

**MODELACIÓN Y SIMULACIÓN MATEMÁTICA DE UN AEROGENERADOR  
UTILIZANDO ACUMULACIÓN HIDRÁULICA TIPO VEJIGA COMO RESPALDO  
PARA MITIGAR HUECOS DE TENSIÓN**

**MARÍA FERNANDA LEÓN NÚÑEZ**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
INGENIERÍA EN ENERGÍA  
BUCARAMANGA  
2019**

**MODELACIÓN Y SIMULACIÓN MATEMÁTICA DE UN AEROGENERADOR  
UTILIZANDO ACUMULACIÓN HIDRÁULICA TIPO VEJIGA COMO RESPALDO  
PARA MITIGAR HUECOS DE TENSIÓN**

**MARÍA FERNANDA LEÓN NÚÑEZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título  
INGENIERO EN ENERGÍA**

**Orientador: LUIS SEBASTIÁN CASTELLANOS MENDOZA  
Co-orientador: MARIO JONATAN ACERO CABALLERO**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
INGENIERÍA EN ENERGÍA  
BUCARAMANGA  
2019**

## **DEDICATORIA**

Dedico este logro primero a Dios por cada una de las bendiciones recibidas.

A mi abuelita que desde el cielo guía mis pasos.

A mi madre María y mi padre Jairo por su amor y apoyo, y a mis hermanos Nicolás y Natalia por ser esos compañeros incondicionales de aventuras.

Y a cada una de las personas que contribuyeron en esta etapa de mi vida, en especial a mi amiga Leidy y a mi compañero Andrés por su comprensión y apoyo en la realización de este trabajo.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi orientador el profesor Luis Sebastián Castellanos por la dedicación, comprensión y amistad brindada.

A mi co-orientador Mario Acero Caballero de quien he adquirido importantes conocimientos.

Y a cada uno de los docentes que han contribuido en mi formación, que sin ellos esto no habría sido posible.

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

**Firma del orientador**

---

**Firma de los evaluadores**

## Resumen

En este trabajo se analiza el comportamiento de un sistema eólico integrado a un sistema de acumulación hidráulica de tipo vejiga como unidad de respaldo para mitigar huecos de tensión. El sistema propuesto Eólico/Acumulador Hidráulico de 5 [kW], fue modelado y simulado a fin de determinar el comportamiento transitorio de la energía eléctrica. La función principal del acumulador hidráulico es compensar las perturbaciones ocurridas en el proceso de generación eléctrica, debido a la intermitencia del viento como fuente natural. La calidad de la energía y la disponibilidad eléctrica son afectadas por perturbaciones en la frecuencia, amplitud y fenómenos transitorios [1]. Para el caso de estudio, se busca mantener la disponibilidad constante del caudal en un circuito hidráulico, aprovechando los excedentes de energía que surgen cuando hay aumentos en la velocidad del viento. Estos excedentes son devueltos al circuito hidráulico a través de los acumuladores, garantizando que el motor hidráulico se mantenga operando a una velocidad de 1800 [rpm].

El número de acumuladores implementados fueron 8, determinados después de plantear estrategias de control de carga y descarga para diferentes intervalos de tiempos y potencia a compensar.

Estudiar este tipo de sistemas híbridos Eólico/Acumuladores hidráulicos resulta de gran importancia, ya que permiten la integración de distintas fuentes de energías renovables no convencionales, aumentando de esta manera su robustez y confiabilidad, disminuyendo los problemas causados por su naturaleza intermitente.

**PALABRAS CLAVE:** Aerogeneradores, acumulación hidráulica, sistema híbrido, sistema de transmisión hidráulica.

## Abstract

This paper analyzes the behavior of a wind system integrated into a bladder-type hydraulic accumulation system as a backup unit to mitigate voltage gaps. The proposed Wind System / Hydraulic Accumulator of 5 [kW] was modeled and simulated in order to determine the transient behavior of the electrical energy. The main function of the hydraulic accumulator is to compensate for the disturbances that have occurred in the electric generation process, due to the intermittency of the wind as a natural source. The quality of energy and electrical availability are affected by disturbances in frequency, amplitude and transient phenomena [1]. For the case study, it is sought to maintain the constant availability of the flow in a hydraulic circuit, taking advantage of surplus energy that arises when there are increases in wind speed. These surpluses are returned to the hydraulic circuit through the accumulators, ensuring that the hydraulic motor keeps operating at a speed of 1800 [rpm].

The number of accumulators implemented was 8, determined after proposing load and discharge control strategies for different time intervals and power to be compensated.

Studying this type of hybrid wind systems / hydraulic accumulators is of great importance, since they allow the integration of different sources of non-conventional renewable energies, thus increasing their robustness and reliability, reducing the problems caused by their intermittent nature.

**KEYWORDS:** Wind turbines, hydraulic accumulation, hybrid system, hydraulic transmission system.

## CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>12</b>
<b>1.1. MOTIVACIÓN DEL TRABAJO</b>	<b>12</b>
<b>1.2. OBJETIVOS</b>	<b>13</b>
<b>1.3. PROCEDIMIENTO</b>	<b>13</b>
<b>1.4. APORTE</b>	<b>13</b>
<b>2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>14</b>
<b>2.1. GENERACIÓN EÓLICA EN LA ACTUALIDAD</b>	<b>14</b>
<b>2.2. DESAFÍOS DE LA INTEGRACIÓN DE LA GENERACIÓN EÓLICA A LA RED</b>	<b>16</b>
<b>2.3. AEROGENERADORES CON SISTEMAS DE TRANSMISIÓN HIDRÁULICA</b>	<b>18</b>
<b>2.4. AEROGENERADORES CON ACUMULACIÓN HIDRÁULICA</b>	<b>22</b>
<b>3. METODOLOGÍA</b>	<b>24</b>
<b>4. SELECCIÓN Y SIMULACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA</b>	<b>24</b>
<b>4.1. AEROGENERADOR</b>	<b>25</b>
<b>4.1.1 Análisis del recurso eólico</b>	<b>25</b>
<b>4.1.2 Selección del aerogenerador</b>	<b>27</b>
<b>4.1.3 Modelado implementado en Matlab/Simulink</b>	<b>29</b>
<b>4.2. SISTEMA DE TRANSMISIÓN HIDRÁULICA</b>	<b>30</b>
<b>4.2.1 Bomba de variable de pistones axiales</b>	<b>31</b>
<b>4.2.2 Motor variable de pistones axiales</b>	<b>33</b>
<b>4.2.3 Acumuladores hidráulicos</b>	<b>36</b>
<b>4.2.3.1 Parámetros para el dimensionamiento del acumulador</b>	<b>36</b>
<b>4.2.4 Implementación del sistema de transmisión y acumulación hidráulica en Matlab/Simulink</b>	<b>39</b>
<b>4.2.4.1 Sistema de alivio</b>	<b>40</b>
<b>4.2.4.2 Control de la carga y descarga del acumulador hidráulico</b>	<b>40</b>
<b>4.2.4.3 Sistema de compensación</b>	<b>43</b>
<b>5. RESULTADOS</b>	<b>45</b>
<b>5.1. INTEGRACIÓN DEL SISTEMA EÓLICO A LOS ACUMULADORES</b>	<b>45</b>
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>50</b>
<b>7. RECOMENDACIONES</b>	<b>51</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>52</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Capacidad global de energía eólica y adiciones anuales, 2007-2017	14
Figura 2: Alta Wind Energy Center	15
Figura 3: Costo nivelado de electricidad a partir de tecnologías de generación de energía renovable, 2010-2017	16
Figura 4: Problemas en la calidad de la energía en la red estadounidense	16
Figura 5: Sistema de transmisión hidráulica	18
Figura 6: Esquema del sistema de transferencia hidráulica de alta presión	19
Figura 7: Comparación entre la velocidad angular	20
Figura 8: Comparación de velocidad del modelo matemático y del sistema experimental del motor	20
Figura 9: Comparación de la medición de la eficiencia del sistema	21
Figura 10: Generación con acumulación y sin acumulación	22
Figura 11: Diagrama esquemático de la turbina eólica hidráulica cerrada con sistema de almacenamiento de energía	23
Figura 12: Velocidad promedio del viento a 10 metros de altura	25
Figura 13: Ciclo diario promedio de la velocidad del viento para la zona de estudio	26
Figura 14: Promedio de la velocidad del viento en Puerto Bolívar	26
Figura 15: Curva de potencia entregada según velocidad del viento	27
Figura 16: Caracterización de la turbina	27
Figura 17: Niveles de rugosidad del terreno	28
Figura 18: Velocidad del viento corregida	28
Figura 19: Potencia entregada por el aerogenerador	29
Figura 20: Bloque turbina eólica Matlab/Simulink	29
Figura 21: Modelo Simulink® de la turbina	30
Figura 22: Elementos que conforman un sistema de transmisión hidráulica	31
Figura 23: Diagrama de la bomba Matlab/Simulink	32
Figura 24: Sistema implementado en Matlab/Simulink	33
Figura 25: Diagrama del motor Matlab/Simulink	34
Figura 26: Motor Matlab/Simulink	35
Figura 27: Acumulador de vejiga típico	36
Figura 28: Etapas del funcionamiento del acumulador tipo vejiga	36
Figura 29: Acumulador hidráulico implementado en Matlab/Simulink	38
Figura 30: Sistema implementado en Matlab/Simulink	39
Figura 31: Diagrama de la válvula de alivio Matlab/Simulink	40
Figura 32: Control del sistema de acumulación Matlab/Simulink	40
Figura 33: Flujograma del control de la válvula de entrada del acumulador	41
Figura 34: Flujograma del control de la válvula de salida del acumulador	42
Figura 35: Comportamiento dinámico del acumulador	43
Figura 36: Válvula con compensación de presión	44
Figura 37: Control de la válvula de compensación	44
Figura 38: Datos de velocidad durante un día del emplazamiento seleccionado	45

Figura 39: Datos de velocidad para realizar el respectivo análisis	45
Figura 40: Comportamiento de descarga del sistema de acumulación	46
Figura 41: Velocidad angular del motor	46
Figura 42: Comportamiento del acumulador	47
Figura 43: Tiempo de carga del acumulador	47
Figura 44: Tiempo de compensación de diferentes cantidades de acumuladores	49

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Principales parques eólicos en el mundo .....	15
Tabla 2: Definición de las principales fallas en la red .....	17
Tabla 3: Resumen de las reducciones de inversión previstas para cada uno de los diseños hidráulico-eléctricos propuestos, basado en una turbina de 5 MW .....	22
Tabla 4: Datos del aerogenerador seleccionado .....	27
Tabla 5: Alturas.....	27
Tabla 6 Datos de entrada del sistema.....	30
Tabla 7: Datos de entrada de la bomba en Matlab/Simulink .....	33
Tabla 8: Datos de entrada del motor en Matlab/Simulink .....	35
Tabla 9: Regresión lineal realizada .....	44
Tabla 10: Tiempo compensado por el sistema de acumulación .....	48
Tabla 11: Potencia compensada por 8 acumuladores.....	48
Tabla 12: Potencia compensada por 11 acumuladores.....	49

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. MOTIVACIÓN DEL TRABAJO

De acuerdo con la ley 1715 propuesta por el Ministerio de Minas y Energía, es necesario gestionar y proponer desde el ámbito universitario proyectos de investigación que promuevan el uso de las fuentes de energías renovables no convencionales, incentivando el desarrollo económico y el cuidado del medio ambiente. Debido a la diversidad del potencial energético en Colombia, diferentes empresas están interesadas en invertir en zonas como la Guajira para utilizar tecnología eólica, con la cual se podría producir el 20% de la demanda colombiana [2].

En la actualidad, la energía eólica es la tecnología de generación de electricidad de mayor crecimiento a nivel mundial [3]. El viento es un recurso renovable, inagotable, no contaminante y de libre disponibilidad, esto hace que se convierta en una de las fuentes más viables para la producción de energía eléctrica minimizando los impactos en el medio ambiente [4].

Sin embargo, de acuerdo a Cortés, P. A. (2013) [5], esta fuente de energía presenta importantes limitaciones como:

- ✚ Existencia de una dificultad intrínseca para poder planificar la energía eólica disponible con antelación.
- ✚ Es necesario compensar la disminución del viento, hibridando la tecnología con otros sistemas de generación eléctrica.
- ✚ Los parques eólicos suelen estar en localizaciones muy alejadas, necesitando sistemas de transmisión que aumentan las pérdidas de energía.
- ✚ Desde que un promotor empieza a construir un parque eólico hasta que éste entra en operación pueden pasar 5 años.

Además, la calidad de la energía generada se ve afectada por diversos factores, entre los cuales destacan los cambios bruscos en la velocidad del viento que generan los llamados huecos de tensión, que se pueden definir como eventos caracterizados por una reducción en la magnitud de la tensión durante un corto periodo de tiempo [6].

Una solución para este inconveniente y otros que trae consigo la utilización de generadores intermitentes es el uso de sistemas de inyección de energía debido a que actúan tan pronto se identifica la disminución en los niveles del sistema. Estos deben estar diseñados para absorber energía cuando haya exceso de esta y suministrar la misma cuando la carga conectada a la red o las variaciones del viento provoquen disminuciones transitorias en los niveles de tensión [7].

Por esta razón, este proyecto propone un sistema de almacenamiento hidráulico que permita mitigar los huecos de tensión provocados por la variabilidad de los vientos,

umentando así la calidad de la energía suministrada por los aerogeneradores actuales.

## 1.2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es modelar y simular el comportamiento de un aerogenerador utilizando un sistema de acumulación hidráulica como respaldo para mitigar huecos de tensión.

### Objetivos específicos

- ✚ Caracterizar el recurso energético disponible y modelar el comportamiento del sistema eólico de 5[kW].
- ✚ Integrar el aerogenerador y el sistema de transmisión hidráulica en Matlab/Simulink.
- ✚ Modelar el comportamiento del sistema de acumulación hidráulica tipo vejiga y dimensionar el número de acumuladores hidráulicos necesarios para compensar los huecos de tensión.
- ✚ Caracterizar el sistema de control de carga y descarga de los acumuladores para posteriormente integrarlos al circuito hidráulico.
- ✚ Determinar la viabilidad técnica de utilizar acumuladores hidráulicos en sistemas eólicos.

## 1.3. PROCEDIMIENTO

Para determinar y caracterizar el comportamiento del sistema eólico integrado al circuito hidráulico tipo vejiga, es necesario modelar cada uno de los componentes que conforman el sistema. En este caso se definió y se caracterizó un emplazamiento de acuerdo con las condiciones de disponibilidad de viento, determinante para seleccionar la capacidad del generador eólico. La turbina eólica fue modelada en Matlab/Simulink de acuerdo con las condiciones definidas inicialmente, para posteriormente ser integrada al circuito de acumulación hidráulica.

Además, se implementó un sistema que permite controlar la activación de las válvulas de carga y descarga, a fin de garantizar un caudal constante en el motor hidráulico para mantener una velocidad de 1800 [rpm], garantizando así una frecuencia 60 [Hz].

## 1.4. APORTE

Este trabajo de grado propone utilizar un sistema de acumulación de energía no convencional integrada a un sistema eólico, caracterizado por operar con un recurso intermitente que provoca problemas en la disponibilidad y calidad de la energía. El uso de acumuladores hidráulicos tipo vejiga se presenta como una alternativa no convencional para mitigar y compensar pequeñas fluctuaciones en la generación eléctrica. Además, este circuito hidráulico actúa como una unidad centralizada de

generación, lo que permite integrar la tecnología eólica a otros tipos de fuentes no convencionales, garantizando mayor confiabilidad en la producción de energía.

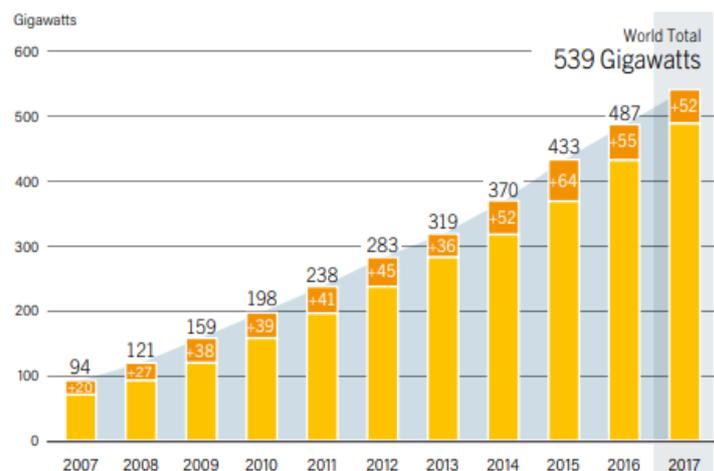
## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La revisión bibliográfica tiene como objetivo contextualizar la evolución de la energía eólica y exponer los problemas que conlleva la generación de energía eléctrica a partir de una fuente natural intermitente. Para esto fueron consultadas bases de datos de publicaciones científicas especializadas tales como: IEEE Explore, Renewable Energy, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control; Advances in Mechanical Engineering, y Energy Conversion and Management; en el tema tanto de sistemas eólicos como de acumulación hidráulica tipo vejiga. Esto a fin de evaluar el comportamiento de integrar estos sistemas de acumulación con tecnologías eólicas y determinar la viabilidad de implementarlos en otras tecnologías renovables como una alternativa para garantizar la calidad de la energía.

### 2.1. GENERACIÓN EÓLICA EN LA ACTUALIDAD

Según el Informe Global del Estado de las Renovables, para el 2017 la capacidad instalada de energía eólica en el mundo era de aproximadamente 539 [GW], con un crecimiento del 11% con respecto al año anterior [8] como se observa en la Figura 1 que se muestra a continuación:

Figura 1: Capacidad global de energía eólica y adiciones anuales, 2007-2017



Fuente: Renewables 2018 Global Status Report [8]

Este aumento fue constituido principalmente por Asia, el cual se ha caracterizado por ser el mercado regional más grande por noveno año consecutivo en energía eólica, representando casi el 48% de la capacidad instalada (con un total superior a 235 GW al final del año), seguido de Europa (más del 30%), América del Norte (14%) y América Latina y El Caribe (casi el 6%) [8]. Es importante resaltar que la energía eólica está proporcionando una parte significativa de la electricidad en un número creciente de países. En 2017, esta cubrió aproximadamente el 11,6% del consumo anual en la Unión Europea y una participación igual o superior en al menos 8 de estos

países, incluida Dinamarca, que alcanzó el 43,4% de su consumo anual de electricidad con energía eólica. Al menos 13 países alrededor del mundo, incluidos Costa Rica, Nicaragua y Uruguay, suplieron el 10% o más de su consumo anual de electricidad con esta energía. En Uruguay, la participación en la generación de electricidad a partir del recurso eólico aumentó más de cuatro veces en solo tres años, del 6,2% en 2014 al 26,3% en 2017. A nivel mundial, la capacidad de energía eólica en operación a fines de 2017 fue suficiente para dar cuenta de un estimado del 5,6% de la generación eléctrica total [8].

Para hacer posible la generación de esta energía, existen en el mundo más de 19.597 granjas eólicas [8], entre las cuales destaca con una capacidad de más de 1,5 [GW] Alta Wind Energy Center ubicada en Estados Unidos, mostrada en la Figura 2. Estos parques se pueden definir como centrales eléctricas formadas por agrupaciones de aerogeneradores de mediana potencia conectados entre sí, que canalizan la producción de energía hacia una red general [9].

Figura 2: Alta Wind Energy Center



Fuente: Renewable and Sustainable Energy Reviews [10]

Entre los principales parques eólicos debido a su capacidad se encuentran:

Tabla 1: Principales parques eólicos en el mundo

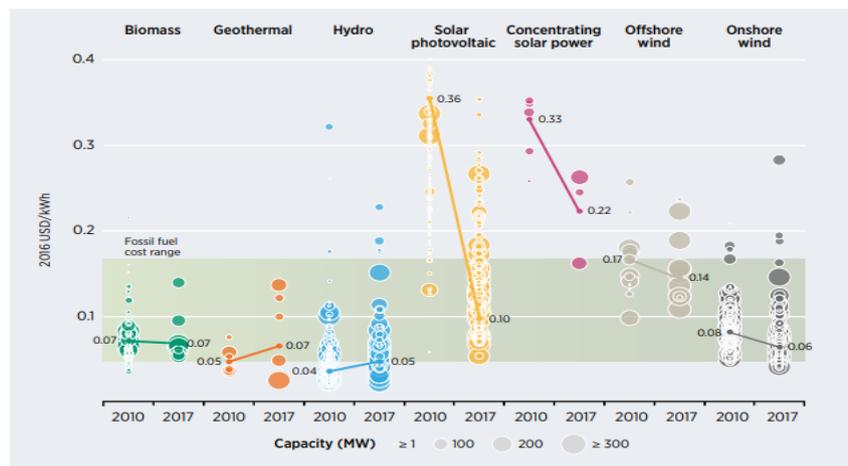
Planta	Capacidad [MW]	País
Alta Wind Energy Center	1548	Estados Unidos
Jaisalmer Wind Park	1064	India
Shepherds Flat Wind Farm	845	Estados Unidos
London Array	630	Reino Unido
Greater Gabbard Wind Farm	504	Reino Unido

Fuente: Renewable and Sustainable Energy Reviews [10]

## 2.2. DESAFÍOS DE LA INTEGRACIÓN DE LA GENERACIÓN EÓLICA A LA RED

Entre las fuentes de energía renovable, la generación eólica se destaca por su madurez tecnológica, buena infraestructura y competitividad de costos respecto a la solar fotovoltaica cuya capacidad instalada supera notoriamente a la energía generada a partir del recurso eólico como se observa en la Figura 3, donde la diferencia de costos entre estas dos tecnologías llega a ser hasta de 0,24 USD/kWh [11,12]:

Figura 3: Costo nivelado de electricidad a partir de tecnologías de generación de energía renovable, 2010-2017

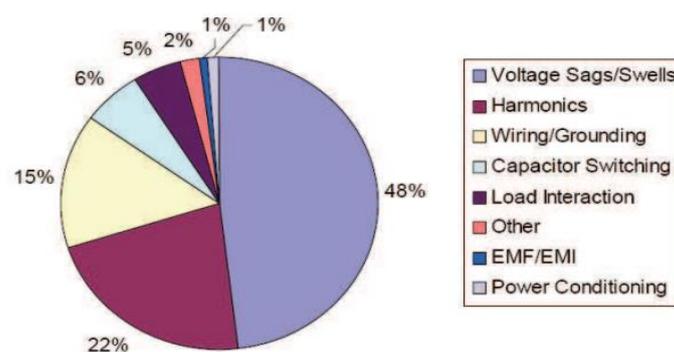


Fuente: Power Generation Costs in 2017, International Renewable Energy Agency [12]

Sin embargo, el despliegue de la generación distribuida implementando sistemas eólicos a altos niveles provoca problemas en la red que afectan la calidad de la energía, la seguridad y estabilidad del sistema, debido a la intermitencia del viento [11].

Un análisis realizado en los Estados Unidos, expone los principales problemas que experimenta la red eléctrica en este país, los cuales se distribuyen como se muestra en la Figura 4:

Figura 4: Problemas en la calidad de la energía en la red estadounidense



Fuente: Consequences of Poor Power Quality – An Overview [13]

Como se puede observar en la gráfica anterior, los principales problemas presentes en la red son las caídas y aumentos de voltaje y los armónicos, el estudio de estas fallas resulta ser de una alta importancia tanto técnica como económica, por lo que algunos de los conceptos fundamentales en lo que se refiere a calidad de la energía son definidos a continuación:

Tabla 2: Definición de las principales fallas en la red

Falla	Definición
<b>Armónicos</b>	Los armónicos se pueden inyectar tanto en la generación como en el consumidor. A nivel de generación, las fuentes de armónicos se encuentran en los dispositivos de acondicionamiento de energía que integran los aerogeneradores a la red eléctrica. Estos causan distorsión en la forma de onda de voltaje y corriente, aumentan las pérdidas en la línea y causan un calentamiento excesivo del equipo, disminuyendo su vida útil. Los sub-armónicos causan parpadeos que resultan en un efecto visual incómodo en los ojos, desequilibrio y saturación del núcleo de los transformadores y envejecimiento térmico de los motores de inducción.
<b>Flickers</b>	Los aerogeneradores producen una potencia de salida oscilatoria, que origina variaciones periódicas de frecuencia (0,5 y 25 [Hz]) en la red eléctrica. Para aerogeneradores de velocidad variable los parpadeos no son severos, ya que poseen controladores de velocidad que permiten amortiguar las fluctuaciones del par aerodinámico debido a cambios bruscos en la velocidad del viento.
<b>Caídas de tensión</b>	La caída de tensión es una disminución momentánea del valor de la tensión eficaz más allá de un umbral especificado durante un corto período de tiempo. La caída de voltaje se considera de acuerdo con la norma europea EN 50160, como una caída en el voltaje de potencia a un nivel por debajo del 90% del voltaje nominal durante no más de un minuto. Es un tipo muy común y grave de alteración de la calidad de la energía debido a sus efectos en equipos sensibles y procesos industriales.

Fuente: Challenges of grid integration of wind power on power system grid integrity [11]

Para este estudio, el concepto de caídas de tensión resulta de vital importancia pues el objetivo principal de este sistema es mitigar estas fallas, que pueden ser provocadas desde la generación por cambios bruscos en la velocidad del viento, y pueden llegar a tener una duración de hasta 60 [s], sin embargo, en cuanto ocurren estas fallas el tiempo de recuperación del sistema implica casi 3 [min], lo que involucraría problemas en el abastecimiento de energía.

Es importante resaltar que el nivel de tolerancia de la calidad de la energía depende del tipo de carga instalada por el cliente. La ocurrencia y la frecuencia de los problemas de calidad de la energía dependen de la fuerza de la red, el tipo de carga del consumidor, el equipo electrónico utilizado, la ubicación geográfica, la longitud de la red, el recurso eólico y la práctica operativa [11].

La baja calidad de la energía tiene consecuencias negativas en la vida económica de esta sociedad moderna. En el artículo "Summary of the Economic Impacts of Power Quality on Consumers" [14] los autores afirman que se han evaluado varios estudios para proporcionar datos cuantitativos sobre el costo de la calidad de la energía. Según el estudio, a comienzos de la década de 1990, se estimaba que el costo de la calidad de la energía para la industria global era de unas decenas de miles de millones de dólares en la región. Estudios más completos sugieren que esto aumentó a unos cientos de miles de millones de dólares en 2003. En general, el estudio afirma que "en todos los sectores comerciales, la economía de los Estados Unidos está perdiendo entre \$ 104 mil millones y \$ 164 mil millones al año en cortes y otros \$ 15 mil millones a \$ 24 mil millones por el fenómeno de calidad de la energía" [14].

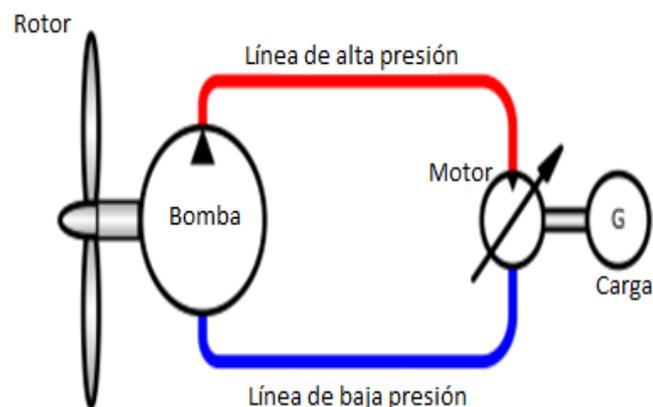
### 2.3. AEROGENERADORES CON SISTEMAS DE TRANSMISIÓN HIDRÁULICA

Para garantizar la continuidad de la energía eléctrica y la mejora en la calidad de la energía entregada a la carga, se propone el uso de un sistema de transmisión hidráulica con acumulación tipo vejiga, por lo que resulta de vital importancia conocer los conceptos de estos sistemas:

Un sistema de transmisión hidráulica se define como un 'motor controlado por una bomba'. Como se muestra en la Figura 5, la transmisión hidráulica utiliza la bomba para convertir la energía mecánica de entrada en fluido presurizado, mangueras hidráulicas para entregarlo y distribuirlo, y motores para transformar nuevamente la energía contenida en el fluido en energía mecánica que podrá ser usada en distintas aplicaciones [15].

Un sistema de transmisión hidráulica se caracteriza por ser un medio excepcional de transmisión de potencia cuando se requiere una velocidad de salida variable. Esta aplicación es utilizada en procesos de ingeniería en el campo de la manufactura, automatización y control de procesos y en la implementación de vehículos pesados en procesos de minería [15].

Figura 5: Sistema de transmisión hidráulica



Fuente: Modeling of gearless wind power transfer. IECON Proceedings [15]

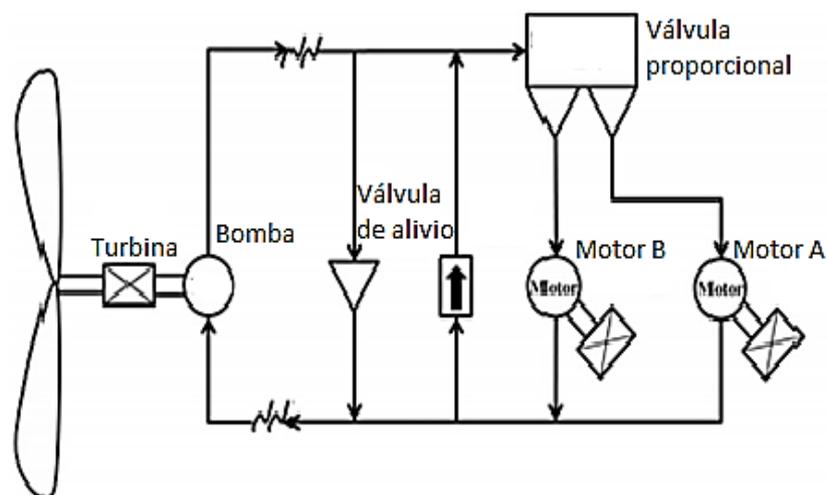
Estos sistemas, ofrecen tiempos de respuesta rápidos, mantiene velocidades precisas bajo cargas variables, incluida una alta durabilidad y la capacidad de producir grandes

fuerzas a altas velocidades. La principal ventaja de una transmisión hidrostática sobre los sistemas de transmisión directa y engranada, es la posibilidad de variar la relación de transmisión. Por lo tanto, es posible operar con velocidad de rotor variable (requerida para la máxima extracción de energía), mientras se usa un generador síncrono acoplado directamente a la red, eliminando así la necesidad de un convertidor de frecuencia de corriente alterna y un transformador de voltaje [15].

En la revisión del estado del arte, se evidencian estudios donde se desarrollan modelos matemáticos para la integración de sistemas de transmisión hidráulica y aerogeneradores, los cuales se exponen y se analizan a continuación:

En el trabajo realizado por Izadian et al (2014) [16] titulado “A Hydraulic Wind Power Transfer System: Operation and Modeling”, se presenta un estudio sobre un aerogenerador cuyo tren de engranajes ha sido reemplazado por un sistema de transmisión hidráulica, esto con el objetivo de reducir costos de operación y mantenimiento. La configuración del sistema de transferencia hidráulica propuesto es mostrada en la Figura 6, dónde el rotor de la turbina alimenta una bomba que transporta un fluido a través de un circuito hidráulico. La finalidad es alimentar cada uno de los motores dispuestos, en este caso (A y B) para un fin productivo. El sistema está compuesto por válvulas de alivio y anti retorno que mantienen la presión en valores deseados y no permiten el retroceso del fluido respectivamente.

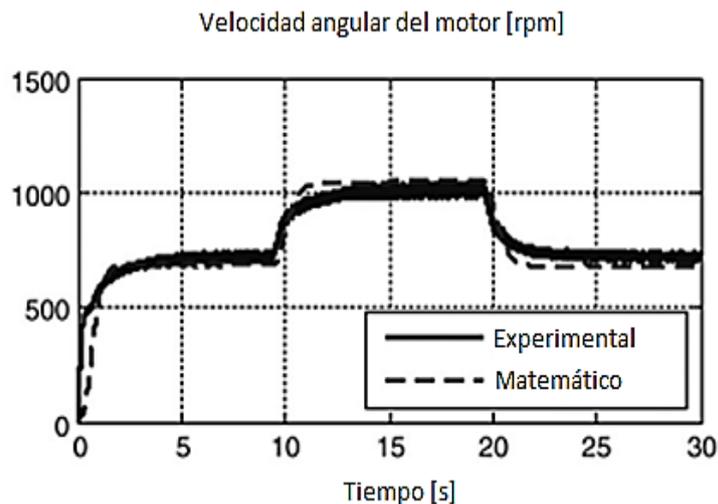
Figura 6: Esquema del sistema de transferencia hidráulica de alta presión



Fuente: A hydraulic wind power transfer system: Operation and modeling [16]

Este sistema es modelado matemáticamente a través de ecuaciones que caracterizan el comportamiento de cada uno de los componentes hidráulicos, esto con la finalidad de obtener resultados que puedan ser comparados con los tests experimentales realizados con un prototipo. Los resultados de las simulaciones realizadas se caracterizan por los bajos porcentajes de desvío entre los resultados del modelo matemático y el comportamiento del prototipo construido. Este fenómeno es mostrado en la Figura 7, donde se observa la variación de la velocidad angular de uno de los motores simulados en función del tiempo.

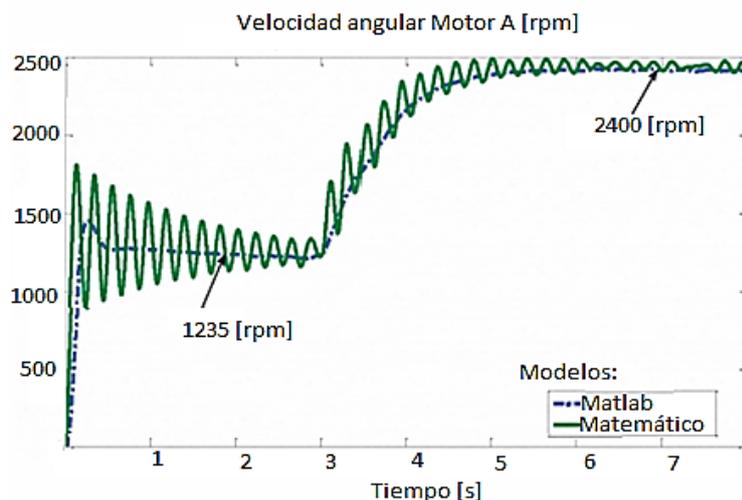
Figura 7: Comparación entre la velocidad angular



Fuente: A hydraulic wind power transfer system: Operation and modeling [16]

En el artículo “Modeling of gearless wind power transfer” [15], se simula el modelo en Matlab/Simulink del sistema propuesto en la Figura 6 y se comparan una vez más los resultados obtenidos con el modelo matemático expuesto en el artículo anterior, y como se evidencia a continuación los resultados obtenidos son bastante favorables:

Figura 8: Comparación de velocidad del modelo matemático y del sistema experimental del motor



Fuente: Modeling of gearless wind power transfer [15]

En este artículo, la velocidad de salida del motor de la simulación se comparó con velocidad de salida del modelo matemático obtenido, y a partir de esto se concluyó como se evidencia en la Figura 8 que, tanto para el modelo matemático como para el sistema simulado, existe una variación mínima en el valor final [15].

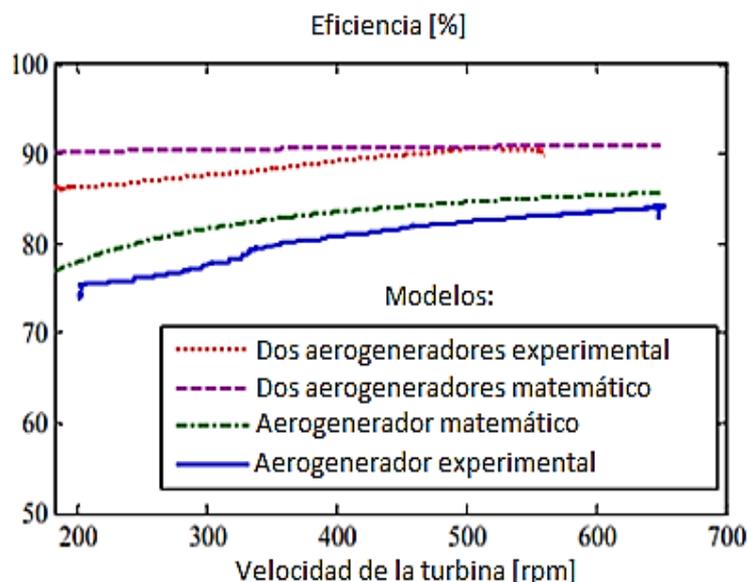
El modelo matemático propuesto por los autores descritos anteriormente, sirve como referencia para escalar o dimensionar sistemas eólicos a nivel industrial. Sin embargo, los autores sugieren que es necesario considerar las pérdidas debido al recorrido del

fluido a través de los ductos del circuito hidráulico, la longitud de los mismos y los componentes como pedestal y tamaño de la turbina.

Por otro lado, de la información encontrada en los artículos para diferentes aplicaciones utilizando sistemas eólicos y transmisión hidráulica, se evidencia que integrar aerogeneradores a sistemas de transmisión hidráulica, presenta grandes ventajas. Dentro de las más importantes se encuentran la eliminación de la caja de engranajes de velocidad variable, ya que aportan pérdidas por fricción y desgaste en los dientes de los engranajes; la implementación de un generador central en lugar de múltiples generadores, disminuyendo así el costo de capital de la planta de energía eólica y el desplazamiento de la mayoría de los equipos de la góndola al suelo para obtener un mejor acceso a la unidad de generación y reducir los costos y el tiempo de mantenimiento.

El aumento de la eficiencia de los aerogeneradores conectados a sistemas de transmisión hidráulica es estudiado por los mismos autores en el artículo “Efficiency analysis of hydraulic wind power transfer system” [17], como se muestra en la Figura 9, se realizaron simulaciones para uno y dos aerogeneradores, haciendo uso del prototipo y el modelo matemático desarrollado.

Figura 9: Comparación de la medición de la eficiencia del sistema



Fuente: Efficiency analysis of hydraulic wind power transfer system [17]

A partir de esto, se concluyó como se observa en la Figura 9, que usar una unidad de generación central para un grupo de turbinas eólicas y transferir la potencia de cada turbina a través del sistema hidráulico aumenta la eficiencia del sistema en general en un 17%, alcanzando una eficiencia máxima del 90.7% [17].

Con respecto a la reducción en los costos mencionados anteriormente, se presenta en el artículo “Hydraulic-electric hybrid wind turbines: Tower mass saving and energy storage capacity” [18], un modelo en el cual se determina la reducción en la inversión total inicial del sistema debido al uso de un sistema hidráulico y del sistema de almacenamiento por aire comprimido, como se evidencia en la Tabla 3.

Tabla 3: Resumen de las reducciones de inversión previstas para cada uno de los diseños hidráulico-eléctricos propuestos, basado en una turbina de 5 MW

5 MW turbine	Conventional		Hydraulic-electric without CAES	Hydraulic-electric with CAES
		Contribution to CAPEX	Reduction in conventional turbine CAPEX	
Tower	$C_C$	8%	-3%	-3%
Gearbox	$C_B$	4%	-4%	-4%
Generator	$C_G$	2%		-1%
Electrical Infrastructure	$C_E$	20%		-11%
Support structure, blades, and other unaffected costs		66%		
Hydraulic and CAES System	$C_H$	Not needed	+0.75%	+2.25%
Total		100%	-6%	-17%

Fuente: Hydraulic-electric hybrid wind turbines: Tower mass saving and energy storage capacity [18]

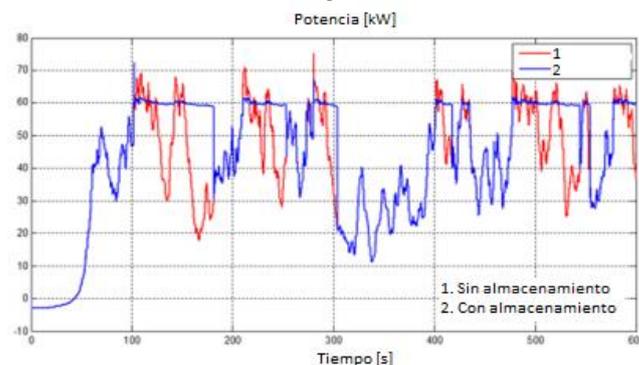
En este estudio se estimó que el sistema híbrido hidráulico-eléctrico con almacenamiento de aire comprimido, producía un ahorro total en la inversión inicial, estimado en un 17% debido a una disminución sustancial en los costos de la infraestructura eléctrica y del aerogenerador [18].

## 2.4. AEROGENERADORES CON ACUMULACIÓN HIDRÁULICA

Dentro de la literatura especializada, existen trabajos que estudian la mitigación de pequeños transitorios y fluctuaciones generadas por la variabilidad del viento, en sistemas eólicos. Dentro de las cuales se encontraron dos trabajos científicos que tratan el tema y que son expuestos a continuación:

En el artículo “Analysis of short-term energy storage for midsize hydrostatic wind turbine” [19], se estudia el almacenamiento de energía a corto plazo durante condiciones de viento turbulento, para esto se hace uso de una transmisión hidrostática la cual no solo proporciona un funcionamiento confiable sino que también permite un fácil almacenamiento de energía usando acumuladores hidráulicos para los cuales se definen estrategias de operación, propiciando el aprovechamiento máximo del recurso eólico. Un estudio de sensibilidad del tamaño del acumulador muestra que la generación anual de energía aumenta con el tamaño del mismo [19]. En la Figura 10, se observa el comportamiento dinámico para la generación de potencia eléctrica de una turbina de 50 [kWe] utilizando acumulación de corto plazo y trabajando sin acumulación.

Figura 10: Generación con acumulación y sin acumulación

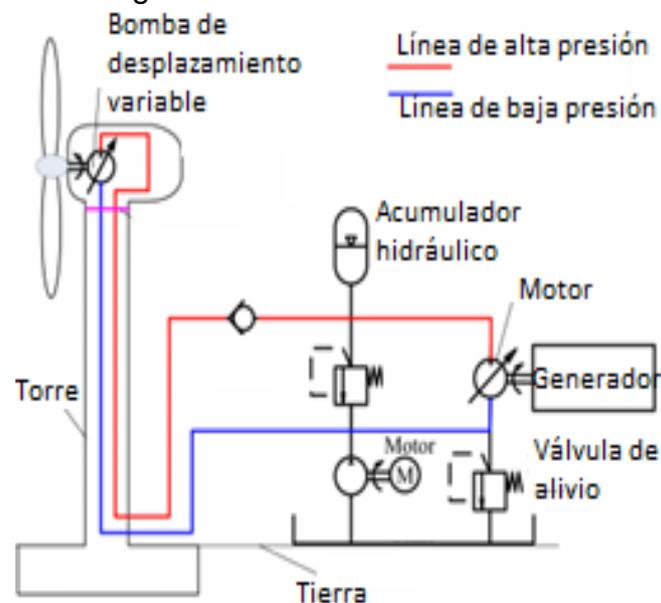


Fuente: Analysis of short-term energy storage for midsize hydrostatic wind turbine [19]

El autor concluye que, utilizando un acumulador de 40 litros, la generación anual aumenta en un 3,4% y con un acumulador de 60 litros aumenta en un 4,1%. Sin embargo, no se realiza un análisis de costos para determinar la viabilidad económica de la implementación de este sistema de acumulación [20].

En esta búsqueda también se encontró el documento “Modeling and control of a 600 kW closed Hydraulic wind turbine with an energy storage system” [20], que propone un aerogenerador hidráulico cerrado con un sistema de almacenamiento hidráulico de energía como se muestra en la Figura 11. La simulación realizada valida la eficiencia de la turbina eólica hidráulica y el esquema de control de velocidad presentado. Se obtienen las ecuaciones matemáticas de todos los componentes y se construye el modelo de simulación de todo el sistema en MATLAB. Se adoptan dos controladores PID para el sistema de control de velocidad del rotor y del motor para que la velocidad del rotor alcance rápidamente las expectativas y mantenga la velocidad del motor constante todo el tiempo [20].

Figura 11: Diagrama esquemático de la turbina eólica hidráulica cerrada con sistema de almacenamiento de energía



Fuente: Modeling and control of a 600 kW closed hydraulic wind turbine with an energy storage system [20]

Los resultados de la simulación muestran que el aerogenerador hidráulico cerrado no solo puede hacer que el rotor funcione a una velocidad óptima en aras de la máxima captura de energía eólica, sino que también puede mantener la velocidad del motor en un valor constante garantizando una frecuencia constante en la energía eléctrica generada. Además, el sistema de acumulación de energía puede almacenar o liberar automáticamente la energía hidráulica para compensar el desajuste de energía entre la energía de la turbina y la potencia de carga, en cualquier caso [20].

Una vez revisada la literatura existente sobre el tema planteado en esta tesis, se puede resaltar que el prototipo propuesto puede ser implementado en los parques e infraestructura ya existentes, a diferencia de los expuestos anteriormente que

implican la modificación de la configuración de las turbinas eólicas lo que sugiere altas inversiones. Este sistema, consiste en implementar una unidad central de generación a partir de sistemas eólicos, integrados a un circuito hidráulico que implementa un sistema de almacenamiento hidráulico que permite acumular excedentes de energía. Esta energía acumulada será devuelta al circuito hidráulico cuando la presión del caudal disminuya, manteniendo la frecuencia de rotación del motor hidráulico en 1800 [rpm].

Con este sistema cuyo componente principal son los acumuladores tipo vejiga, se busca garantizar la disponibilidad de la energía y generar confiabilidad en sistemas de generación de energía a partir de fuentes intermitentes.

### **3. METODOLOGÍA**

Para alcanzar el objetivo de este proyecto es necesario caracterizar el comportamiento de un generador eólico de 5 [kW] integrado a un sistema de almacenamiento hidráulico tipo vejiga, utilizando la herramienta matemática Matlab/Simulink.

Para cumplir con el alcance de este proyecto se proponen las siguientes actividades:

- ✚ Identificación del emplazamiento y determinación del potencial energético para la selección del aerogenerador.
- ✚ Simulación del comportamiento del sistema eólico para 5 [kW] en la herramienta matemática Matlab/Simulink.
- ✚ Integración del sistema eólico al sistema de acumulación hidráulica y determinación de los parámetros de diseño que permiten la interacción de estos dos sistemas.
- ✚ Caracterización del sistema de control de carga y descarga de los acumuladores hidráulicos.
- ✚ Dimensionamiento del número de acumuladores hidráulicos necesarios a fin de compensar los huecos de tensión para pequeños intervalos de tiempo.
- ✚ Análisis de la viabilidad técnica y autónoma de implementar acumuladores hidráulicos en sistemas eólicos.

### **4. SELECCIÓN Y SIMULACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA**

El sistema estudiado en este proyecto está compuesto principalmente por un aerogenerador, una bomba de desplazamiento positivo variable, un motor hidráulico y un banco de acumuladores hidráulicos tipo vejiga. Cada uno de los elementos son estudiados y caracterizados a continuación:

## 4.1. AEROGENERADOR

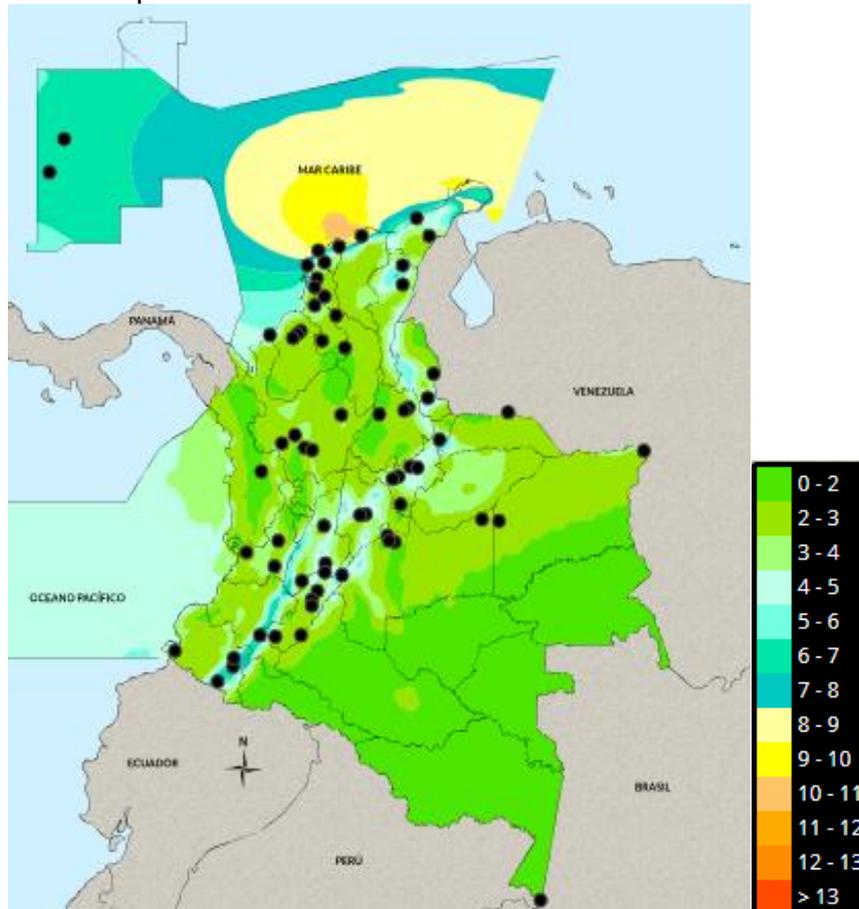
Un aerogenerador es una máquina capaz de transformar la fuerza cinética del viento en eléctrica. El funcionamiento de este dispositivo se basa en el movimiento de su hélice, la cual aprovecha la energía proveniente del aire [21].

Para la selección del aerogenerador estudiado primero se definió y analizó el lugar para el cual se realizaría la instalación, luego se determinó la potencia resultado del recurso eólico del emplazamiento y por último con los datos obtenidos se modeló el sistema.

### 4.1.1 Análisis del recurso eólico disponible

Para realizar el análisis del comportamiento del sistema propuesto, se seleccionó el departamento de la Guajira, el cual como se evidencia en la Figura 12, cuenta con un alto potencial eólico con respecto a otras zonas del país:

Figura 12: Velocidad promedio del viento a 10 metros de altura

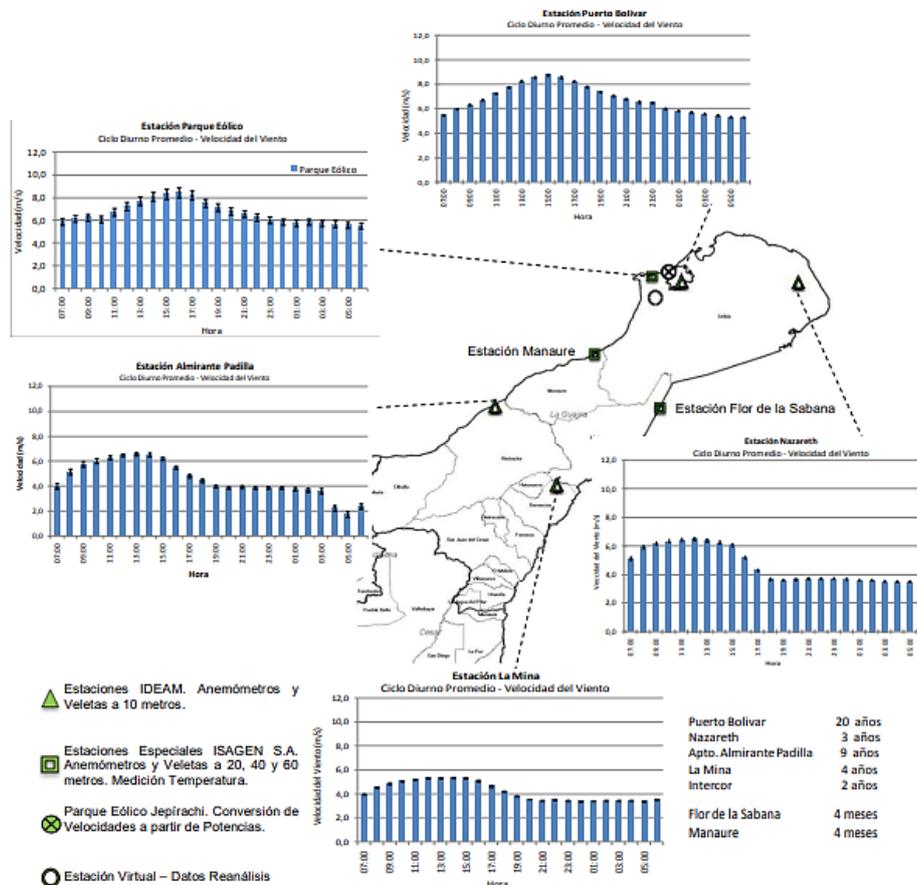


Fuente: IDEAM Atlas de viento [22]

Para el análisis de la velocidad del viento se utilizó información de varias estaciones climatológicas de la zona. La información utilizada y debidamente procesada incluye cuatro (4) estaciones climatológicas del IDEAM y tres (3) estaciones climatológicas especiales de ISAGEN [23]. Estos datos permitieron determinar la localización exacta del proyecto.

Como se puede observar en la Figura 13, el lugar con mayor recurso eólico estudiado en el proyecto “Análisis de generación complementaria entre energía hidráulica y eólica caso: generación ISAGEN – proyectos eólicos en la guajira colombiana” [23], es Puerto Bolívar.

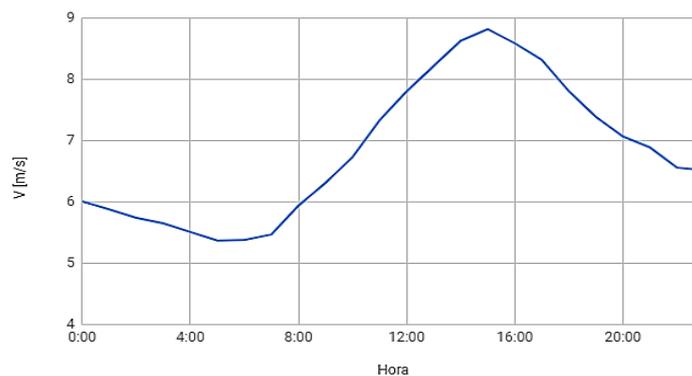
Figura 13: Ciclo diario promedio de la velocidad del viento para la zona de estudio



Fuente: Energía hidráulica y eólica caso: generación ISAGEN [23]

A continuación, se presentan los datos de velocidad de viento del emplazamiento seleccionado, los cuales será utilizados para el desarrollo del sistema:

Figura 14: Promedio de la velocidad del viento en Puerto Bolívar



Fuente: Propia

#### 4.1.2 Selección del aerogenerador

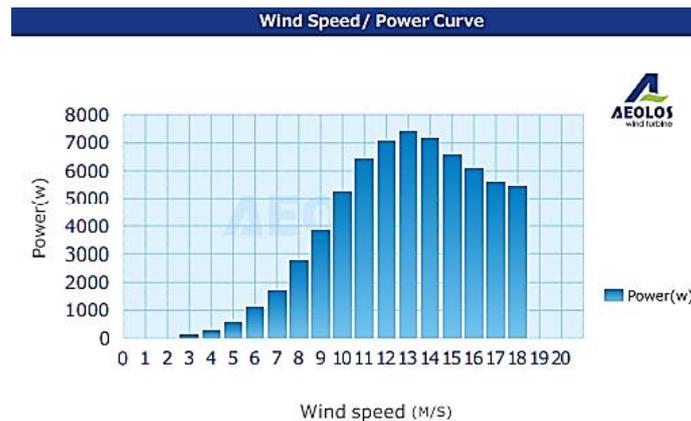
Para la simulación se definió una potencia de 5 [kW], por lo que se seleccionó el aerogenerador de referencia Aeolos-H 5 [kW], el cual presenta los datos expuestos en la Tabla 4 y Figuras 15 y 16:

Tabla 4: Datos del aerogenerador seleccionado

<b>Diámetro [m]</b>	6,4
<b>Altura [m]</b>	15

Fuente: Catálogo AEOLOS [24]

Figura 15: Curva de potencia entregada según velocidad del viento



Fuente: Catálogo AEOLOS [25]

Figura 16: Caracterización de la turbina

Aeolos-H 5kW Wind Turbine Output								
Wind Speed(m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
Generator Power(w)	170	460	930	1463	2210	3000	4100	5152
Annual Energy Output(kwh)	1489	4030	8147	12816	19360	26280	35916	45132

Fuente: Catálogo AEOLOS [25]

Una vez seleccionado el aerogenerador se determina la cantidad de potencia que será capaz de suministrar con los recursos dispuestos por el emplazamiento, para lo cual se inicia corrigiendo la velocidad del viento que depende del terreno y de la altura a la que se tome, como se evidencia en la Tabla 5 la velocidad inicial fue medida a 10 [m] de altura mientras que el aerogenerador se encuentra a 15[m]:

Tabla 5: Alturas

<b>h1 [m]</b>	10
<b>h2 [m]</b>	15

Fuente: Propia

Donde,  $h_1$  representa la altura a la cual fue realizada la medición y  $h_2$  la altura del rotor de la turbina propuesta. Para determinar la velocidad corregida se hace uso de la ecuación 4.1:

$$v_c = v_{h_1} \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^b \quad 4.1$$

Donde  $v_{h_1}, v_c$  representan las velocidades del viento a las alturas  $h_1, h_2$  y  $b$  es un coeficiente que depende del nivel de rugosidad del terreno. En la Figura 17 se detallan diferentes valores del coeficiente  $b$  en función de distintos tipos de terreno [25].

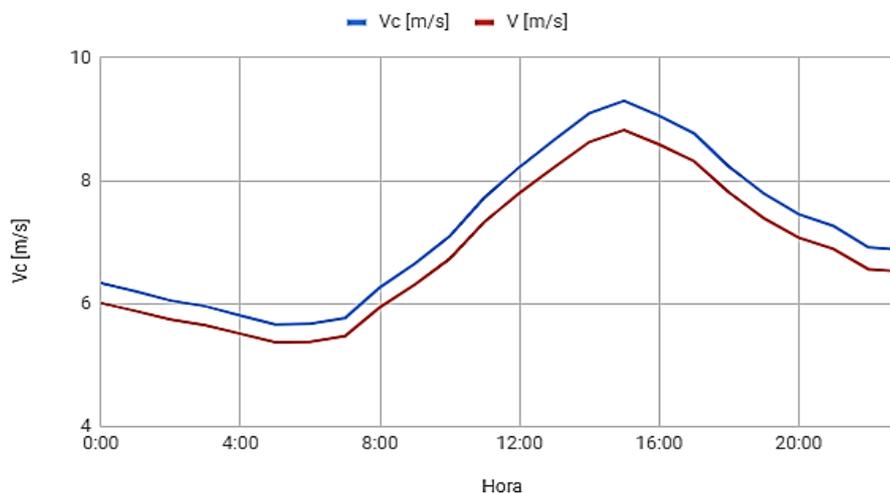
Figura 17: Niveles de rugosidad del terreno

Nivel de rugosidad del terreno	b
No rugoso (arena, nieve, mar)	0,10-0,13
Poco rugoso (hierba, campo de cereales)	0,13-0,20
Rugoso (bosque, casa pequeñas)	0,20-0,27
Muy rugoso (edificios grandes)	0,27-0,40

Fuente: Diseño de un aerogenerador de baja potencia [25]

Tomando el coeficiente del nivel de rugosidad del suelo como 0.13, se obtienen los datos presentados en la Figura 18, donde la velocidad corregida aumentó aproximadamente un 5,4% con respecto a la velocidad medida a 10 [m]:

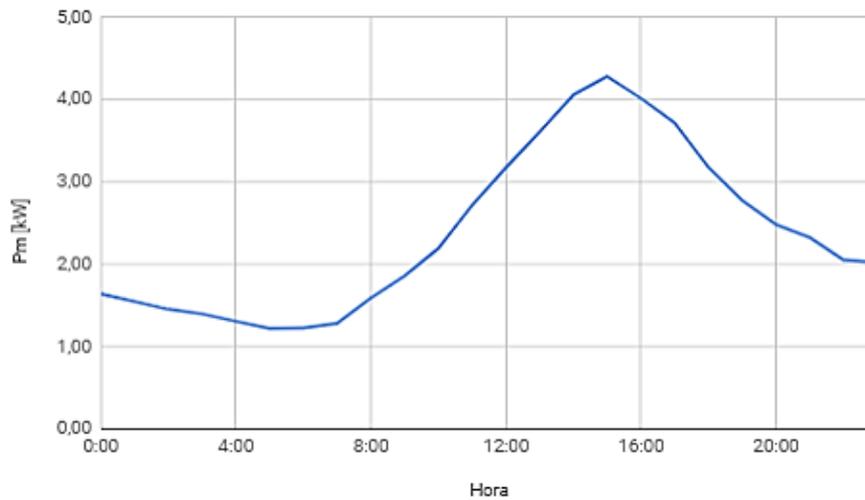
Figura 18: Velocidad del viento corregida



Fuente: Propia

Con los datos de velocidad obtenidos, se determina a partir de la curva del aerogenerador la potencia entregada por el mismo como se muestra en la Figura 19, donde el máximo suministrado es igual a 4,3 [kW], para las condiciones del emplazamiento seleccionado:

Figura 19: Potencia entregada por el aerogenerador



Fuente: Propia

#### 4.1.3 Modelado implementado en Matlab/Simulink

Para la simulación de este sistema en el entorno Matlab/Simulink, se hace uso de la turbina eólica mostrada en la Figura 20, cuyo comportamiento es descrito por la ecuación enunciada a continuación [26]:

$$P_m = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho A}{2} v_{wind}^2 \quad 4.2$$

Donde,

$P_m$ , potencia mecánica de salida [W]

$C_p$ , coeficiente de rendimiento de la turbina

$\rho$ , densidad del aire [kg/m<sup>3</sup>]

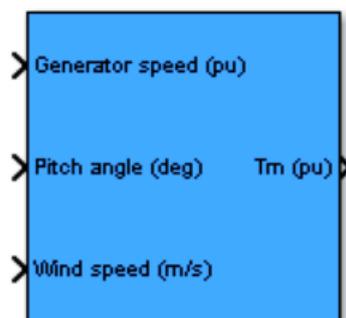
$A$ , área de barrido [m<sup>2</sup>]

$v_{wind}$ , velocidad del viento [m/s]

$\lambda$ , relación de velocidad de la punta de la pala del rotor y la velocidad del viento

$\beta$ , ángulo de la pala [deg]

Figura 20: Bloque turbina eólica Matlab/Simulink



Fuente: MathWorks [26]

Donde,

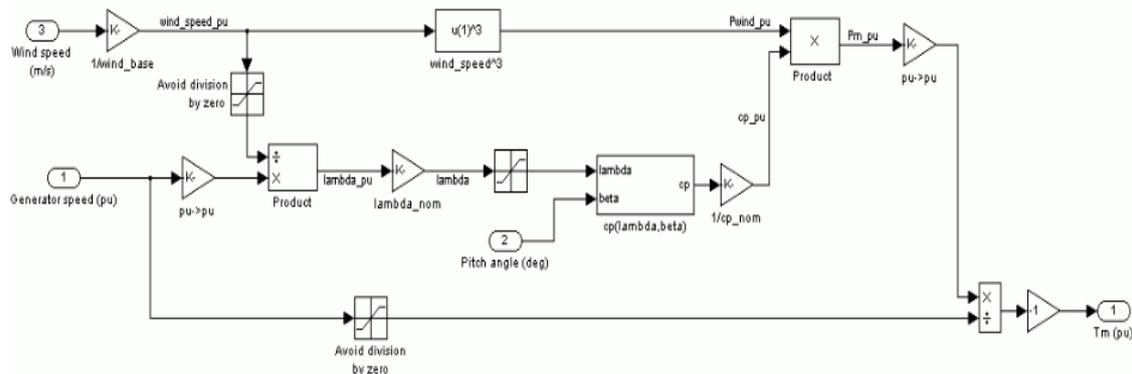
Generator speed [pu], es la entrada de la velocidad del generador.

Pitch angle [deg], es la entrada que indica el ángulo de inclinación.

Wind speed [m/s], consiste en la entrada del perfil de velocidad.

El modelo Simulink® de la turbina se ilustra en la siguiente Figura:

Figura 21: Modelo Simulink® de la turbina



Fuente: MathWorks [26]

Los datos de entrada al sistema se exponen en la Tabla 6:

Tabla 6: Datos de entrada del sistema

Vbase [m/s]	Pbase [W]	Pnominal [W]	Kp [pu]	Relación rotacional [pu]
7,20	2184,312031	5000	0,4368623	1,805418131

Fuente: Propia

Donde,

Velocidad base [m/s], es la velocidad promedio del emplazamiento.

Potencia base [W], potencia suministrada por el aerogenerador a la velocidad base.

Potencia nominal [W], consiste en la potencia nominal del aerogenerador.

Relación kp [pu], se refiere a la razón entre la potencia base y la potencia nominal.

Relación rotacional [pu], es la velocidad de máxima entre la velocidad base.

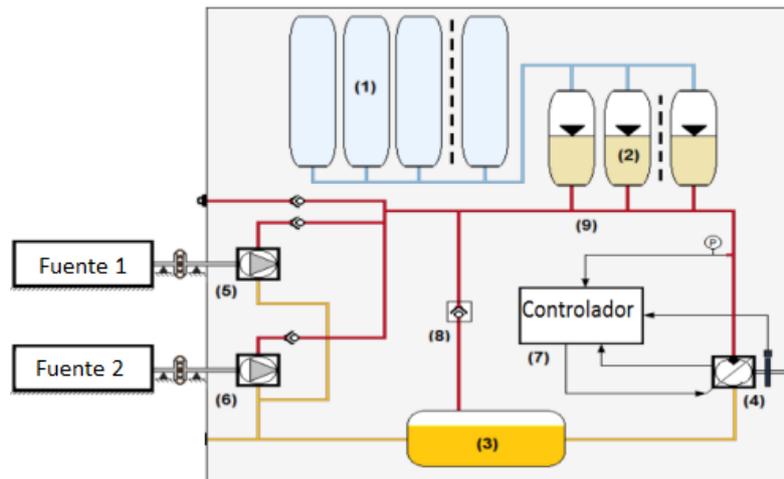
## 4.2. SISTEMA DE TRANSMISIÓN HIDRÁULICA

Los sistemas hidráulicos son usados generalmente para controlar y transmitir potencia mecánica. Entre sus principales ventajas se encuentran [27]:

- ✚ Alta relación potencia / peso.
- ✚ Auto lubricación.
- ✚ Posibilidad de almacenamiento de energía en acumuladores hidráulicos.
- ✚ Flexibilidad de transmisión en comparación con los sistemas mecánicos.

Estos sistemas están constituidos por los siguientes elementos:

Figura 22: Elementos que conforman un sistema de transmisión hidráulica



Fuente: Modelagem matemática da operação integrada do sistema híbrido Solar / Biomassa, utilizando tecnologias Disco / Stirling, CCP-ORC solar e gaseificação / MCI com sistema de acumulação hidráulico tipo bexiga [28]

Los componentes mostrados en la Figura 22 se describen a continuación [28]:

- Botellas de almacenamiento de gas a presión (1)
- Acumuladores hidráulicos (2)
- Tanque de depósito de aceite de baja presión (3)
- Motor hidráulico de desplazamiento variable (4)
- Bomba hidráulica de desplazamiento variable (5)
- Bomba hidráulica de desplazamiento variable (6)
- Control electrónico de rotación del motor hidráulico (7)

A continuación, se describen los principales elementos del sistema hidráulico propuesto.

#### 4.2.1 Bomba de variable de pistones axiales

Las bombas hidráulicas son máquinas que incrementan la energía del líquido que fluye a través de ellas [28]. Para realizar el respectivo análisis se hizo uso de una bomba de desplazamiento variable, ya que esta permite adecuar en cualquier instante el volumen desplazado con la demanda.

Este volumen de fluido trabajado por la bomba es proporcional a la señal de control proporcionada por el puerto C, mostrado en la Figura 23 [28]:

Figura 23: Diagrama de la bomba Matlab/Simulink



Fuente: MathWorks [29]

Donde cada uno de los puertos representa:

- C, puerto de entrada de señal física para la posición del miembro de control.
- S, puerto de conservación rotativo mecánico que representa el eje de la bomba.
- P, puerto conservador hidráulico que representa la salida de la bomba.
- T, puerto conservador hidráulico que representa la entrada de la bomba.

El caudal de trabajo de la bomba es calculado mediante la siguiente ecuación [28]:

$$Q_{bomba} = D_{bomba} * \omega_{bomba} - k_{leak} * P_{bomba} \quad 4.3$$

Donde  $Q_{bomba}$  es el caudal de trabajo de la bomba,  $D_{bomba}$  es el desplazamiento instantáneo,  $\omega_{bomba}$  es la velocidad angular,  $k_{leak}$  es el coeficiente de fuga y  $P_{bomba}$  es el diferencial de presión a través de la bomba.

El coeficiente de fuga está dado por:

$$k_{leak} = k_{HP}/\nu * \rho \quad 4.4$$

Dónde,

- $k_{HP}$ , Coeficiente de Hagen-Poiseuille.
- $\nu$ , es la viscosidad cinemática del fluido.
- $\rho$ , es la densidad del fluido.

El coeficiente de Hagen-Poiseuille puede ser determinado por:

$$k_{HP} = \frac{D_{m\acute{a}x\ bomba} * \omega_{nombomba}(1 - \eta_{vbomba}) * \nu_{nom} * \rho_{nom}}{P_{nombomba}} \quad 4.5$$

Dónde,  $D_{m\acute{a}x\ bomba}$  es el desplazamiento máximo de la bomba,  $\omega_{nombomba}$  es la velocidad angular nominal,  $\eta_{vbomba}$  es la eficiencia volumétrica de la bomba,  $\nu_{nom}$  es la viscosidad cinemática nominal del fluido y  $\rho_{nom}$  su densidad nominal,  $P_{nombomba}$  es la presión nominal. El torque de accionamiento de la bomba puede ser calculado por la ecuación:

$$T_{bomba} = D_{m\acute{a}x\ bomba} * P_{bomba}/\eta_{mecbomba} \quad 4.6$$

Dónde,  $\eta_{mecbomba}$  es la eficiencia mecánica de la bomba.

El diferencial de presión a través de la bomba es determinado mediante la siguiente ecuación:

$$P_{bomba} = P_P - P_T \quad 4.7$$

Donde,  $P_P$  y  $P_T$  son las presiones manométricas en los terminales de la bomba. La eficiencia mecánica no está generalmente disponible en los catálogos, por tanto, es determinada a partir de:

$$\eta_{mecbomba} = \frac{\eta_{total}}{\eta_{vbomba}} \quad 4.8$$

Para la selección de la bomba se eligió del catálogo Rexroth Bosch Group. Los parámetros ingresados en Matlab/Simulink son los mostrados en la Tabla 7:

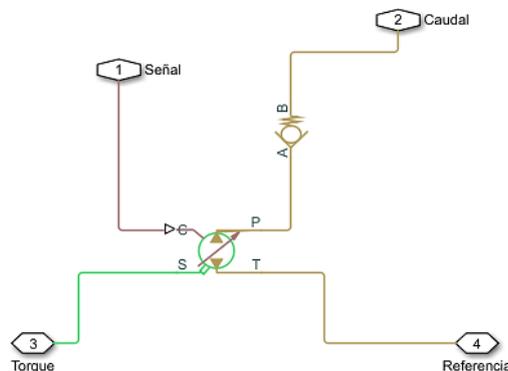
Tabla 7: Datos de entrada de la bomba en Matlab/Simulink

Parámetros	Valor	Unidad
Desplazamiento máximo	0,0066	[l/rev]
Curso máximo	0,005	[m]
Eficiencia volumétrica	0,9	[%]
Eficiencia total	0,81	[%]
Presión nominal	20000000	[Pa]
Velocidad angular	188	[rad/s]

Fuente: Propia

En la Figura 24 se evidencia el sistema implementado en Simulink:

Figura 24: Sistema implementado en Matlab/Simulink



Fuente: Propia

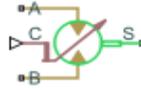
#### 4.2.2 Motor variable de pistones axiales

Los motores hidráulicos son máquinas que se instalan para impulsar las cargas al convertir la potencia hidráulica en potencia mecánica. La potencia mecánica

suministrada a la carga se administra mediante el control de la presión del fluido y el caudal, mediante el uso de válvulas de control hidráulicas [27]. Para realizar el respectivo análisis se hizo uso de un motor de desplazamiento variable, ya que este al igual que la bomba descrita anteriormente permite adecuar en cualquier instante el volumen desplazado con la demanda.

Este volumen de fluido trabajado por la bomba es proporcional a la señal de control proporcionada por el puerto C, mostrado en la Figura 25 [28]:

Figura 25: Diagrama del motor Matlab/Simulink



Fuente: MathWorks [30]

Donde,

A, puerto conservador hidráulico que representa la entrada del motor.

B, puerto conservador hidráulico que representa la salida del motor.

C, puerto de entrada de señal física para la posición del miembro de control.

S, puerto de conservación rotativo mecánico que representa el eje del motor.

El caudal de trabajo del motor es calculado mediante la ecuación 4.9 [28]:

$$Q_{motor} = D_{motor} * \omega_{motor} - k_{leak} * P_{motor} \quad 4.9$$

Donde  $Q_{motor}$  es el caudal de trabajo del motor,  $D_{motor}$  es el desplazamiento instantáneo,  $\omega_{motor}$  es la velocidad angular,  $k_{leak}$  es el coeficiente de fuga y  $P_{motor}$  es el diferencial de presión a través del motor.

El coeficiente de fuga está dado por:

$$k_{leak} = k_{HP}/\nu * \rho \quad 4.10$$

Dónde,

$k_{HP}$ , Coeficiente de Hagen-Poiseuille.

$\nu$ , es la viscosidad cinemática del fluido.

$\rho$ , es la densidad del fluido.

El coeficiente de Hagen-Poiseuille puede ser determinado por:

$$k_{HP} = \frac{D_{m\acute{a}x\ motor} * \omega_{nommotor} (1 - \eta_{vmotor}) * \nu_{nom} * \rho_{nom}}{P_{nommotor}} \quad 4.11$$

Dónde,  $D_{m\acute{a}x\ motor}$  es el desplazamiento máximo del motor,  $\omega_{nombomba}$  es la velocidad angular nominal,  $\eta_{vmotor}$  es la eficiencia volumétrica del motor,  $\nu_{nom}$  es la viscosidad cinemática nominal del fluido y  $\rho_{nom}$  su densidad nominal,  $P_{nommotor}$  es la presión nominal. El torque en el eje del motor puede ser calculado por la ecuación:

$$T_{motor} = D_{m\acute{a}x\ motor} * P_{motor} / \eta_{mecmotor} \quad 4.12$$

Dónde,  $\eta_{mecmotor}$  es la eficiencia mecánica del motor.

El diferencial de presión a través del motor es determinado mediante la siguiente ecuación:

$$P_{motor} = P_P - P_T \quad 4.13$$

Donde,  $P_P$  y  $P_T$  son las presiones manométricas en los terminales del motor. La eficiencia mecánica no está generalmente disponible en los catálogos, por tanto, es determinada a partir de:

$$\eta_{mecmotor} = \frac{\eta_{total}}{\eta_{vmotor}} \quad 4.14$$

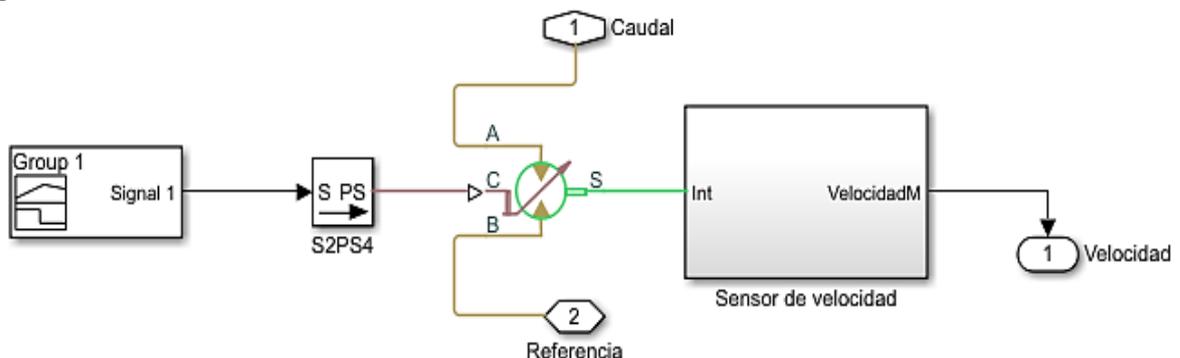
Para la selección del motor se eligió del catálogo Rexroth Bosch Group A10V(S)O45. Los datos de entrada al sistema implementado en Matlab expuesto en la Figura 26 se enuncian en la Tabla 8 mostrada a continuación:

Tabla 8: Datos de entrada del motor en Matlab/Simulink

Parámetros	Valor	Unidad
Desplazamiento máximo	0,00654	[l/rev]
Curso máximo	0,005	[m]
Eficiencia volumétrica	0,9	[%]
Eficiencia total	0,81	[%]
Presión nominal	19000000	[Pa]
Velocidad angular	188	[rad/s]

Fuente: Propia

Figura 26: Motor Matlab/Simulink



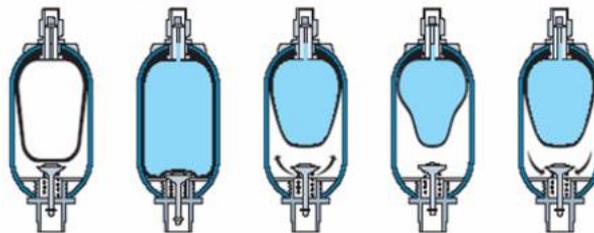
Fuente: Propia

### 4.2.3 Acumuladores hidráulicos

Los acumuladores hidráulicos, son contenedores que almacenan el fluido hidráulico a presión para su uso posterior. Mediante el uso de gas nitrógeno comprimido, estos contenedores almacenan energía que puede ser usada como una fuente de respaldo de energía hidráulica en caso de fallas. Existen tres tipos de acumuladores de uso común: vejiga, pistón y diafragma, idénticos en su principio de funcionamiento, estos tres tipos de acumuladores utilizan diferentes mecanismos para separar el gas del fluido hidráulico. Es la diferencia, y las características de rendimiento resultantes, lo que determina su idoneidad para diferentes aplicaciones [31]. Para el sistema propuesto en este trabajo se usará un acumulador tipo vejiga, el cual es el más usado cuando se trata de aplicaciones que impliquen compensación de energía [31].

En este acumulador se aloja una vejiga de goma flexible no plisada cargada de nitrógeno dentro de una carcasa de acero. Para su carga el fluido hidráulico es bombeado a través de la válvula haciendo que se contraiga la vejiga con nitrógeno lo que hace que su presión aumente. Una vez la presión en el sistema al que están conectados los acumuladores cae, la vejiga a alta presión se expande para descargar el fluido, proceso que se puede observar en la Figura 27 [31].

Figura 27: Acumulador de vejiga típico

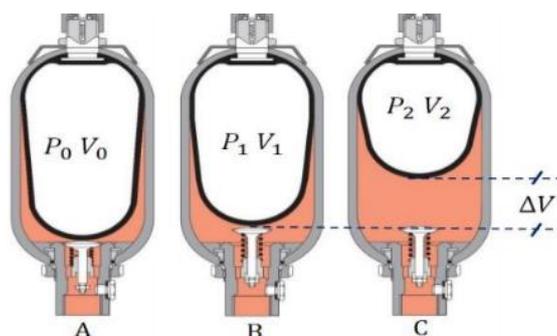


Fuente: The deep water gas charged accumulator and its possible replacements [31]

#### 4.2.3.1 Parámetros para el dimensionamiento del acumulador

El acumulador es cargado durante los períodos de alto recurso eólico y descargado cuando la energía del viento disminuye. A continuación, se pueden evidenciar las principales etapas del funcionamiento del acumulador [28]:

Figura 28: Etapas del funcionamiento del acumulador tipo vejiga



Fuente: Modelagem matemática da operação integrada do sistema híbrido Solar / Biomassa, utilizando tecnologias Disco / Stirling, CCP-ORC solar e gaseificação / MCI com sistema de acumulação hidráulico tipo bexiga [28]

- En la Figura A, el acumulador está en la posición de pre-carga, lo que significa que el acumulador sólo tiene nitrógeno a una presión de llenado  $P_0$  y volumen de gas efectivo  $V_0$ . En esta etapa el acumulador no contiene aceite.
- En la Figura B, el acumulador está en la posición mínima de funcionamiento. En esta etapa hay una cantidad pequeña de aceite entre la vejiga y la válvula de retención, aproximadamente 10% del valor nominal de la capacidad del acumulador. Esto es hecho de tal modo que el sistema de extrusión no cierre el orificio hidráulico, alcanzando una presión de servicio mínimo  $P_1$  y volumen de gas  $V_1$ .
- En la Figura C, la posición de la vejiga está en la presión máxima de trabajo. El aceite fluye hacia el acumulador hasta que el gas en el interior de la vejiga es comprimido alcanzando la presión máxima permitida  $P_2$  y el volumen mínimo del gas  $V_2$ .

La variación del volumen entre las posiciones de presión de operación mínima y máxima corresponde a la cantidad de fluido hidráulico útil para producir trabajo, calculado por la ecuación 4.15 [28]:

$$\Delta V = V_1 - V_2 \quad 4.15$$

Los acumuladores de vejiga permiten aprovechar el 75% del volumen de gas efectivo. Por eso, la relación entre la presión de llenado de nitrógeno y la presión máxima de operación es limitada. Por otro lado, la presión de llenado del gas no debe superar el 90% de la presión mínima del sistema. Para obtener el mejor aprovechamiento del volumen del acumulador y mayor vida útil, se recomienda que la presión de llenado del gas  $P_0$ , para una temperatura máxima de servicio  $T_{m\acute{a}x}$ , sea:

$$P_{o(Tm\acute{a}x)} = 0,9P_1 \quad 4.16$$

Es importante tener en cuenta que la presión máxima permitida  $P_2$ :

$$P_2 \leq 4P_0 \quad 4.17$$

En cuanto mayor sea la diferencia entre  $P_1$  y  $P_2$  mayor es la vida útil de la vejiga del acumulador. El caudal actual de aceite que entra en el acumulador  $Q_a$  es igual a la tasa de compresión del gas en el acumulador, mostrada en la siguiente ecuación [28]:

$$Q_a = -m_g \frac{dv}{dt} \quad 4.18$$

Dónde  $m_g$  masa del gas,  $v$  es el volumen específico del gas y  $t$  es el tiempo. La anterior ecuación es integrada para prever el volumen específico del gas conociendo el volumen específico inicial  $v_0$  y la tasa de flujo real  $Q_a$ . Considerando la carga del gas como un sistema cerrado, el balance de energía es calculado por la ecuación:

$$m_g \frac{du}{dt} = hA_w(T_w - T) - P_g \frac{dV}{dt} \quad 4.19$$

Donde  $h$  es el coeficiente de transferencia por convección,  $A_w$  el área eficaz de la pared del acumulador,  $T$  la temperatura media del gas,  $P_g$  es la presión del gas y  $V$  su volumen. La energía interna por unidad de masa para un gas real está dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{du}{dt} = C_v \frac{dT}{dt} + [T(\frac{\partial P_g}{\partial T})_V - P_g] \frac{dV}{dt} \quad 4.20$$

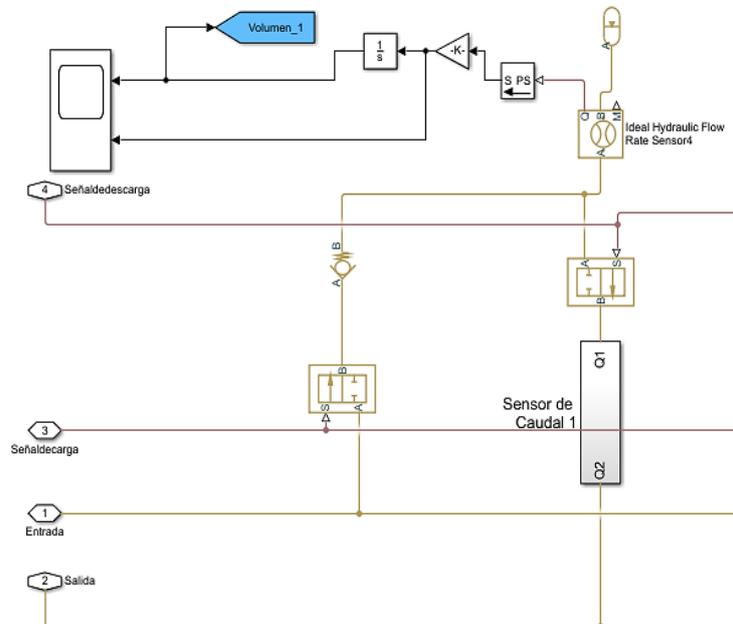
Dónde,  $C_v$  es el calor específico a volumen constante,  $v$  es el volumen específico del gas. Reemplazando en las ecuaciones anteriores:

$$\tau \frac{dT}{dt} + T = T_w - \frac{T_V \tau}{C_V} (\frac{\partial P_g}{\partial T})_V \frac{dV}{dt} \quad 4.21$$

$$\tau = \frac{m_g C_V}{hA_w} \quad 4.22$$

Dónde  $\tau$  es la constante de tiempo térmica, definida como el tiempo en el que la presión llega hasta el 63,2% en comparación con la presión final de equilibrio [28]. En la Figura 29 se puede observar el sistema de acumulación implementado, el cual está compuesto principalmente por dos válvulas para controlar su carga y descarga, el acumulador hidráulico de tipo vejiga y una válvula anti retorno, como se evidencia a continuación:

Figura 29: Acumulador hidráulico implementado en Matlab/Simulink

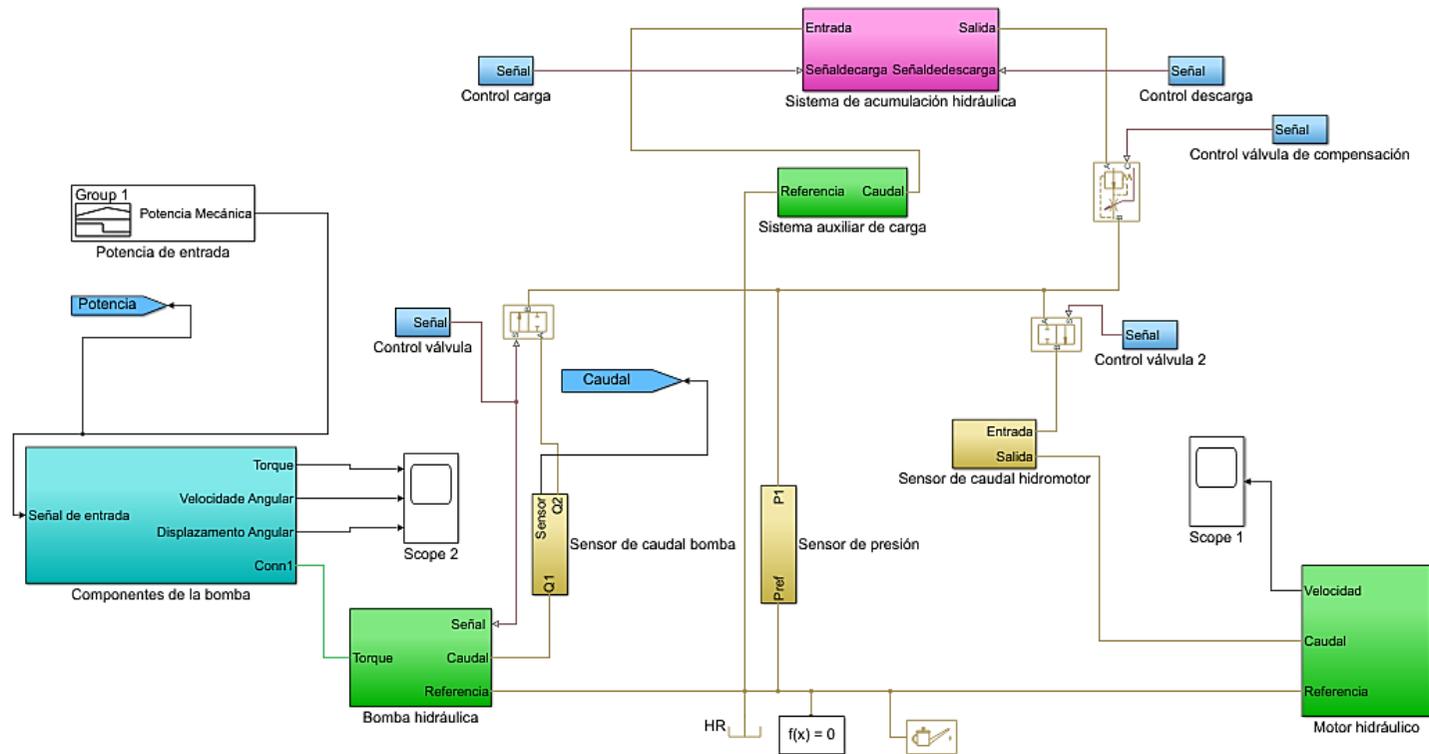


Fuente: Propia

#### 4.2.4 Implementación del sistema de transmisión y acumulación hidráulica en Matlab/Simulink

En las partes anteriores fueron descritas las formulaciones matemáticas para cada elemento que compone el sistema. A continuación, se mostrará su simulación en el paquete de herramientas de Matlab/Simulink llamado Simhydraulics:

Figura 30: Sistema implementado en Matlab/Simulink



Fuente: Propia

El sistema está diseñado para garantizar 1800 rpm en la salida del motor y 3 [kW], para lo cual se hizo uso de los sistemas analizados a continuación:

#### 4.2.4.1 Sistema de alivio

Para garantizar que cuando haya exceso y los acumuladores estén completamente cargados el sistema siga funcionando a las condiciones deseadas se implementa una válvula de alivio, la cual garantiza un caudal de 1,8 [l/s], el necesario para mantener el sistema a 1800rpm y 3 [kW].

Figura 31: Diagrama de la válvula de alivio Matlab/Simulink



Fuente: MathWorks [32]

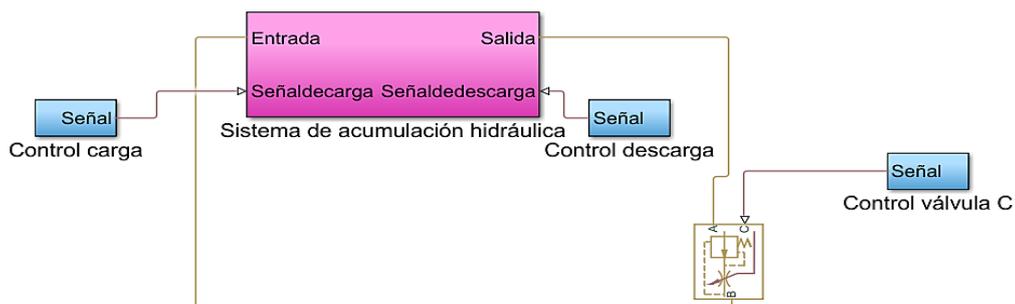
El bloque de la válvula de alivio de presión modela el flujo a través de una válvula que se abre para ventilar a fin de mantener una caída de presión predeterminada entre la entrada (puerto A) y la salida (puerto B). La válvula normalmente cerrada se agrieta cuando la caída de presión de A a B supera el ajuste de presión de la válvula. El área de apertura de la válvula se calcula como una función del exceso en la caída de presión, ya sea una expresión lineal simple o una función tabulada (generalmente no lineal). La válvula cumple su función hasta que su área de apertura alcanza un máximo: un punto en el límite del rango de regulación de la válvula, más allá del cual la caída de presión es libre de subir, sin cesar [32]. En este caso se calibra de tal manera que se garanticen las condiciones de diseño.

#### 4.2.4.2 Control de la carga y descarga del acumulador hidráulico

Para controlar la carga y descarga del sistema de acumulación se hizo uso del siguiente algoritmo el cual controla los pulsos para abrir y cerrar la válvula dependiendo de la potencia suministrada por el aerogenerador y del volumen de los acumuladores.

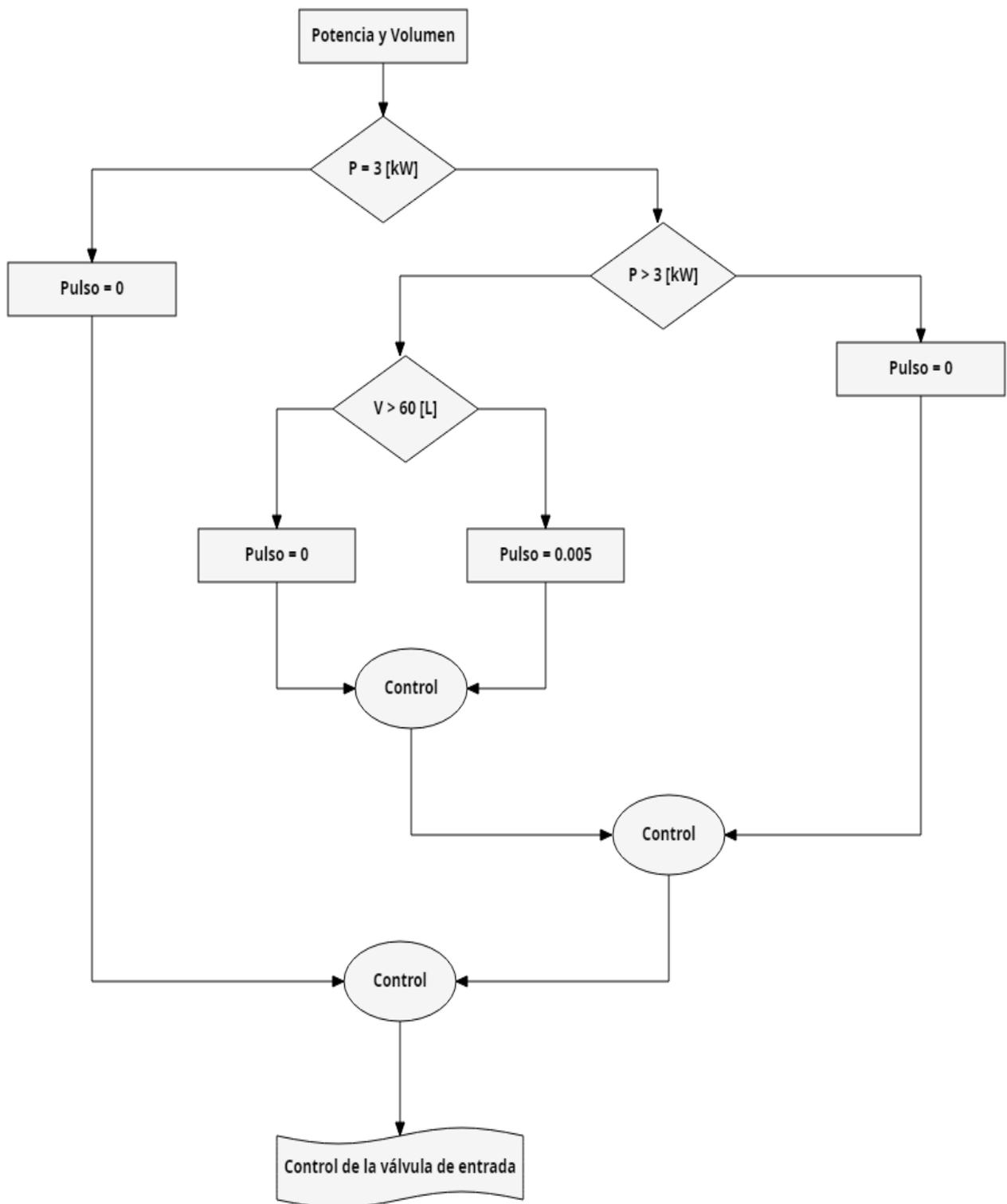
La Figura 32 expone el sistema implementado en Matlab/Simulink, en el cual las válvulas de carga y descarga son controladas por señales que dependen de la potencia entregada y el volumen de fluido disponible en los acumuladores como se evidencia en las Figuras 33 y 34.

Figura 32: Control del sistema de acumulación Matlab/Simulink



Fuente: Propia

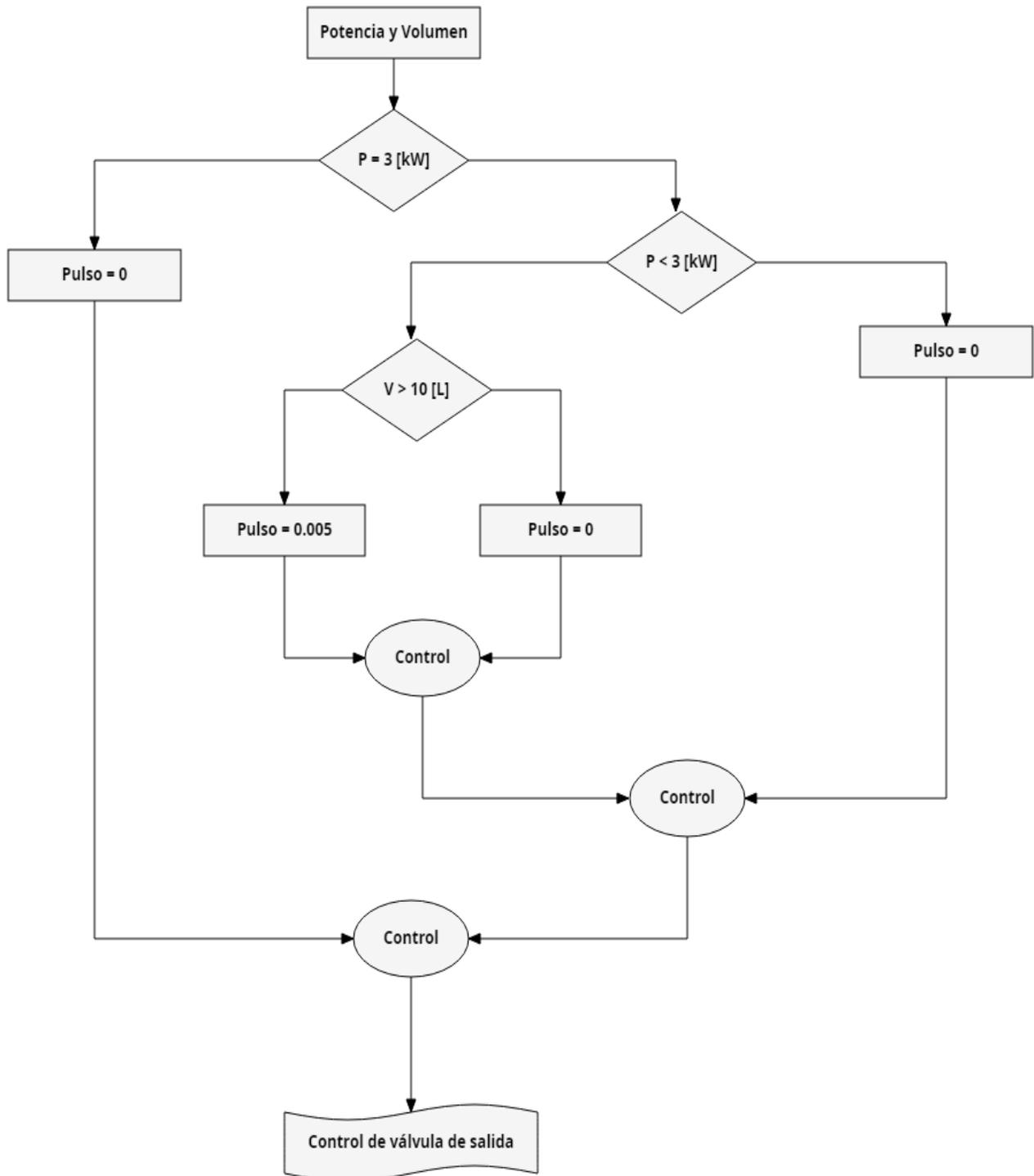
Figura 33: Flujograma del control de la válvula de entrada del acumulador



Fuente: Propia

En este caso la válvula de carga sólo se abrirá cuando la potencia suministrada por el aerogenerador sea mayor a 3 [kW] y el volumen del acumulador sea menor a la capacidad máxima de los mismos.

Figura 34: Flujograma del control de la válvula de salida del acumulador



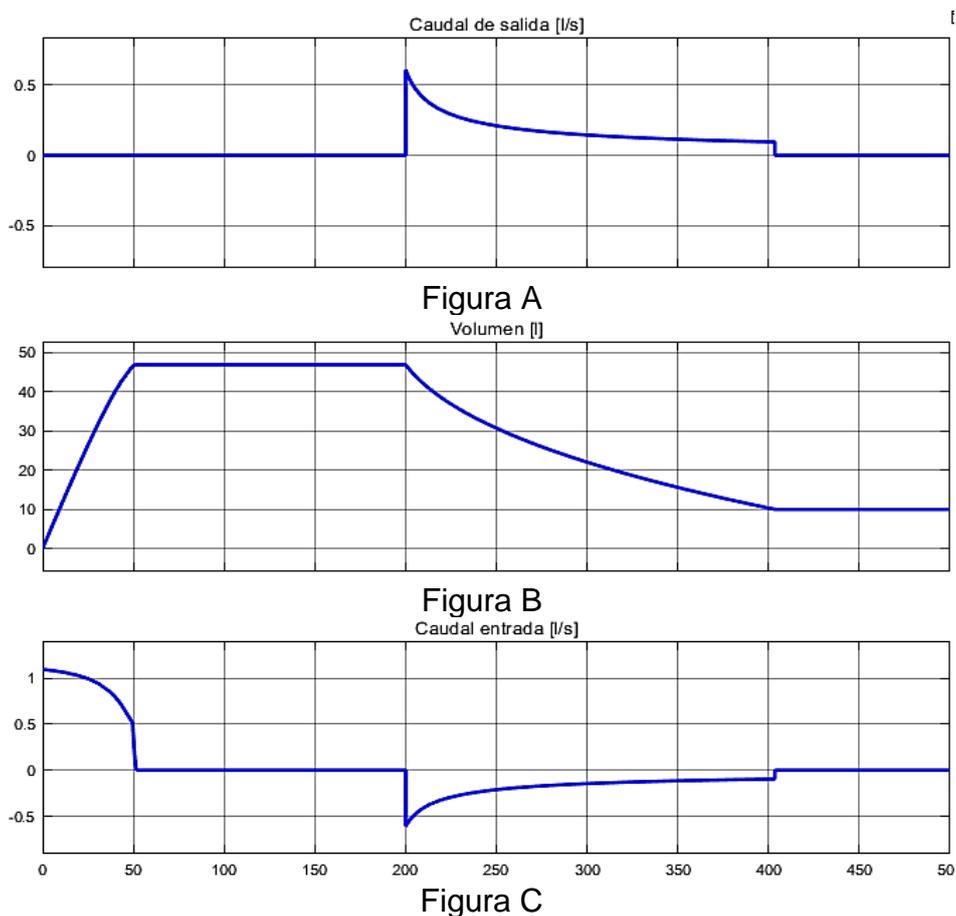
Fuente: Propia

En la Figura 34 se observa que la válvula de descarga sólo se abrirá cuando la potencia suministrada por el aerogenerador sea menor a 3 [kW] y el volumen del acumulador mayor a 10 [L], de lo contrario permanecerá totalmente cerrada.

#### 4.2.4.3 Sistema de compensación

Implementado el sistema de control y la válvula de alivio, se observa la descarga de los acumuladores hidráulicos el cual se presenta de manera exponencial. Este comportamiento no es adecuado para implementarlo en el sistema propuesto en este trabajo, ya que la descarga no es controlada y no permite mantener la velocidad del motor hidráulico constante y en el valor deseado. Este fenómeno se presenta en la Figura 35, donde se observa como es el comportamiento del caudal de salida (A), el comportamiento del volumen al cargar y descargar (B) y como es el comportamiento del caudal a la entrada del acumulador (C):

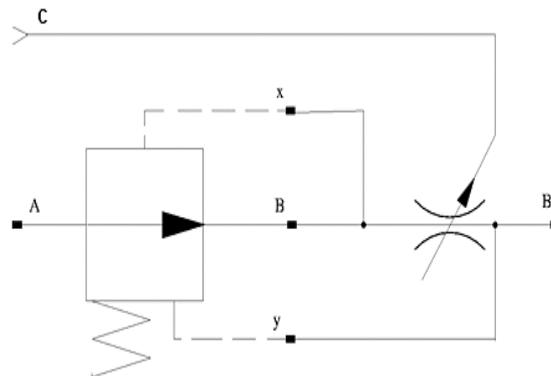
Figura 35: Comportamiento dinámico del acumulador



Fuente: Propia

El comportamiento natural de la descarga de los acumuladores hidráulicos, no es el adecuado para mantener la velocidad de rotación del motor hidráulico en el punto de operación óptimo. Para ajustar la descarga del fluido hidráulico, fue necesario implementar una válvula de regulación de caudal con presión compensada, mostrada en la Figura 36 [33]. La válvula es caracterizada de manera que se pueda controlar la apertura de la válvula y la presión en los bornes a la salida, para cualquier punto de operación. El objetivo es minimizar los efectos en la caída de la presión, en el circuito hidráulico que permita compensar el caudal necesario de tal manera que la velocidad en motor hidráulico se mantenga constante [33].

Figura 36: Válvula con compensación de presión



Fuente: MathWorks [33]

Para cumplir con las condiciones de diseño de descarga de los acumuladores es necesario caracterizar la válvula de regulación de caudal, teniendo en cuenta diferentes entradas de potencia y ajustando los valores en la apertura de la misma, como se evidencia en la Tabla 9:

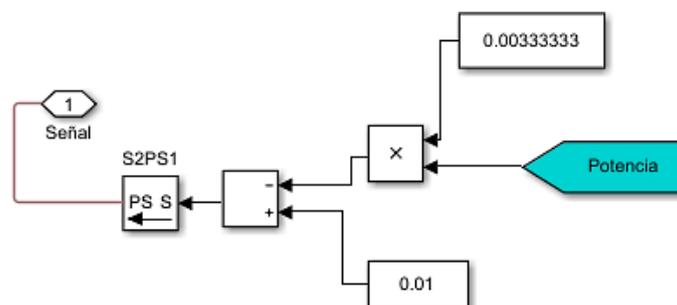
Tabla 9: Regresión lineal realizada

Potencia [kW]	Desplazamiento [m]
0	0,01
0,5	0,00831
1	0,00663
1,5	0,004962
2	0,003304
2,5	0,001647
3	0

Fuente: Propia

A partir de esta regresión, se construye el diagrama de bloques mostrado en la Figura 37, el cual controla la descarga del sistema permitiendo que el motor trabaje en su punto óptimo de operación mientras se descargan los acumuladores. La señal generada es ingresada en el puerto C de la válvula de compensación, el cual como se puede observar en la Figura 36 se encarga del control de apertura de la válvula.

Figura 37: Control de la válvula de compensación



Fuente: Propia

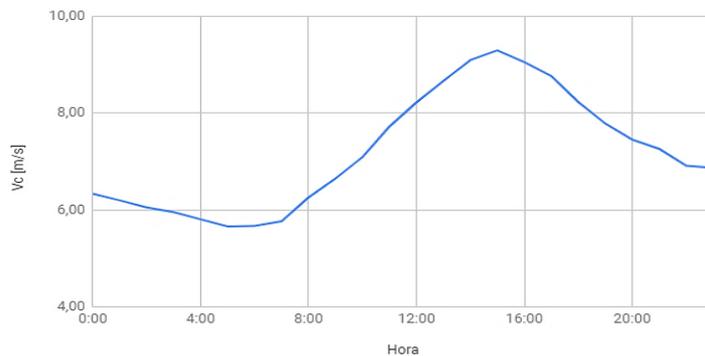
## 5. RESULTADOS

En este capítulo se determina la viabilidad de la integración del sistema eólico al sistema de acumulación hidráulica tipo vejiga, se analiza la respuesta de los acumuladores con compensación y se determinan los tiempos en los que el prototipo propuesto suplirá las fallas.

### 5.1. INTEGRACIÓN DEL SISTEMA EÓLICO A LOS ACUMULADORES

Para analizar la respuesta del sistema, se tomaron los datos de vientos mostrados en la Figura 38, los cuales fueron tomados del proyecto “Análisis de generación complementaria entre energía hidráulica y eólica caso: generación ISAGEN – proyectos eólicos en la guajira colombiana” [23] enunciados anteriormente:

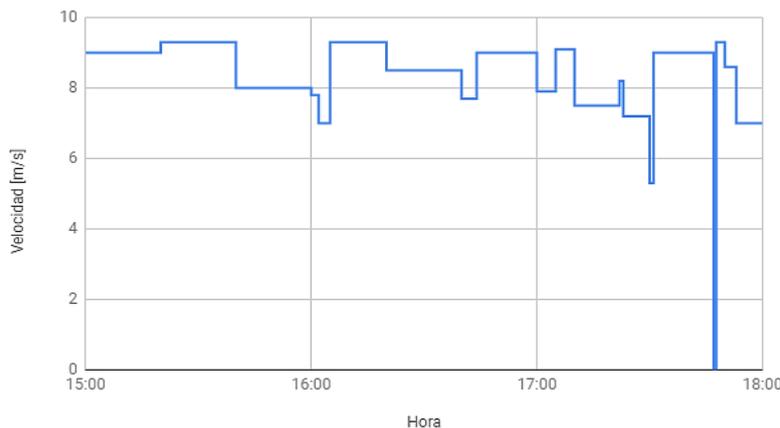
Figura 38: Datos de velocidad durante un día del emplazamiento seleccionado



Fuente: [24]

Para disminuir el tiempo de computo, se tomaron datos entre las 15:00 y 18:00 y se asumieron algunos puntos de intermitencia como se evidencia en la Figura 39 para visualizar así el comportamiento de carga y descarga de los acumuladores frente a variaciones en la velocidad del viento.

Figura 39: Datos de velocidad para realizar el respectivo análisis



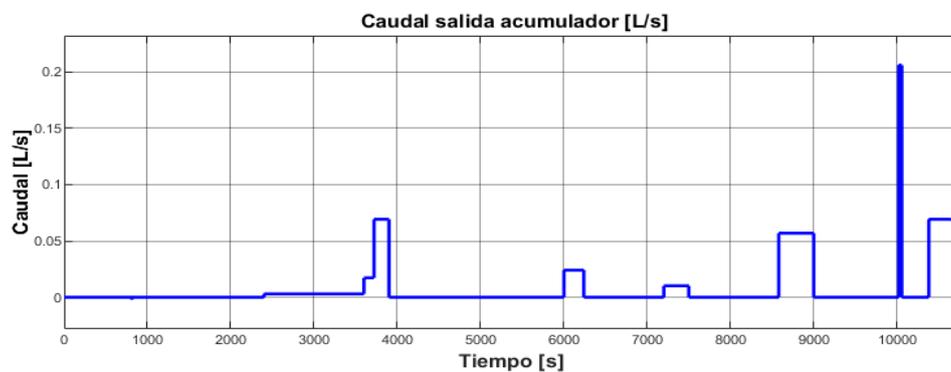
Fuente: Propia

En la Figura 39, se presentan distintos escenarios para la carga y descarga de los acumuladores los cuales son expuestos a continuación:

- ✚ Cuando la velocidad es mayor a 8,1 [m/s] el sistema se encuentra en carga y generando 3 [kW] a 1800 [rpm].
- ✚ En los intervalos en los que la velocidad toma valores inferiores a 8,1 [m/s] y el volumen de los acumuladores es mayor a 10 [L], el sistema de acumulación descarga.
- ✚ Cuando la velocidad se hace 0 [m/s], el sistema sólo compensa por 2,3 [min].
- ✚ El sistema cuenta con una válvula de alivio para cuando la energía obtenida supla los requerimientos y el sistema de acumulación esté totalmente saturado.

Para las condiciones mostradas en la Figura 39, el sistema de acumulación exhibe el siguiente comportamiento:

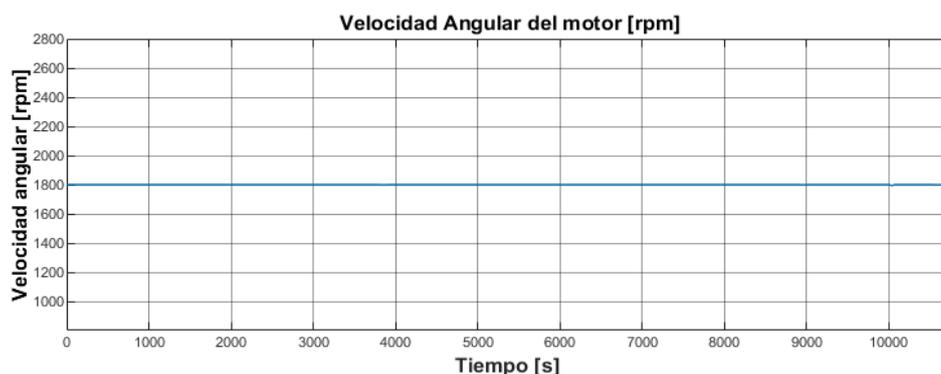
Figura 40: Comportamiento de descarga del sistema de acumulación



Fuente: Propia

Al comparar las Figuras 39 y 40 se concluye que el sistema de acumulación está preparado para suplir las necesidades del aerogenerador, lo que se puede confirmar en la Figura 41, dónde para el perfil de vientos propuesto, el requerimiento de garantizar las 1800 [rpm] es cumplido satisfactoriamente.

Figura 41: Velocidad angular del motor



Fuente: Propia

Para este análisis se hizo uso de 8 acumuladores de 60 [L], cuya carga máxima es de aproximadamente 43,75 [L] garantizando una larga vida útil de la vejiga, y una descarga de hasta 10 [L], estos valores son evidenciados en la Figura 42 (A).

Figura 42: Comportamiento del acumulador

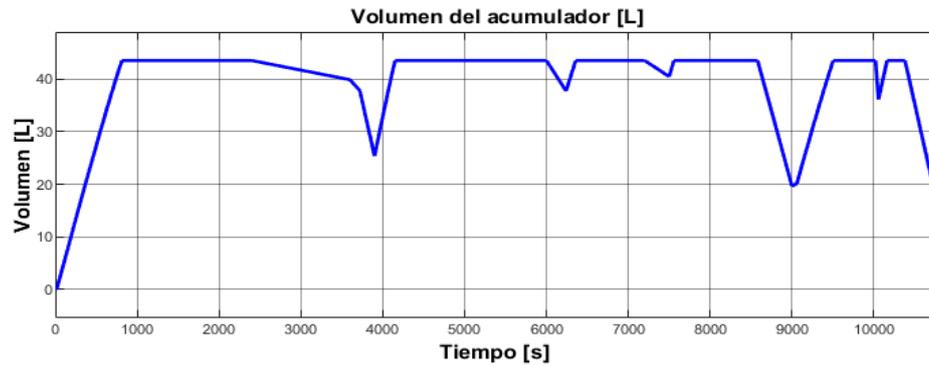


Figura A

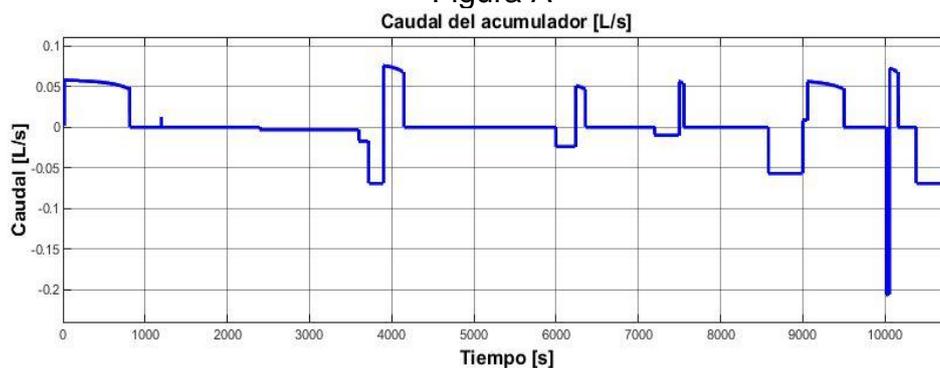


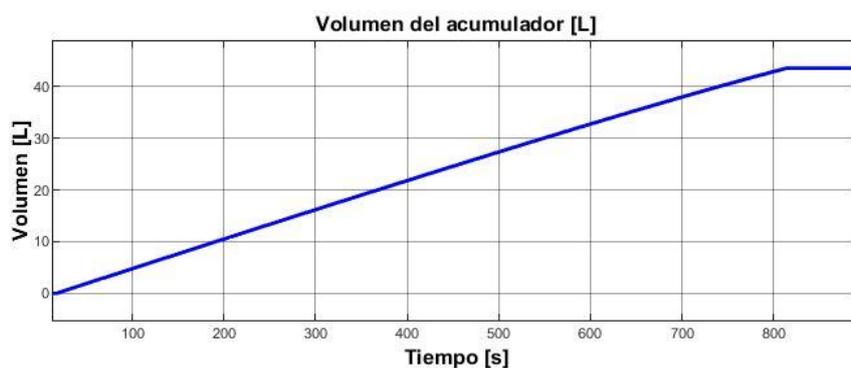
Figura B

Fuente: Propia

La Figura 42 (B) permite observar la carga y descarga del acumulador, esta última se caracteriza por tener un comportamiento constante debido a la presencia de la válvula de compensación de presión lo que garantiza el funcionamiento óptimo del motor.

Estas 8 unidades cargadas con el máximo excedente que se puede obtener en el emplazamiento propuesto el cual es de 1,3 [kW], tardan 817 [s] en alcanzar su máxima capacidad.

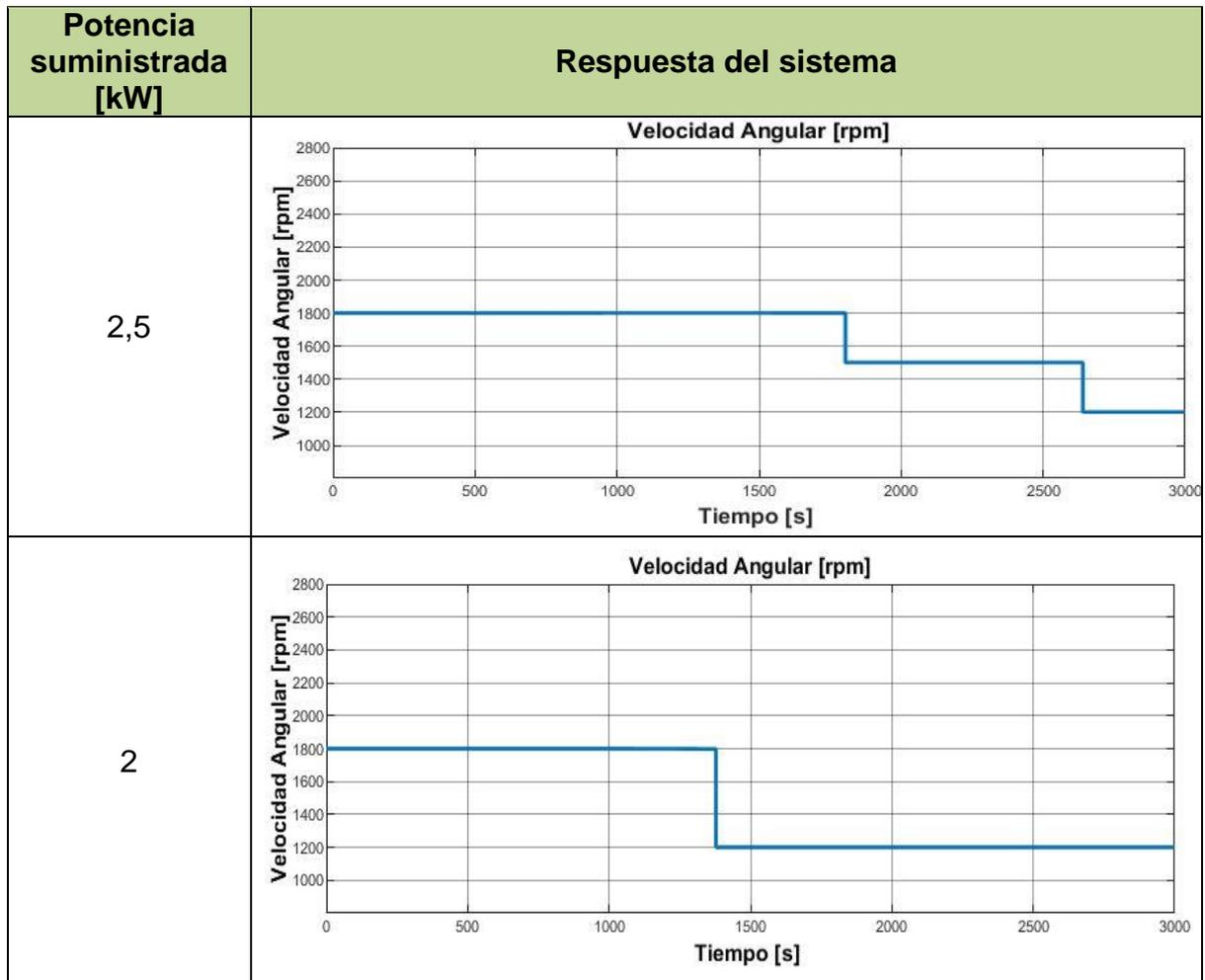
Figura 43: Tiempo de carga del acumulador



Fuente: Propia

A continuación, se presenta la respuesta del sistema para dos entradas de potencia:

Tabla 10: Tiempo compensado por el sistema de acumulación



Fuente: Propia

Como se observa en la Tabla 10 el sistema sólo garantiza las 1800 [rpm] por 853 [s] y 426 [s] para compensar 0,5 [kW] y 1 [kW] respectivamente, por esta razón a continuación se presenta el tiempo en el cual los acumuladores podrán garantizar las condiciones de diseño según la potencia que deban entregar al sistema:

Para 8 acumuladores:

Tabla 11: Potencia compensada por 8 acumuladores

Potencia acumuladores [kW]	Tiempo [s]
3	141,270
2,5	165,066
2	212,703
1,5	284,129
1	426,976
0,5	853,943

Fuente: Propia

Para 11 unidades:

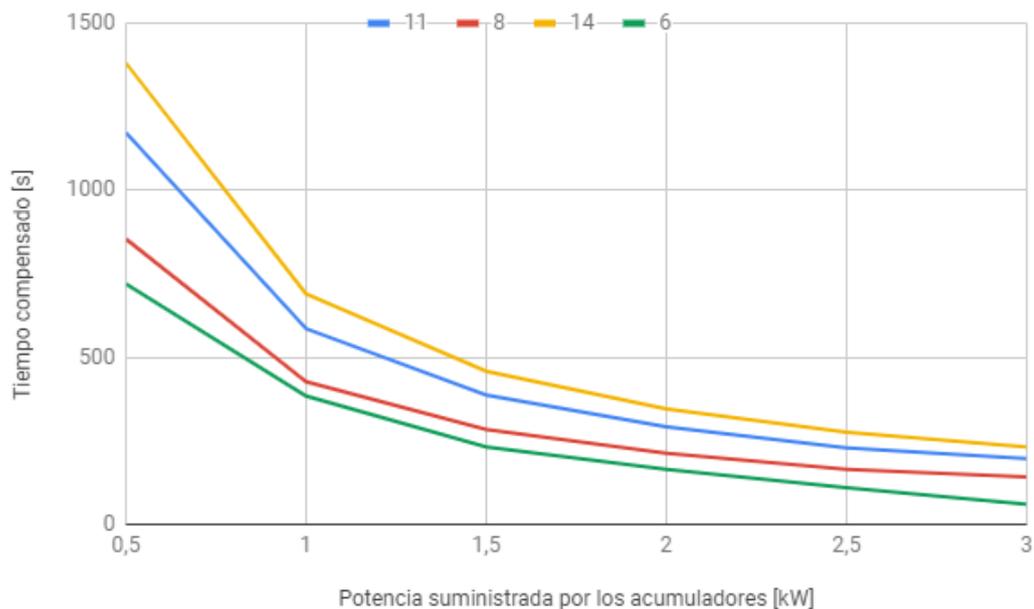
Tabla 12: Potencia compensada por 11 acumuladores

Potencia acumuladores [kW]	Tiempo [s]
3	196,820
2,5	228,563
2	292,057
1,5	387,305
1	585,719
0,5	1173

Fuente: Propia

Como se muestra en las tablas anteriores con 11 acumuladores y ausencia total del recurso viento sólo se podrían compensar 3 minutos debido a la baja densidad energética del tipo de almacenamiento usado. Sin embargo, como el objetivo de este proyecto es mitigar los huecos de tensión los cuales duran como máximo un minuto, el sistema estaría en la capacidad de cumplir con este requerimiento sin presentar fallas. Incluso, como se observa en la siguiente figura, para hacer un sistema más óptimo en cuanto a costos se podrían suplir los huecos de tensión haciendo uso de sólo 6 acumuladores, no obstante, está opción no fue considerada pues se necesita de más tiempo mientras el sistema eólico se recupera de una falla.

Figura 44: Tiempo de compensación de diferentes cantidades de acumuladores



Fuente: Propia

Es importante aclarar que el sistema propuesto no tiene como fin ser un respaldo de energía sino mitigar los huecos de tensión que se presentan en la generación a partir de fuentes intermitentes.

## 6. CONCLUSIONES

En este proyecto se desarrolló la simulación de un aerogenerador acoplado a un sistema de acumulación hidráulica de tipo vejiga en el software Matlab/Simulink. Debido al comportamiento del sistema de acumulación fue necesario la implementación de una válvula de compensación de presión para mitigar los efectos en la descarga de los mismos, realizado esto, se observó que el sistema implementado seguía sin inconvenientes los cambios en la generación eólica.

Los resultados a partir de esta simulación muestran que:

- ✚ Con 11 acumuladores sólo se garantizan 3 [kW] a 1800 [rpm] durante 196,8 [s] en ausencia total del recurso viento o en un corte brusco de la turbina, por lo que para garantizar un mayor tiempo de suministro se hace necesario el uso de una mayor cantidad de acumuladores debido a la baja densidad energética de este tipo de tecnología, por lo que no podría ser usado como unidad de respaldo de generación. Sin embargo, como el objetivo de este proyecto son los huecos de tensión y estos se presentan en intervalos muy pequeños que van desde 1 [ms] hasta 60 [s], el sistema propuesto los compensaría sin ningún inconveniente.
- ✚ En Colombia, según la Resolución CREG-025 de 1995, el rango de operación normal en términos de frecuencia es de  $\pm 500$  [mHz] lo que representa aproximadamente un error de 0,833% en términos de la velocidad angular del generador, por lo que el error máximo obtenido en el sistema propuesto puede ser considerado aceptable en una aplicación de este tipo pues es equivalente a 0,264%.
- ✚ El error que se presenta en la compensación del sistema de acumulación con respecto a las variaciones de potencia a la entrada del sistema, se incrementa cuando disminuye la potencia suministrada por el aerogenerador, por lo que para compensación de potencias entre 0,0001 y 1,5 [kW], el sistema responde de la forma más óptima con un error de aproximadamente 0,05%.
- ✚ Este sistema permite la centralización de la generación de energía en parques eólicos, además de la integración de distintas fuentes de energía y tecnologías de almacenamiento para una mayor continuidad en la generación con fuentes intermitentes.
- ✚ Este tipo de sistemas, como se estudió en la literatura aumentan la producción de energía anual en parques eólicos, sin embargo, como se planteó en este proyecto garantizar 3 [kW] de un aerogenerador que consigue llegar a suministrar 5 [kW], puede ser que si el sistema de acumulación no está bien dimensionado se generen grandes pérdidas de energía, por lo que se propone un estudio económico que permita determinar cuál sería la situación más favorable: si perder esta energía por la válvula de alivio o almacenarla aumentando el número de acumuladores, y por consiguiente la inversión realizada.

## 7. RECOMENDACIONES

El sistema propuesto en este proyecto puede ser usado para la integración de distintas fuentes de energía renovables, por lo que, para trabajos futuros se recomienda tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- ✚ Implementar junto a los acumuladores hidráulicos otro tipo de tecnología de almacenamiento que permita garantizar confiabilidad en el sistema.
- ✚ Incluir otras fuentes de energía que permitan garantizar la continuidad en la generación.
- ✚ Desarrollar sistemas de control para disminuir el error en la respuesta de los acumuladores.
- ✚ Incluir los generadores eléctricos con el objetivo de analizar en detalle la implementación de este sistema a la red.
- ✚ Realizar el análisis económico de la implementación de estos sistemas en parque eólicos ya existentes.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Montero-izquierdo, A. (2014). Influencia de las ráfagas de viento en la calidad de la energía de los parques eólicos.
- [2] Atn, C. (n.d.). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia.
- [3] Pinilla, P. Á. (2008). El poder del viento. *Revista de Ingeniería*, 64-69.
- [4] Carlos Méndez, J. S. (2015). Modelación de un aerogenerador de imán permanente y su controlador. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.
- [5] Cortés, P. A. (2013). Energía eólica: ventajas y desventajas de su utilización en Colombia. Bogotá: Instituto de Posgrados de Ingeniería.
- [6] Ordo, G. (2012). Caracterización, identificación y localización de huecos de tensión: revisión del estado del arte, 191–220.
- [7] Mauricio, C., & Ugu, O. (2017). Control de huecos de tensión mediante la incursión de un sistema de inyección de energía basado en volante de inercia en un sistema de distribución de energía eléctrica.
- [8] Sawin, J. L., Rutovitz, J., & Sverrisson, F. (2018). Renewables 2018 Global Status Report. <https://doi.org/978-3-9818911-3-3>.
- [9] Jim, C. A., Tutor, P., & Bravo, I. L. (2016). Proyecto Fin de Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales.
- [10] Kumar, Y., Ringenberg, J., Depuru, S. S., Devabhaktuni, V. K., Lee, J. W., Nikolaidis, E., ... Afjeh, A. (2016). Wind energy: Trends and enabling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 209–224. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.200>.
- [11] Ayodele, T. R., Jimoh, A., Munda, J. L., & Tehile, A. J. (2012). Challenges of Grid Integration of Wind Power on Power System Grid Integrity: A Review. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 2(4), 618–626. Retrieved from <http://ijrer.com/index.php/ijrer/article/view/317>.
- [12] IRENA (2018). (2018). Power Generation Costs in 2017. International Renewable Energy Agency, (Vol. Abu Dhabi). [https://doi.org/10.1007/SpringerReference\\_7300](https://doi.org/10.1007/SpringerReference_7300).
- [13] Power, P., An, Q., Bhattacharyya, S., & Cobben, S. (2005). Consequences of Poor Power Quality – An Overview.
- [14] Elphick, S., Ciufu, P., Smith, V., & Perera, S. (2015). Summary of the economic impacts of power quality on consumers. 2015 Australasian Universities Power

Engineering Conference: Challenges for Future Grids, AUPEC 2015, 0–5. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2015.7324875>.

[15] Pusha, A., Izadian, A., Hamzehlouia, S., Girrens, N., & Anwar, S. (2011). Modeling of gearless wind power transfer. IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference), 3176–3179. <https://doi.org/10.1109/IECON.2011.6119818>.

[16] Izadian, A., Hamzehlouia, S., Deldar, M., & Anwar, S. (2014). A hydraulic wind power transfer system: Operation and modeling. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 5(2), 457–465. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2013.2291835>.

[17] Pusha, A., Deldar, M., & Izadian, A. (2013). Efficiency analysis of hydraulic wind power transfer system. IEEE International Conference on Electro Information Technology. <https://doi.org/10.1109/EIT.2013.6632717>.

[18] Qin, C., Innes-Wimsatt, E., & Loth, E. (2016). Hydraulic-electric hybrid wind turbines: Tower mass saving and energy storage capacity. Renewable Energy, 99, 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.06.037>.

[19] Dutta, R., Wang, F., Bohlmann, B. F., & Stelson, K. A. (2013). Analysis of Short-Term Energy Storage for Midsize Hydrostatic Wind Turbine 1. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 136(1), 011007. <https://doi.org/10.1115/1.4025249>.

[20] Wei, L., Zhao, Y., Liu, Z., Tao, Y., & Wang, G. (2018). Modeling and Control of a 600 kW Closed Hydraulic Wind Turbine with an Energy Storage System. Applied Sciences, 8(8), 1314. <https://doi.org/10.3390/app8081314>.

[21] Xavier, D., & Toromoreno, D. J. (2008). Ubicación de un parque de energía eólica en la costa ecuatoriana.

[22] IDEAM. (Mayo de 2019). Atlas de Vientos IDEAM. Obtenido de <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>.

[23] José, A., & Otero, E. (2011). energía hidráulica y eólica caso: generación ISAGEN – proyectos eólicos en la guajira.

[24] Energy, A. W. (2016). Catálogo AEOLOS. Aeolos-H 5kW. Londres, Reino Unido.

[25] Diseño de un aerogenerador de baja potencia. (s.f.). Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/2763/408431.pdf?sequence=1>.

[26] Matlab. (2019). MathWorks: Wind turbine. Obtenido de <https://la.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/windturbine.html>.

[27] Rabie, M. G. (2009). Fluid Power Engineering. New York: Mc Graw Hill.

[28] Em, P. D. E. P., & Mecânica, E. (2017). Modelagem matemática da operação integrada do sistema híbrido Solar / Biomassa, utilizando tecnologias Disco / Stirling, CCP-ORC solar e gaseificação / MCI com sistema de acumulação hidráulico tipo bexiga.

[29] Matlab. (2019). MathWorks: Variable displacement pump. Obtenido de <https://la.mathworks.com/help/phymod/hydro/ref/variabledisplacementpumptl.html>

[30] Matlab. (2019). MathWorks: Variable displacement motor. Obtenido de <https://la.mathworks.com/help/phymod/hydro/ref/variabledisplacementmotortl.html>

[31] Rajabi, M. M. (2004). The deep water gas charged accumulator and its possible replacements, (December), 1–101.

[32] Matlab. (2019). MathWorks: Pressure relief valve. Obtenido de <https://la.mathworks.com/help/phymod/hydro/ref/pressurereliefvalvetl.html>.

[33] Matlab. (2019). MathWorks: Pressure compensated valve. Obtenido de <https://la.mathworks.com/help/phymod/hydro/ref/pressurecompensatedflowcontrolvalve.html>.