^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \Theta & \sin \Theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\Theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\Theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\Theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\Theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\Theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\Theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

4.1.7. Transformación inversa de Park en 20Sim

Al comprobar la efectividad del método de la transformada inversa de Park mediante el software 20Sim, Figura 4.7, se puede observar que las señales sinusoidales de entrada son iguales a las señales sinusoidales de salida, además de que en las señales intermedias se aprecian los valores V_d , V_q y V_0 ; en los cuales el valor de V_d es el que tiene un valor considerable y continuo, V_q es mínimo debido a que se tiene un sistema trifásico balanceado y V_0 es cero.

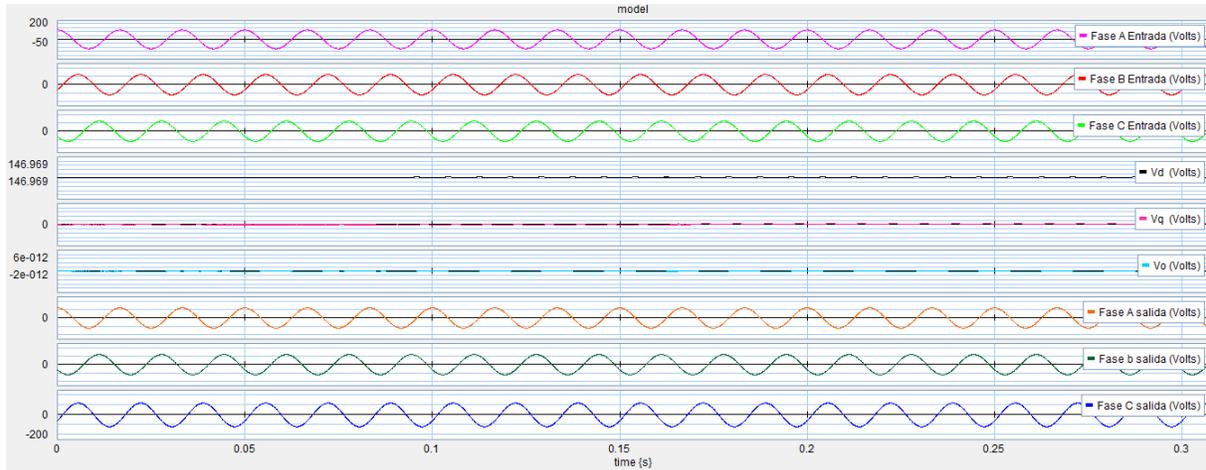
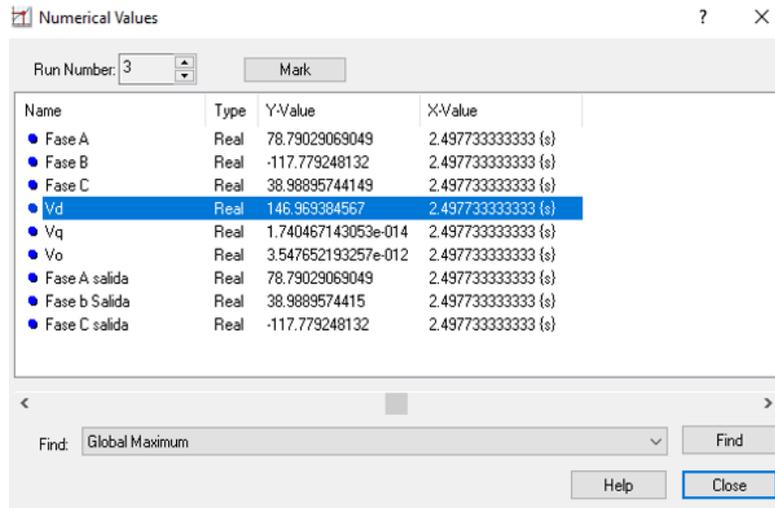


Figura 4.7: Resultados gráficos de la transformación inversa de Park en 20Sim.

Si se analizan los valores numéricos de la transformada inversa de Park, Figura 4.8, es posible comprobar la efectividad al observar congruencia en los valores de entrada y salida de las fases abc , además se observa un valor de V_d esperado, así como valores mínimos en V_q y V_0 .



Name	Type	Y-Value	X-Value
● Fase A	Real	78.79029069049	2.497733333333 (s)
● Fase B	Real	-117.779248132	2.497733333333 (s)
● Fase C	Real	38.98895744149	2.497733333333 (s)
● Vd	Real	146.969384567	2.497733333333 (s)
● Vq	Real	1.740467143053e-014	2.497733333333 (s)
● Vo	Real	3.547652193257e-012	2.497733333333 (s)
● Fase A salida	Real	78.79029069049	2.497733333333 (s)
● Fase b Salida	Real	38.9889574415	2.497733333333 (s)
● Fase C salida	Real	-117.779248132	2.497733333333 (s)

Figura 4.8: Resultados numéricos de la transformación inversa de Park .

4.2. Rectificador trifásico

Un rectificador puede considerarse un convertidor de energía, ya que requiere energía con características sinusoidales a la entrada y entrega energía de corriente directa a la salida, Figura 4.9. Además, dicho convertidor puede considerarse como un convertidor absoluto, ya que la parte negativa de la señal sinusoidal no la elimina, solamente la vuelve positiva, así al presentar una señal sinusoidal de entrada V_s , se obtiene la salida V_o , representada matemáticamente en la ecuación (4.18).

$$V_o = |V_s| \quad (4.18)$$

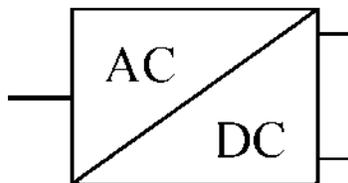


Figura 4.9: Bloque representativo del rectificador trifásico.

Los rectificadores se clasifican en dos tipos: rectificadores monofásicos y rectificadores trifásicos, [Rashid, 2004]. En la presente investigación se analiza el rectificador trifásico, ya que la turbina eólica Skystream está dotada de un rectificador trifásico de puente completo.

4.2.1. Topología del rectificador trifásico

En la Figura 4.10, se observa la topología del rectificador trifásico, notese que cuenta con seis diodos rectificadores, los cuales realizan la función esencial de rectificar la onda sinusoidal y convertirla en una señal de energía directa; para lograr lo anterior, los diodos en un rectificador trifásico operan en pares dependiendo de la señal de entrada que se presente primero en las terminales del puente. Por ejemplo, en el primer instante de tiempo, aparece la señal V_{an} , en ese instante operan los diodos D_1 y D_2 , y así sucesivamente. De esta forma, siempre se tiene un voltaje de corriente directa V_o presente en la carga. El rectificador trifásico con que cuenta la turbina Skystream, se encuentra conectado al GSIP, el cual le provee la energía con características sinusoidales.

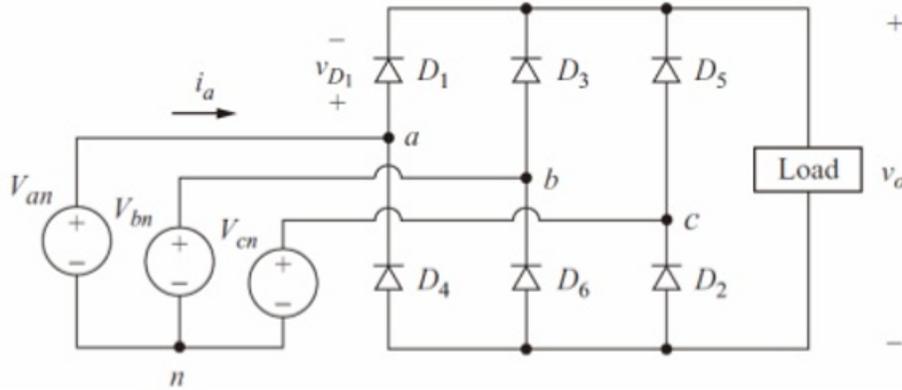


Figura 4.10: Topología del rectificador trifásico.

Debido a que en la entrada del rectificador se tienen señales senoidales provenientes del generador, éstas tienen un defasamiento entre sí de 120° , así las ecuaciones que representan a cada una de las señales de voltaje de fase instantáneo de entrada, quedan definidas en las ecuaciones siguientes:

$$V_{an} = V_s \sin(\omega t) \quad (4.19)$$

$$V_{bn} = V_s \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (4.20)$$

$$V_{cn} = V_s \sin(\omega t - 240^\circ) \quad (4.21)$$

Como el voltaje de línea a línea se adelanta 30° al voltaje de fase, los voltajes instantáneos de línea a línea se describen en las ecuaciones siguientes:

$$V_{ab} = \sqrt{3}V_s \sin(\omega t + 30^\circ) \quad (4.22)$$

$$V_{bc} = \sqrt{3}V_s \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (4.23)$$

$$V_{ca} = \sqrt{3}V_s \sin(\omega t - 210^\circ) \quad (4.24)$$

A continuación se muestran las formas de onda presentes en un rectificador trifásico, Figura 4.11. Notese que en la parte superior se encuentra una señal de corriente directa con múltiples crestas y en la parte media se muestran las señales de corriente alterna de entrada, claramente se observa el defasamiento mencionado en las ecuaciones anteriores. También, se observa que para cada ciclo de las señales de corriente alterna, existen seis crestas en la señal de corriente directa producidas por la interacción de los diodos rectificadores.

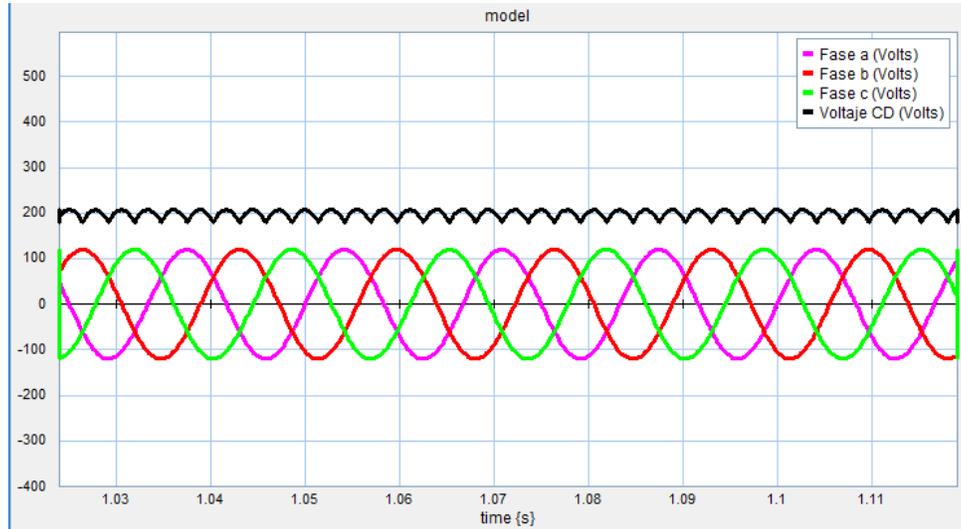


Figura 4.11: Formas de onda de entrada y salida de un rectificador trifásico.

Matemáticamente, la señal obtenida en la salida del rectificador trifásico, corresponde a la ecuación (4.25), en donde se tiene la equivalencia para obtener el valor de corriente directa en términos de señales senoidales. Al desarrollar la ecuación, se observa que el valor obtenido es mayor que cualquiera de las señales de entrada, ecuación (4.26).

$$V_{cd} = \frac{2}{2\pi/6} \int_0^{\pi/6} \sqrt{3}V_s \cos \omega t d(\omega t) \quad (4.25)$$

$$V_{cd} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_s = 1.654V_s \quad (4.26)$$

4.2.2. Rectificador trifásico con filtro

Debido a que al realizar la conversión de corriente alterna a corriente directa se tiene un rizado (múltiples crestas) a la salida del rectificador, es conveniente agregar un filtro a la salida del mismo, el cual se logra mediante un capacitor conectado en paralelo con la carga. Así, se elimina la señal rizada y se obtiene una señal de CD más cercana a la ideal.

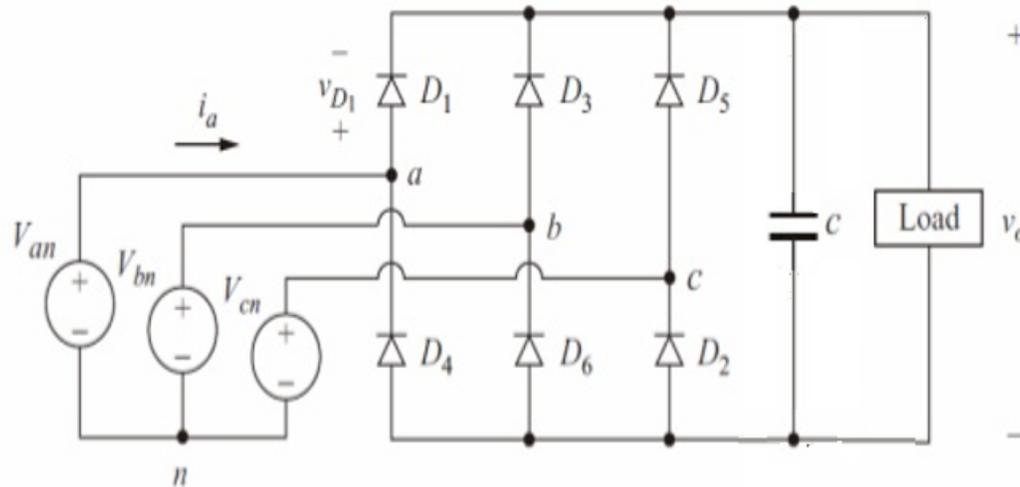


Figura 4.12: Topología del rectificador trifásico con filtro.

4.2.3. Bond Graph del rectificador trifásico con filtro

En la Figura 4.13, se muestra el Bond Graph desarrollado para el rectificador trifásico con filtro. Es notorio que cuenta con seis elementos MTF , tres fuentes MS_e que representan las entradas de corriente alterna, el capacitor C que funge como filtro y finalmente una resistencia R_L que representa la carga a la salida del rectificador.

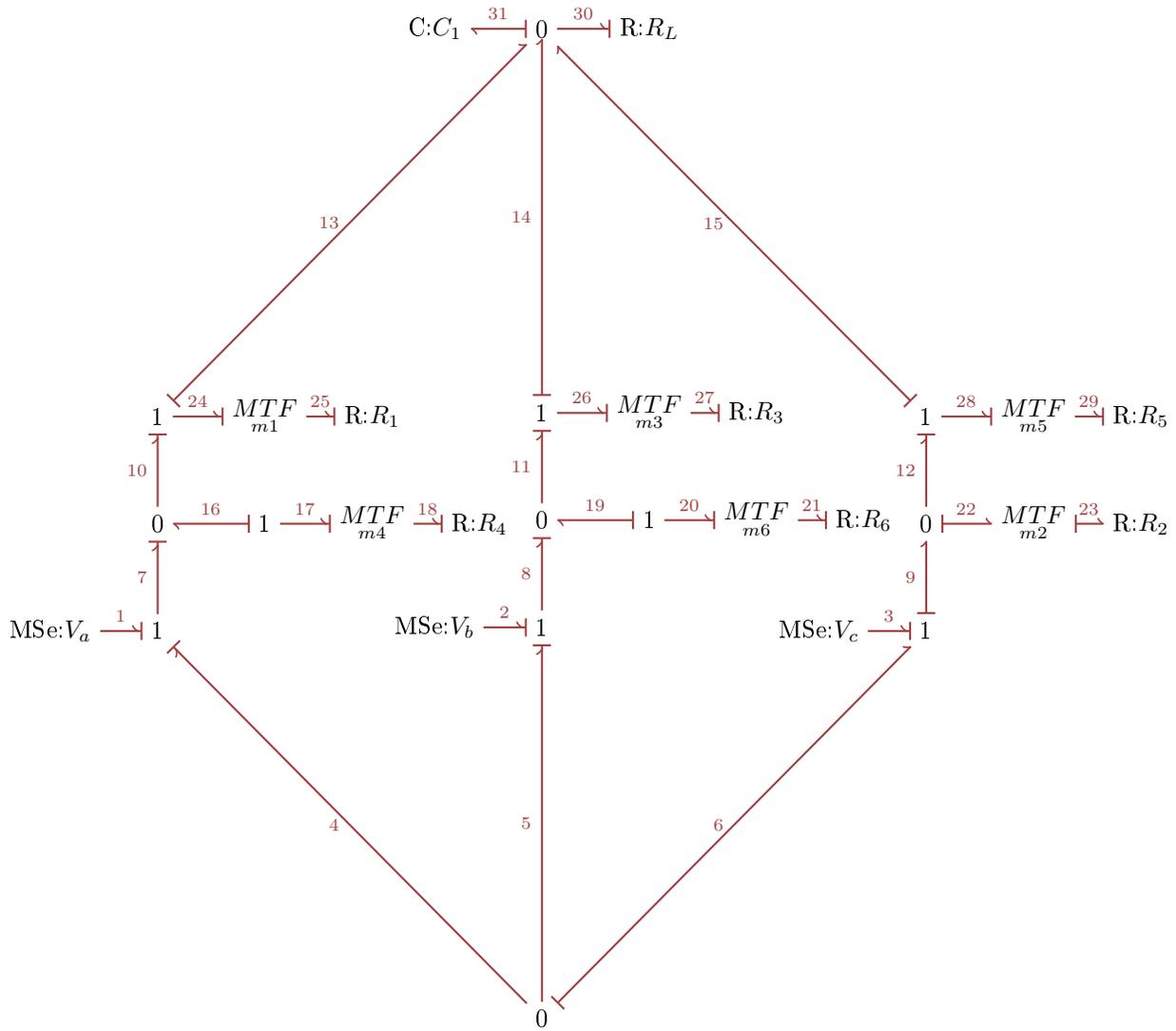


Figura 4.13: Bond Graph del rectificador trifásico con filtro.

Luego de desarrollar el diagrama de Bond Graph representativo del puente rectificador trifásico se inicia la obtención de los vectores clave, lo anterior, tomando como base la información de dicho diagrama. Como primer vector se obtiene el relativo a los elementos fuente (4.27), en este caso tres elementos fuente de esfuerzo, las cuales son provenientes del GSIP.

$$u = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

Para el vector (4.28) que contiene al único elemento almacenador de energía del sistema se utiliza el bond 31.

$$x = q_{31} \quad (4.28)$$

Para obtener el flujo relativo al elemento almacenador se obtiene el vector (4.29).

$$\dot{x} = f_{31} \quad (4.29)$$

Para obtener el esfuerzo relativo al elemento almacenador se obtiene el vector (4.30).

$$z = e_{31} \quad (4.30)$$

Se observa un total de siete elementos disipadores dentro del diagrama de Bond Graph del rectificador trifásico, los cuales se colocan en el vector (4.31).

$$D_{in} = \begin{bmatrix} e_{18} \\ e_{21} \\ e_{25} \\ e_{27} \\ e_{29} \\ e_{30} \\ f_{23} \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

De los mismos elementos disipadores es creado el vector (4.32).

$$D_{out} = \begin{bmatrix} f_{18} \\ f_{21} \\ f_{25} \\ f_{27} \\ f_{29} \\ f_{30} \\ e_{23} \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Finalmente, se crea el vector (4.33), con el cual se pretende medir el valor de voltaje a la salida del rectificador trifásico, ya que este bond pertenece a un bond activo.

$$y = e_{32} \quad (4.33)$$

Para obtener las ecuaciones de estado que representan el modelo matemático del rectificador trifásico es necesario definir tanto L , ecuación (4.34) como F , ecuación (4.35).

$$L = \text{diag} \{1/R_1, R_2, 1/R_3, 1/R_4, 1/R_5, 1/R_6, 1/R_L\} \quad (4.34)$$

$$F = \frac{1}{C_1} \quad (4.35)$$

Al unir los vectores clave se tiene el sistema mostrado en (4.36). Notese que contiene múltiples elementos debido a la naturaleza del rectificador trifásico de puente completo.

$$\begin{bmatrix} f_{31} \\ e_{18} \\ e_{21} \\ e_{25} \\ e_{27} \\ e_{29} \\ e_{30} \\ f_{23} \\ e_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & m_1 & m_3 & m_5 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_2 m_4 & 0 & -m_4 & -m_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -m_2 m_6 & 0 & 0 & m_6 & m_6 \\ -m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_1 m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -m_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_2 m_3 & 0 & m_3 & -m_3 & 0 \\ -m_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_2 m_5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -m_2 m_4 & m_2 m_6 & -m_1 m_2 & -m_2 m_3 & -m_2 m_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{31} \\ f_{18} \\ f_{21} \\ f_{25} \\ f_{27} \\ f_{29} \\ f_{30} \\ e_{23} \\ e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

Luego de verificar que el sistema obtenido cumpla con las dos propiedades de conservación de energía, se obtienen las ecuaciones de estado que representan el modelo matemático del rectificador trifásico.

Para obtener la matriz A, se toma de base la ecuación (2.33), de donde se obtiene la ecuación (4.37).

$$A = a_{11} \quad (4.37)$$

donde:

$$\begin{aligned} a_{11} = & m_1((m_1 m_2^2 m_3^2 R_1 R_5)/(\beta) - (m_1(R_1 R_3 R_5 m_2^2 m_3^2 + R_3 R_4 R_5 m_2^2 m_4^2 + R_1 R_3 R_4 m_2^2 m_5^2 + R_1 R_2 R_3 R_4 R_5 m_2^2 m_6^2 + \\ & R_1 R_3 R_4 R_L m_2 m_5 + R_1 R_3 R_4 R_5 R_L))/R_3(\beta)) + (m_1 m_2^2 m_5^2 R_1 R_4)/(\beta)) + m_3((m_1^2 m_2^2 m_3 R_1 R_5)/(\beta) - \\ & (m_3(R_1 R_4 R_5 m_1^2 m_2^2 + R_3 R_4 R_5 m_2^2 m_4^2 + R_1 R_3 R_4 m_2^2 m_5^2 + R_1 R_2 R_3 R_4 R_5 m_2^2 m_6^2 + R_1 R_3 R_4 R_L m_2 m_5 + \\ & R_1 R_3 R_4 R_5 R_L))/R_4(\beta)) + (m_2^2 m_3 m_5^2 R_1 R_3)/(\beta)) + m_5((m_1^2 m_2^2 m_5 R_1 R_4)/(\beta) - (m_5(\beta))/R_5(\beta)) + \\ & (m_2^2 m_3^2 m_5 R_1 R_3)/(\beta)) - 1/R_6 \end{aligned}$$

$$B = [b_{11} \quad b_{12} \quad b_{13} \quad b_{14}] \quad (4.38)$$

donde:

$$b_{11} = 0$$

$$b_{12} = m_4((m_1^2 m_2^2 m_4 R_4 R_5)/(\beta) + (m_2^2 m_3^2 m_4 R_3 R_5)/(\beta) + (m_2^2 m_4 m_5^2 R_3 R_4)/(\beta)) - m_3((m_1^2 m_2^2 m_3 R_1 R_5)/(\beta) - (m_3(\beta))/(R_4(\beta)) + (m_2^2 m_3 m_5^2 R_1 R_3)/(\beta))$$

$$b_{13} = m_6((m_1^2 m_2^2 m_6 R_1 R_2 R_4 R_5)/(\beta) + (m_2^2 m_3^2 m_6 R_1 R_2 R_3 R_5)/(\beta) + (m_2^2 m_5^2 m_6 R_1 R_2 R_3 R_4)/(\beta)) + m_4((m_1^2 m_2^2 m_4 R_4 R_5)/(\beta) + (m_2^2 m_3^2 m_4 R_3 R_5)/(\beta) + (m_2^2 m_4 m_5^2 R_3 R_4)/(\beta)) + m_3((m_1^2 m_2^2 m_3 R_1 R_5)/(\beta) - (m_3(\beta))/(R_4(\beta)) + (m_2^2 m_3 m_5^2 R_1 R_3)/(\beta))$$

$$b_{14} = m_6((m_1^2 m_2^2 m_6 R_1 R_2 R_4 R_5)/(\beta) + (m_2^2 m_3^2 m_6 R_1 R_2 R_3 R_5)/(\beta) + (m_2^2 m_5^2 m_6 R_1 R_2 R_3 R_4)/(\beta))$$

donde:

$$\beta = R_1 R_4 R_5 m_1^2 m_2^2 + R_1 R_3 R_5 m_2^2 m_3^2 + R_3 R_4 R_5 m_2^2 m_4^2 + R_1 R_3 R_4 m_2^2 m_5^2 + R_1 R_2 R_3 R_4 R_5 m_2^2 m_6^2 + R_1 R_3 R_4 R_L m_2 m_5 + R_1 R_3 R_4 R_5 R_L$$

De la ecuación (2.35), se obtiene el valor de la matriz C (4.39).

$$C = \begin{bmatrix} 1 \\ C_1 \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

De la ecuación (2.36), se obtiene el valor de la matriz D (4.40).

$$D = 0 \quad (4.40)$$

Finalmente tomando de referencia la ecuación (2.31), se obtiene el modelo matemático que representa al rectificador trifásico de puente completo (4.41).

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} a_{11} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \end{bmatrix} u \quad (4.41)$$

Debido a la colocación de un bond activo, se requiere la obtención de la ecuación de estados que representa dicha salida (4.42). Notese que la señal de interés se encuentra asociada con el capacitor C_1 .

$$y = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \end{bmatrix} x \quad (4.42)$$

4.2.4. Modelado del rectificador trifásico en Bond Graph mediante 20Sim

Para corroborar el correcto funcionamiento del diagrama de Bond Graph planteado para el rectificador trifásico de puente completo, se requiere programarlo en el software 20Sim, Figura 4.14, notese que del lado izquierdo del diagrama se encuentra un bloque denominado *control*, en donde se tiene la programación necesaria para lograr la conmutación adecuada de los elementos transformadores modulados (*MTF*). Otro aspecto importante de la simulación del diagrama de Bond

Graph es la programación del bond activo denominado (I_{cd}).

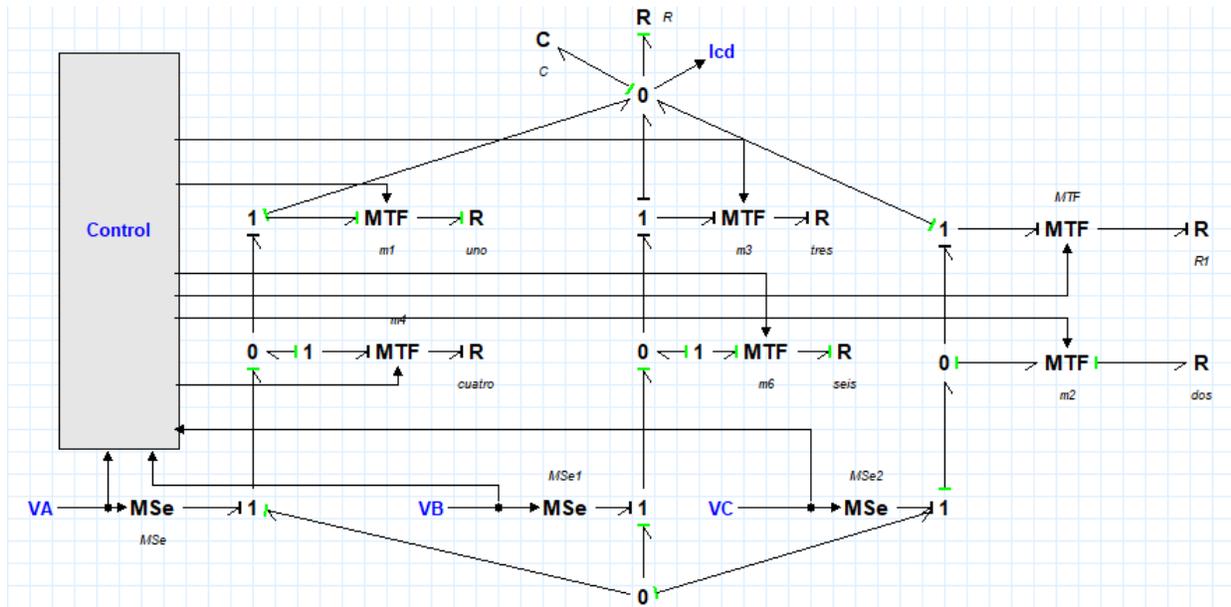


Figura 4.14: Bond Graph del rectificador trifásico en 20Sim.

En la Figura 4.15, se aprecia la programación del bloque denominado control, cuya función es realizar la sincronización por pares de los elementos de conmutación.

```

m1 = if( Va_p > Vb_p ) and (Va_p > Vc_p) then 1 else 0 end;
m4 = if( Va_p < Vb_p ) and (Va_p < Vc_p) then 1 else 0 end;
m3 = if( Vb_p > Va_p ) and (Vb_p > Vc_p) then 1 else 0 end;
m6 = if( Vb_p < Va_p ) and (Vb_p < Vc_p) then 1 else 0 end;
m5 = if( Vc_p > Va_p ) and (Vc_p > Vb_p) then 1 else 0 end;
m2 = if( Vc_p < Va_p ) and (Vc_p < Vb_p) then 0 else 1 end;

```

Figura 4.15: Ecuaciones del bloque de control para el rectificador trifásico en Bond Graph con 20Sim.

A continuación se presentan las formas de onda del rectificador trifásico modelado en el software 20sim a partir del Bond Graph desarrollado, Figura 4.16. Notese que la señal de corriente directa de salida tiene un rizado mínimo, ya que se corrigió gracias al capacitor agregado como filtro.

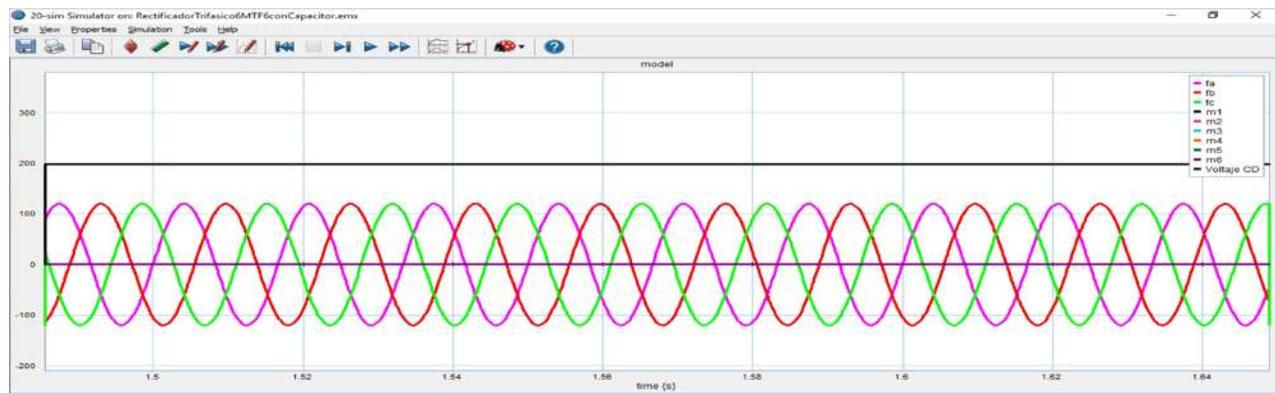


Figura 4.16: Formas de onda del rectificador trifásico.

4.3. Convertidor boost

En la turbina Skystream como en muchas aplicaciones industriales se requiere convertir una fuente de energía de corriente directa fija, en una fuente de corriente directa variable. En la etapa anterior de la presente investigación se encuentra el rectificador trifásico, el cual solamente convierte la corriente alterna en corriente directa, pero no la aumenta ni disminuye. Para lograr lo anterior, se requiere la implementación de un convertidor CD-CD, Figura 4.17.

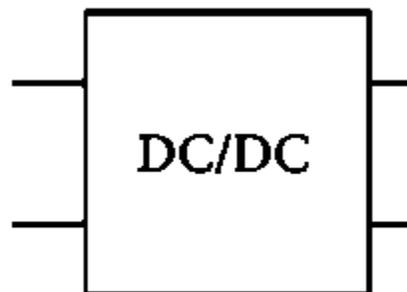


Figura 4.17: Bloque representativo del convertidor boost.

Dicho convertidor de CD-CD convierte directamente corriente de CD a CD y simplemente se conoce como convertidor de CD. Un convertidor de CD, se puede considerar equivalente de CD a un transformador de corriente alterna con una relación de vueltas continuamente variable. Al igual que un transformador, se puede utilizar para aumentar o reducir una fuente de voltaje de CD.

Para la presente investigación se requiere un convertidor de CD-CD elevador, para ello se utiliza el convertidor boost, el cual cumple con el objetivo de aumentar el valor de energía proveniente del rectificador trifásico.

4.3.1. Topología del convertidor boost

En la Figura 4.18, se muestra la topología generalizada de un convertidor boost, el cual eleva el voltaje hasta un valor deseado. Es notorio que son pocos los elementos presentes para realizar la conversión de energía, entre ellos: un inductor, un capacitor, un diodo, un elemento de conmutación controlada (Q) y una resistencia como carga. Para dicho convertidor la potencia de salida se define en la ecuación (4.43).

$$P_{cd} = I_a V_a \quad (4.43)$$

donde V_a e I_a son el voltaje de carga y corriente de carga promedio.

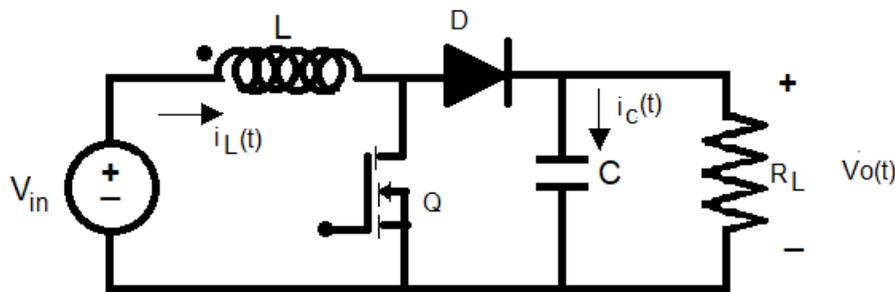


Figura 4.18: Topología generalizada del convertidor boost.

El funcionamiento del convertidor se basa en la operación del elemento Q , el cual tiene la función de un switch que se activa o desactiva durante determinado tiempo. En la Figura 4.19, se analiza el funcionamiento del convertidor cuando se encuentra activo el elemento Q .

Cuando dicho elemento Q se encuentra cerrado en un tiempo t_1 , la corriente en el inductor se eleva debido a que se encuentra conectada directamente con la fuente y la corriente se almacena en el inductor L .

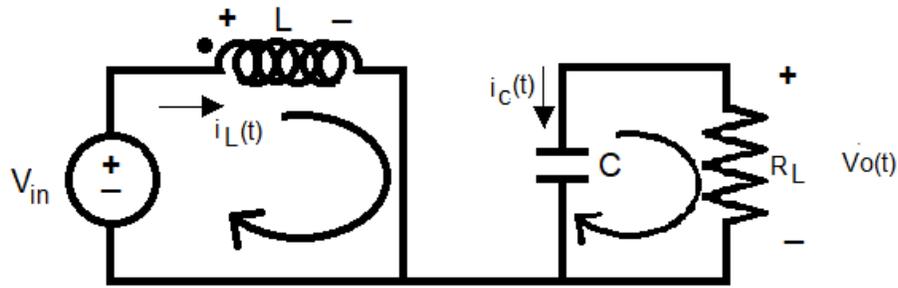


Figura 4.19: Topología del convertidor con switch activado.

Si el elemento Q , se abre en un tiempo t_2 , la energía almacenada en el inductor L se transfiere a la carga a través del diodo D y la corriente en el inductor cae.

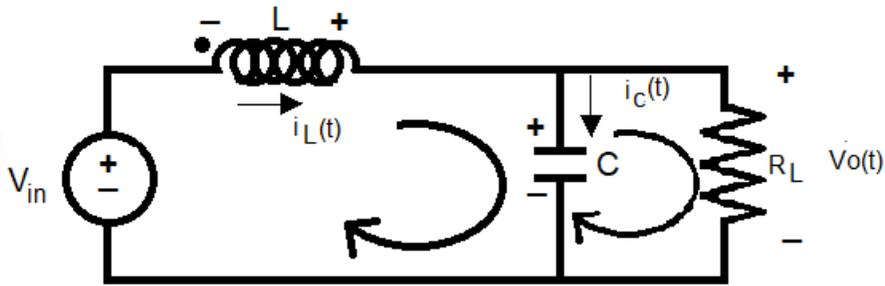


Figura 4.20: Topología del convertidor con switch desactivado.

Cuando se enciende el convertidor, el voltaje a través del inductor se muestra en la ecuación (4.44).

$$v_L = L \frac{di}{dt} \quad (4.44)$$

Así, la corriente de rizo pico a pico en el inductor se define en la ecuación (4.45).

$$\Delta I = \frac{V_{in}}{L} t_1 \quad (4.45)$$

El voltaje de salida promedio de un convertidor boost se define en la ecuación (4.46).

$$V_a = V_{in} + L \frac{\Delta I}{t_2} = V_{in} \left(1 + \frac{t_1}{t_2}\right) = V_{in} \frac{1}{1 - k} \quad (4.46)$$

Al observar la ecuación (4.46), es notorio que la ganancia de un convertidor boost es:

$$G_{boost} = \frac{1}{1 - k} \quad (4.47)$$

En las ecuaciones (4.46) y (4.47) aparece la variable k , la cual representa el ciclo de trabajo presente en el convertidor boost. Es de suma importancia, ya que en base a dicho ciclo se opera el elemento de conmutación Q presente en el convertidor boost.

El funcionamiento del ciclo de trabajo k , se basa en la Modulación de Ancho de Pulso o PWM por sus siglas en inglés (*Pulse Width Modulation*), Figura 4.21. El método de PWM consiste en una señal tipo diente de sierra (Saw) y una señal de corriente directa; la señal diente de sierra queda como referencia y la señal de CD se puede variar, así en la programación se condiciona cuando para obtener los pulsos que dan como resultado los tiempos de encendido y apagado, los cuales serán los pulsos de control para el elemento Q de conmutación.

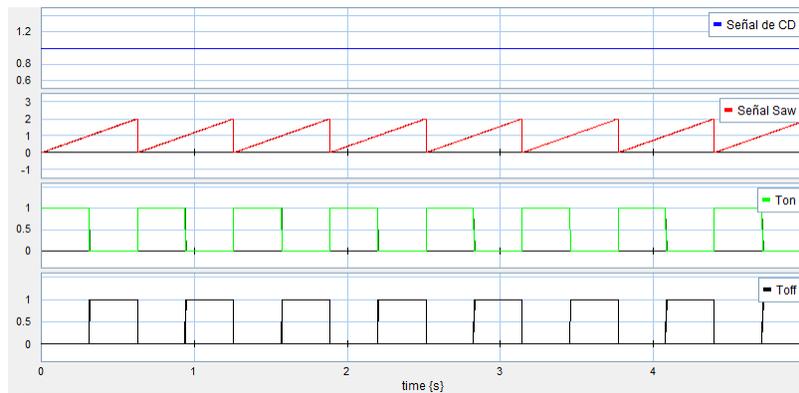


Figura 4.21: PWM para el elemento de conmutación del convertidor boost.

4.3.2. Bond Graph del convertidor boost

A continuación se muestra el diagrama de Bond Graph que representa al convertidor boost, en el cual consta de seis elementos, teniendo un elemento de fuente de esfuerzo $MS_e : V_1$, dos elementos de conmutación MTF , dos elementos almacenadores de energía L_1 y C_1 y tres elementos disipadores, uno de los cuales representa la resistencia de carga R_L .

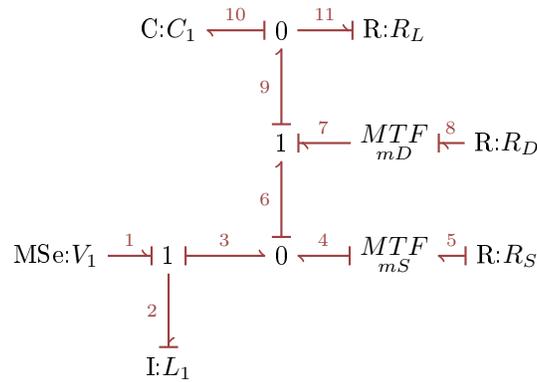


Figura 4.22: Bond Graph del convertidor boost.

El vector relativo al único elemento fuente de esfuerzo $MSe : V_1$ se define en la ecuación (4.48).

$$u = e_1 \quad (4.48)$$

Para obtener el vector relativo a los elementos disipadores, se tiene (4.49).

$$x = \begin{bmatrix} p_2 \\ q_{10} \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

Los bonds de referencia de los elementos disipadores son el 2 y 10, de ahí se obtiene el vector (4.50).

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} e_2 \\ f_{10} \end{bmatrix} \quad (4.50)$$

El vector z se define en (4.51).

$$z = \begin{bmatrix} f_2 \\ e_{10} \end{bmatrix} \quad (4.51)$$

Para llenar el vector de entrada (4.52) relativo a los elementos disipadores se utilizan los bonds: 5, 11 y 8. Dichos bonds, también se utilizan para el vector de salida representado en (4.53).

$$D_{in} = \begin{bmatrix} e_5 \\ e_{11} \\ f_8 \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

$$D_{out} = \begin{bmatrix} f_5 \\ f_{11} \\ e_8 \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

Finalmente, se muestra en (4.54) el vector de salida perteneciente al bond activo con el cual se desea obtener directamente el valor de la variable de voltaje a la salida del convertidor boost.

$$y = e_{12} \quad (4.54)$$

Al definir los valores de L y F quedan las matrices diagonales como se muestra en las ecuaciones (4.55) y (4.56) respectivamente.

$$L = \text{diag} \{1/R_S, R_D, 1/R_L\} \quad (4.55)$$

$$F = \text{diag} \{1/L_1, 1/C_1\} \quad (4.56)$$

Al unir la información de cada uno de los vectores anteriores (4.57), se tiene el sistema que representa el diagrama de Bond Graph previo a la obtención del modelo matemático que representa el comportamiento del sistema dinámico del convertidor boost.

$$\begin{bmatrix} e_2 \\ f_{10} \\ e_5 \\ e_{11} \\ f_8 \\ e_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & -m_D & 1 \\ 1 & 0 & -m_S & -1 & 0 & 0 \\ 0 & m_S & 0 & 0 & -m_D m_S & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_D & 0 & m_D m_S & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_2 \\ e_{10} \\ f_5 \\ f_{11} \\ e_8 \\ e_1 \end{bmatrix} \quad (4.57)$$

Tomando de referencia la ecuación (2.38) se obtiene la ecuación (4.58).

$$M = \begin{bmatrix} \frac{R_L R_S}{\Delta} & 0 & \frac{-R_S m_D m_S}{\Delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ \frac{R_L m_D m_S}{\Delta} & 0 & \frac{R_L R_S}{\Delta} \end{bmatrix} \quad (4.58)$$

donde:

$$\Delta = m_D^2 m_S^2 + R_L R_S$$

Al obtener la matriz A, se toma de referencia la ecuación (2.38) y se obtiene (4.59).

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-m_D^2 R_L R_S}{\Delta L_1} & \left(\frac{-m_D^2 m_S^2 R_L}{\Delta} - 1 \right) \frac{1}{C_1} \\ \left(\frac{-m_D^2 m_S^2 R_S}{\Delta} + 1 \right) \frac{1}{L_1} & \left(\frac{-m_S^2 R_L R_S}{\Delta} + 1 \right) \frac{1}{C_1} \end{bmatrix} \quad (4.59)$$

Para la matriz B, es referente la ecuación (2.34), así se obtiene (4.60).

$$B = S_{13} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.60)$$

Para la matriz C, es referente la ecuación (2.35), así se obtiene (4.61).

$$C = S_{31}F = \left[0 \quad \frac{1}{C_1} \right] \quad (4.61)$$

Finalmente, se obtiene el modelo matemático representativo del diagrama de Bond Graph planteado para el convertidor boost, el cual se muestra en (4.62).

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \frac{-m_D^2 R_L R_S}{\Delta L_1} & \left(\frac{-m_D^2 m_S^2 R_L}{\Delta} - 1 \right) \frac{1}{C_1} \\ \left(\frac{-m_D^2 m_S^2 R_S}{\Delta} + 1 \right) \frac{1}{L_1} & \left(\frac{-m_S^2 R_L R_S}{\Delta} + 1 \right) \frac{1}{C_1} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (4.62)$$

Cabe mencionar la colocación de un bond activo, por lo cual se requiere obtener la salida planteada, cuyo resultado aparece en la ecuación (4.63).

$$y = \left[0 \quad \frac{1}{C_1} \right] x \quad (4.63)$$

4.3.3. Modelado en Bond Graph del convertidor boost en 20Sim

Al modelar el convertidor boost en el software 20Sim mostrado en la Figura 4.23, se pueden observar los elementos propios de la topología del convertidor, además de un bloque denominado ciclo de trabajo, con el cual se controla el voltaje a la salida del convertidor, lo anterior controlando el tiempo de conmutación de los dos elementos *MTF* a través de su modulación.

4.4. Inversor monofásico de puente completo

El inversor monofásico es un convertidor de energía de corriente directa en energía de corriente alterna como se muestra en la Figura 4.25, cuya función específica es cambiar un voltaje de entrada de CD a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna de magnitud y frecuencia deseadas. Su posición dentro del sistema eólico de la presente investigación es después de la etapa del convertidor boost.

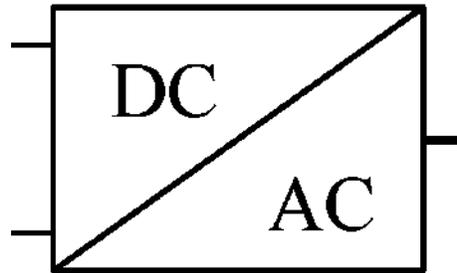


Figura 4.25: Bloque representativo del inversor monofásico de puente completo.

4.4.1. Topología del inversor monofásico de puente completo

En la Figura 4.26, se muestra la topología de un inversor monofásico de puente completo, el cual consta de cuatro elementos de conmutación controlada $Q_1 - Q_4$, y cuatro elementos de conmutación no controlada $D_1 - D_4$, así como dos elementos capacitivos C_1 y C_2 y la fuente de corriente directa V_s en la entrada.

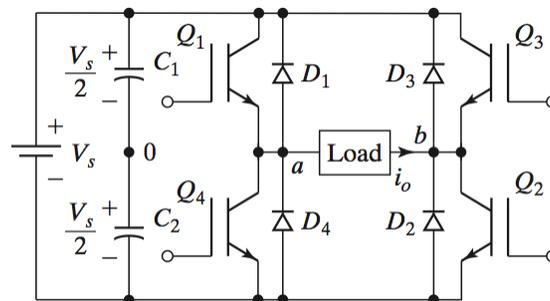


Figura 4.26: Topología del inversor monofásico de puente completo.

El funcionamiento del inversor monofásico, se basa en la frecuencia de control que se aplica a los elementos $Q_1 - Q_4$, la activación se realiza por pares, es decir, en un tiempo $T_0/2$ se activan los elementos Q_1 y Q_2 y en la carga se tiene el voltaje V_s , por otro lado, si en un tiempo T_0 se activan los elementos Q_3 y Q_4 se tendrá el voltaje $-V_s$ en la carga. Dicho lo anterior, se cumple la función del inversor de proveer un voltaje de corriente alterna simétrico, Figura 4.27.

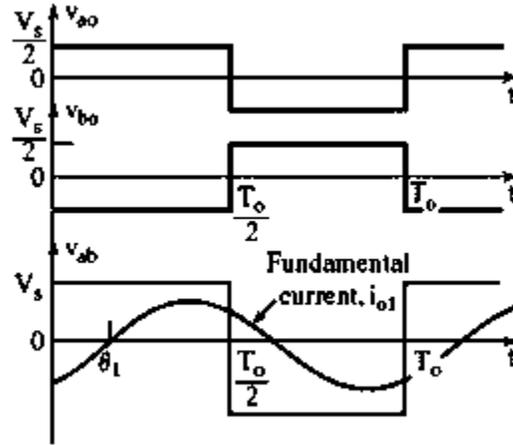


Figura 4.27: Formas de onda del inversor monofásico de puente completo.

El voltaje rms se calcula como aparece en la ecuación (4.64).

$$V_o = \left(\frac{2}{T_0} \int_0^{T_0/2} V_s^2 dt \right)^{1/2} = V_s \quad (4.64)$$

Si se requiere obtener el voltaje de salida instantáneo del inversor, se puede expresar mediante una serie de Fourier como se muestra en la ecuación (4.65).

$$v_o = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \sin n\omega t \quad (4.65)$$

Cuando $n=1$ de la ecuación (4.65), se tiene el valor rms de la componente fundamental, la cual queda como se aprecia en la ecuación (4.66).

$$v_{o1} = \frac{4V_s}{\sqrt{2\pi}} = 0.90V_s \quad (4.66)$$

Para obtener la corriente instantánea de salida, se presenta la ecuación (4.67).

$$i_0 = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi\sqrt{R^2 + (n\omega L)^2}} \sin(n\omega t - \theta_n) \quad (4.67)$$

donde: $\theta_n = \tan^{-1}(n\omega L/R)$

El inversor monofásico, es la etapa final del sistema de generación eólico. Dicha etapa es capaz de interconectarse con el SEN.

4.4.2. Bond Graph del inversor monofásico de puente completo

En la Figura 4.28, se observa el Bond Graph correspondiente al inversor monofásico de puente completo. Notese que se compone de un total de veinte bonds, en donde se interconectan; los cuatro elementos principales de conmutación $m_1 - m_4$, dos capacitores, la resistencia de carga R_L y obviamente el elemento fuente $Ms_e : V_s$.

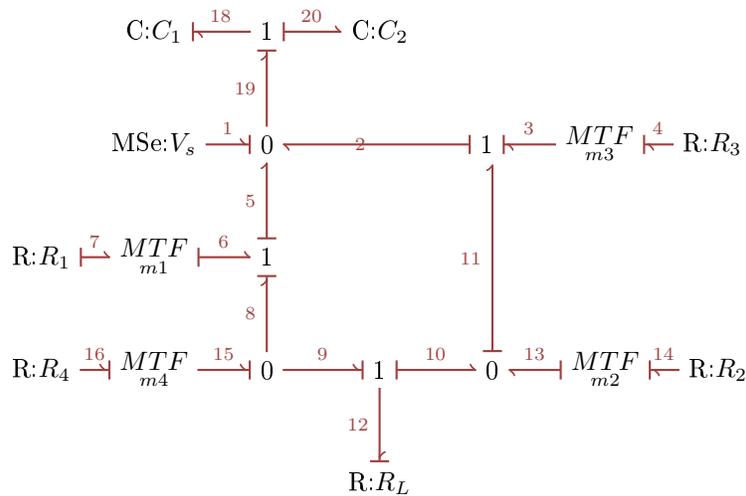


Figura 4.28: Bond Graph del inversor monofásico de puente completo.

El vector que contiene el elemento fuente de esfuerzo, se presenta en la ecuación (4.68). Notese que únicamente se tiene un elemento, el cual proviene del convertidor boost.

$$u = e_1 \quad (4.68)$$

Para el vector que contiene el elemento almacenador de energía perteneciente al bond 20, se tiene la ecuación (4.69). Cabe mencionar que a pesar de la existencia de otro elemento almacenador, este se coloca de manera independiente por tener causalidad derivativa.

$$\dot{x} = q_{20} \quad (4.69)$$

Al obtener el vector que contiene el elemento almacenador con causalidad derivativa y con el interés de conocer el flujo, queda (4.70).

$$\dot{x} = f_{20} \quad (4.70)$$

En el vector z mostrado en la ecuación (4.71), se tiene el esfuerzo a través del elemento almacenador conectado al bond veinte.

$$z = e_{20} \quad (4.71)$$

Los elementos disipadores son parte del vector de entrada (4.72), así como del vector de salida (4.73).

$$D_{in} = \begin{bmatrix} e_4 \\ f_7 \\ f_{14} \\ e_{16} \\ e_{12} \end{bmatrix} \quad (4.72)$$

$$D_{out} = \begin{bmatrix} f_4 \\ e_7 \\ e_{14} \\ f_{16} \\ f_{12} \end{bmatrix} \quad (4.73)$$

La matriz L , representada en la ecuación (4.74), se llena a partir de los elementos disipadores presentes en el inversor monofásico de puente completo.

$$L = \text{diag} \{1/R_1, 1/R_2, R_3, R_4, 1/R_L\} \quad (4.74)$$

Para obtener F , representada por la ecuación (4.75), se hace uso del elemento almacenador que tiene causalidad integral.

$$F = \frac{1}{C_2} \quad (4.75)$$

Ahora como se tiene un elemento almacenador que tiene causalidad derivativa, se tiene que agregar a la matriz de vectores clave, así la formulación queda como (4.76). En donde se observa que el elemento Z_d corresponde al elemento conectado al bond dieciocho y que precisamente es el cual tiene causalidad derivativa.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ D_{in} \\ y \\ Z_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 \\ S_{41} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z \\ D_{out} \\ u \\ \dot{x}_d \end{bmatrix} \quad (4.76)$$

Finalmente al unir los vectores clave anteriores, se obtiene (4.77).

$$\begin{bmatrix} f_{20} \\ e_4 \\ f_7 \\ f_{14} \\ e_{16} \\ e_{12} \\ f_{21} \\ e_{18} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 m_3 & 0 & 0 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_1 m_4 & -m_1 & 0 & 0 \\ 0 & -m_2 m_3 & 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -m_1 m_4 & 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 & -m_2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{20} \\ f_4 \\ e_7 \\ e_{14} \\ f_{16} \\ f_{12} \\ e_1 \\ f_{18} \end{bmatrix} \quad (4.77)$$

Al tener un elemento con causalidad derivativa, se obtiene la siguiente formulación de (4.78) a (4.81), obteniendo finalmente el valor de (4.83), en donde se observa que influyen los dos capacitores presentes en el inversor.

$$G = E^{-1} [S_{14} F_d^{-1} S_{43}] \quad (4.78)$$

$$E = I - S_{14} F_d^{-1} S_{41} F \quad (4.79)$$

$$E = 1 - \frac{C_1}{C_2} \quad (4.80)$$

$$E^{-1} = \frac{-1}{\left(\frac{C_1}{C_2} - 1\right)} \tag{4.81}$$

$$G = \frac{-1}{\left(\frac{C_1}{C_2} - 1\right)} [(1)(C_1)(1)] \tag{4.82}$$

$$G = \frac{-C_1}{\left(\frac{C_1}{C_2} - 1\right)} \tag{4.83}$$

4.4.3. Modelado en Bond Graph del inversor monofásico en 20Sim

Luego del desarrollo matemático del Bond Graph planteado para representar al inversor monofásico de puente completo es conveniente realizar la simulación del mismo, Figura 4.29, con el objetivo de analizar de forma gráfica los resultados que tiene que arrojar el modelo de la etapa del inversor monofásico. Cabe mencionar, que además de los elementos citados con anterioridad, se observa el bloque que contiene el sistema de modulación PWM para controlar a cada uno de los cuatro elementos de conmutación.

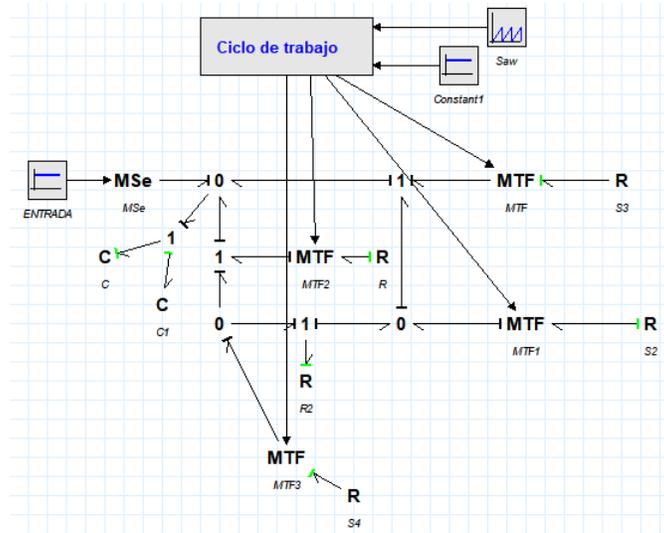


Figura 4.29: Bond Graph del inversor monofásico en 20Sim.

Al realizar la simulación del inversor en el software 20Sim se grafican las señales de interés, Figura 4.30, en este caso, se observa inicialmente la señal de entrada de corriente directa, para luego verificar la conmutación de cada switch, con el objetivo de obtener una señal de corriente alterna,

tal y como se muestra al final de la imagen, en donde se observa una señal con las características deseadas.

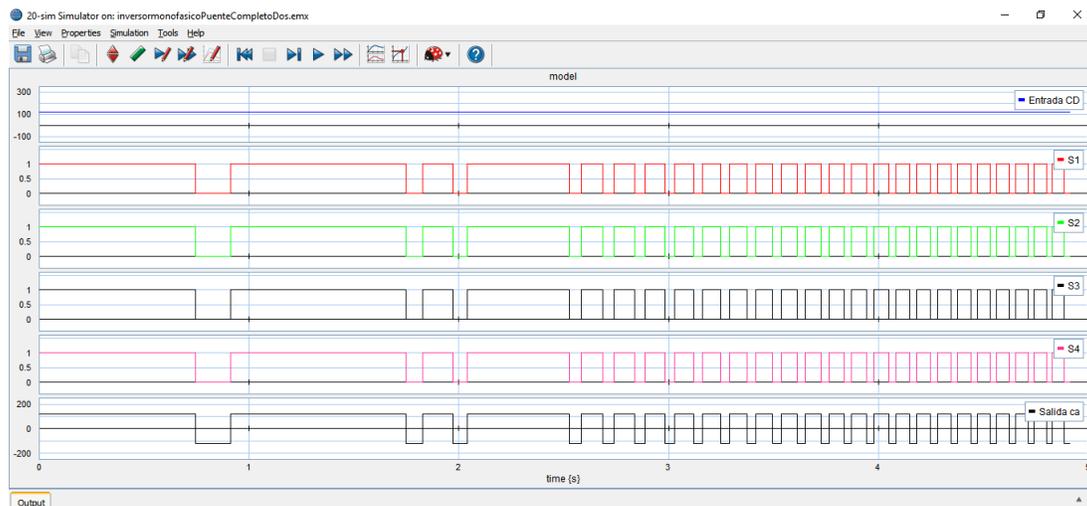


Figura 4.30: Formas de onda del inversor monofásico en 20Sim.

4.5. Sistema Skystream mediante el software 20Sim

Después de realizar cada uno de los elementos presentes en la turbina Skystream en el software 20Sim, se presenta la unión de todos y cada uno de los antes mencionados, Figura 4.31. Cabe señalar que se realizan pruebas por separado y finalmente en conjunto para poder validar el modelo de la turbina Skystream con lecturas reales de generación eólica.

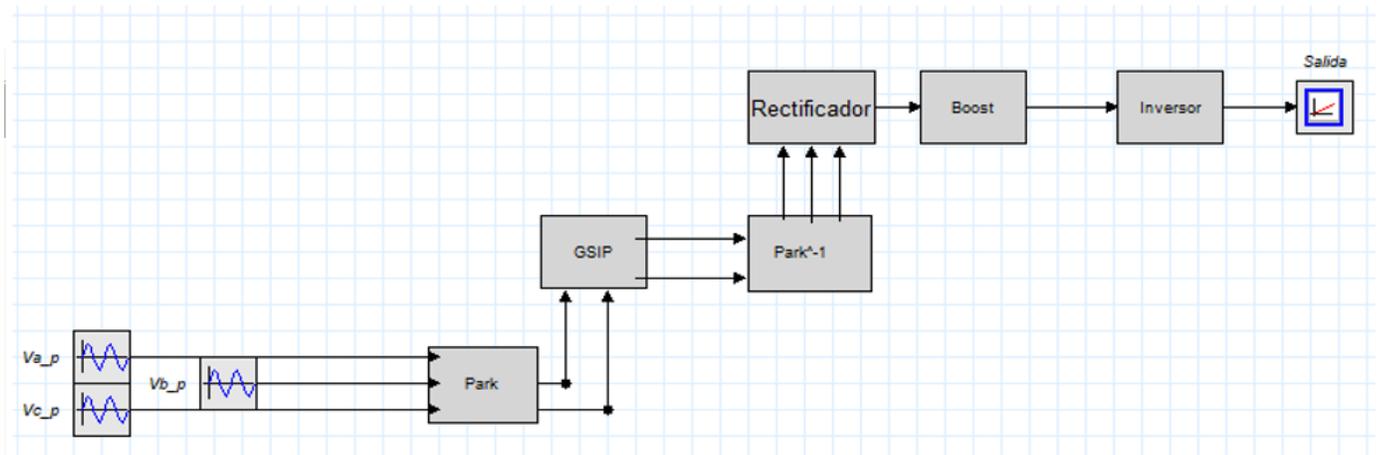


Figura 4.31: Simulación del sistema en Bond Graph de la turbina Skystream en 20Sim.

En la Figura 4.32, se muestran las formas de onda de las diferentes etapas que conforman el sistema eólico Skystream planteado; primeramente se observan tres ondas senoidales representativas de las fases A,B y C provenientes del GSIP, luego aparece la señal denominada V_d , en donde se verifica el correcto funcionamiento de la transformación de Park al convertir las tres señales senoidales en una señal invariante en el tiempo, es decir de corriente directa. Posteriormente, se observan nuevamente unas señales senoidales, las cuales representan a la transformación inversa de Park, en dicha transformación se logra convertir de manera matemática la señal de corriente directa en señales de corriente alterna, las cuales son conectadas a la entrada al rectificador trifásico, el que a su vez arroja una señal de corriente directa en la salida.

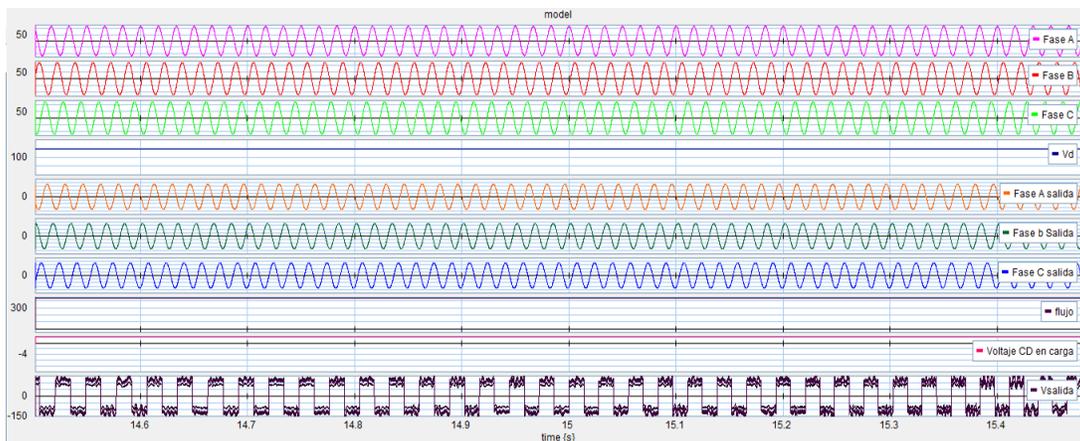
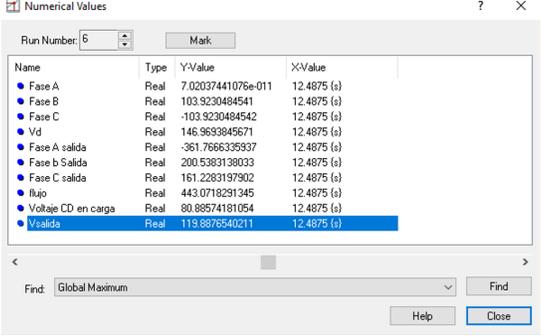


Figura 4.32: Gráfica del sistema en Bond Graph de la turbina Skystream en 20Sim.

A pesar de que el rectificador trifásico provee una señal de corriente directa, no es posible interco-

nectarlo al SEN, ya que no es compatible con las especificaciones que se requieren para interconectarlo. Para ello, es necesario conectar la señal de corriente directa al inversor, el cual convierte la energía de corriente directa a energía en corriente alterna, es decir con una amplitud y frecuencia como la mostrada al final de la Figura 4.32, que es totalmente compatible con el SEN.



Name	Type	YValue	XValue
● Fase A	Real	7.02037441076e-011	12.4875 (s)
● Fase B	Real	103.9230484541	12.4875 (s)
● Fase C	Real	-103.9230484542	12.4875 (s)
● Vd	Real	146.9693845671	12.4875 (s)
● Fase A salida	Real	-361.7666335937	12.4875 (s)
● Fase b Salida	Real	200.5363138033	12.4875 (s)
● Fase C salida	Real	161.2263197302	12.4875 (s)
● Rujp	Real	443.0716291345	12.4875 (s)
● Voltaje CD en carga	Real	80.08574181054	12.4875 (s)
● Vsalida	Real	119.8376540211	12.4875 (s)

Figura 4.33: Valores numéricos del sistema en Bond Graph de la turbina Skystream mediante 20Sim.

En la Figura 4.33, se muestra una tabla perteneciente al software 20sim, en donde se presentan los valores numéricos del sistema planteado, notese que el valor de salida tiene un valor de 119.88V, muy cercano a los 120V que maneja el sistema monofásico del SEN.

4.5.1. Modelo aerodinámico del viento

Para validar los resultados del modelo de la turbina Skystream, se requiere la incidencia del viento en los alábes de la turbina, para lograr lo anterior, se utiliza la ecuación (4.84), [Elbeji et al., 2014], en donde se logra una velocidad variable del viento a partir de una serie de Fourier tomando de referencia características climáticas y geográficas para obtener una velocidad promedio del viento.

$$v_v(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \sin(\omega_k t) \quad (4.84)$$

donde A es el valor promedio de la velocidad del viento, a_k es la amplitud del armónico de orden k y ω_k es el pulso harmónico de orden k .

En la Figura 4.34, se muestra la forma de onda de la velocidad del viento utilizada para el sistema Skystream mediante el software 20sim.

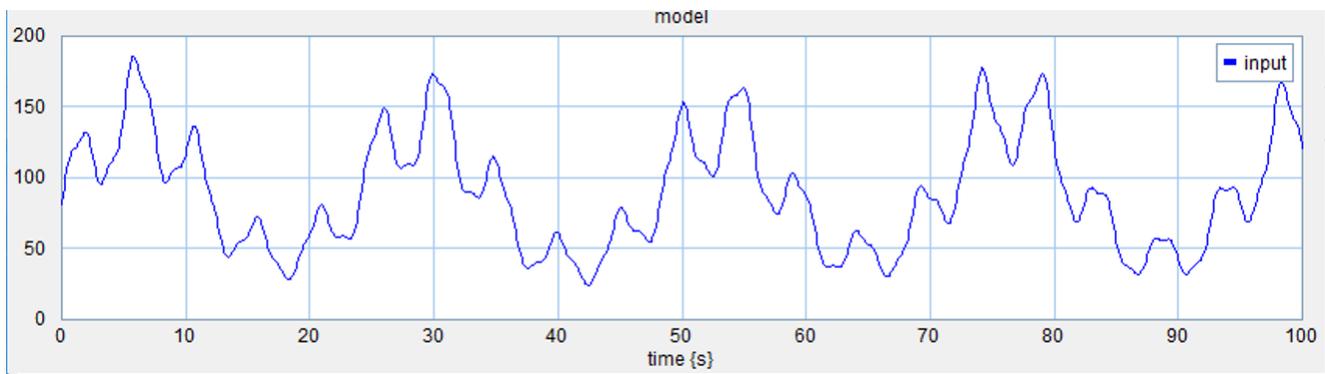


Figura 4.34: Simulación del viento para el generador de la turbina Skystream mediante 20Sim.

A partir del modelo del viento se obtiene la energía aerodinámica que puede generar, la cual se puede representar como la ecuación (4.85).

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 \quad (4.85)$$

donde A es el área circular, ρ es la densidad del aire y v_w es la velocidad del viento.

En la Figura 4.35, se observa la curva de potencia obtenida por la turbina Skystream 3.7, en donde se muestra una potencia variable y valores cercanos a los 2.5 KW, lo cual coincide con los valores del fabricante que indica generación incluso de 2.7 KW.

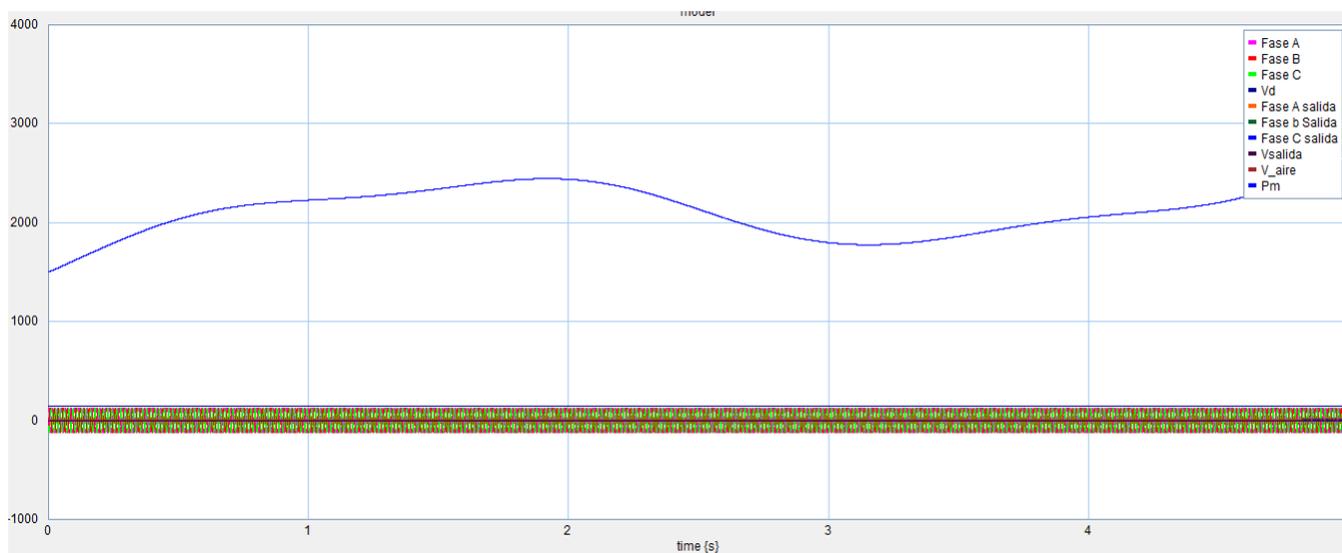


Figura 4.35: Potencia generada mediante el sistema Skystream utilizando 20Sim.

Cabe mencionar que a pesar de que se tiene una potencia generada que varía respecto a la velocidad del viento, se tiene un voltaje de generación constante, tal y como se muestra en la Figura 4.36. Lo anterior es una de las características más importantes del sistema, ya que a pesar de altibajos en la velocidad del viento, se mantiene constante el voltaje constante interconectado con el SEN a través del inversor monofásico.

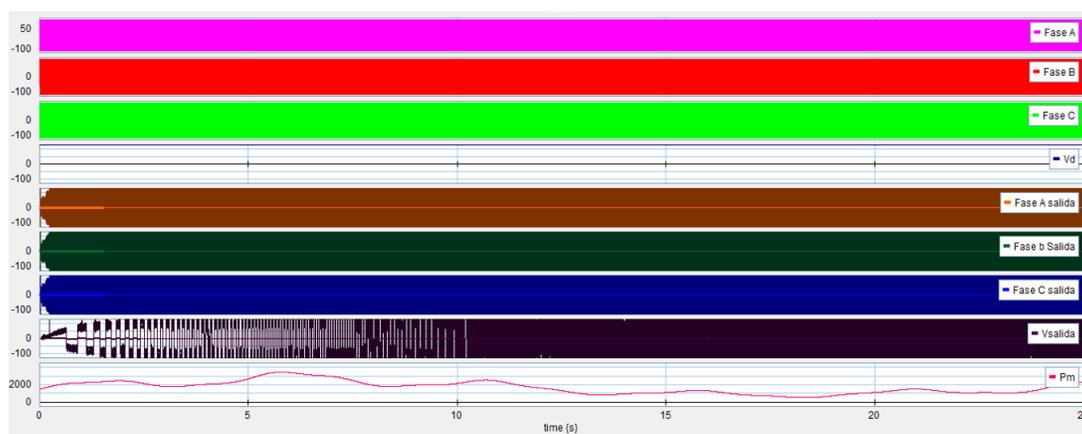


Figura 4.36: Comportamiento de la potencia generada de la turbina Skystream mediante 20Sim.

En la Figura 4.37, se muestran la mayoría de las formas de onda de interés relativas al sistema eólico mediante la turbina Skystream 3.7. Se observan las señales producidas por el GSIP, las señales provenientes de la transformada de Park, así como la inversa de Park, señal del rectificador

trifásico, convertidor boost, voltaje de salida del Inversor monofásico, potencia de salida de la turbina eólica y finalmente la velocidad del viento.

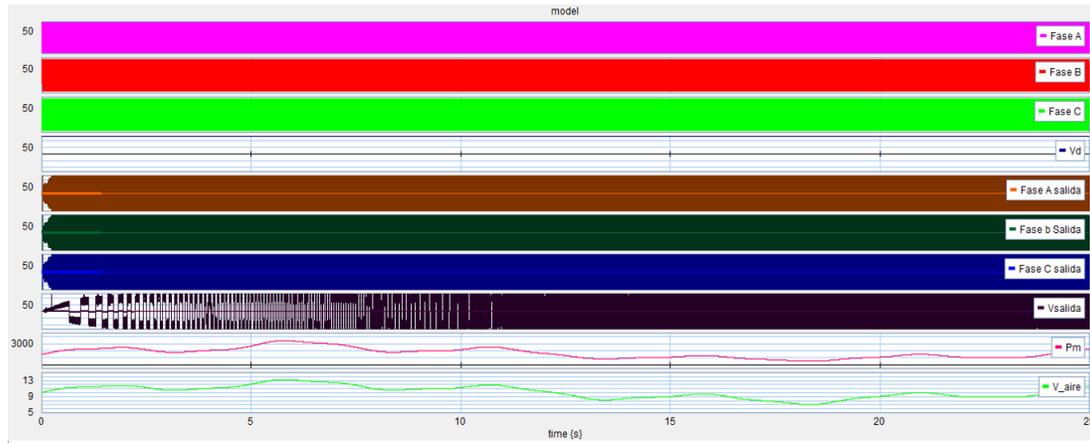


Figura 4.37: Voltajes, potencia y velocidad del viento presentes en la turbina Skystream mediante 20Sim.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

La historia de las ciencias nos demuestra que las teorías son perecederas. Con cada nueva verdad revelada, tenemos una mejor comprensión de la naturaleza y nuestras concepciones, y nuestros puntos de vista se modifican.

Nikola Tesla

5.1. Conclusiones

La metodología de Bond Graph unifica los diferentes sistemas de energía, haciendola una herramienta sumamente potente y elegible al requerir modelos matemáticos de múltisistemas dinámicos. Tal fue el caso del presente proyecto en donde se analizaron en conjunto diversos sistemas de energía.

Los modelos matemáticos obtenidos mediante la metodología Bond Graph aseguran una respuesta en donde se tienen directamente los valores de las variables de interés, lo que tiene un valor agregado sobre otras técnicas de obtención de modelos matemáticos, como los modelos obtenidos algebraicamente mediante EDO o mediante el método de diagrama de bloques.

La turbina eólica Skystream 3.7 por excelencia, es una de las turbinas de mayor adquisición para aplicaciones residencial y de diversa indole, lo anterior por su diseño y calidad de elementos que la conforman, así como por las múltiples certificaciones obtenidas a nivel mundial que la catalogan como una de las favoritas en el mercado.

El software de simulación 20Sim provee los elementos para programar los diagramas de Bond Graph, contiene un ambiente amigable para el programador, así como una basta cantidad de herramientas para obtener graficamente las señales de interés. Además se puede obtener un resumen de ecuaciones del diagrama programado.

El sistema de monitoreo Skyview con el que cuenta la turbina eólica Skystream 3.7, es de calidad y de suma importancia para la adquisición de datos y monitoreo en tiempo real, así como para diagnosticar de manera rápida el estado de la turbina. Es sumamente amigable debido a su desarrollo sobre la plataforma de LabVIEW.

Se concluye que los pioneros en el ramo eólico estaban en lo cierto al decir que la limitante al inicio del desarrollo de las turbinas eólicas era el control de la velocidad y que actualmente gracias al avance en electrónica de potencia se pueden obtener los resultados esperados desde aquel entonces.

Se obtuvo el modelo en Bond Graph de la turbina Skystream 3.7 propuesto inicialmente, logrando los objetivos planteados y así, culminando con un proyecto que puede ser la base para futuras investigaciones.

Con la presente investigación se demuestran las capacidades que tiene la metodología de Bond Graph.

5.2. Recomendaciones

Un análisis de un pequeño parque eólico con la selección de la turbina eólica Skystream 3.7, sería de gran utilidad para conocer el rendimiento en conjunto de la turbina. Para eso, también se recomienda el estudio de una zona geográfica del estado de Michoacán en donde se puedan llevar a cabo múltiples pruebas al respecto.

Otra recomendación sería, realizar un estudio en la UMSNH, en específico en Ciudad Universitaria, en donde se tienen unidades meteorológicas en diversos edificios, el objetivo es reunir la información estadística sobre las velocidades del viento en los diferentes puntos geográficos de Ciudad Universitaria, así se podría realizar un análisis para definir puntos estratégicos para la colocación de turbinas eólicas.

También, se recomienda el trabajo en conjunto de Universitarios para lograr la manufactura de turbinas eólicas similares a la turbina Skystream de la cual se tiene comprobada su eficacia.

Bibliografía

- [Aliprantis et al., 2000] Aliprantis, D., Papathanassiou, S., Papadopoulos, M., and Kladas, A. (2000). Modeling and control of a variable-speed wind turbine equipped with permanent magnet synchronous generator. In *Proc. of ICEM*, volume 3, pages 558–562.
- [Anderson and Fouad, 2008] Anderson, P. M. and Fouad, A. A. (2008). *Power system control and stability*. John Wiley & Sons.
- [Badoni and Prakash, 2014] Badoni, P. and Prakash, S. B. (2014). Modeling and simulation of 2 mw pmsg wind energy conversion systems. *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 9(4):53–58.
- [Badoud et al., 2013] Badoud, A. E., Khemliche, M., and Chermat, F. (2013). Investigation bond graph to control a variable speed wind turbine with permanent magnet synchronous generator. *Proceedings Engineering & Technology-Vol*, 1:64–69.
- [Baqersad et al., 2015] Baqersad, J., Niezrecki, C., and Avitabile, P. (2015). Full-field dynamic strain prediction on a wind turbine using displacements of optical targets measured by stereophotogrammetry. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 62:284–295.
- [Binder and Schneider, 2005] Binder, A. and Schneider, T. (2005). Permanent magnet synchronous generators for regenerative energy conversion—a survey. In *Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on*, pages 10–pp. IEEE.
- [Birkett and Roe, 1989] Birkett, S. and Roe, P. (1989). The mathematical foundations of bond graphs—i. algebraic theory. *Journal of the Franklin Institute*, 326(3):329–350.
- [Breedveld, 1984] Breedveld, P. C. (1984). Physical systems theory in terms of bond graphs. *PhD Thesis, Technische Hogeschool Twente*.
- [Cellier, 1991] Cellier, F. E. (1991). Qualitative modeling and simulation: promise or illusion (basic definitions). In *1991 Winter Simulation Conference Proceedings.*, pages 1086–1090.
- [Chan et al., 2010] Chan, T.-F., Wang, W., and Lai, L.-L. (2010). Permanent-magnet synchronous generator supplying an isolated load. *IEEE transactions on magnetics*, 46(8):3353–3356.
- [Cultura and Salameh, 2012] Cultura, A. B. and Salameh, Z. M. (2012). Dynamic response of a skystream wind turbine to a wind gust. In *2012 IEEE International Conference on Industrial Technology*, pages 1061–1066. IEEE.
- [Elbeji et al., 2014] Elbeji, O., Hamed, M. B., and Sbita, L. (2014). Pmsg wind energy conversion system: Modeling and control. *International Journal of Modern Nonlinear Theory and Application*, 3(03):88.

- [Ferraz et al., 2012] Ferraz, R., Iurinic, L., Filomena, A., and Bretas, A. (2012). Park’s transformation analytical approach of transient signal analysis for power systems. In *North American Power Symposium (NAPS), 2012*, pages 1–6. IEEE.
- [Frolova, 2010] Frolova, M. (2010). Los paisajes de la energía eólica: su percepción social y gestión en España.
- [Ghaith et al., 2017] Ghaith, A. F., Epplin, F. M., and Frazier, R. S. (2017). Economics of household wind turbine grid-tied systems for five wind resource levels and alternative grid pricing rates. *Renewable Energy*, 109:155–167.
- [Ghictua et al., 2008] Ghictua, C., Chirilua, A., Deaconu, I., and Ilina, D. (2008). Wind turbine permanent magnet synchronous generator magnetic field study. In *International Conference of Renewable Energy and Power Quality (ICREPPQ’08), Santander, Spain*.
- [Jones, 2006] Jones, W. D. (2006). I’ve got the power. *IEEE Spectrum*, 43(10):18–18.
- [Juárez-Hernández and León, 2014] Juárez-Hernández, S. and León, G. (2014). Energía eólica en el istmo de Tehuantepec: desarrollo, actores y oposición social. *Problemas del desarrollo*, 45(178):139–162.
- [Karnopp, 1983] Karnopp, D. (1983). Alternative bond graph causal patterns and equation formulations for dynamic systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 105(2):58–63.
- [Kuldipsinh I Rathod, 2014] Kuldipsinh I Rathod, Mahipalsinh .B. Jhala, A. P. (2014). Modeling and simulation of wind turbine connected to pmsg for wind mill application. In *Global Journal for Research Analysis, India*, volume 3, pages 41–44.
- [Kulkarni and Thosar, 2013] Kulkarni, S. and Thosar, A. (2013). Mathematical modeling and simulation of permanent magnet synchronous machine. *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, 1(2):66–71.
- [Kumar et al., 2015] Kumar, A. S., Cermak, T., and Misak, S. (2015). Modeling and experimentation of a 12kw direct driven pm synchronous generator of wind power. In *Control, Engineering & Information Technology (CEIT), 2015 3rd International Conference on*, pages 1–5. IEEE.
- [Le Quéré et al., 2018] Le Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Hauck, J., Pongratz, J., Pickers, P. A., Korsbakken, J. I., Peters, G. P., Canadell, J. G., Arneeth, A., Arora, V. K., Barbero, L., Bastos, A., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Ciais, P., Doney, S. C., Gkritzalis, T., Goll, D. S., Harris, I., Haverd, V., Hoffman, F. M., Hoppema, M., Houghton, R. A., Hurtt, G., Ilyina, T., Jain, A. K., Johannessen, T., Jones, C. D., Kato, E., Keeling, R. F., Goldewijk, K. K., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lienert, S., Liu, Z., Lombardozzi, D., Metzl, N., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S.-I., Neill, C., Olsen, A., Ono, T., Patra, P., Peregon, A., Peters, W., Peylin, P., Pfeil, B., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Resplandy, L., Robertson, E., Rocher, M., Rödenbeck, C., Schuster, U., Schwinger, J., Séférian, R., Skjelvan, I., Steinhoff, T., Sutton, A., Tans, P. P., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F. N., van der Laan-Luijkx, I. T., van der Werf, G. R., Viovy, N., Walker, A. P., Wiltshire, A. J., Wright, R., Zaehle, S., and Zheng, B. (2018). Global carbon budget 2018. *Earth System Science Data*, 10(4):2141–2194.

- [Li et al., 2012] Li, Z., Boyle, F., and Reynolds, A. (2012). Domestic application of micro wind turbines in Ireland: Investigation of their economic viability. *Renewable Energy*, 41:64–74.
- [Merino Bobillo, 2008] Merino Bobillo, M. (2008). No a la guerra: otra visión a la guerra de Irak, el tigre y la nieve (Roberto Benigni).
- [Merzoug et al., 2011] Merzoug, M., Benalla, H., and Louze, L. (2011). Nonlinear control of permanent magnet synchronous generators (PMSG) using feedback linearization. *Revue des Energies Renouvelables*, 14(2):357–367.
- [Nanda and Sengupta, 2014] Nanda, S. and Sengupta, M. (2014). Design, fabrication and analytical investigations on a permanent magnet synchronous generator. In *2014 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, pages 1–4. IEEE.
- [Oduardo, 2018] Oduardo, M. D. S. (2018). Actividades dirigidas al desarrollo de la cultura ambiental en los estudiantes de la educación superior.
- [Okedu, 2011] Okedu, K. E. (2011). Wind turbine driven by permanent magnet synchronous generator. *The Pacific Journal of Science and Technology, University of Port Harcourt, Nigeria*.
- [Patil and Mehta, 2014] Patil, K. and Mehta, B. (2014). Modeling and simulation of variable speed wind turbine with direct drive permanent magnet synchronous generator. In *2014 International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCCE)*, pages 1–6. IEEE.
- [Paynter, 1961] Paynter, H. (1961). Analysis and design of engineering systems; class notes for MIT course 2.751.
- [Rashid, 2004] Rashid, M. H. (2004). *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Pearson Educación.
- [Reddy et al., 2012] Reddy, B. R. K., Lalitha, D. M. P., and Chennaiah, M. P. (2012). Modeling and control of a variable speed wind turbine equipped with permanent magnet synchronous generator. *International Journal of Modern Engineering Research*, pages 2249–6645.
- [Rojas, 2008] Rojas, W. J. C. (2008). Lectura productiva y elemento dinamizador.
- [Rolan et al., 2009] Rolan, A., Luna, A., Vazquez, G., Aguilar, D., and Azevedo, G. (2009). Modeling of a variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generator. In *2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pages 734–739. IEEE.
- [Ron, 2011] Ron, J. M. S. (2011). Historia de la química-Marie Curie, la radioactividad y los premios Nobel. In *Anales de Química*, volume 107.
- [Stroe et al., 2011] Stroe, D., Stan, A., Visa, I., and Stroe, I. (2011). Modeling and control of variable speed wind turbine equipped with PMSG. In *Proceedings of the 13th World Congress in Mechanism and Machine Science, Guanajuato, Mexico*, pages 19–23.
- [Thomas, 1991] Thomas, J. (1991). Simulation by bond graph.
- [VADOT, L., 1957] VADOT, L. (1957). étude synoptique des différents types d'éoliennes. *La Houille Blanche*, (2):189–212.

- [Wang et al., 2014] Wang, T., Li, L., and Wang, X. (2014). An electromechanical transient model of direct-driven permanent magnet synchronous generator based wind power system. In *2014 International Conference on Power System Technology*, pages 2878–2883. IEEE.
- [Windpower, 2011] Windpower, S. (2011). Skystream 3.7. *Retrieved October, 3:2011*.
- [Zhang et al., 2013] Zhang, Z., Zhao, Y., Qiao, W., and Qu, L. (2013). A discrete-time direct-torque and flux control for direct-drive pmsg wind turbines. In *Industry Applications Society Annual Meeting, 2013 IEEE*, pages 1–8. IEEE.