



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería de Sistemas

Departamento de Control y Automatización

www.bdigital.ula.ve

TESIS DE PREGRADO

DISEÑO DE UN CONTROL SUPERVISORIO PARA
SISTEMAS HÍBRIDOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA
RENOVABLE

María Daniela Baptista Theuerkauf

Octubre 2019

C.C. Reconocimiento

Introducción

El uso de recursos renovables para la generación de energía es un tema que está haciéndose cada vez más importante a nivel mundial. Uno de los principales motivos de esto, es la necesidad de reducir el impacto ambiental que produce la generación de energía basada en combustibles fósiles como el carbón, petróleo y gas natural. Hoy en día existen una amplia gama de recursos naturales que pueden aprovecharse para la producción de energía, permitiendo así contar con formas de generación modernas y no contaminantes.

La principal desventaja del uso de energías renovables para la generación de energía reside en el hecho de que los recursos no están siempre disponibles cuándo y dónde se necesitan, es decir, estos recursos naturales son intermitentes a diferencia de los combustibles fósiles. Por ende es necesaria la combinación de varias energías renovables en un mismo sistema de generación para poder cubrir con la demanda energética de una determinada región, al reunir varias energías primarias en un solo sistema se construye lo que se conoce como sistemas híbridos. Este trabajo se va a centrar en tres energías renovables: energía solar, energía eólica y generación hidráulica.

El control supervisorio, en términos generales, se aplica para dirigir una cantidad de controladores individuales que forman parte de un sistema. En este caso, para el correcto funcionamiento del sistema híbrido se propone un control supervisorio el cual determinará el modo de operación de cada sub-sistema de generación para cumplir con los requerimientos energéticos correspondientes; el controlador se modelará a través de Redes de Petri.

A continuación se presenta un breve resumen de los contenidos de cada capítulo.

Capítulo 1: Planteamiento del Problema

En este primer capítulo se muestran los antecedentes que incluyen una serie de trabajos relacionados con el tema a desarrollar, se describe de forma breve el problema y se plantean las formas en la que se abordará el mismo; se exponen también los objetivos de éste trabajo y se describe la metodología a seguir.

Capítulo 2: Energías Renovables

Se presenta la teoría relacionada con las energías renovables, en este capítulo se hace énfasis en los tipos de energías renovables que conforman el sistema híbrido de generación a controlar en el desarrollo de este trabajo.

Capítulo 3: Control Supervisorio y Redes de Petri

Se describen una serie de conceptos que deben conocerse para un mejor entendimiento del trabajo que se desarrolla, el control supervisorio es parte fundamental de esta investigación, como se mencionó el control supervisorio se modelará con Redes de Petri por lo que toda la teoría referente a las Redes de Petri se muestra en este capítulo

Capítulo 4: Descripción del Sistema y del Control

A lo largo de este capítulo se muestran los detalles referentes a cada sub-sistema de generación en conjunto con los detalles del control supervisorio. Se detallan los parámetros utilizados en la simulación de cada sistema de generación y también aspectos importantes sobre los controladores locales. Por otro lado, se muestran las Redes de Petri que modelan el control supervisorio y se describe como trabaja dicho control.

Capítulo 5: Análisis de los Resultados

Por último se muestra el sistema controlado, de tal forma se corrobora el correcto funcionamiento del control supervisorio sobre el sistema de generación.

www.bdigital.ula.ve

Contenidos

Introducción	IV
Índice de figuras	IX
Índice de cuadros	XI
1. Planteamiento del Problema	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del Problema	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo General	3
1.3.2. Objetivos Específicos	3
1.4. Metodología	3
2. Energías Renovables	5
2.1. Sistemas de Generación de Energía	5
2.1.1. Sistemas Híbridos de Generación	6
2.2. Energías Renovables	6
2.2.1. Tipos de Energías Renovables	6
2.2.2. Energía Solar	7
2.2.2.1. Módulos Fotovoltaicos	8
2.2.2.2. Modelo Matemático	8
2.2.3. Métodos para el Seguimiento del Punto Máximo de Potencia . . .	11
2.2.3.1. Métodos Directos - MPPT	11
2.2.3.2. Métodos Indirectos - MPPT	13
2.2.4. Energía Eólica	15
2.2.4.1. Partes de una Turbina Eólica	16
2.2.4.2. Modelo Matemático	16
2.2.5. Control de Potencia	18
2.2.5.1. Regulación por cambio del ángulo de paso (Pitch Control)	18

2.2.5.2.	Regulación por pérdida aerodinámica (Stall Control) . .	18
2.2.6.	Energía Hidráulica	19
2.2.6.1.	Turbinas Hidráulicas	19
2.2.6.2.	Modelo Matemático	20
3.	Control Supervisorio y Redes de Petri	23
3.1.	Control Supervisorio	23
3.1.1.	Concepto de Supervisión	23
3.1.2.	Diseño de un Control Supervisorio	24
3.1.3.	Sistemas de Supervisión y Sistemas de Generación de Energía . .	25
3.2.	Redes de Petri	26
3.2.1.	Definición de una Red de Petri	26
3.2.2.	Redes de Petri Marcadas	27
3.2.3.	Definición de una Red de Petri Marcada	28
3.2.4.	Definición formal de las transiciones habilitadas	28
3.2.5.	Dinámica de las Redes de Petri	28
3.2.6.	Propiedades de las Redes de Petri	29
3.2.6.1.	Red de Petri Viva	29
3.2.6.2.	Red de Petri Binaria	29
3.2.7.	Árbol de Alcanzabilidad	29
3.2.8.	Matrices de Incidencia en las Redes de Petri	30
4.	Sistema Híbrido de Generación de Energía Renovable y Control Supervisorio	31
4.1.	Sistema Híbrido de Generación de Energía Renovable	31
4.1.1.	Energía Solar Fotovoltaica	31
4.1.2.	Energía Eólica	36
4.1.3.	Energía Hidráulica	40
4.2.	Control Supervisorio	42
4.2.1.	Red de Petri que Modela el Control Supervisorio	45
4.2.1.1.	Descripción de los Lugares	45
4.2.1.2.	Descripción de las Transiciones	46
4.2.1.3.	Matrices de incidencia	47
4.2.2.	Árbol de Cobertura	48
5.	Análisis de los Resultados	51
6.	Apéndice A: Control Supervisorio - Matlab	61
7.	Apéndice B: Interfaz Gráfica de Usuario - Matlab GUIDE	65
7.1.	Interfaz Gráfica de Usuario	65

7.1.1. Pasos para correr la simulación desde la interfaz	66
Conclusión	70
Recomendaciones	71
Bibliografía	73

www.bdigital.ula.ve

Índice de figuras

2.1.	Celda Solar	9
2.2.	Panel Fotovoltaico	10
2.3.	Curva Característica de una Celda Solar	10
2.4.	diagrama de Flujo Algoritmo Perturbar y Observar	12
2.5.	Diagrama de Flujo Algoritmo Conductancia Incremental	13
2.6.	Control de Potencia Limitada	14
2.7.	Diagrama de Flujo - MPPT modificado	14
2.8.	Partes de una Turbina Eólica	15
2.9.	Diagrama de Bloques - Sistema de Generación Eólica	17
3.1.	Unidad de Control Supervisorio	25
3.2.	Árbol de Alcanzabilidad de una Red de Petri	29
4.1.	Sistema de Generación Solar - Simulink	32
4.2.	Curvas Características para $T = 25^{\circ}\text{C}$ (SPR-305E-WHT-D)	33
4.3.	Curva de Máxima Potencia para $T = 25^{\circ}\text{C}$ (SPR-305E-WHT-D)	34
4.4.	Control de Potencia Activa - Referencia igual a 150kW	35
4.5.	Control de Potencia Activa - Referencia igual a 80kW	36
4.6.	Curva Característica Turbina Eólica	37
4.7.	<i>Picth Control</i> - Turbina Eólica	38
4.8.	<i>Picth Control</i> - Turbina Eólica	39
4.9.	Control de Potencia Activa - Referencia igual a 30W	39
4.10.	Turbina Hidráulica	40
4.11.	Control PID - Turbina Hidráulica	41
4.12.	Control de Potencia Activa - Turbina Hidráulica	42
4.13.	Sistema de Generación de Energía y Control Supervisorio - Simulink	44
4.14.	Red de Petri que modela el Control Supervisorio	45
4.15.	Árbol de Cobertura de la Red de Petri	49
5.1.	Demanda Nula	52
5.2.	Demanda 70.000W	53
5.3.	Demanda 120.000W	54
5.4.	Demanda 100.000 W	54



5.5.	Demanda 1.400.000 W	55
5.6.	Demanda 70.000 W	56
5.7.	Demanda 1.570.000 W	57
5.8.	Demanda 1.570.000 W	57
5.9.	Demanda 1.600.420 W	58
5.10.	Demanda 100.420 W	59
7.1.	Interfaz Gráfica de Usuario	65
7.2.	Detalle Interfaz Gráfica de Usuario	66

www.bdigital.ula.ve

Índice de cuadros

4.1.	Especificaciones de un módulo 330 SunPower (SPR-305E-WHT-D)	32
4.2.	Parámetros Control de Potencia (P_{ref})	37
4.3.	Parámetros Control de Frecuencia (ω_{ref})	38
4.4.	Parámetros del Controlador PI	41
4.5.	Casos Posibles	43
4.6.	Matriz de Incidencia de Entrada - Control Supervisorio	47
4.7.	Matriz de Incidencia de Salida - Control Supervisorio	48
4.8.	Matriz de Incidencia - Control Supervisorio	48
5.1.	Máxima Potencia que puede generar cada sub-sistema	51
7.1.	Descripción de la Interfaz Gráfica	66

Índice de Códigos

6.1. Código Control Supervisorio	61
--	----

www.bdigital.ula.ve

Planteamiento del Problema

LA tendencia de expansión de los sistemas eléctricos ha dado impulso al desarrollo de los Sistemas de Generación Híbridos que, según la disponibilidad y demanda energética, administran eficientemente los recursos disponibles. La generación de energía a partir de recursos renovables es ya una realidad en varios países del mundo y con ella se busca contrarrestar el impacto negativo que la generación mediante combustión fósil tiene sobre el ambiente.

1.1. Antecedentes

Achour y colaboradores [1] desarrollan un control supervisorio para un sistema híbrido de generación de energía conformado por una turbina eólica y un arreglo de paneles fotovoltaicos. Por otro lado, para el almacenamiento de la energía se cuenta con un banco de baterías. En este caso, también se cuenta con una turbina Diesel para cubrir la demanda en aquellos momentos donde las energías renovables no se puedan aprovechar. El objetivo del control, este trabajo, se enfocan en maximizar la cantidad de energía eléctrica generada a partir de la turbina eólica y los paneles fotovoltaicos ante cualquier fluctuación que pueda presentarse de los recursos naturales y también el manejo de la energía total generada controlando el banco de baterías. Las simulaciones respectivas del funcionamiento del controlador se realizaron en MATLAB/SIMULINK, en el documento se muestran las gráficas de los resultados obtenidos.

Bhandari y colaborados [2] muestran en su trabajo el modelo matemático de un sistema híbrido de generación de energía que abarca la energía del viento, la energía solar y la energía hidráulica. Con la unión de dos o más recursos renovables en un mismo sistema se plantean como objetivo principal incrementar la fiabilidad del sistema de generación de energía y minimizar los costos de producción, dejando a un lado los combustibles fósiles. En este estudio, de manera similar al trabajo hecho por Achour [1], se consideran baterías para el almacenamiento de la energía producida. Por otro lado, el estudio lo realizan enfocándose en el seguimiento del punto máximo de energía (MPPT, por sus siglas en inglés)

en el caso de la energía eólica y la energía solar. Este MPPT maximiza la eficiencia del sistema híbrido de generación de energía.

Shen y colaboradores [4] en su investigación proponen un sistema híbrido de generación de energía *standalone* distribuido que incluye: energía solar, energía eólica y dispositivos de almacenamiento. En este estudio consideran también el MPPT, mencionado anteriormente, para las energías renovables: solar y eólica. Con el sistema construido en este trabajo se pretende mejorar la estabilidad y fiabilidad en el suministro de energía. Diseñan un control supervisor que permita cumplir la demanda energética requerida y gestionar el estado de las baterías. Las simulaciones correspondientes se realizaron en MATLAB/SIMULINK.

Sirasani y colaboradores [5] muestran en su trabajo los modelos matemáticos correspondientes a los sistemas de energía solar, eólica e hidráulica. Dado que la energía que se aprovecha de sol y del viento es intermitente, estos sistemas híbridos generalmente cuentan con dispositivos de almacenamiento, los más comunes son las baterías; los parámetros asociados con el modelo matemático que logran describir la dinámica de las baterías son expuestos en este trabajo. Por último, exhiben en el documento las simulaciones correspondientes al sistema híbrido conformado por las energías renovables ya mencionadas. Las simulaciones fueron realizadas en MATLAB/SIMULINK.

1.2. Planteamiento del Problema

La demanda de energía eléctrica en una ciudad, estado o país puede variar dependiendo de muchos factores, entre ellos: el número de habitantes, climatologías extremas, cantidad de industrias en la zona, tipos de industrias, tipos de electrodomésticos que usa la población, estación del año y horas del día. Desde hace muchos años, la generación de energía eléctrica se hace a partir de combustibles fósiles; con esta forma de producción de energía, hasta el momento, se ha logrado cubrir con la demanda energética en los diversos países del mundo. Sin embargo, ha traído consigo un impacto negativo en el medio ambiente. Dicho impacto negativo se ve reflejado en problemas ambientales como: el calentamiento global, la lluvia ácida, contaminación del aire y de las aguas.

La generación de energía renovable ha resultado ser una de las soluciones más eficientes y efectivas para los problemas ambientales que se están presentando en la actualidad en nuestro planeta, causados por el uso de combustibles fósiles. Cuando se habla de energía renovable, se hace referencia a aquel tipo de energía que se genera a partir de recursos naturales, es decir, recursos que pueden reponerse. Existen varios tipos de energías renovables, entre ellas: la solar, la eólica, la hidráulica, la marina, entre otras.

Por otro lado, resulta un poco complejo cubrir por completo la demanda energética de una región en base a una sola energía renovable, esto se debe a que existe la posibilidad de

que en algún instante del día no esté disponible el recurso, por ejemplo, al caer la noche ya no se cuenta con la luz solar para la producción de energía. Es por esto que surgen los sistemas híbridos, estos sistemas se conforman por varios tipos de energías renovables y tienen como propósito la optimización de la producción de energía a partir de los recursos renovables.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Diseñar un control supervisorio para un sistema híbrido de generación de energía renovable, dicho sistema engloba granjas eólicas, solares e hidráulicas tipo grid, aplicando Redes de Petri.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Estudiar técnicas de generación de energía renovable
- Estudiar modelos matemáticos que describen la dinámica de turbinas eólicas, módulos fotovoltaicos y turbinas hidráulicas
- Estudiar las técnicas y métodos de control de sistemas híbridos de generación de energía renovable
- Diseñar un control supervisorio que optimice el funcionamiento del sistema híbrido y determine el modo de operación de cada sub-sistema de generación
- Simular la dinámica del sistema controlado en MATLAB/SIMULINK

1.4. Metodología

El paso inicial para el desarrollo de esta investigación consiste en la revisión de otros trabajos relacionados con el tema en cuestión, de esta forma se pretende estudiar las técnicas de generación de energía eléctrica a partir de recursos renovables, haciendo énfasis en los tipos de energías renovables que conforman el sistema híbrido de generación a controlar. Por otro lado, se buscarán y estudiarán los modelos matemáticos que describen la dinámica de los elementos generadores de cada tipo de energía renovable; los modelos a buscar incluyen los módulos fotovoltaicos, las turbinas eólicas y las turbinas hidráulicas. Como paso siguiente, se realizarán las simulaciones correspondientes de cada elemento y se construirá el sistema híbrido de generación. Además, se diseñará un control supervisorio capaz de coordinar y tomar decisiones sobre los modos de operación del sistema de generación con la finalidad de cubrir la demanda energética solicitada. La dinámica del

control supervisorio se modelará mediante Redes de Petri. Para verificar el correcto funcionamiento del control supervisorio se harán las simulaciones respectivas. Finalmente, se añadirá el control supervisorio a sistema híbrido construido, y mediante simulaciones se validará que el control supervisorio está cumpliendo con el objetivo inicialmente planteado. Las simulaciones se realizarán en MATLAB/SIMULINK.

www.bdigital.ula.ve

Capítulo 2

Energías Renovables

La energía tiene un rol vital para el desarrollo de una nación por lo que debe ser producida y suministrada de la mejor y más eficiente forma posible. Las nuevas tecnologías de generación apuntan a la obtención de energía de una manera más amigable con el medio ambiente e incluso más económicas, en comparación con las formas convencionales de generación de energía. Las energías renovables permiten una generación más limpia, y por ser recursos renovables, se deja a un lado la preocupación por su agotamiento. Es importante mencionar que, estos sistemas de generación no siempre estarán disponibles para la generación dada su intermitencia y su dependencia de las condiciones climáticas; es por ello que es necesario la combinación de varias fuentes primarias para poder así cubrir con el requerimiento energético.

2.1. Sistemas de Generación de Energía

Los sistemas de generación de energía garantizan el suministro de energía a una región de forma inmediata y sin incidencias. Comúnmente, la generación de energía eléctrica se basa en la transformación de alguna fuente de energía primaria en energía eléctrica.

En los sistemas de generación de energía se pueden encontrar dos grandes grupos: los sistemas centralizados y los sistemas distribuidos. La generación centralizada es la producción de electricidad desde una estación central. La mayoría de estas centrales de producción utilizan combustibles fósiles para la generación de electricidad, aunque en algunos casos pueden incluir también grandes plantas hidroeléctricas [24]. Por otro lado, la generación distribuida se caracteriza por producir energía eléctrica cerca de los consumidores, aunque no es un concepto nuevo, en las últimas décadas ha despertado un mayor interés a nivel mundial.

2.1.1. Sistemas Híbridos de Generación

Los sistemas híbridos de generación de energía, son aquellos sistemas que utilizan diferentes fuentes de generación de energía como: módulos fotovoltaicos, turbinas eólicas, generadores diesel, entre otros; y tienen como fin suministrar energía eléctrica de manera óptima a una localidad. Este tipo de sistemas buscan el aprovechamiento de los recursos disponibles en determinadas localidades, maximizando así la disponibilidad del flujo eléctrico debido a la complementariedad de los recursos.

Para el desarrollo de este trabajo, se plantea un sistema híbrido de generación de energía, el cual está conformado únicamente por energías renovables. Este sistema combina tres fuentes primarias de energía para su funcionamiento, las cuales son: la energía solar (módulos fotovoltaicos), la energía eólica (turbinas eólicas) y por último, energía hidráulica (turbinas hidráulicas).

2.2. Energías Renovables

Las energías renovables son todas las formas de energía alternativas a los combustibles fósiles, que son a saber, capaz de producir electricidad mediante la explotación de fuentes de energía limpia, sostenible y que se renuevan con el tiempo. Las energías renovables son aquellas producidas a partir de fuentes naturales no sujetas a agotamiento, como el sol, el viento, las olas y las mareas, el poder del agua y el calor de la tierra. Desde aquí toman el nombre de energía solar, energía eólica, energía hidráulica y energía geotérmica [10].

Las tecnologías de producción de energía basadas en energías renovables no necesitan ningún tipo de combustible fósil para su operación. Su funcionamiento está basado en la explotación de recursos naturales, los cuales tienen relativamente bajos costos de operación. La principal desventaja en el caso de las energías renovables, es la fluctuación de la potencia generada debido a la intermitencia de los recursos naturales. Cabe destacar que para contrarrestar las pérdidas que pueden producirse debido a la irregularidad de los recursos surgen los sistemas híbridos de generación. En comparación con las tecnologías convencionales de generación de energía a partir de combustión fósil, las energías renovables tienen menos emisiones de carbono y son más amables con el medio ambiente, es por ello que el uso de energías alternativas contribuye a frenar calentamiento global.

2.2.1. Tipos de Energías Renovables

A continuación se muestran los tipos de energías renovables que existen:

- **Biomasa:** la generación de energía mediante biomasa emplea materia orgánica como fuente primaria. Los compuestos orgánicos utilizados van desde desechos in-

dustriales, agrícolas hasta residuos de madera. Todos estos materiales orgánicos son quemados en calderas para generar energía.

- **Bioetanol:** el bioetanol es un combustible orgánico que se produce a partir de biomasa vegetal, a diferencia del petróleo y otros combustible fósiles la biomasa no tarda tanto tiempo en generarse.
- **Energía Eólica:** la energía eólica es aquella que se obtiene del viento, esta energía aprovecha la velocidad del aire para hacer rotar las palas de los aerogeneradores, generando inicialmente energía mecánica y a partir de ella energía eléctrica.
- **Energía Geotérmica:** consiste en el aprovechamiento de la energía calorífica del interior de la Tierra.
- **Energía Hidráulica:** la energía hidráulica se obtiene de los ríos y corrientes de agua dulce, se aprovecha la fuerza del agua para hacer girar las turbinas produciendo energía mecánica que luego se convierte en energía eléctrica.
- **Energía Solar:** la energía que se obtiene del sol. Las principales tecnologías son la solar fotovoltaica (aprovecha la luz del sol) y la solar térmica (aprovecha el calor del sol).

www.bdigital.ula.ve

2.2.2. Energía Solar

El sol es una poderosa fuente de energía y la luz solar es la fuente de energía más grande recibida en la superficie de la tierra. La energía solar es la producida por la luz (energía fotovoltaica) o el calor del sol (termosolar) para la generación de electricidad o la producción de calor. Inagotable y renovable, pues procede del sol, se obtiene por medio de paneles y espejos. En el caso de la energía fotovoltaica, las células solares fotovoltaicas convierten la luz del sol directamente en electricidad por el llamado efecto fotoeléctrico, por el cual determinados materiales son capaces de absorber fotones (partículas lumínicas) y liberar electrones, generando una corriente eléctrica. Por otro lado, los colectores solares térmicos usan paneles o espejos para absorber y concentrar el calor solar, transferirlo a un fluido y conducirlo por tuberías para su aprovechamiento en edificios e instalaciones o también para la producción de electricidad (solar termoelectrica).

La energía solar goza de numerosos beneficios que la sitúan como una de las más prometedoras. Renovable, no contaminante y disponible en todo el planeta, contribuye al desarrollo sostenible y a la generación de empleo en las zonas en que se implanta. Igualmente, la simplicidad de esta tecnología la convierte en idónea para su uso en puntos aislados de red, zonas rurales o de difícil acceso. La energía solar también es útil para generar electricidad a gran escala e inyectarla en red, en especial en zonas geográficas cuya meteorología proporcione abundantes horas de sol al año [25].

2.2.2.1. Módulos Fotovoltaicos

Los módulos fotovoltaicos son la interface que convierte la luz solar en electricidad [8]. Esta transformación en energía eléctrica se consigue aprovechando las propiedades de los materiales semi-conductores mediante las células fotovoltaicas. El material base para la fabricación de los módulos fotovoltaicos es el silicio. Cuando la luz del Sol (fotones) incide en una de las caras de la célula solar genera una corriente eléctrica. Esta electricidad generada se puede aprovechar como fuente de energía [18].

La fabricación las células fotovoltaicas es un proceso costoso, tanto económicamente como en tiempo. El silicio con el que se fabrican las células fotovoltaicas es un material muy abundante en la Tierra. Sin embargo, el procesamiento del silicio es laborioso y complicado. Mediante unos procesos muy complicados se elaboran lingotes de silicio. Posteriormente, de estos lingotes de silicio se cortarán las obleas (células fotovoltaicas). Otra fuente de obtención de silicio es el reciclado de la industria electrónica [18].

Un panel solar típico convierte entre 30-40% de la incidencia solar en energía eléctrica [50]. En la actualidad existen algunos métodos que permiten sacar más provecho de los módulos fotovoltaicos, estas técnicas se implementan con la finalidad de aumentar la eficacia de los paneles fotovoltaicos.

2.2.2.2. Modelo Matemático

Dada la velocidad con la que ha crecido y se ha expandido la energía solar son necesarias buenas técnicas de modelado y simulación para lograr así que los modelos de los módulos fotovoltaicos sean realistas y precisos. Como ya se mencionó, una célula fotovoltaica es definida como un dispositivo semi-conductor que convierte la luz solar en energía eléctrica, un panel o módulo fotovoltaico hace referencia a un conjunto de células fotovoltaicas interconectadas formando un arreglo.

Una descripción matemática de las características de corriente/voltaje de una célula fotovoltaica ha estado disponible desde hace un tiempo. Generalmente, el circuito eléctrico equivalente de una celda solar, consta de una fuente de corriente foto generada por acción de la radiación solar, un diodo, una resistencia en paralelo y una resistencia en serie (que representa a la resistencia interna del material al flujo de la corriente), tal como se representa en la Figura 2.1.

El modelo matemático de la celda se obtiene a partir de su representación eléctrica, y se encuentra en función principalmente de la radiación solar y de la temperatura de la celda. Tal como se muestra a continuación:

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\left(\frac{q(V+IR_s)}{AkT} \right)} - 1 \right) - \frac{VIR_s}{R_p} \quad (2.1)$$

Donde:

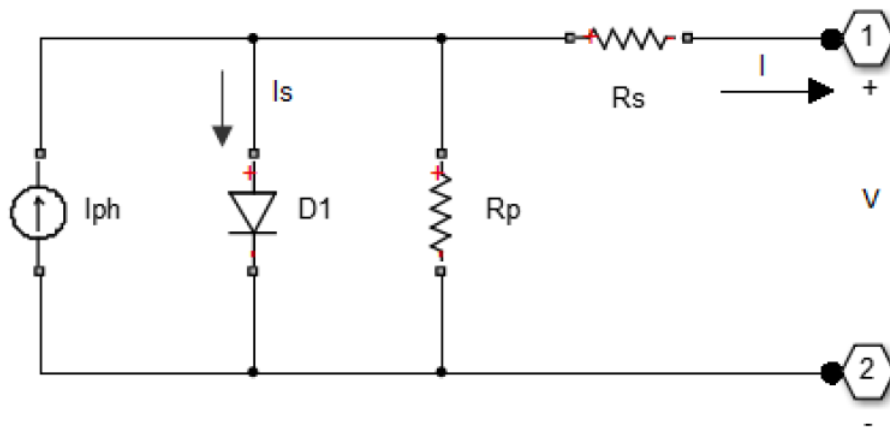


Figura 2.1: Celda Solar

- I_{ph} : corriente fotogenerada $I_{ph} = I_{ph0} \times \frac{I_r}{I_{r0}}$
 - I_r : irradiancia solar W/m^2
 - I_{ph0} : corriente solar medida generada por la irradiancia I_{r0}
- I_s : corriente de saturación del diodo
- q : carga de un electrón ($q = 1,6 \times 10^{-19}C$)
- V : voltaje en los terminales de la celda solar
- I : corriente en los terminales de la celda solar
- R_s : resistencia en serie
- R_p : resistencia en paralelo
- k : constante de Boltzmann ($k = 1,38 \times 10^{-23}J/K$)
- A : factor de calidad del diodo
- T : temperatura ambiental K

Al agrupar un número determinado de celdas solares en serie y/o paralelo se forman los módulos y arreglos fotovoltaicos. En la Figura 2.2 se muestra el circuito que representa un panel fotovoltaico con N_p celdas conectadas en paralelo y N_s celdas conectadas en serie. En este caso, la dinámica del sistema se modela mediante la siguiente expresión matemática:

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_s \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{N_s A k T}} - 1 \right) \quad (2.2)$$

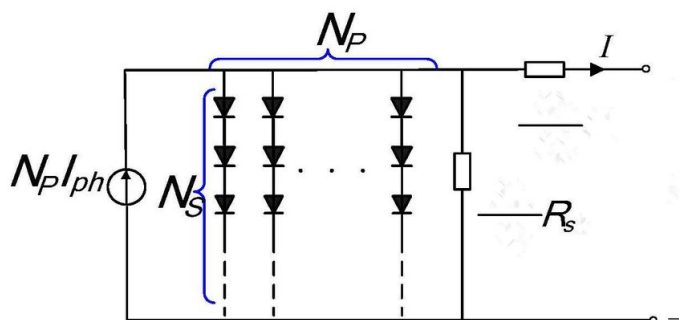


Figura 2.2: Panel Fotovoltaico

Las características típicas de una celda solar suelen representarse por medio de gráficas: voltaje/corriente y voltaje/potencia. En la siguiente figura, se pueden observar los puntos más representativos de las curvas, tales como: la corriente de corto circuito (I_{SC}), el voltaje de circuito abierto (V_{OC}), el punto de máxima potencia (MPP), la corriente en el punto de máxima potencia (I_{MPP}), el voltaje en el punto de máxima potencia (V_{MPP}) y la potencia en el punto de máxima potencia (PMPP) [23].

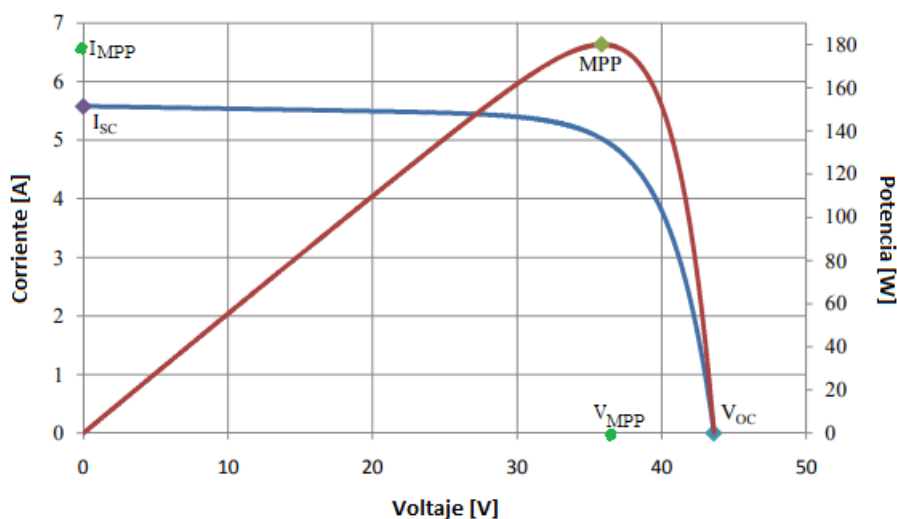


Figura 2.3: Curva Característica de una Celda Solar

2.2.3. Métodos para el Seguimiento del Punto Máximo de Potencia

El seguidor de máxima potencia o «*Maximum Power Point Tracking*» (MPPT) fue introducido por primera vez en 1980, esta técnica se inspiró en la industria solar para encontrar soluciones ante la baja eficacia de los módulos fotovoltaicos [45]. El MPPT es una técnica comúnmente utilizada en el control de potencia de los paneles fotovoltaicos y tiene como objetivo maximizar la extracción de potencia en cualquier escenario climático. Para el seguimiento del punto de máxima potencia existen diversos métodos, los cuales se pueden clasificar en dos grandes grupos: métodos directos y métodos indirectos.

2.2.3.1. Métodos Directos - MPPT

Los métodos directos abarcan aquellos métodos que utilizan las medidas directas de voltaje y/o corriente del panel fotovoltaico. Existen muchos métodos directos para el seguimiento del punto máximo de potencia. Uno de los más conocidos es el algoritmo *Hill Climbing* el cual se basa en introducir una perturbación en el ciclo de trabajo del convertidor DC-DC, este convertidor está conectado a la salida del arreglo fotovoltaico. La finalidad de la perturbación es producir un cambio en la potencia que genera el sistema; luego, mediante su análisis se deduce la dirección de la siguiente perturbación para ir acercándose al punto de máxima potencia. Los algoritmos más conocidos basados en esta técnica son: Perturbar y Observar y Conductancia Incremental.

- **Pertubar y Observar (P&O):** El algoritmo P&O actúa sobre el ciclo de trabajo del convertidor DC-DC el cual está conectado a la salida del arreglo fotovoltaico. Este algoritmo se basa en el siguiente criterio: si el voltaje de operación, V_{pv} , del arreglo fotovoltaico se perturba en cierta dirección y la potencia extraída del mismo se incrementa significa que el punto de operación se ha movido hacia el MPP, por consiguiente el voltaje de operación deberá perturbarse en la misma dirección, de otra forma si la potencia extraída del arreglo fotovoltaico disminuye, el punto de operación se ha movido en dirección opuesta de la ubicación del MPP, por consiguiente el voltaje de operación deberá ser perturbado en dirección contraria a la que se tenía [49] (Figura 2.4).
- **Conductancia Incremental (INC):** El algoritmo INC usa la información medida de voltaje y corriente para encontrar el punto de operación que se desea. El MPP se puede rastrear mediante la comparación de la conductancia instantánea (I/V) a la conductancia incremental ($\Delta I/\Delta V$). De la curva P-V de un panel fotovoltaico (Figura 2.3) se puede apreciar que la pendiente es cero en el punto de máxima potencia, positiva a la izquierda del punto de máxima potencia y negativa a la derecha punto de máxima potencia.

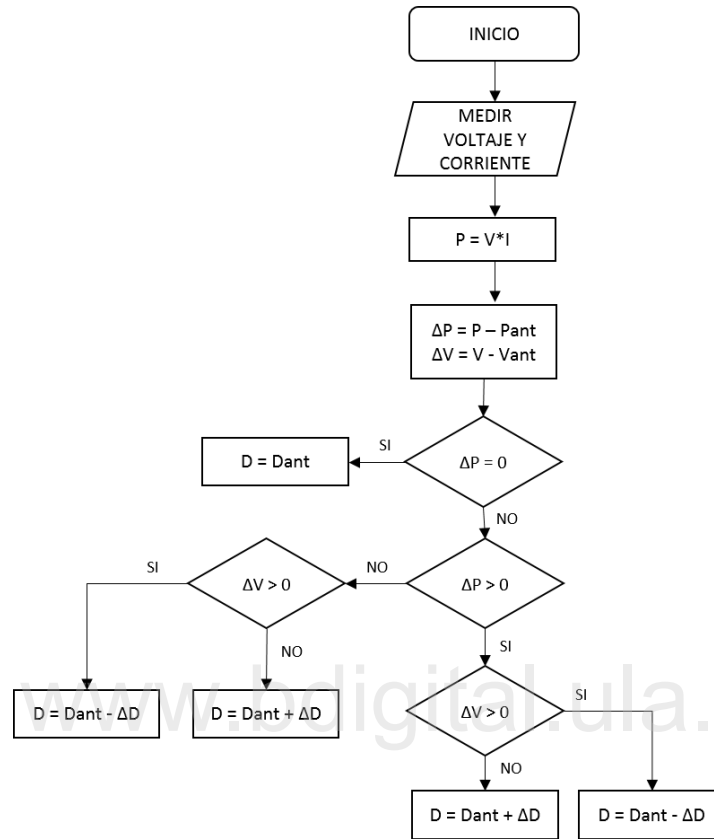


Figura 2.4: diagrama de Flujo Algoritmo Perturbar y Observar

$$INC = \begin{cases} dP/dV = 0 & \text{en el MPP} \\ dP/dV > 0 & \text{a la izquierda del MPP} \\ dP/dV < 0 & \text{a la derecha del MPP} \end{cases} \quad (2.3)$$

Dado que

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \simeq I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (2.4)$$

$$INC = \begin{cases} \Delta I/\Delta V = -I/V & \text{en el MPP} \\ \Delta I/\Delta V > -I/V & \text{a la izquierda del MPP} \\ \Delta I/\Delta V < -I/V & \text{a la derecha del MPP} \end{cases} \quad (2.5)$$

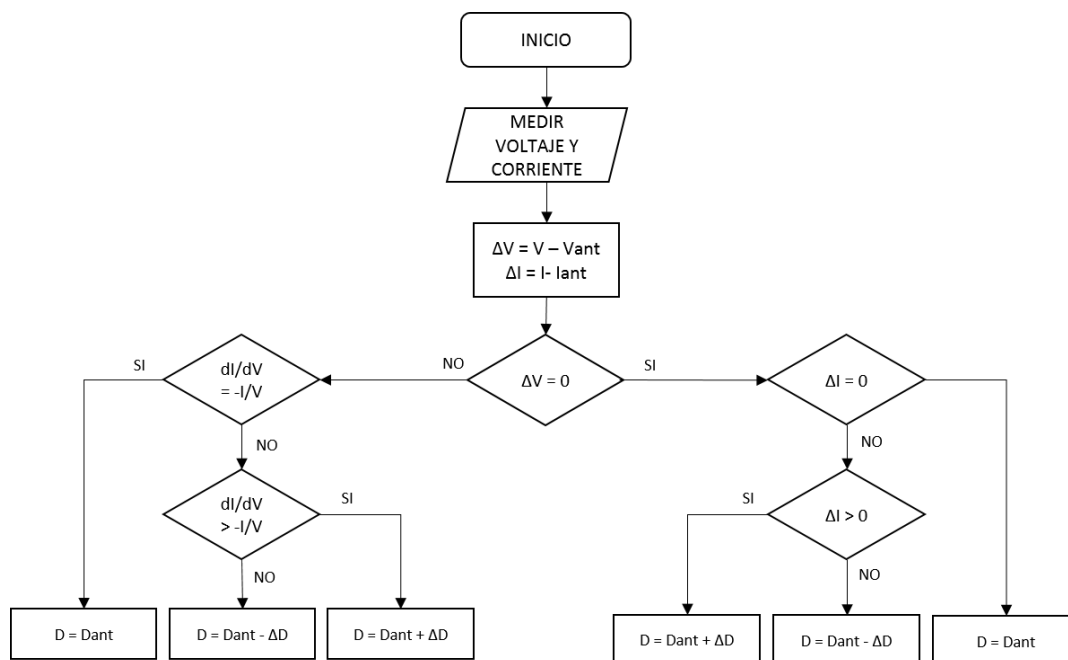


Figura 2.5: Diagrama de Flujo Algoritmo Conductancia Incremental

2.2.3.2. Métodos Indirectos - MPPT

A diferencia de los métodos directos, en los métodos indirectos la información relacionada con las variables de interés de los paneles fotovoltaicos es almacenada en grandes bases de datos y luego es utilizada para tomar decisiones. Algunos de estos métodos son:

- **Método por Ajuste de Curva** este método describe las curvas características de un arreglo fotovoltaico a partir de una aproximación utilizando una función matemática, por ejemplo un polinomio de tercer grado. Sin embargo, es un método que se utiliza poco debido a lo complejo que puede resultar, hallar la expresión matemática correcta y estimar los parámetros respectivos para los diferentes valores de irradiancia y temperatura.
- **Método de Tabla de Consulta** esta técnica utiliza una base de datos donde previamente se ha almacenado información sobre las variables de interés del arreglo fotovoltaico como los valores de corriente y voltaje en los puntos máximos de potencia para varios valores de irradiancia y temperatura. Se requiere una gran cantidad de datos para poder construir la base de datos. Luego mediante la tabla de consulta se puede conocer el voltaje correspondiente al punto máximo de potencia para cualquier condición atmosférica.

Resulta importante resaltar que, a través de los métodos antes descritos se obtiene el **máximo** punto de potencia. Por lo que si se desea un valor menor al máximo se deben hacer ciertas modificaciones al algoritmo que se implemente. Estas estrategias flexibles de control de potencia activa se conocen como Control de Potencia Limitada o Seguimiento del Punto Máximo de Potencia Modificado (MPPT modificado) [60].

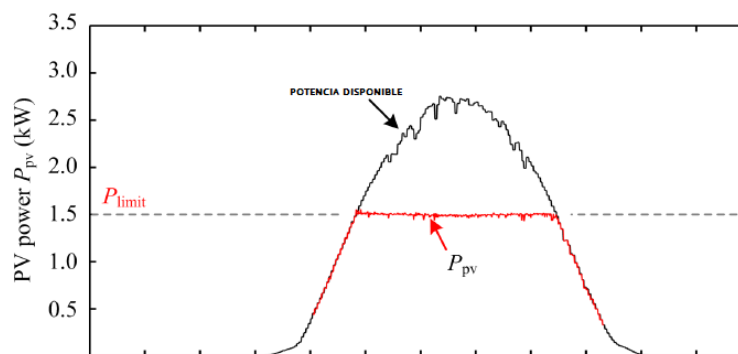


Figura 2.6: Control de Potencia Limitada

A fin de limitar la potencia entregada por el arreglo fotovoltaico a cierto nivel diferente al punto máximo (P_{limit} o P_{ref}), se regula el voltaje del convertidor DC-DC, esto se logra modificando el ciclo de trabajo (*duty*) a cierto valor que permita conseguir el valor deseado. El valor del *duty* a utilizar en el MPPT modificado se puede escoger haciendo pruebas y seleccionando el que permita obtener la salida que se quiere.

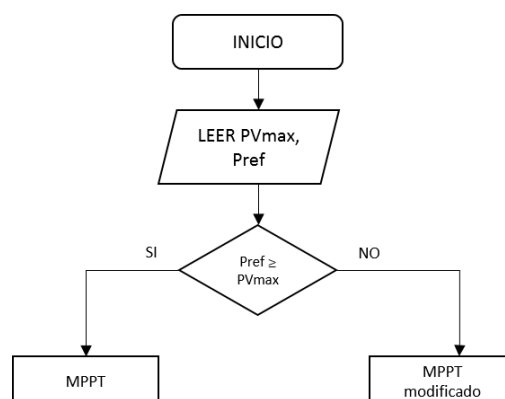


Figura 2.7: Diagrama de Flujo - MPPT modificado

2.2.4. Energía Eólica

La energía eólica fue utilizada en la antigüedad para moler granos y bombear agua mediante molinos de viento. Hoy el equivalente a los molinos de viento son las turbinas de viento que se utilizan para generar electricidad. Así como los molinos de viento, las turbinas de viento son montadas en torres para capturar energía eólica. A treinta metros del suelo o más, las turbinas de viento reciben los vientos más rápidos y menos turbulentos para generar energía eléctrica. Las turbinas captan la energía del viento que hace girar sus dos o tres aspas montadas de tal manera para formar un rotor que activa el generador para producir electricidad [11].

Las turbinas eólicas pueden ser clasificadas según la orientación de su eje de rotación en: turbinas eólicas de eje horizontal y turbinas eólicas de eje vertical, las cuales pueden ser instaladas tanto en tierra como en el océano [12]. Las turbinas de eje horizontal son más comunes, estas constan de una, dos o tres palas. Tienen la ventaja de que las palas están situadas a una altura elevada, con lo cual la velocidad del viento es mayor, y la intensidad de turbulencia es menor, en comparación con la estabilidad del viento a nivel de terreno. A su vez, las turbinas de eje horizontal se pueden clasificar según la disposición del rotor, el cual puede estar ubicado por delante o por detrás de la torre. Por otro lado, existen las turbinas de eje vertical. En este tipo de turbinas, el generador y la caja de engranajes se encuentran a nivel de terreno facilitando la instalación y el mantenimiento de las mismas. Sin embargo la eficiencia en cuanto a la generación de energía es menor en comparación con las de eje horizontal.

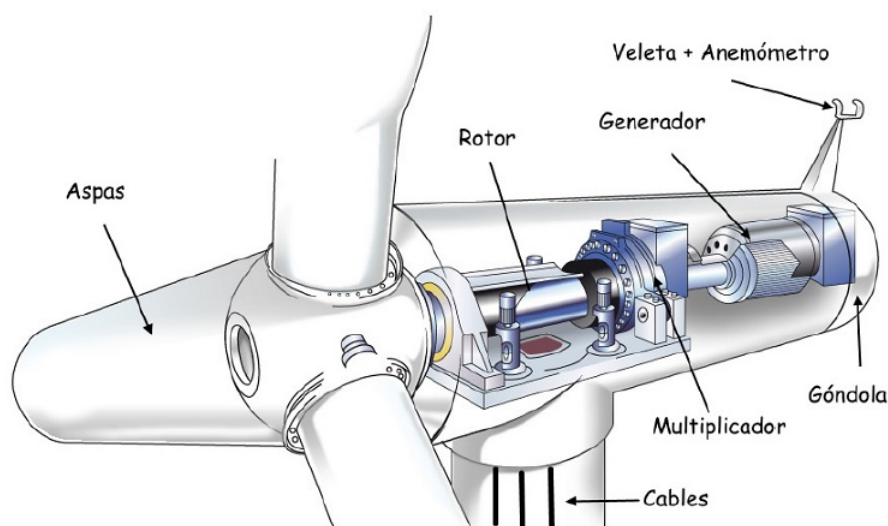


Figura 2.8: Partes de una Turbina Eólica

2.2.4.1. Partes de una Turbina Eólica

Los componentes básicos de una turbina eólica son los siguientes:

- Rotor: es el que transforma la energía cinética del viento en energía mecánica, la energía mecánica producida es la que alimenta el generador eléctrico.
- Sistema de transmisión mecánica: está compuesto por el eje de baja velocidad, la caja de engranajes y el eje de alta velocidad. El eje principal es quien transmite el torque aerodinámico al sistema de generación (generador eléctrico). La caja de engranajes es la que convierte la velocidad del motor que es baja, a una velocidad alta para un generador convencional pueda producir electricidad. Por último, el eje de alta velocidad es el encargado de entregar la potencia mecánica directamente al generador.
- Generador eléctrico: es el encargo de convertir la energía mecánica, proveniente del rotor a causa del viento, en energía eléctrica.
- Góndola: es la cápsula que protege al generador, sistemas de transmisión y el resto de componentes.
- Torre: es el soporte del rotor y la góndola, debe diseñada de tal forma que soporte la dinámica de la turbina eólica.
- Sistema de orientación: está compuesto generalmente por un servomecanismo que gira la góndola en la dirección del viento.
- Paletas o aspas: Son la parte de la turbina que recibe directamente la energía del viento; los diseños avanzados están orientados a aprovechar al máximo esta energía. Las turbinas más modernas constan de tres paletas, que miden de 20 a 50 metros de largo.

En la Figura 2.9 se muestra el diagrama de bloques que representa el sistema de generación eólica. Donde V es la velocidad del viento, β es el ángulo de giro de las paletas, Ω_r es la velocidad de rotación del rotor, Ω_g es la velocidad de rotación del generador de potencia, \mathcal{T}_r es el torque aerodinámico, F_T es la fuerza de reacción de las paletas, \mathcal{T}_g es el torque de entrada del generador, U_s es el voltaje de la red y F_s es la frecuencia de la red [52].

2.2.4.2. Modelo Matemático

El aprovechamiento de la energía del viento ha sido un tema de interés desde hace mucho tiempo para los seres humanos. Las turbinas eólicas han sido utilizadas desde hace

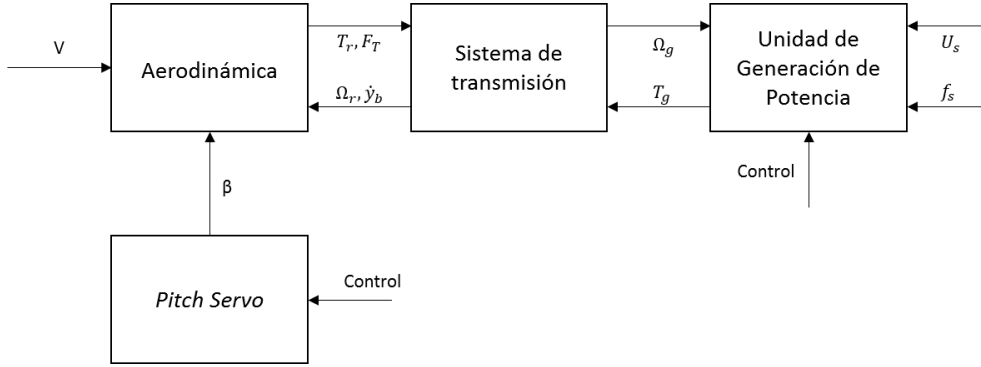


Figura 2.9: Diagrama de Bloques - Sistema de Generación Eólica

varios siglos y millones de éstas han sido instaladas en diferentes partes del mundo. Dada la popularidad que ha adquirido éste tipo de energía, es necesario conocer un modelo matemático que logre describir la dinámica de las turbinas de manera adecuada. A continuación, se describe el modelo matemático basado en la aerodinámica [17]. Básicamente las paletas del rotor se encargan de extraer la energía cinética del viento y convertirla en energía mecánica. La energía cinética en una parcela de masa de aire, m , fluyendo a una velocidad, v_w en una dirección horizontal x es:

$$E = \frac{1}{2}mv_w^2 = \frac{1}{2}\rho A x v_w^2 \quad (2.6)$$

Donde ρ es la densidad del aire en kg/m^3 , A es el área de la sección transversal en m^2 y x es el grosor de la parcela de viento en m . Ahora, la potencia disponible en la parcela de viento es la derivada de la energía cinética:

$$P_w = \frac{1}{2}\rho A v_w^2 \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2}\rho A v_w^3 \quad (2.7)$$

Cabe destacar que la turbina eólica va a extraer solo una parte de la potencia total disponible en el viento. La fracción de potencia extraída de la potencia del viento es usualmente dada por un coeficiente C_p conocido como el coeficiente de potencia. Por lo tanto, la potencia mecánica de salida puede escribirse como:

$$P_m = C_p \left(\frac{1}{2}\rho A v_w^3 \right) = \frac{1}{2}\rho \pi R^2 v_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2.8)$$

Donde R es el radio de las paletas de la turbina, v_w es la velocidad del viento, y ρ es la densidad del viento. El coeficiente de potencia no es constante, éste varía en función de la velocidad del viento, la velocidad del rotor de la turbina y de los parámetros de las

paletas. Generalmente se dice que el coeficiente de potencia, C_p , es una función del *tip speed ratio*, λ , y del *pitch angle* de las paletas, β . El *tip speed ratio* es definido como:

$$\lambda = \frac{\omega_R R}{v_w} \quad (2.9)$$

Donde ω_R es la velocidad mecánica angular del rotor y v_w es la velocidad del viento.

2.2.5. Control de Potencia

Debido a las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre las paletas del rotor, una turbina eólica convierte la energía cinética del flujo del viento en energía mecánica rotatoria. Estas paletas necesitan perfiles especialmente formados que son bastante similares a aquellos usados para las alas de los aviones. Con el aumento en la velocidad del flujo de aire, las paletas del rotor comienzan a girar cada vez con más velocidad por lo que se requiere de acciones de control rápidas y altamente eficaces para evitar la sobrecarga de las turbinas que pudieran conllevar a accidentes.

En la actualidad se usan esencialmente dos principios de control aerodinámicos diferentes para limitar la potencia extraída a la potencia nominal del generador. Estos principios de control son: *pitch control* y *stall control*.

2.2.5.1. Regulación por cambio del ángulo de paso (Pitch Control)

La regulación por cambio del ángulo de paso, comúnmente conocida como *pitch control* cuenta con un sistema de monitoreo que comprueba varias veces por segundo la potencia que está siendo generada, cuando ésta potencia alcanza un valor demasiado alto el controlador envía una orden al mecanismo de cambio de ángulo de paso, con la finalidad de hacer girar las paletas del rotor ligeramente. Así pues, las paletas del rotor deben ser capaces de girar alrededor de su eje longitudinal.

El diseño de este tipo de controladores requiere de una ingeniería muy desarrollada, para asegurar que las palas giren el ángulo deseado. En este tipo de turbinas eólicas, las paletas girarán unos pocos grados cada vez que el viento cambie, para mantener en lo posible un ángulo óptimo que proporcione el máximo rendimiento de la turbina en todas las velocidades del viento.

2.2.5.2. Regulación por pérdida aerodinámica (Stall Control)

En este tipo de regulación las paletas permanecen fijas al rotor, sin la posibilidad de modificar el ángulo de paso. Sin embargo, el perfil de la paleta ha sido aerodinámicamente diseñado para asegurar que, en el momento en que la velocidad del viento sea demasiado alta, se cree una cierta turbulencia en la parte de la pala que no da al viento. La principal

ventaja de la regulación por pérdida aerodinámica es que se evitan las partes móviles del rotor y un complejo sistema de control. Por otro lado, la regulación por pérdida aerodinámica representa un problema de diseño aerodinámico muy complejo, y comporta retos en el diseño de la dinámica estructural de toda la turbina.

2.2.6. Energía Hidráulica

El flujo de agua que genera energía, puede ser capturado y transformado en electricidad. Esto es la hidroeléctrica o hidroenergía. En el sistema hidroeléctrico común, se usan diques en ríos para almacenar su agua en presas. El agua de la presa fluye a través de turbinas y las hace girar. Al girar las turbinas, se activan los generadores para producir electricidad. No siempre se requieren diques para obtener energía hidroeléctrica. Algunas plantas hidroeléctricas usan únicamente un canal angosto para encausar toda el agua de un río a través de la turbina. Una microplanta hidroeléctrica puede producir suficiente electricidad para un rancho, granja o casa [11].

La energía hidráulica a gran escala es el tipo de energía renovable más utilizada a nivel mundial, proporcionando energía a un gran número de personas. Por otro lado, existe también la microgeneración hidráulica (<1 MW) ha venido tomando fuerzas desde hace un tiempo, ésta es una gran alternativa para generar energía limpia a baja escala. Con este tipo de generación se puede producir suficiente electricidad para una casa o edificio pequeño.

2.2.6.1. Turbinas Hidráulicas

La turbina hidráulica es un elemento indispensable en las centrales hidroeléctricas. A partir de la energía cinética y potencial que posee el agua, se produce energía mecánica que se transfiere a un eje conectado a un generador que produce energía eléctrica.

Las turbinas hidráulicas se pueden clasificar en dos grupos: turbinas de acción y turbinas de reacción.

Las **turbinas de acción** son aquellas que aprovechan únicamente la velocidad del flujo de agua para girar. El tipo más utilizado es la denominada turbina Pelton; mientras que **turbinas de reacción** se accionan a través de la presión que el líquido ejerce sobre los álabes. Las turbinas de reacción que se suelen instalar son las Francis y las Kaplan.

Por otro lado, de acuerdo a la dirección del flujo del fluido, las turbinas hidráulicas se clasifican en: radiales, axiales y tangenciales. En las **turbinas radiales** el fluido circula alrededor del eje como si se tratase de un molino hidráulico, un ejemplo de este tipo de turbina es la Turbina Francis; por otro lado, en las **turbinas axiales** el fluido fluye paralelo al eje de rotación, por ejemplo la Turbina Kaplan y en las **turbinas tangenciales** el líquido fluye tangencialmente al rotor de la turbina, por ejemplo la Turbina Pelton.

2.2.6.2. Modelo Matemático

Para el modelado de la turbina hidráulica se asume el flujo como incompresible y un conducto rígido de largo L y sección transversal A . De la ley de cantidad de movimiento, la tasa de cambio del flujo para una turbina con un solo conducto es [41].

$$\frac{dq}{dt} = (h_s - h - h_l)g \frac{A}{L} \quad (2.10)$$

Donde:

- q : flujo de la turbina [m^3/seg]
- h_s : metros estáticos de la columna de agua [m]
- A : área de la sección transversal del conducto [m^2]
- L : longitud del conducto [m]
- g : aceleración de gravedad [m/seg^2]
- h : metros de admisión de la turbina [m]
- h_l : pérdidas debido a la fricción en el conducto [m]

La ecuación 2.11 puede expresarse en una ecuación por unidad dividiendo por su cantidad base, q_{base} , h_{base} .

$$\frac{d\bar{q}}{dt} = \frac{(h_s - h - h_l)}{h_{base}} \frac{Agh_{base}}{Lq_{base}} \quad (2.11)$$

Igualando $\frac{Lq_{base}}{Agh_{base}} = T_w$, se obtiene:

$$\frac{d\bar{q}}{dt} = \frac{(\bar{h}_s - \bar{h} - \bar{h}_l)}{T_w} \quad (2.12)$$

Donde:

- \bar{q} : flujo de turbina [pu]
- \bar{h}_s : metros estáticos de columna de agua [pu]
- T_w : constante de tiempo del agua [pu]
- \bar{h} : metros de admisión de la turbina [pu]
- \bar{h}_l : pérdidas debido a la fricción en el conducto [pu]

$$\bar{q} = \bar{G}\sqrt{\bar{h}} \quad (2.13)$$

Donde:

- \bar{q} : flujo de turbina [pu]
- \bar{G} : posición de la compuerta [pu]
- \bar{h} : metros de admisión de la turbina [pu]

La potencia mecánica producida por la turbina, se puede expresar en función del flujo tal como se muestra a continuación:

$$P_m = A_t h (q - q_{nl}) \quad (2.14)$$

Donde:

- P_m : potencia mecánica [pu]
- q : flujo de agua [pu]
- A_t : ganancia de la turbina
- q_{nl} : flujo sin carga [pu]

$$A_t = \frac{1}{\bar{G}_{max} - \bar{G}_{min}} \quad (2.15)$$

Donde:

- \bar{G}_{max} : máxima carga [pu] de apertura de compuerta
- \bar{G}_{min} : mínima carga [pu] de apertura de compuerta

La ecuación anterior es real para una turbina ideal, pero en la práctica las turbinas no son 100% eficientes. Éstas tienen una pequeña desviación de velocidad debido a un efecto de amortiguamiento del flujo de agua con la turbina. Puede entonces escribirse la potencia mecánica como se muestra a continuación [31]:

$$P_m = A_t h (q - q_{nl}) - \beta G \Delta w \quad (2.16)$$

Donde:

- Δw : la desviación de velocidad
- β : constante de proporcionalidad
- G : posición de la compuerta [pu]

Δw expresa la desviación de la velocidad actual de turbina-generador respecto a la velocidad normal. El término $\beta G \Delta w$ representa la desviación de velocidad por amortiguamiento de la apertura de la compuerta [31].

www.bdigital.ula.ve

Capítulo 3

Control Supervisorio y Redes de Petri

LOS sistemas, todo aquello que nos rodea, han sido clasificados en dos grandes conjuntos: los sistemas a eventos continuos y los sistemas a eventos discretos. Un sistema a eventos continuos es aquel que va cambiando de forma constante conforme el tiempo transcurre, mientras que un sistema a eventos discretos es aquel que cambia su estado en intervalos de tiempos variados. Algunos ejemplos de los sistemas a eventos continuos son el cambio de la temperatura, la cantidad de agua en un tanque que está siendo llenado por una tubería; por otro lado, la cantidad de personas en una fila en un banco, cataloga como un sistema a eventos discretos. Sabiendo esto, una de las herramientas utilizadas para modelar sistemas a eventos discretos son las Redes de Petri (RdP).

3.1. Control Supervisorio

Con la inclusión de la automatización en los ambientes de trabajo se pretende optimizar los procesos, ayudar a mantener la eficiencia y procesar datos de forma más inteligente. El control supervisorio es crucial para la organización de las industrias, este tipo de control permite a los operadores procesar, distribuir, mostrar y analizar datos de los procesos además tomar decisiones importantes de manera más rápida y efectiva. Las redes de control supervisorio son utilizadas en muchos campos, incluyendo sistemas de generación y transmisión de potencia, industrias químicas y petroquímicas, industria de automotriz, entre otras.

3.1.1. Concepto de Supervisión

La supervisión se comprende como el conjunto de acciones desempeñadas que permite el acceso a los datos del proceso y cierta interacción entre el operario y el proceso con el propósito de asegurar el correcto funcionamiento del mismo, incluso en situaciones anómalas [58].

El rol de un sistema de supervisión es coleccionar datos desde los procesos y tomar decisiones sobre nuevas direcciones que puedan tener dichos procesos, lo cual está soportado por funciones de monitoreo del proceso, ajustes menores en línea, planificación y coordinación. Un **Sistema de Supervisión** es un sistema que evalúa si un comportamiento satisface un conjunto de especificaciones de desempeño, planifica acciones y ejecuta las acciones planificadas [48].

En el área de Control y automatización, se han desarrollado aplicaciones de supervisión orientadas a diferentes objetivos y estructura del sistema. Se tiene por un lado, la supervisión orientada a tareas de control donde, en términos generales, los sistemas de supervisión son concebidos como generadores de consignas para los controladores locales y, por otro lado, la supervisión orientada al diagnóstico de fallas. Independientemente de la orientación los objetivos se reducen a permitir el manejo del proceso, identificar en tiempo real la tendencia del proceso y gestionar datos para realizar análisis, que permitirán mejorar la eficiencia del proceso, mejorar la confiabilidad, optimizar los recursos y prevenir la degradación del proceso [48].

3.1.2. Diseño de un Control Supervisorio

La teoría que abarca todo lo relacionado con el control supervisorio se enfoca al análisis y estudio de sistemas de eventos discretos de una manera formal. La implementación de un control supervisorio consta de dos partes principales: (1) diseño del modelo del proceso a controlar (planta) y (2) diseño de la lógica de la unidad de control.

En esta área, los procesos a controlar se modelan como una estructura de estados y transiciones, donde las transiciones son denominadas: controlables (aquellas que pueden ser deshabilitadas por una intervención externa) y no controlables (aquellas que no se puede prevenir que ocurran). El diseño de la planta, es un paso que requiere mucha atención, el modelo del proceso a controlar debe describir de una forma bastante precisa la dinámica del sistema. Se recomienda separar el proceso en sub-sistemas para minimizar errores en el modelado y a su vez, entender a fondo cada parte que conforma el sistema en general.

Por otro lado, se debe diseñar la unidad de control cuyo propósito será manejar el comportamiento del sistema para satisfacer ciertas condiciones y alcanzar los objetivos que definidos, dicho de otra forma, el control supervisorio juega con las transiciones controlables del sistema para guiar y restringir el comportamiento del proceso según objetivos predefinidos.

La interacción entre la planta y la unidad de control representa un punto clave en el sistema global. El control recibe toda la información necesaria de la planta a través de sensores que le permiten monitorizar las variables de interés, con toda esta información el control supervisorio toma las decisiones correspondientes según su configuración. Fi-

nalmene, la comunicación entre la unidad de control y la planta se da a través de señales que se envían a los actuadores (Ver Figura 3.1). Resulta de gran importancia identificar las entradas y salidas de la unidad de control para entender y definir de manera correcta la comunicación entre el control y la planta.

Una vez determinado el modelo de la planta, la lógica del control supervisorio y definidas las entradas y salidas que permiten la comunicación en el sistema, se deben hacer las pruebas necesarias para verificar que la integración planta-control se hizo de forma adecuada y de igual forma verificar el correcto funcionamiento del controlador.

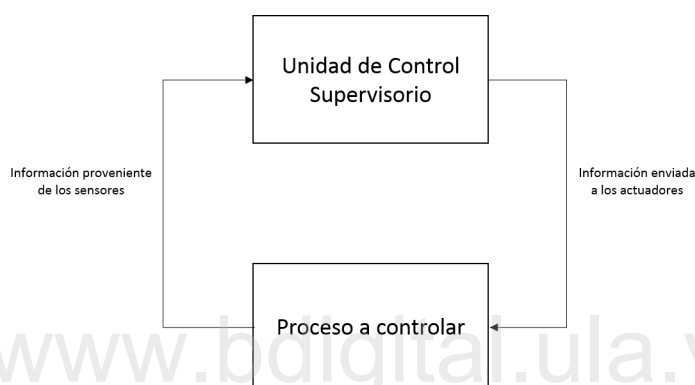


Figura 3.1: Unidad de Control Supervisorio

3.1.3. Sistemas de Supervisión y Sistemas de Generación de Energía

Incluir control supervisorio en sistemas híbridos de generación de energía es de gran utilidad, su principal objetivo será el de coordinar y supervisar la correcta operación del sistema en general, mientras monitorea sub-controladores locales. El término supervisorio engloba una visión general de operación, planeación, programación, coordinación y ejecución de acciones que mejoren la confiabilidad del sistema. Cabe destacar que el control de la dinámica del sistema, es decir, la regulación de las variables de los sistemas no es una tarea del control supervisorio.

El control supervisorio es el responsable de seleccionar el mejor modo de operación para el sistema tomando en cuenta las metas específicas de operación y la configuración y restricciones del sistema. El control supervisorio puede entonces determinar los *setpoints* para los diferentes componentes del sistema en diferentes modos de operación y enviar estas decisiones a los respectivos controladores locales [21].

Cabe destacar que para la correcta integración de los recursos renovables en un solo sistema se deben plantear estrategias de operación que permitan decidir cuáles y cuántos generadores deben estar operativos para cubrir con la demanda respectiva.

El objetivo principal del control supervisorio es optimizar el suministro de energía a una localidad. Para ello, dos tareas son primordiales: mantener los parámetros operacionales dentro de los límites para cada tipo de energía y mejorar el rendimiento del sistema. Las acciones de control utilizadas para cumplir con estas tareas son: prender y apagar componentes, lo que permite cambiar los modos de operación y por otro lado, cambiar los setpoints según las necesidades [21].

3.2. Redes de Petri

Las Redes de Petri fueron introducidas por Carl Adam Petri en 1962, en su trabajo de tesis doctoral «Kommunikation mit Automaten», sometido en la Facultad de Matemáticas de la Universidad de Bonn, en Alemania [14]. Las RdP son una herramienta de modelación gráfica y matemática que puede aplicarse en el estudio de muchos sistemas. Con RdP se puede modelar y estudiar sistemas concurrentes, asíncronos, distribuidos, paralelos, no deterministas y/o estocásticos. Como una herramienta gráfica, las RdP pueden utilizarse como un apoyo de comunicación visual similar a diagramas de flujo, diagramas de bloques y redes [15]. Además, los tokens son utilizados en estas redes para simular el comportamiento dinámico y concurrente de los sistemas.

Una Red de Petri es un grafo dirigido con peso que cuenta con dos tipos de nodos: lugares y transiciones. Gráficamente los lugares son representados por círculos y las transiciones por rectángulos. Los nodos del grafo están unidos por arcos, los cuales solo pueden unir elementos de tipo distinto.

Por otro lado, un marcado (estado) asigna a cada lugar un entero no negativo. Este entero no negativo indica el número de *tokens* que contendrá cada lugar para indicar el estado en que se encuentra el sistema modelado con la Red de Petri. Gráficamente se colocan n puntos negros (*tokens*) en el lugar.

3.2.1. Definición de una Red de Petri

Una red de petri, según Cassandras [16], se puede definir como una cuádrupla:

$$RdP = (P, T, A, \omega) \quad (3.1)$$

Donde:

- P : es el conjunto finito de lugares que conforman la RdP
- T : es el conjunto finito de transiciones que conforman la RdP
- $A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ es el conjunto de arcos que van desde lugares a transiciones y desde transiciones a lugares que conforman la RdP

- ω : es la función de peso de los arcos de la RdP

Normalmente se representa el conjunto de los lugares como $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$ y el conjunto de transiciones como $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_m\}$, por lo tanto, $|P| = n$ y $|T| = m$ serían el número de lugares y el número de arcos respectivamente que conforman la RdP. Una representación típica de un arco es (p_i, t_j) o (p_j, t_i) el peso relacionado con el arco es un número entero positivo [16].

Al momento de describir la Red de Petri es conveniente usar $I(t_j)$ representar el conjunto de lugares que entran a la transición t_j . De forma similar, $O(t_j)$ representa el conjunto de lugares que salen de la transición t_j . Una notación semejante se puede utilizar para describir las transiciones que salen y entran de un lugar: $I(p_i)$ y $O(p_i)$.

Por otro lado, si $\omega(p_i, t_j) = k$ entonces existe un arco desde p_i hasta t_j con un peso igual a k , cabe mencionar que si $k = 0$ indica que no existe tal arco dentro de la RdP.

Otra forma de definir una Red de Petri es [26]:

$$RdP = (P, T, Pre, Post, M) \quad (3.2)$$

Donde:

- P : es el conjunto finito de lugares
- T : es el conjunto finito de transiciones
- $Pre: P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ define el lugar precedente de una transición. $Pre(P, t) = n$, indica el arco que liga P con t con un peso n
- $Post: P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ define el lugar siguiente a una transición. $Post(P, t) = n$, indica el arco que liga t con P con un peso n
- Marcado de la Red de Petri. $M : P \rightarrow \mathbb{N}$, número de fichas en P .

3.2.2. Redes de Petri Marcadas

Es importante mencionar que las transiciones en una Red de Petri representan los eventos que dirigen el sistema y que los lugares describen las condiciones bajo las cuales estos eventos deben ocurrir. Por lo tanto se necesita de un mecanismo que indique si estas condiciones son cumplidas o no. Para ello se asignan los *tokens* en los lugares, un *token* es algo que "se coloca en un lugar". Esencialmente para indicar que la condición que representa dicho lugar es satisfecha. La forma en la que se asignan los *tokens* en una RdP definen el marcado de la red. Formalmente una marca x de una RdP (P, T, A, ω) es una función $x : P \rightarrow \mathbb{N} = \{0, 1, 2, \dots\}$ entonces las marcas de una RdP se pueden definir como

un vector fila $x = [x(p_1), x(p_2), \dots, x(p_n)]$ donde n es el número de lugares que tiene la RdP [16]. En las RdP un *token* es indicado por un punto negro posicionado dentro de un lugar.

3.2.3. Definición de una Red de Petri Marcada

Una RdP marcada se define como un quintupla (P, T, A, ω, x) donde (P, T, A, ω) es una RdP y x es el vector que indica el marcado de la red $x = [x(p_1), x(p_2), \dots, x(p_n)]$ [16]. Las marcas en un instante dado indican el estado de la RdP.

Una vez definido lo que representan las marcas dentro de una RdP, es importante mencionar que los términos anteriormente definidos no establecen la transición de los estados del modelo, cosa que claramente es crucial debido a que por medio de la RdP se pretende estudiar la dinámica de un sistema a eventos discretos. Básicamente la dinámica del sistema depende de la estructura de la RdP y para entender el mecanismo de transición de los estados es necesario hablar sobre las transiciones activas. Para que una transición este habilitada se requiere la presencia de un *token* en cada lugar de entrada de dicha transición.

www.bdigital.ula.ve

3.2.4. Definición formal de las transiciones habilitadas

Una transición $t_j \in T$ se dice que está habilitada si:

$$x(p_i) \geq \omega(p_i, t_j) \quad (3.3)$$

para todo $p_i \in I(t_j)$ [16].

En palabras, la transición t_j en la RdP está habilitada cuando el número de *tokens* en p_i es al menos tan grande como el peso del arco que conecta p_i con t_j , esto debe cumplirse para todos los lugares p_i que son entradas de la transición t_j .

3.2.5. Dinámica de las Redes de Petri

El mecanismo que define la transición de los estados de una RdP es provisto por el movimiento de los *tokens* a través del grafo, con lo que el estado de la RdP va evolucionando. Cuando una transición está habilitada se dice que se puede disparar («fire» el cual es un término comúnmente utilizado en esta área). Entonces se puede decir que la función de transición de los estados es definida a través del cambio en el estado de la RdP mediante el disparo de las transiciones habilitadas.

3.2.6. Propiedades de las Redes de Petri

3.2.6.1. Red de Petri Viva

Una transición es viva, para un marcado M_o , si para todo marcado M que se pueda alcanzar a partir del marcado inicial M_o existe un marcado sucesor de M a partir del cual se puede disparar dicha transición [26]. Sabiendo esto, se dice entonces que una Red de Petri es viva si todas sus transiciones son vivas para un marcado dado.

3.2.6.2. Red de Petri Binaria

Una Red de Petri se dice Binaria si cualquier marcado alcanzable es tal que ningún lugar posee más de una marca [26], dicho de otra forma, en una Red de Petri binaria todo lugar marcado poseerá únicamente una marca o *token*.

3.2.7. Árbol de Alcanzabilidad

El árbol de alcanzabilidad es una técnica de análisis de las Redes de Petri. Esta técnica se basa en la construcción de un árbol donde los nodos son los lugares y los arcos son las transiciones de la Red de Petri, partiendo siempre del marcado inicial de la Red de Petri, tal como se muestra en la Figura 3.2.

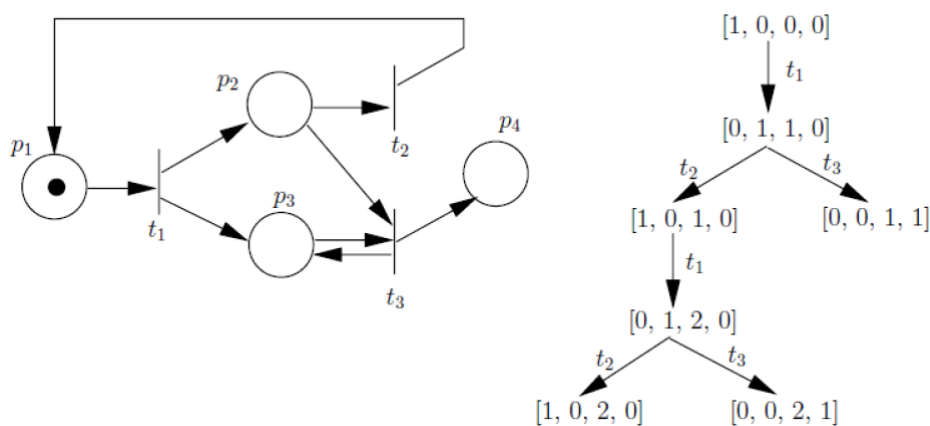


Figura 3.2: Árbol de Alcanzabilidad de una Red de Petri

3.2.8. Matrices de Incidencia en las Redes de Petri

Las Redes de Petri se pueden representar también a través de matrices, éstas matrices son las conocidas como matrices de incidencia y se definen de la siguiente forma:

- La matriz W^- o E se conoce como matriz de incidencia de entrada

$$W^- = [W_{ij}^-] \quad (3.4)$$

Donde $W_{ij}^- = Pre(P_i, T_j)$

- La matriz W^+ o S se conoce como matriz de incidencia de salida

$$W^+ = [W_{ij}^+] \quad (3.5)$$

Donde $W_{ij}^+ = Post(P_i, T_j)$ [26]

A partir de las matrices de incidencia de entrada y salida se puede hallar la matriz de incidencia de la Red de Petri, tal como se indica a continuación.

$$W = W_{ij}^+ - W_{ij}^- \quad (3.6)$$

Donde:

- W : matriz de incidencia
- W_{ij}^+ : matriz de incidencia de entrada
- W_{ij}^- : matriz de incidencia de salida

Conociendo la matriz de incidencia de una Red de Petri y a partir de un estado inicial M_i y una secuencia de disparos S , se puede entonces conocer un estado final M_k por medio de la ecuación fundamental [26].

$$M_k = M_i + WS \quad (3.7)$$

Capítulo 4

Sistema Híbrido de Generación de Energía Renovable y Control Supervisorio

LAS energías alternativas han ido gradualmente reemplazando las formas convencionales de generación de energía como: turbinas diesel, generadores a gas, etc. La necesidad de adoptar las energías renovables para la generación de energía radica no solo en el hecho de que son formas de generación más limpias, sino que reducen de manera notoria los efectos contaminantes en el mundo, donde la contaminación causada por la combustión fósil es cada vez mayor.

4.1. Sistema Híbrido de Generación de Energía Renovable

Como ya se ha mencionado en capítulos anteriores, los sistemas híbridos de generación de energía renovable están constituidos por dos o más tipos de energías alternativas con la finalidad de incrementar la eficiencia y confiabilidad del sistema de generación de energía eléctrica. El desarrollo de esta investigación se orienta a un sistema híbrido conformado por tres energías renovables, estas energías son: energía solar fotovoltaica, energía eólica y energía hidráulica. En las secciones subsiguientes se describe detalladamente cada sub-sistema de generación correspondiente a cada tipo de energía.

4.1.1. Energía Solar Fotovoltaica

El término energía solar se refiere al aprovechamiento de la energía que proviene del Sol. La principal ventaja que presenta este tipo de energía es que la luz solar es un recurso abundante además de inagotable; la cantidad de energía que el sol emana sobre la superficie terrestre cada día es muchísimo mayor que la energía consumida por los humanos en 24 horas. La mínima unidad de generación de la energía solar fotovoltaica se conoce como celda solar, cuyo modelo ya fue descrito en el Capítulo 2. La disposición de varias celdas solares bien sea en paralelo y/o en serie da lugar a los módulos fotovoltaicos.

Para la simulación de este sub-sistema de generación se parte de un demo de Matlab R2014b, cuyo nombre es: «*Detailed Model of a 100-kW Grid-Connected PV Array*». Este modelo incluye: el panel fotovoltaico, el control de potencia activa *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) mediante un *Boost Converter*, un convertidor DC-AC y los controladores correspondientes para poder sincronizar el sistema de generación con la *grid* (Figura 4.1).

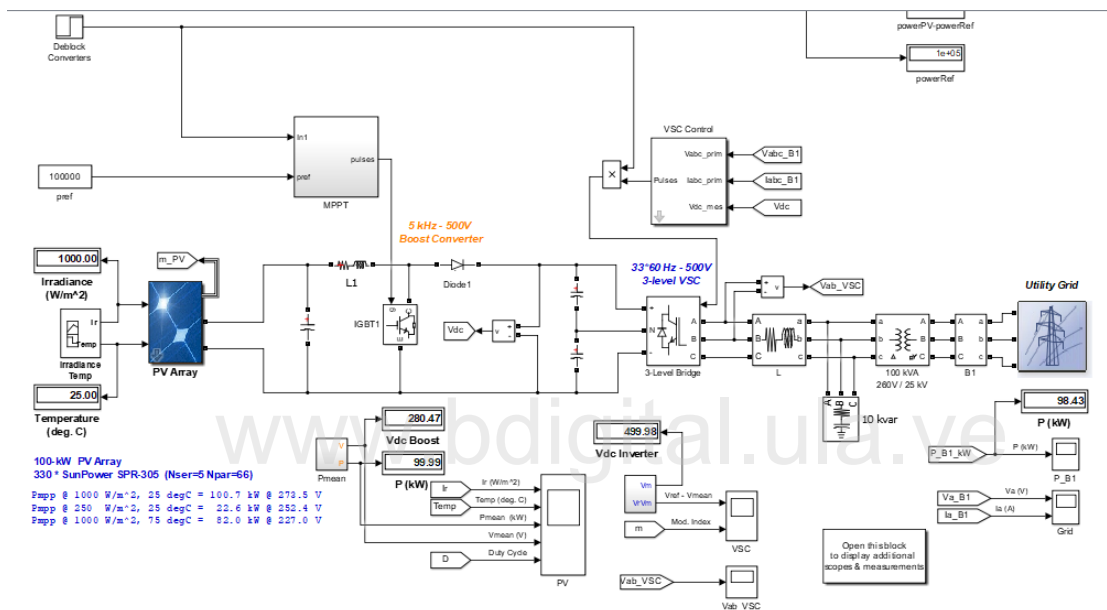


Figura 4.1: Sistema de Generación Solar - Simulink

El modelo del módulo fotovoltaico utilizado en las simulaciones es 330 SunPower (SPR-305E-WHT-D), el cual es un módulo de silicio monocristalino de 350 W. Se disponen de 66 cadenas conectadas en paralelo, cada cadena de 5 celdas conectadas en serie, de tal forma se consigue un módulo fotovoltaico que genera 100kW. Las curvas características de dicho módulo fotovoltaico se muestran en la Figura 4.2.

Parámetro	
Voltaje circuito abierto (Voc)	64.2 V
Corriente corto circuito (Isc)	5.96 A
Voltaje de máxima potencia	54.7 V
Corriente de máxima potencia	5.58 A

Cuadro 4.1: Especificaciones de un módulo 330 SunPower (SPR-305E-WHT-D)

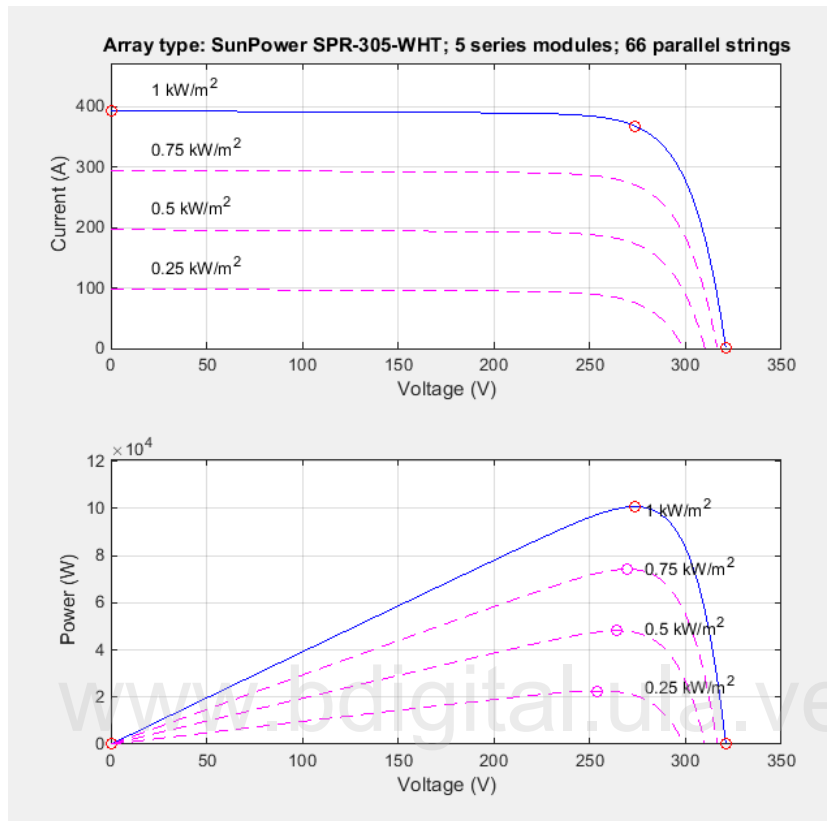


Figura 4.2: Curvas Características para $T = 25^{\circ}\text{C}$ (SPR-305E-WHT-D)

De las curvas características se puede notar que la máxima potencia que puede generar el módulo fotovoltaico es de 100 kW cuando la irradiancia solar es de 1000 W/m^2 y la temperatura es de 25°C . De la Figura 4.2 se puede apreciar que para valores de irradiancia menores a 1000 W/m^2 la potencia máxima que puede generar el panel fotovoltaico es menor que 100 kW.

A partir del punto de máxima potencia que existe para cada valor diferente de irradiancia solar se puede construir lo que se conoce como la **curva de máxima potencia**. Esta curva de máxima potencia describirá la relación entre la máxima potencia que puede generar el módulo fotovoltaico y la variación de la irradiancia solar. La información que proporciona esta relación matemática será de gran utilidad para el control supervisor, dicha curva se muestra en la Figura 4.3. A continuación se muestra la expresión matemática que describe la curva de máxima potencia del panel fotovoltaico.

$$P_{max} = 104,1irr - 3695 \quad (4.1)$$

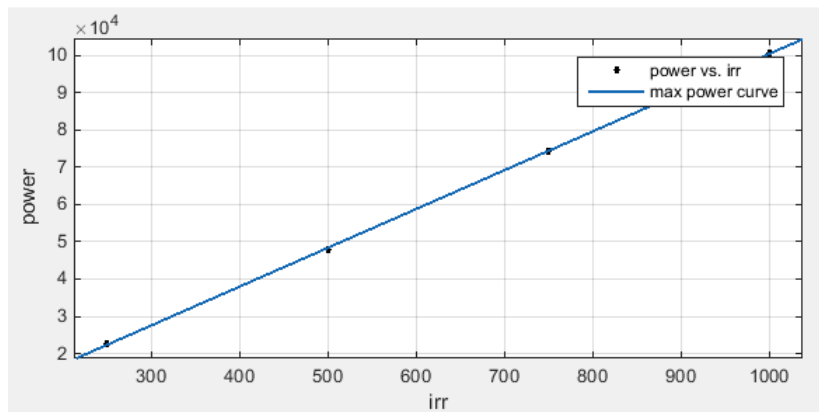


Figura 4.3: Curva de Máxima Potencia para $T = 25^{\circ}\text{C}$ (SPR-305E-WHT-D)

Donde irr es la irradiancia solar (W/m^2).

Como se mencionó anteriormente, se implementa el control MPPT sobre el panel fotovoltaico con la finalidad de controlar la potencia activa que se está generando. Es importante resaltar que el MPPT busca maximizar la extracción de potencia, es decir, el MPPT seguirá el punto de máxima potencia que puede entregar el panel en todas las condiciones. En este caso, el algoritmo a utilizar para implementar el MPPT es el de Conductancia Incremental, mediante este algoritmo se define la variación del ciclo de trabajo del convertidor DC-DC para variar el voltaje requerido para extraer la máxima potencia del panel fotovoltaico. El convertidor DC-DC utilizado es un convertidor del tipo *Boost*.

Por otro lado, el control supervisorio asigna *setpoints* a cada sub-sistema de generación, por lo que es necesario entonces realizar una modificación sobre el control MPPT para aquellos casos donde el *setpoint* sea menor al punto máximo de potencia. Dicha modificación se rige por la siguiente regla. Sea P_{ref} el *setpoint* asignado por el control supervisorio. Existirán dos casos:

- Si $P_{ref} \geq P_{max} \rightarrow \text{MPPT}$
- Si $P_{ref} < P_{max} \rightarrow \text{MPPT modificado}$

En el caso del MPPT modificado, se hace una corrección extra en el ciclo de trabajo (*duty*) del convertidor DC-DC con la finalidad de conseguir que el módulo fotovoltaico siga la referencia asignada.

La salida del convertidor DC-DC se envía a un convertidor DC-AC trifásico, con la finalidad de conseguir una señal que pueda sincronizarse con la red trifásica (*grid*). Este convertidor posee un sistema de control que usa dos lazos: un lazo externo que regula el

DC link y una lazo interno que regula la corriente activa y reactiva. Además posee lazo de seguimiento de fase que permite la sincronización con la red.

En la Figura 4.4 se observa el control de potencia activa en funcionamiento, en esta ocasión la referencia es 150kW, este valor está por encima del valor máximo que puede generar el arreglo fotovoltaico (100kW), éste es el caso donde la referencia es menor al punto máximo de potencia por lo que actúa el MPPT. De la gráfica se puede observar que el sistema presenta una dinámica sub-amortiguada, y luego de ciertas oscilaciones logra llegar al valor deseado.

Por otro lado, en la Figura 4.5 se puede apreciar la dinámica del control en el caso donde la referencia es menor al punto máximo de potencia, donde actúa el MPPT modificado. En esta oportunidad, el sistema no presenta oscilaciones y logra alcanzar el valor deseado en un tiempo menor que el caso anterior.

Es importante mencionar que en la simulación se agrega un retardo de 0.05 unidades de tiempo para comenzar a hacer las lecturas, es por eso que en las gráficas los datos comienzan a variar a partir de 0.05.

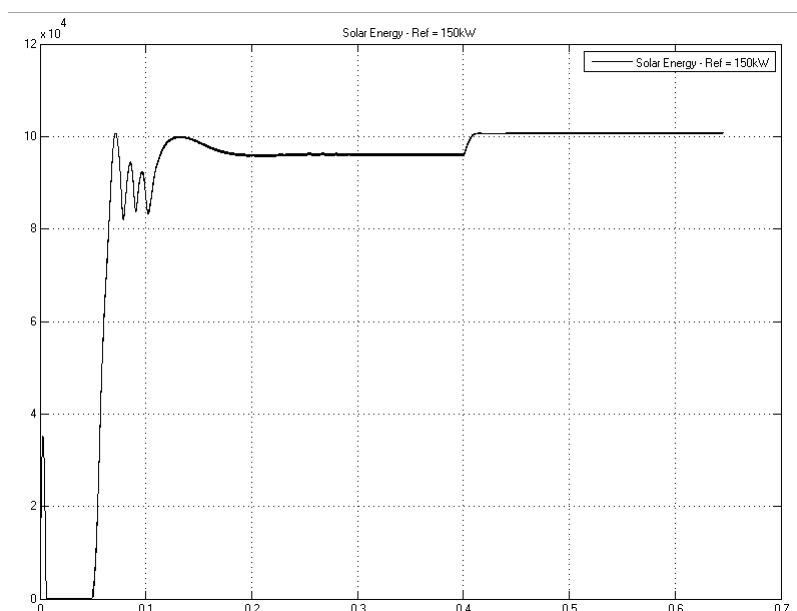


Figura 4.4: Control de Potencia Activa - Referencia igual a 150kW

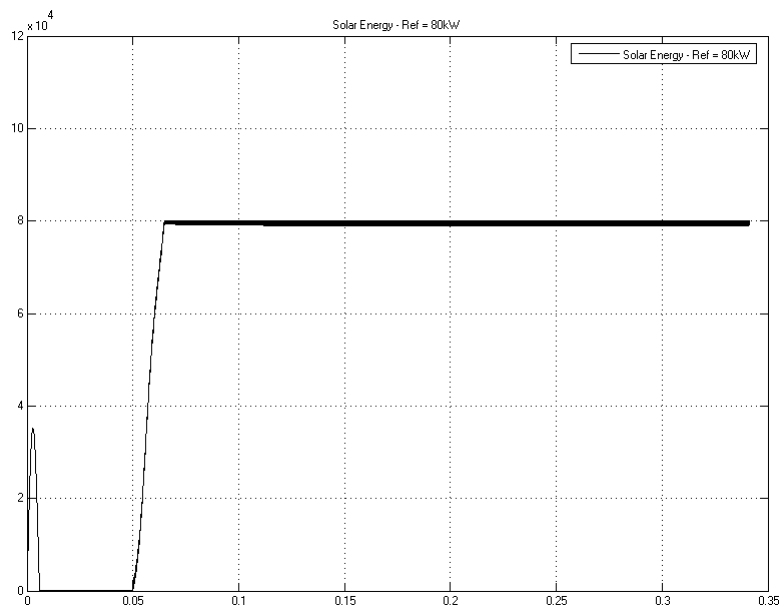


Figura 4.5: Control de Potencia Activa - Referencia igual a 80kW

www.bdigital.ula.ve

4.1.2. Energía Eólica

La energía eólica es una fuente de energía renovable que utiliza la fuerza del viento para generar electricidad. Este tipo de energía alternativa se ha convertido en una fuente de generación de energía clave para el cambio de modelo energético, más limpio y sostenible.

El viento forma parte de las energías primarias que no tienen fecha de caducidad, por lo que también cataloga como buena opción para incluirla en sistemas de generación renovables. Las turbinas eólicas utilizadas son de eje horizontal, con tres paletas.

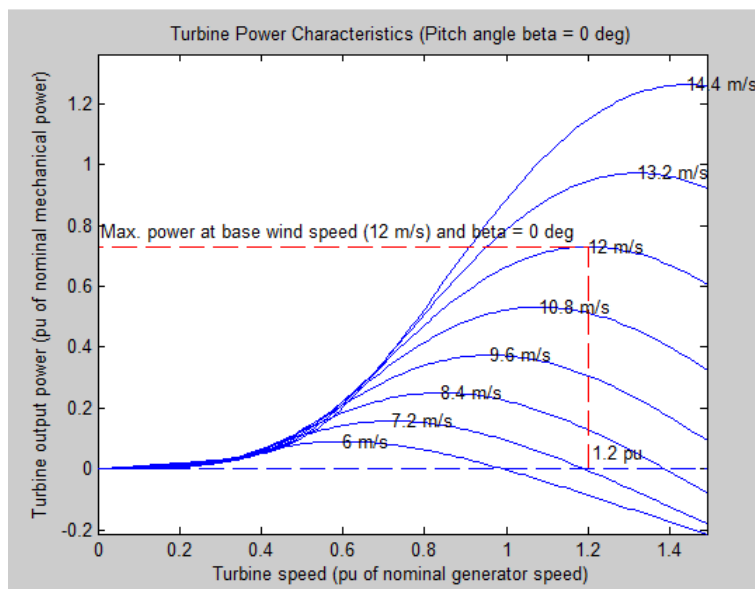


Figura 4.6: Curva Característica Turbina Eólica

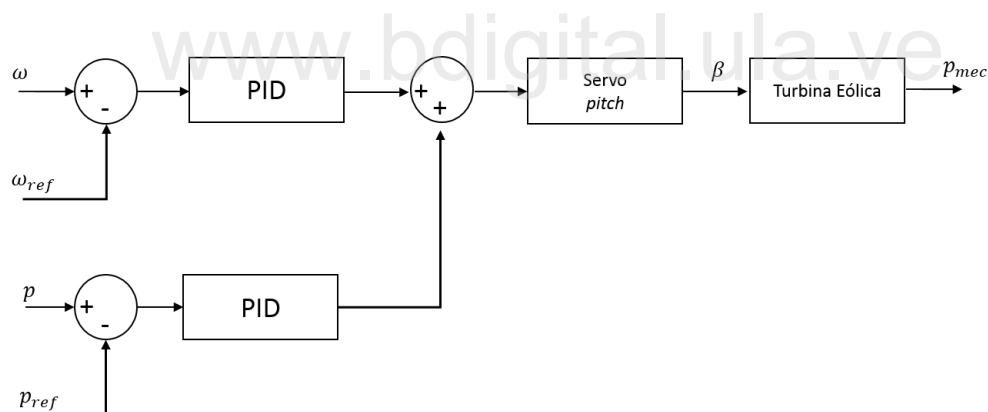
Las paletas de los aerogeneradores giran gracias al viento, esta rotación es la que permite la generación de potencia mecánica. Para convertir la potencia mecánica en potencia eléctrica es necesario incluir un generador eléctrico, el cual se conecta a través de la caja de cambios al sistema mecánico. En este sub-sistema de generación se utiliza un generador síncrono de imanes permanentes. En este caso, el modelo utilizado de la turbina eólica puede generar un máximo de 33 W para una velocidad del viento de 12 m/s.

En el sub-sistema de generación eólica, se incluye un sistema de control (Figura 4.7) capaz de controlar el ángulo de giro de las paletas (β) con la finalidad de obtener la potencia eléctrica deseada. Además se introduce un lazo de control extra que permite sincronizar la generación de este sub-sistema con la red eléctrica.

Parámetro	
Kp	0.0005
Ki	0.001
Kd	0

Cuadro 4.2: Parámetros Control de Potencia (P_{ref})

Parámetro	
Kp	0.1
Ki	0.7
Kd	0

Cuadro 4.3: Parámetros Control de Frecuencia (ω_{ref})Figura 4.7: *Picth Control* - Turbina Eólica

En la Figura 4.8 se muestra el modelo [55] de la turbina eólica y los respectivos controladores hechos en Simulink. Por otro lado, en la Figura 4.9 se muestra la respuesta del sistema con el control de potencia activa en funcionamiento. El sistema muestra un comportamiento sub-amortiguado y se alcanzan el valor deseado: 30W.

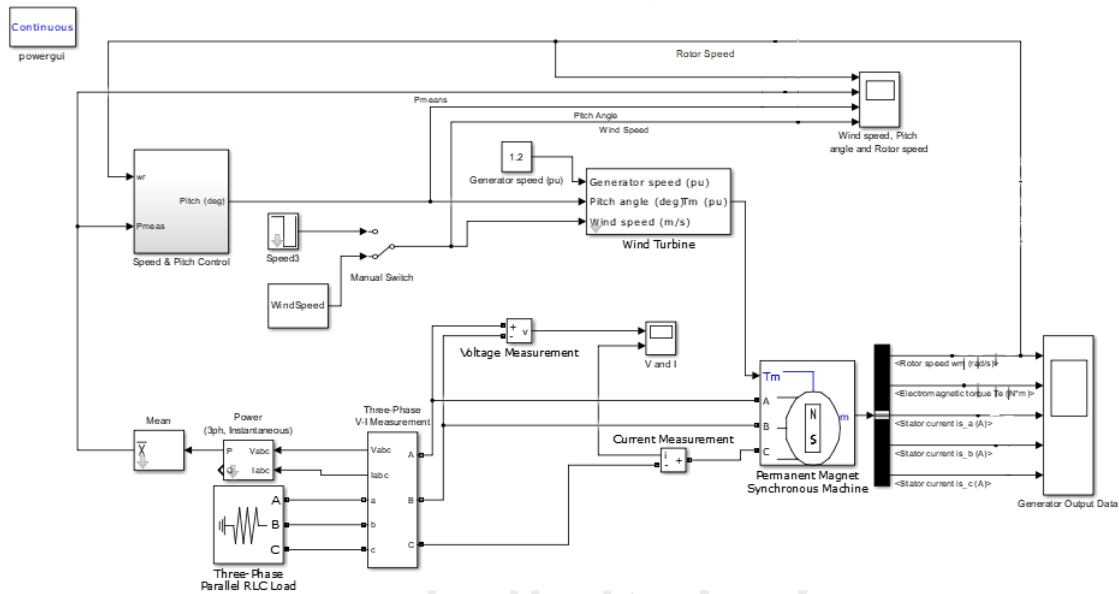


Figura 4.8: Pitch Control - Turbina Eólica

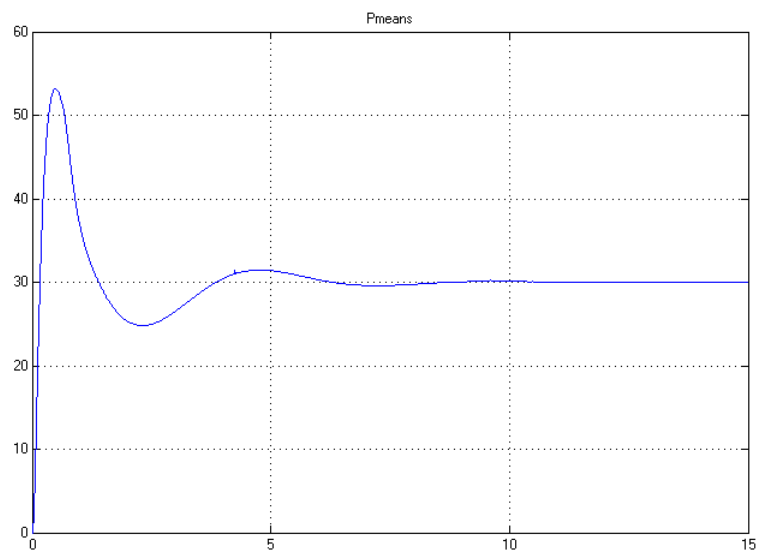


Figura 4.9: Control de Potencia Activa - Referencia igual a 30W

4.1.3. Energía Hidráulica

Finalmente, la tercera energía renovable que conforma el sistema híbrido de generación es la energía hidráulica. Como ya se conoce, este tipo de energía aprovecha las corrientes de agua, bien sea ríos o represas, para la generación de electricidad. Este tipo de generación es bastante flexible y una fuente de producción bastante estable. En este caso, el agua hace rotar la turbina generando así una potencia mecánica la cual luego será transformada en potencia eléctrica.

Para la simulación de este sub-sistema de parte de un demo de Matlab R2014b, cuyo nombres es: «Power Turbine». Este modelo incluye: la turbina hidráulica, el generador eléctrico, sistema de excitación del generador y un controlador de la familia PID para controlar potencia activa y frecuencia (Ver Figura 4.10).

En este sub-sistema debe incluirse un generador eléctrico cuyo objetivo es convertir la energía mecánica, generada por la turbina hidráulica, en energía eléctrica. En este caso, dicha transformación se hace por medio de una máquina síncrona que opera como un generador eléctrico (trifásico). Asimismo, es necesario incluir un sistema de excitación para el generador síncrono, este sistema provee la corriente continua necesaria para excitar el rotor del generador.

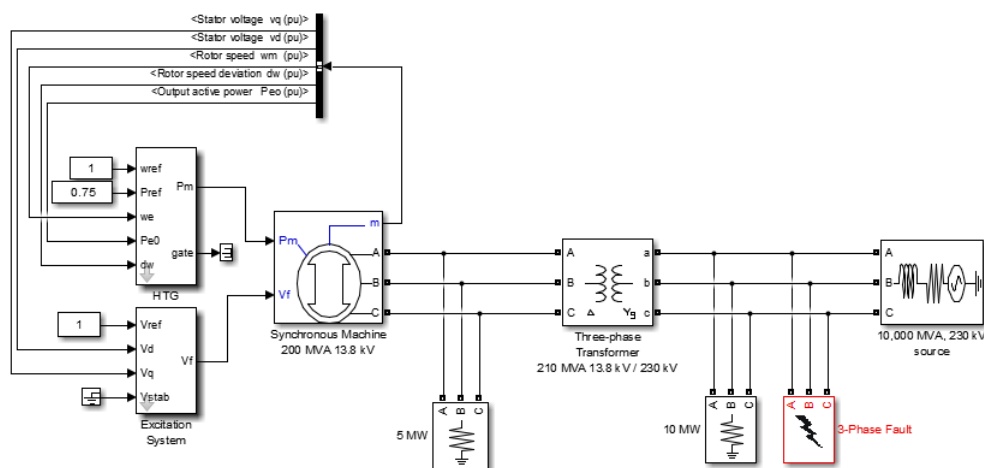


Figura 4.10: Turbina Hidráulica

Al igual que es sistema de generación eólica, en este caso se tiene un control de la familia PID conformado por dos partes, el primero hace control sobre la potencia activa y el segundo hace control sobre la frecuencia para poder sincronizar la generación de este sub-sistema con la red. En la Figura 4.11 se muestra el esquema del control y en la tabla 4.4 se muestran los parámetros del PID.

Finalmente en la Figura 4.12 se exhibe el comportamiento del sistema con el controlador activo, la referencia es igual a 1.5MW. El sistema, aunque presenta una dinámica sub-amortiguada bastante marcada, logra alcanzar el valor deseado.

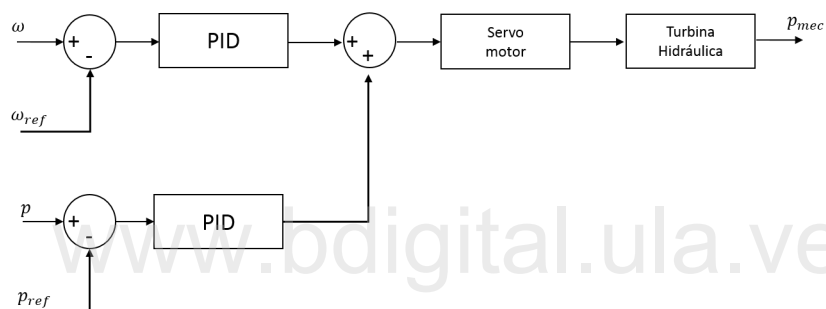


Figura 4.11: Control PID - Turbina Hidráulica

En el Cuadro 4.4 se muestran los parámetros del controlador PI, estos parámetros se obtuvieron haciendo diversas pruebas con diferentes valores de K_p y K_i y seleccionando aquellos parámetros con los que se obtenía la respuesta deseada, en este caso la dinámica deseada incluye: alcanzar la referencia con el menor error posible en el menor tiempo posible.

Parámetro	
K_p	2
K_i	2

Cuadro 4.4: Parámetros del Controlador PI

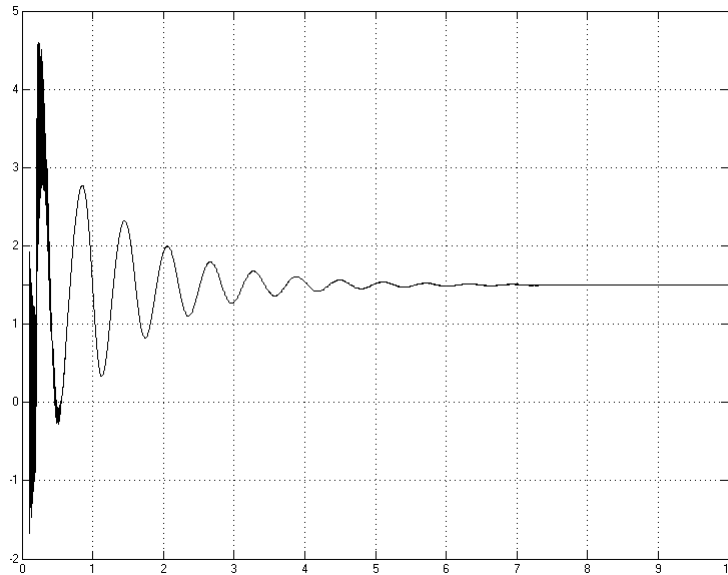


Figura 4.12: Control de Potencia Activa - Turbina Hidráulica

4.2. Control Supervisorio

La generación de energía a partir de recursos renovables está sujeta a la disponibilidad de los recursos naturales, los cuales son intermitentes, por tanto el sistema híbrido de generación de energía se complementa con un control supervisorio con el objetivo de optimizar el funcionamiento del sistema y determinar el modo de operación de cada sub-sistema que lo conforma. A continuación se describe detalladamente el funcionamiento del control supervisorio.

El control se encarga de supervisar y coordinar el modo de operar del sistema de generación, para ello conoce cuánta potencia está generando y cuánta potencia puede generar cada sub-sistema de generación por separado. Por otro lado, el control está al tanto de la demanda de potencia que está siendo solicitada al sistema; conociendo estas variables el control supervisorio determina la combinación de energías renovables que deben activarse para cubrir con el requerimiento energético. La lógica del control supervisorio que se propone apunta a que se active la energía renovable o la combinación de energías renovables que puedan cubrir la demanda con la menor diferencia posible; por ejemplo, el control supervisorio conoce que la energía eólica puede generar hasta 1 MW y la energía solar puede generar hasta 100 kW, si la demanda es de 80 kW, el control supervisorio tomará la decisión de activar la energía solar asignando una referencia de 80kW a su controlador local. El control supervisorio se decide por la energía solar, primero porque cubre la de-

manda y segundo porque la diferencia entre lo que este sub-sistema puede generar y la demanda solicitada es menor que la diferencia entre la generación eólica y la demanda. En el Cuadro 4.5 se listan los casos posibles que evaluará el control supervisorio para tomar una decisión.

	Casos Posibles
1	Ninguna energía
2	Energía Solar
3	Energía Eólica
4	Energía Hidráulica
5	Energía Solar + Energía Eólica
6	Energía Solar + Energía Hidráulica
7	Energía Eólica + Energía Hidráulica
8	Energía Solar + Energía Eólica + Energía Hidráulica

Cuadro 4.5: Casos Posibles

Como se menciona en los objetivos de este trabajo, la lógica del control supervisorio se modela con Redes de Petri (Figura 4.14), en la siguiente sección se muestra en detalle el modelo del control, las matrices de incidencia y el árbol de cobertura de la Red de Petri que modela el control supervisorio.

La lógica del control supervisorio es codificada en un script de Matlab el cual es incluido en el archivo de Simulink mediante el bloque *supervisory* (ver Figura 4.13). En el Apéndice A se muestra el código de Matlab correspondiente.

En la Figura 4.13 se puede apreciar el modelo completo, en Simulink, conformado por el sistema de generación y el control supervisorio. En la parte superior de la imagen se observa el control supervisorio representado por un *Fcn Block* y en la parte inferior se encuentran los tres bloques que contienen los sub-sistemas de generación de energía.

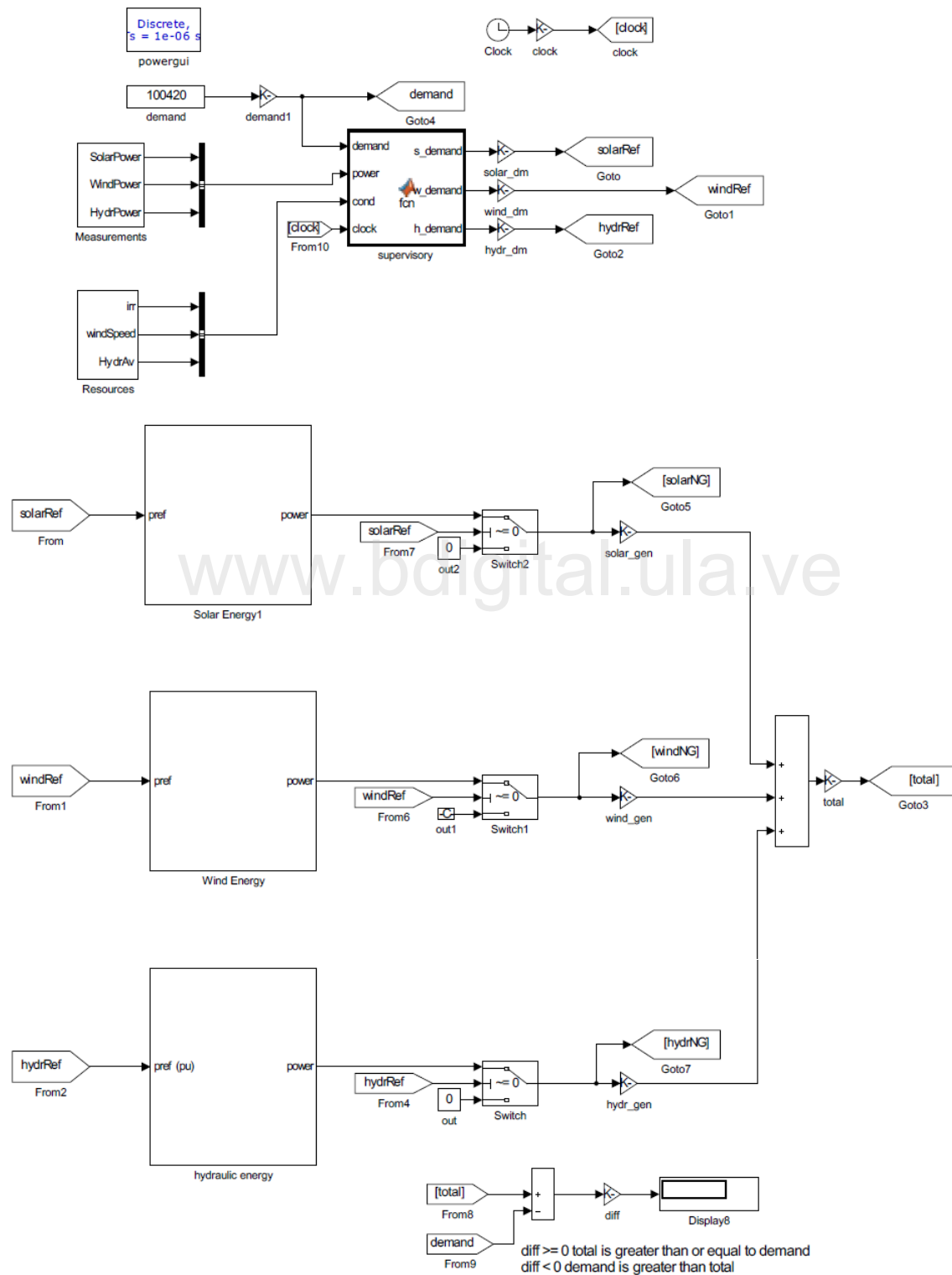


Figura 4.13: Sistema de Generación de Energía y Control Supervisorio - Simulink

4.2.1. Red de Petri que Modela el Control Supervisorio

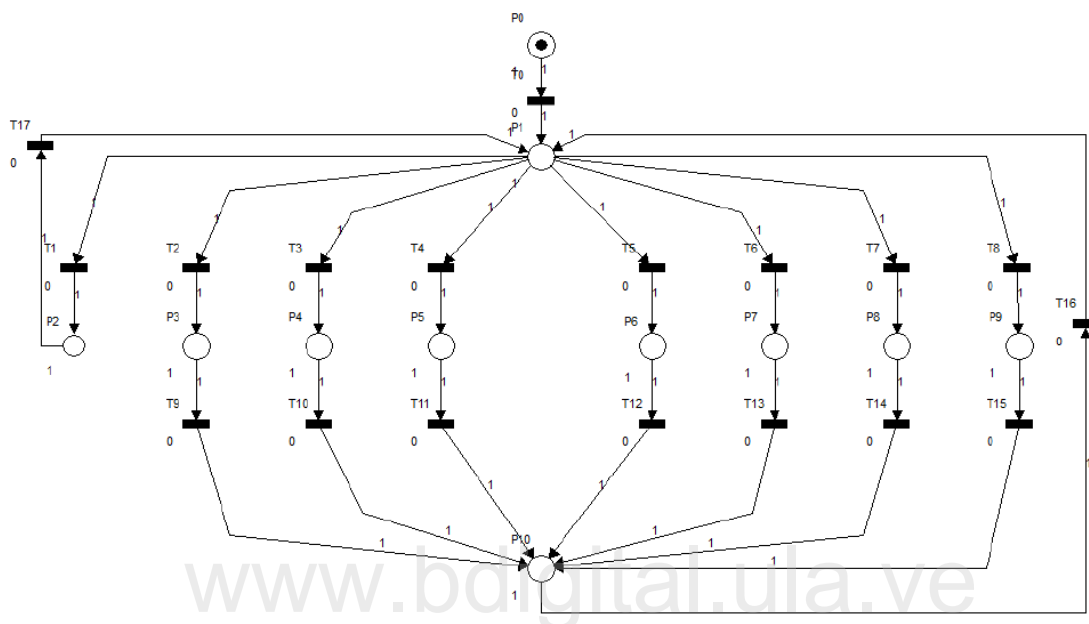


Figura 4.14: Red de Petri que modela el Control Supervisorio

4.2.1.1. Descripción de los Lugares

- P0: Todas las formas de generación de energía, a partir de recursos renovables, apagadas
- P1: Variables del sistema leídas (demanda, generación, condiciones climáticas)
- P2: Demanda nula. Asignar todas las sub-demandas igual a cero.
- P3: Activar sistema de generación solar. Asignar toda la demanda como sub-demanda a este sub-sistema.
- P4: Activar sistema de generación eólica. Asignar toda la demanda como sub-demanda a este sub-sistema.

- P5: Activar sistema de generación hidráulica. Asignar toda la demanda como sub-demanda a este sub-sistema.
- P6: Activar sistema de generación solar en conjunto con el sistema de generación eólica. Asignar sub-demandas a ambos sub-sistemas.
- P7: Activar sistema de generación solar en conjunto con el sistema de generación hidráulica. Asignar sub-demandas a ambos sub-sistemas.
- P8: Activar sistema de generación eólica en conjunto con el sistema de generación hidráulica. Asignar sub-demandas a ambos sub-sistemas.
- P9: Activar los tres sub-sistemas de generación. Asignar sub-demandas a los tres sub-sistemas.
- P10: Sub-demandas asignadas a cada sub-sistema de generación.

4.2.1.2. Descripción de las Transiciones

- T0: Lectura de la demanda y potencias generadas por cada una de las energías
- T1: La demanda es igual a cero
- T2: La potencia generada por la energía solar cubre la demanda
- T3: La potencia generada por la energía eólica cubre la demanda
- T4: La potencia generada por la energía hidráulica cubre la demanda
- T5: La potencia generada por la energía solar en conjunto con la eólica cubre la demanda
- T6: La potencia generada por la energía solar en conjunto con la energía hidráulica cubre la demanda
- T7: La potencia generada por la energía eólica en conjunto con la energía hidráulica cubre la demanda
- T8: La potencia generada por la tres energías en conjunto cubre la demanda
- T9: Sub-demanda enviada al control local de la energía solar
- T10: Sub-demanda enviada al control local de la energía eólica
- T11: Sub-demanda enviada al control local de la energía hidráulica
- T12: Sub-demandas enviadas a los controladores locales de la energía solar y eólica

- T13: Sub-demandas enviadas a los controladores locales de la energía solar y hidráulica
- T14: Sub-demandas enviadas a los controladores locales de la energía eólica e hidráulica
- T15: Sub-demandas enviadas a los controladores locales de la energía solar, eólica e hidráulica
- T16: Lectura y actualización de variables (demanda, potencias generadas, condiciones climáticas)
- T17: Lectura y actualización de variables (demanda, potencias generadas, condiciones climáticas)

www.bdigital.ula.ve

4.2.1.3. Matrices de incidencia

	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17
P0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
P2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0

Cuadro 4.6: Matriz de Incidencia de Entrada - Control Supervisorio

	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17
P0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
P3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
P4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
P5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
P6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
P7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
P8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
P9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
P10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Cuadro 4.7: Matriz de Incidencia de Salida - Control Supervisorio

	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17
P0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
P3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
P4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
P5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
P6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0
P7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0
P8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
P9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
P10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	-1	0

Cuadro 4.8: Matriz de Incidencia - Control Supervisorio

4.2.2. Árbol de Cobertura

En la Figura 4.15 se muestra el árbol de cobertura de la Red de Petri de la Figura 4.14, en donde los círculos etiquetados con S_n representan los estados de la Red de Petri y los arcos representan las transiciones. La flecha que señala el estado s_0 , indica que éste es el estado que representa el marcado inicial de la Red de Petri.

S_n es un vector de n elementos donde n es igual al número de lugares que conforman la Red de Petri, en este caso S_n posee 11 elementos (P_0, P_1, \dots, P_{10}). Para cada elemento del vector, solo existen dos posibilidades: 1 para indicar que el lugar asociado a ese elemento posee marca, 0 para indicar que el lugar no posee ninguna marca. Entonces, si $S_n = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ quiere decir que el único lugar que está marcado es P_0 . De cada círculo salen arcos que representan las transiciones habilitadas. Si la Red de Petri se encuentra en el estado s_0 , la única transición habilitada es t_0 , por esa razón solo se tiene un arco que conecta s_0 con s_1 , al dispararse la transición t_0 , la Red de Petri pasa al estado s_1 , de igual forma los arcos que salen de s_1 dependen de la cantidad de transiciones que están habilitadas.

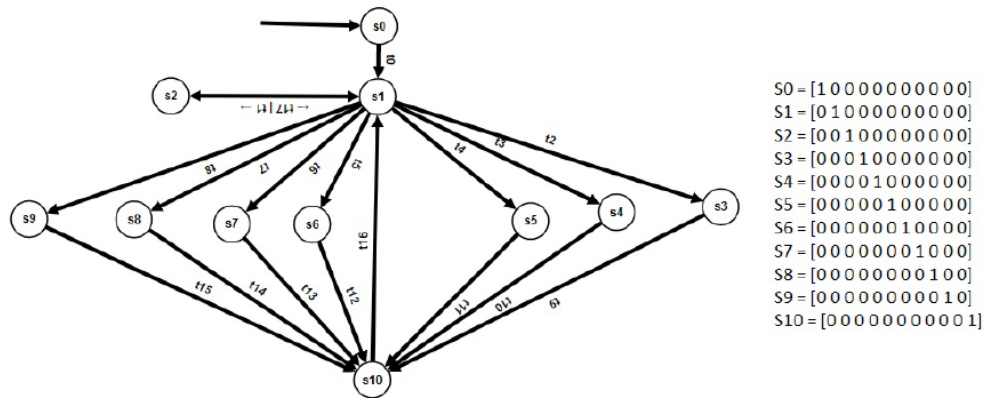


Figura 4.15: Árbol de Cobertura de la Red de Petri

www.bdigital.ula.ve

Capítulo 5

Análisis de los Resultados

En este capítulo se exhibirán los resultados obtenidos de la simulación en algunos escenarios que se pueden presentar en la generación de energía, con la finalidad de corroborar el correcto funcionamiento del control supervisorio. Los resultados de la simulación se muestran de forma ordenada mediante la interfaz gráfica de usuario (Detalles de la Interfaz en Apéndice 2).

Es importante recordar que las decisiones del control supervisorio se basan en la cantidad máxima de potencia que puede generar cada sub-sistema de generación por separado y la cantidad máxima de potencia que resulta de la combinación de varios de estos sub-sistemas de generación. En el Cuadro 5.1 se muestra la máxima potencia que puede generar cada sub-sistema, la potencia señalada en el cuadro es para una irradiancia solar constante igual a 1000 W y una velocidad de viento constante igual a 12m/s.

A continuación, de forma breve, se hace referencia a algunos de los escenarios posibles: en el caso que la potencia solicitada sea nula, ninguno de los sub-sistemas de generación debe activarse, por otro lado, en el caso que la potencia solicitada sea mayor a la potencia que puede generar el sistema de generación completo, se activan las tres formas de energía. Para el resto de los casos, se opta por la combinación que permita cubrir la demanda con la menor diferencia posible, en base a la máxima potencia que se puede generar.

	Máxima Potencia
Energía Solar	100.405 W
Energía Eólica	33 W
Energía Hidráulica	1,5 MW

Cuadro 5.1: Máxima Potencia que puede generar cada sub-sistema

Asimismo, cabe resaltar que la generación proveniente de la turbina eólica y la turbina hidráulica no está disponible al comenzar la simulación, esto se debe a que ambas poseen un comportamiento sub-amortiguado, con oscilaciones bastante marcadas; por lo que se opta por aplicar un retardo de 3.5 unidades de tiempo para la turbina hidráulica y de 5.5 unidades de tiempo para la turbina eólica. Es decir, desde 0 unidades de tiempo hasta 3.5 unidades de tiempo solo estará disponible la energía solar, luego, entre 3.5 unidades de tiempo y 5.5 unidades de tiempo, estará disponible la energía solar y la energía hidráulica, finalmente a partir de 5.5 unidades de tiempo estarán disponibles las tres energías renovables.

En la Figura 5.1 se muestra el primer escenario. Este es el caso en donde la demanda es nula, en esta ocasión las referencias asignadas por el control supervisorio son iguales a cero, es decir, ningún sistema de generación de energía se activa.

Se puede observar en la interfaz que se mantienen inactivos los tres sub-sistemas de generación mientras la referencia asignada sea nula.

www.bdigital.ula.ve

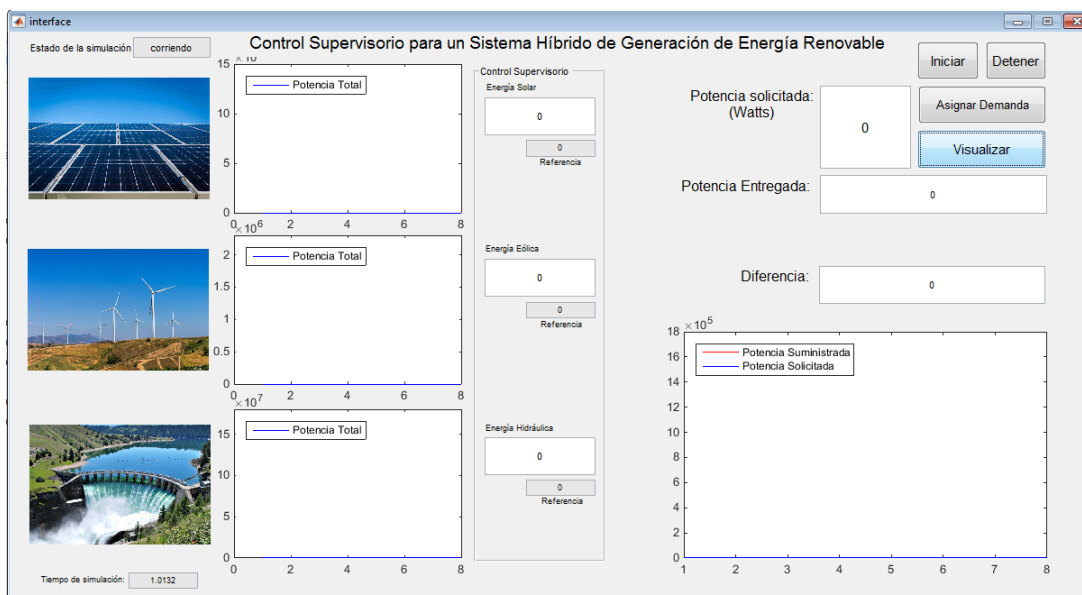


Figura 5.1: Demanda Nula

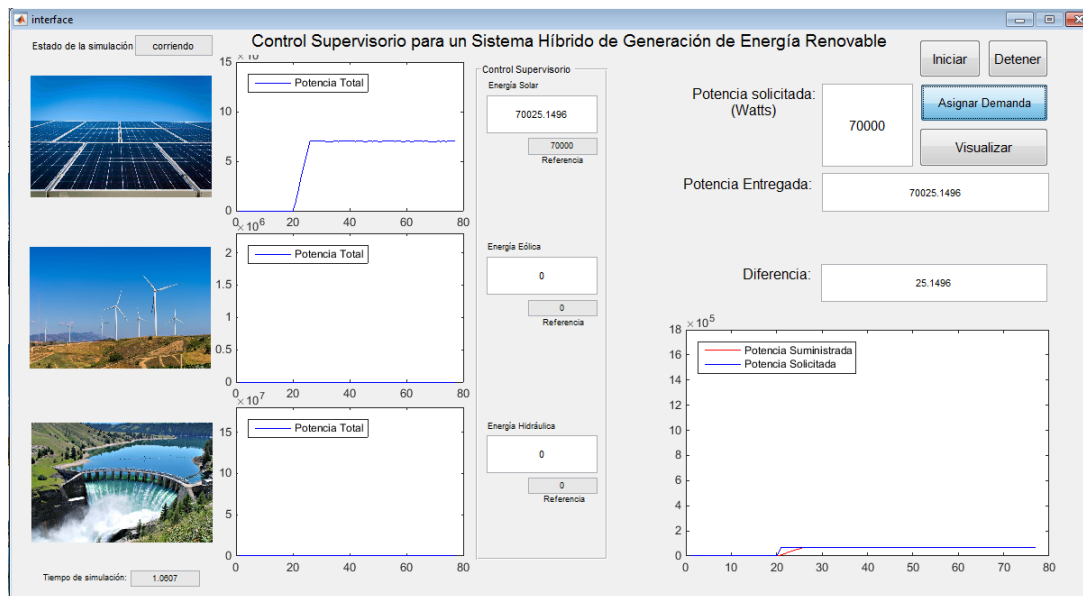


Figura 5.2: Demanda 70.000W

www.bdigital.ula.ve

En el caso que se muestra en la Figura 5.2, la potencia solicitada es 70.000 W. Se puede apreciar que se asigna la demanda como referencia al sub-sistema de generación solar. En la gráficas se observa que la respuesta de este sistema es bastante rápida lo que le permite alcanzar la referencia en poco tiempo y con una diferencia muy pequeña.

En la Figura 5.3 se muestra el escenario donde la demanda aumenta a 120.000 W, el cual es un valor mayor a la máxima potencia que puede entregar el sub-sistema de generación solar. Dado que no se ha cumplido el tiempo de retardo de los otros dos sub-sistemas de generación, no se pueden tomar en cuenta para cubrir con la solicitud. Es por ello que se observa en la interfaz que se asigna como referencia el máximo valor a la energía solar, mientras que las otras referencias permanecen en cero. En esta oportunidad no se está cumpliendo con la demanda, debido a que la máxima potencia que puede generar la energía solar es de 100.405 W.

Si el valor de la potencia solicitada disminuye a 100.000 W, como se muestra en la Figura 5.4, el sub-sistema de generación solar logra cubrir la demanda. Se puede observar en la gráfica que muestra la potencia suministrada y la potencia solicitada (Figura 5.4 que entre 170 unidades de tiempo y 390 unidades de tiempo (caso anterior), la demanda suministrada se mantuvo por debajo de la demanda solicitada, porque la única energía disponible es la solar; luego con la disminución de la demanda el sistema de generación logra cubrir la solicitud de forma rápida.

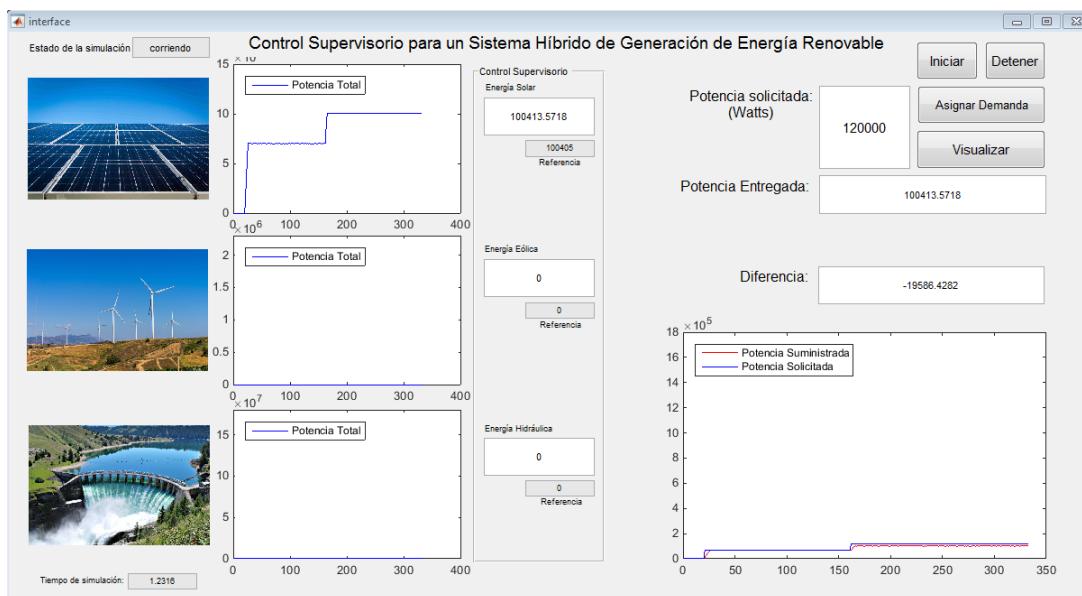


Figura 5.3: Demanda 120.000W

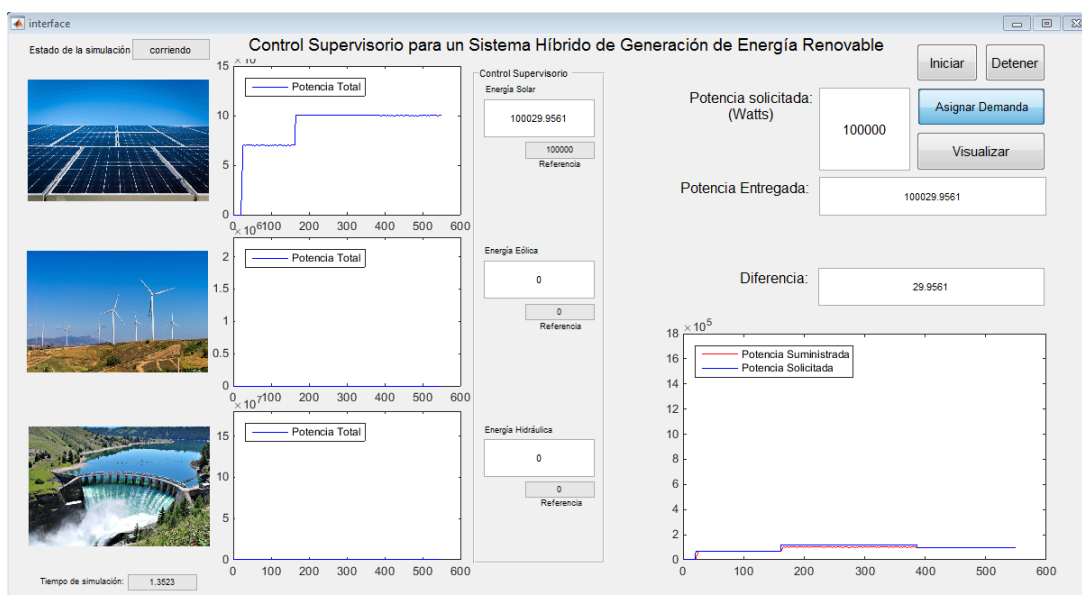


Figura 5.4: Demanda 100.000 W

En la Figura 5.5 la potencia solicitada aumenta a 1,4 MW. En esta oportunidad ya está disponible la generación hidráulica (tiempo de simulación mayor a 3.5) por lo que el control supervisorio activa este sub-sistema de generación, asignándole como referencia 1,4MW. La energía hidráulica es suficiente para cumplir con la demanda por lo que el sub-sistema de generación solar es desactivado por el control supervisorio (referencia igual a cero). La respuesta del sub-sistema de generación hidráulica es sub-amortiguada por lo que luego de un par de oscilaciones consigue alcanzar el valor deseado.

En el caso que se muestra en la Figura 5.6, la demanda ha disminuido a 70.000 W. A pesar de que la turbina hidráulica puede cubrir esta solicitud de potencia, el control supervisorio activa nuevamente el sub-sistema de generación solar y desactiva la generación hidráulica, esto lo hace debido a que con la energía solar se cubre la demanda con una diferencia menor respecto a la máxima potencia que puede generar en comparación con la generación hidráulica. En la gráfica de la potencia total (Figura 5.6), se aprecia como el sub-sistema de generación solar se adapta rápidamente a la nueva referencia asignada, cumpliendo de esta forma con la orden del control supervisorio.

www.bdigital.ula.ve

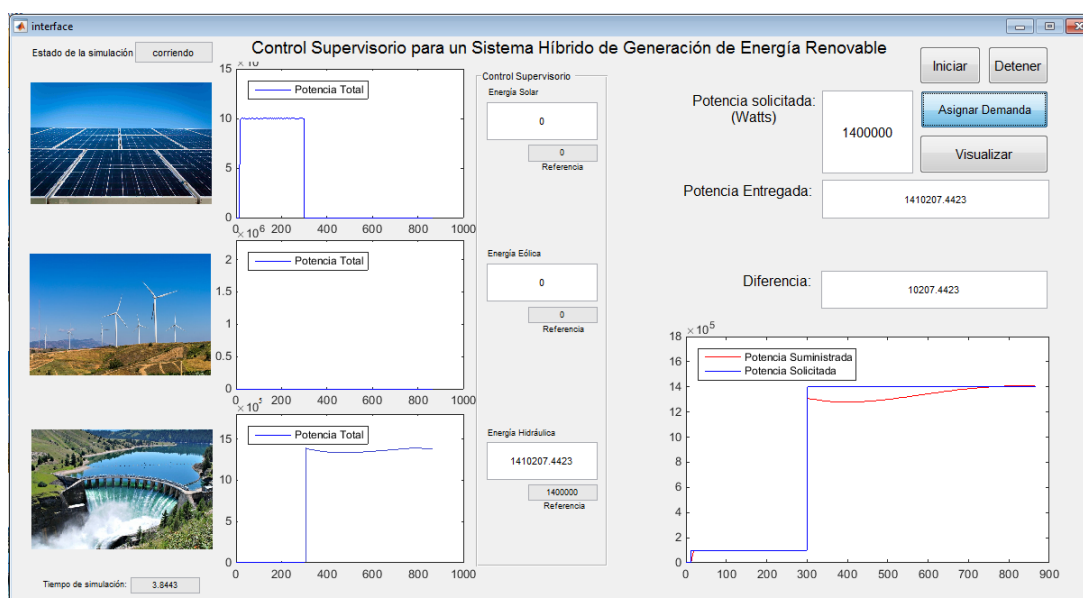


Figura 5.5: Demanda 1.400.000 W

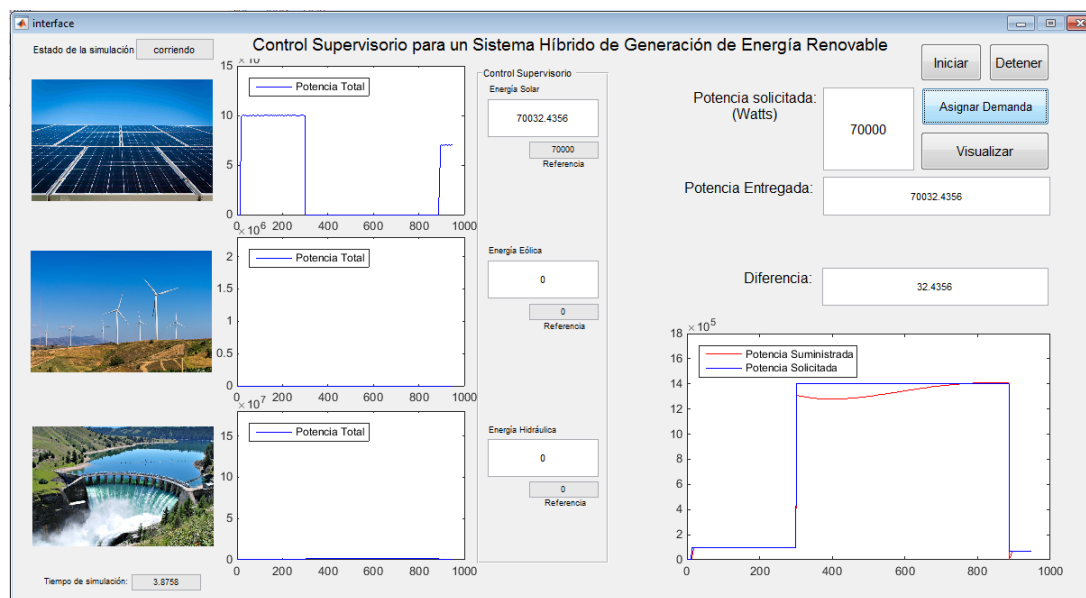


Figura 5.6: Demanda 70.000 W

En la Figura 5.7 se muestra nuevamente un escenario donde la demanda presenta un cambio importante, en esta oportunidad la potencia solicitada aumenta hasta 1,57 MW.

En el caso mostrado en la figura anterior (Figura 5.6) solo con la energía solar se podía cubrir la solicitud, pero en este caso, debe complementarse la energía solar con alguna otra energía de las energías para cubrir con la demanda. El tiempo de simulación aún se encuentra por debajo de las 5.5 unidades de tiempo, por lo que la energía eólica aún no está disponible. La decisión que toma el control supervisorio incluye la activación del sub-sistema de generación hidráulica en conjunto con el sub-sistema de generación solar tal y como se puede apreciar en la interfaz el control supervisorio activa ambos sistemas de generación asignando demandas diferentes de cero: 70.000 W para el sub-sistema de generación solar y 1,5 MW para el sub-sistema de generación hidráulico. Como ya se mencionó, la dinámica del sistema hidráulico es sub-amortiguada, se puede apreciar esta dinámica en la gráfica respectiva, por lo que le tomará al sistema un tiempo en alcanzar el valor asignado por el control supervisorio.

Luego de transcurrido un tiempo, se puede observar en la Figura 5.8 que el sub-sistema de generación hidráulica ha alcanzado su estado estable y en conjunto con lo que está generando el sub-sistema de generación solar se logra alcanzar la referencia asignada por el control supervisorio con una diferencia muy pequeña.



Figura 5.8: Demanda 1.570.000 W

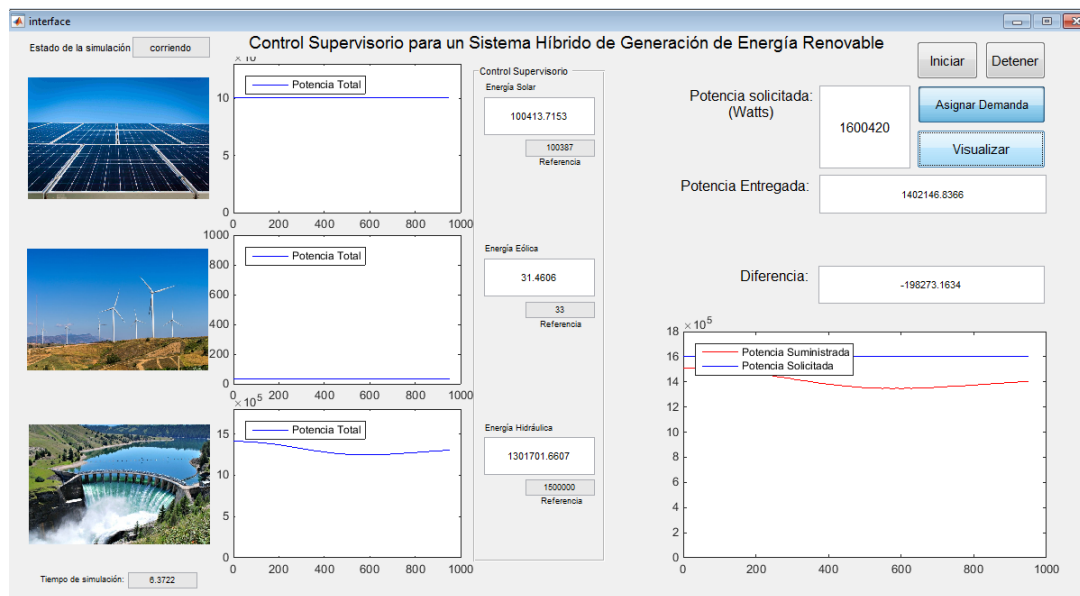


Figura 5.9: Demanda 1.600.420 W

Finalmente, el tiempo de simulación ya superó las 5.5 unidades de tiempo por lo que desde de este momento la generación eólica está disponible. En el caso que se muestra en la Figura 5.9 la potencia solicitada aumenta hasta 1.600.420 W. Para poder cubrir con esta demanda, el control supervisorio activa los tres sub-sistemas de generación asignando referencias diferentes de cero a cada control local: 100.387 W para la energía solar, 33 W para la energía eólica y 1,5 MW para la energía hidráulica. Debido a la dinámica sub-amortiguada tanto del sistema eólico como del hidráulico, le tomará un tiempo al sistema de generación alcanzar la referencia asignada.

Por último, en la Figura 5.10, la potencia solicitada disminuye a 100.420 W, en este caso la combinación de la energía solar con la energía eólica son suficientes para cubrir la demanda. Se puede observar en la interfaz que el control supervisorio asigna como referencias 100.387 W al sub-sistema de generación solar y 33 W al sub-sistema de generación eólica. Con la decisión que toma el control supervisorio se logra cumplir con la potencia solicitada con una diferencia muy pequeña. Se puede observar en la gráfica que el sub-sistema de generación hidráulica se desactiva en este caso, y la potencia suministrada solo depende de la energía solar y la energía eólica.

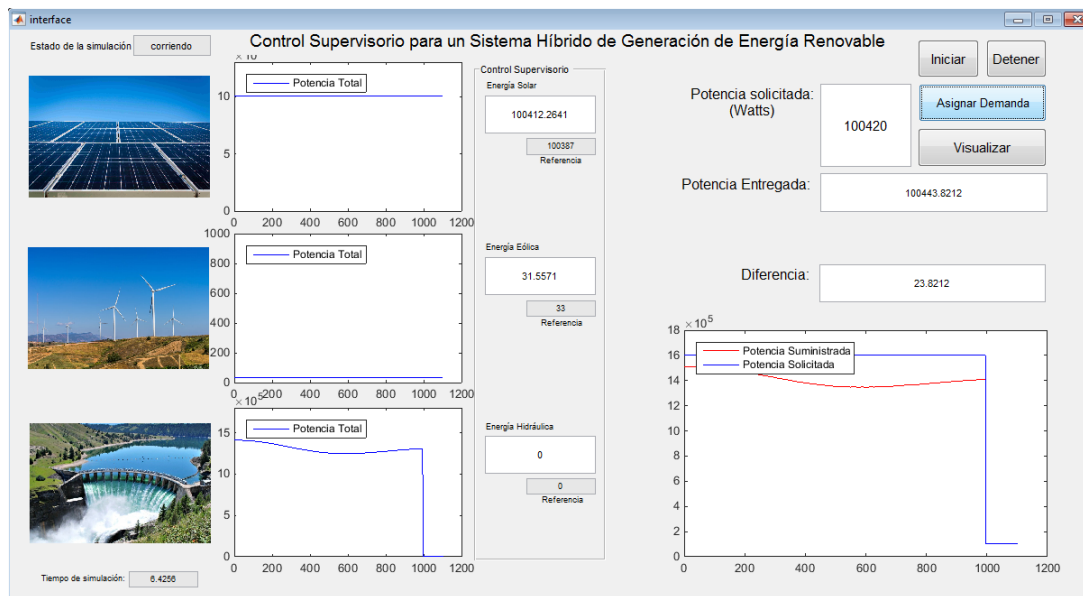


Figura 5.10: Demanda 100.420 W

www.bdigital.ula.ve

Capítulo 6

Apéndice A: Control Supervisorio - Matlab

Código 6.1: Código Control Supervisorio

```
1 function [s_demand, w_demand, h_demand]= fcn(demand,
    power, cond, clock)
2 % demand
3 s_demand = 0; w_demand = 0; h_demand = 0;
4 % solar irr, wind speed and hydr av
5 irr = cond(1); wspeed = cond(2); hav = cond(3);
6 % solar, wind and hydraulic generation now
7 sgnow = power(1); wgnow = power(2); hgnow = power(3);
8 %max generation
9 solar = 104.1*irr-3695; %max power curve
10
11 if clock >= 5.5
12     wind = 33;
13 else
14     wind = 0;
15 end
16 % wind=33;
17 if hav == 1 && clock >=3.5 %1: hydraulic energy is
    available, 0: is not
18     hydraulic = 1.5e06;
19 else
20     hydraulic = 0;
21 end
22 sw = solar + wind; sh = solar + hydraulic; wh = wind +
    hydraulic;
23 swh = solar + wind + hydraulic;
24 % all measurements array
```

```
25 all = [solar wind hydraulic sw sh wh swh];
26 % satisfy = all >= demand
27
28 %operation mode matrix [solar wind hydraulic]
29 op_mode = [ 1 0 0; 0 1 0; 0 0 1;
30             1 1 0; 1 0 1; 0 1 1;
31             1 1 1];
32 diff = min(all-demand, [], 1);
33
34 if demand == 0
35     s_demand = 0;
36     w_demand = 0;
37     h_demand = 0;
38 elseif sum(diff>=0)==0
39     s_demand = solar;
40     w_demand = wind;
41     h_demand = hydraulic;
42 else
43     [min1, index] = min(diff(diff>=0));
44     closest = find(diff==min1);
45
46 %setting demand for each case
47 switch closest(1)
48     case 1 %only solar working
49         s_demand = demand;
50         w_demand = 0;
51         h_demand = 0;
52     case 2 %only wind working
53         s_demand = 0;
54         w_demand = demand;
55         h_demand = 0;
56     case 3 %only hydraulic working
57         s_demand = 0;
58         w_demand = 0;
59         h_demand = demand;
60     case 4 %solar + wind working
61         s_demand = demand - wind;
62         w_demand = wind;
63         h_demand = 0;
```

```
64     case 5 %solar + hydraulic working
65         s_demand = demand - hydraulic;
66         w_demand = 0;
67         h_demand = hydraulic;
68     case 6 %wind + hydraulic working
69         s_demand = 0;
70         w_demand = wind;
71         h_demand = demand - wind;
72     case 7 %all on
73         s_demand = demand - wind - hydraulic;
74         w_demand = wind;
75         h_demand = hydraulic;
76 end
77
78 end
79
80 if s_demand < 0
81     s_demand = 0;
82 end
83 if w_demand < 0
84     w_demand = 0;
85 end
86 if h_demand < 0
87     h_demand = 0;
88 end
89 s_demand; w_demand; h_demand;
```

Capítulo 7

Apéndice B: Interfaz Gráfica de Usuario - Matlab GUIDE

7.1. Interfaz Gráfica de Usuario

Para mostrar de forma ordenada y resumida los resultados de la simulación se diseñó una interfaz gráfica de usuario mediante la herramienta Matlab GUIDE. La interfaz muestra la potencia que está generando cada sub-sistema de generación mediante gráficas y también exhibe las decisiones que toma el control supervisorio, en la figura 7.1 se muestra cómo luce la interfaz y en el Cuadro 7.1 se explica detalladamente cada espacio que conforma dicha interfaz.

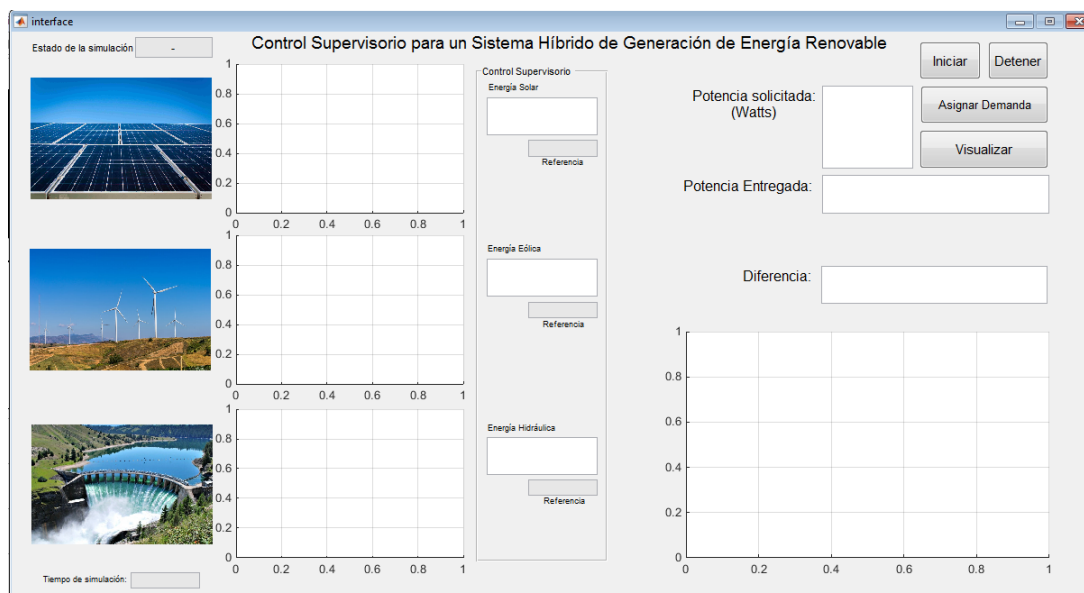


Figura 7.1: Interfaz Gráfica de Usuario

	Descripción
A	Botones iniciar y detener permiten empezar y pausar la simulación
B.1	Se muestra el estado actual de la simulación: corriendo/detenida
B.2	Se muestra el tiempo de simulación
C	La potencia solicitada debe ingresarse en el cuadro de texto que se indica, es necesario luego presionar el botón de Asignar Demanda
D	Este botón permite visualizar los resultados que se van generando en la simulación
E	Muestra la potencia generada por el sub-sistema de generación solar mediante una gráfica
F	Muestra la potencia generada por el sub-sistema de generación eólica mediante una gráfica
G	Muestra la potencia generada por el sub-sistema de generación hidráulica mediante una gráfica
H	Muestra la potencia que está siendo generada por el sub-sistema de generación solar
H.1	Referencia asignada por el control supervisorio al sub-sistema de generación solar
I	Muestra la potencia que está siendo generada por el sub-sistema sub-sistema de generación eólico
I.1	Referencia asignada por el control supervisorio al sub-sistema de generación eólico
J	Muestra la potencia que está siendo generada por el sub-sistema sub-sistema de generación hidráulico
J.1	Referencia asignada por el control supervisorio al sub-sistema de generación hidráulico
K	Muestra la potencia solicitada y la potencia entregada mediante una gráfica
L	Muestra la potencia entregada por el sistema
M	Muestra la diferencia entre la potencia solicitada y la potencia entregada

Cuadro 7.1: Descripción de la Interfaz Gráfica

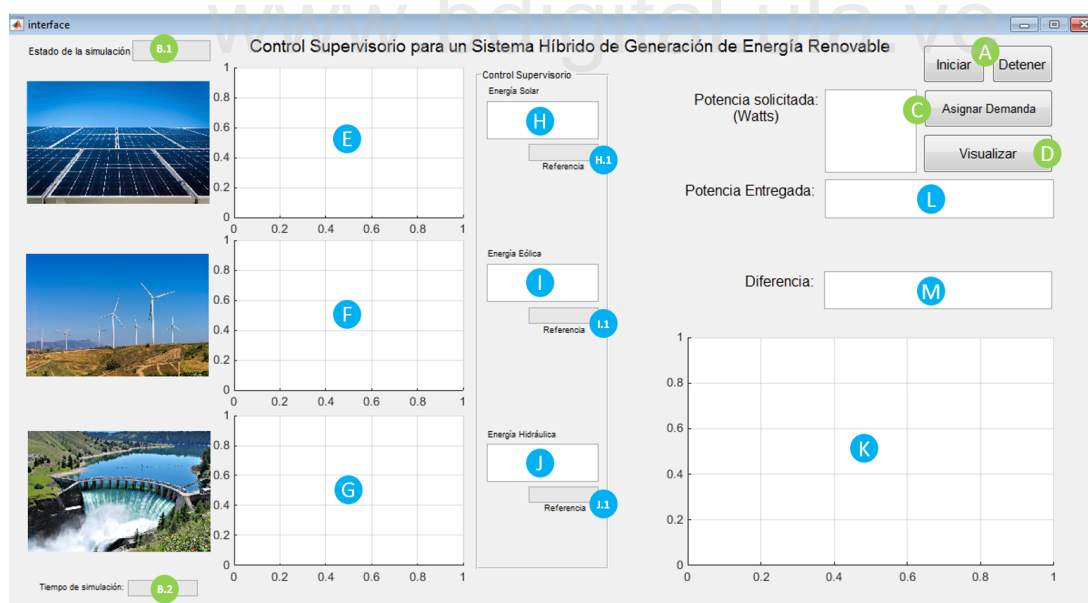


Figura 7.2: Detalle Interfaz Gráfica de Usuario

7.1.1. Pasos para correr la simulación desde la interfaz

1. Abrir los archivos: interface.m, system.slx

2. Correr el archivo interface.m para abrir la interfaz
3. Una vez abierta la interfaz, presionar el botón **Iniciar**, luego de unos segundos debe cambiar el estado de la simulación a: **corriendo**
4. Ingresar el valor de la demanda solicitada y presionar el botón **Asignar Demanda**
5. Es necesario presionar el botón **Visualizar** para que se comiencen a mostrar los resultados en la interfaz. Luego de presionar el botón **Visualizar** se comenzarán a mostrar los resultados de la simulación en los cuadros de texto (H, I, J, L y M) y en las gráficas (E, F, G y K), (el botón **Visualizar** solo se presiona una vez, ya luego los resultados se irán actualizando conforme avance la simulación).
6. El usuario puede ingresar un nuevo valor de demanda en el cuadro de texto correspondiente y presionar el botón **Asignar Demanda** para actualizar dicho valor en la simulación

www.bdigital.ula.ve

Conclusión

Se diseñó un control supervisorio capaz de definir de forma correcta los modos de operación de un sistema híbrido de generación de energía renovable que engloba tres tipos de energías primarias: energía solar, energía eólica y energía hidráulica.

Con el estudio y revisión de libros y trabajos se estudiaron diversas técnicas de generación de energía renovable, en especial, aquellas energías que conforman el sistema a controlar en este trabajo. Además, se conocieron los modelos matemáticos comúnmente utilizados para la descripción de la dinámica de las energías renovables de interés, es importante resaltar que a través de estos modelos se pueden hacer, de manera exhaustiva, los análisis necesarios con la finalidad de comprender con detalle el comportamiento de cada una de las energías que representan.

Asimismo, mediante la revisión de trabajos previos se lograron conocer algunas técnicas que permiten controlar características importantes en los sistemas de generación como lo son: la potencia activa y reactiva. Este trabajo se enfocó hacia el control de potencia activa en los tres tipos de energía. En el caso de la energía solar, la técnica utilizada fue el seguidor del punto máximo de potencia (MPPT), con este método se puede hacer control de la potencia activa de un arreglo solar de manera sencilla y eficaz. En el caso de los aerogeneradores y las turbinas hidráulicas el control de potencia activa se puede hacer mediante la implementación de controladores pertenecientes a la familia de los PID, con estos métodos se consigue controlar las turbinas eólicas e hidráulica de manera correcta. Además de los controladores de potencia activa, juegan un papel fundamental los controladores de frecuencia, cuyo objetivo principal es permitir la sincronización de los sistemas de generación con la red, no incluir estos controladores traería como consecuencia graves daños físicos al momento de suministrar la potencia generada.

El modelado del control supervisorio se hizo mediante el uso de Redes de Petri, esta herramienta ha demostrado ser útil en el modelado de sistemas, ya que permite capturar muchas características importantes y representarlas de forma sintetizada, lo que facilita la comprensión y análisis de sistemas de gran complejidad. Luego, la lógica del controlador fue codificada en un script de Matlab que se incluyó en el modelo del sistema elaborado en Simulink. A través de este script se consiguió integrar la unidad de control con el sistema a controlar.

Por último, se verificó el correcto funcionamiento del control supervisorio realizando diversas pruebas, estas pruebas básicamente consistieron en asignar diferentes valores a la demanda o potencia solicitada y corroborar que las decisiones del control supervisorio eran precisas, es decir, constatar que las referencias que se asignaban a los controladores locales eran correctas. Además de examinar que los sub-sistemas de generación respondían de manera adecuada ante las órdenes del control supervisorio.

Por lo tanto, el diseño de un control supervisorio para sistemas híbridos de generación de energía renovable cumple con los objetivos propuestos y, se comprueba que la supervisión juega un papel fundamental en sistemas tan complejos como los son los sistemas de generación de energía renovable, permitiendo la optimización del funcionamiento del sistema basándose en la toma de decisiones según ciertas condiciones predefinidas, además posibilita la monitorización de una gran cantidad de datos de forma rápida y ordenada.

www.bdigital.ula.ve

Recomendaciones

Para futuros trabajos:

- Agregar más elementos generadores en cada tipo de energía para formar granjas solares, parques eólicos e hidráulicos más grandes y así alcanzar niveles más altos de generación y suministro
- Dado que los recursos naturales son intermitentes, es importante conocer métodos que permitan almacenar la energía generada cuando sea posible, de tal forma una recomendación para este trabajo es incluir dispositivos capaces de almacenar energía eléctrica

www.bdigital.ula.ve

Bibliografía

- [1] ARCHOUR, D., CHAIB, A., KESRAQUI, M., *Modelling and Supervisory Control Hybrid Renewable Energy Based on Wind-PV-Diesel-Battery*. (2015).
- [2] BHANDARI, B., POUDEL, S.R., LEE, K., AHN, S., *Mathematical Modeling of Hybrid Renewable Energy System: A Review on Small Hydro-Solar-Wind Power Generation*. (2014).
- [3] PRAKASH, M., PREETHA, R. *Supervisory control of standalone wind/solar energy generation systems*, 2014 IEEE 8th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO). pp. 199-205, 2015.
- [4] SHEN, D., IZADIAN, A. *A Hybrid Wind-Solar-Storage Energy Generation System Configuration Control*, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, pp. 436-442, 2014.
- [5] SIRASANI, K., KAMDI, S.Y. *Solar Wind Hydro Energy System Simulation* 2013.
- [6] VENKOBARAO, V., CHINNAGOUDER, C., *Design Modeling and Simulation of Supervisor Control for Hybrid Power System*. IEEE 2013 1st International Conference on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation. pp. 156-160, 2013.
- [7] YOUNSI, S., JRAIDI, M., HAMROUNI, N., CHERIF, A., *Modelling and Control of Hybrid Renewable Energy System connected to AC grid* (2011).
- [8] HABBATI, B., RAMDANI, Y., MOULAY, F. *A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB*. NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics.
- [9] TIAN, H., MANCILLA-DAVID, F., ELLIS, K., JENKINS, P., MULJADI, E. *A Detailed Performance Model for Photovoltaic Systems*, National Renewable Energy Laboratory.
- [10] FERNANDO *Energías Renovables* Disponible en: <https://erenovable.com/energias-renovables/>
- [11] DE LA VEGA, J. *Sistemas de Energía Renovable*. 2006. Disponible en: <https://www.gestiopolis.com/sistemas-de-energia-renovable/>.
- [12] SORIANO, L., YU, W., RUBIO, J., *Modeling and Control of Wind Turbine*, Instituto Politécnico Nacional México DF. (2013).
- [13] SARKAR, R., JULAI, S., WEN TONG, C., ZHI CHAO, O., RAHMAN, M., *Mathematical modelling and simulation of induction generator based wind turbine in MATLAB/SIMULINK* (2015). Universidad de Malaya, Malaysia.
- [14] PETRI, C., *Kommunikation mit Automaten. Schriften des IIM Nr. 3. Institute für Instrumentelle Mathematik, Bonn. English translation: Communication with Automata.*, Tech Rep. RADC-TR-65-377, vol 1, 1966. Griffiss Air Force Base, New York.

- [15] MEDINA, J., SECK, J., HERNÁNDEZ, N. *Aplicación de redes de petri en la modelación de sistemas de eventos discretos*. Universidad Autónoma del Estado Hidalgo. Disponible en: <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/icbi/n1/e4.html>.
- [16] CASSAMDRAS, C., LAFORTUNE, S., *Introduction to Discrete Event System*, 2nd Edition, Springer.
- [17] MUYEEN, S., TAMURA, J., MURATA, T. *Wind Turbine Modeling* (2009).
- [18] *Photovoltaic Effect*. Disponible en: <https://www.mrsolar.com/photovoltaic-effect/>
- [19] IRTAZA, S., AMIRNASER, Y. *Simple Mathematical Model of Photo voltaic Module for Simulation in Matlab/Simulink*, (2014), Toronto, Canadá.
- [20] AGUIRRE, A., TORRES, L., MAGALDI, G. *Supervisión y Control de un Sistema Híbrido utilizando energías renovables*, (2017), San Luis, Argentina.
- [21] PEREIRA, A., *Modular supervisory controller for hybrid power systems*, (2000), Roskilde, Dinamarca.
- [22] GOW, J., MANNING, C. *Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies*.
- [23] GUTIERREZ, E., ORTA, O., GUILLÉN, J., JIMENEZ, M., OSORIO, M., GONZÁLEZ, M. *Modelado y Simulación de Celdas y Paneles Solares*, (2013).
- [24] MOMOH, J., MELIOPOULUS, S., SAINT, R. *Centralized and Distributed Generated Power Systems - A Comparison Approach*, (2012), Universidad Howard.
- [25] *Energía Solar* Disponible en: <https://www.accion.com/es/energias-renovables/energia-solar/>
- [26] AGUIRRE, I. *Análisis y Descripción de Técnicas de Automatización*, 1era. edición, 2011, Universidad de Los Andes, Venezuela.
- [27] SHERIDAN, T., BARUCH, F., POSNER, M., PEW, R. *Research Needs for Human Factors*, 1983, Washington D.C.
- [28] *Create L^AT_EX table* <https://www.tablesgenerator.com>
- [29] OSSIEZKY, C. *APO, software for Petri net analysis and synthesis*, Universidad Oldenburg, Alemania. Disponible en: <https://apo.adrian-jagus.de>
- [30] SUMANTHI, S., ASHOK, L., SUREKHA, P. *Solar PV and Wind Energy Conversion System*, Springer, 2015, India.
- [31] NANAWARE, R., SAWANT, S., JADHAV, B. *Modeling of Hydraulic Turbine and Governor for Dynamic Studies of HPP*, 2012, India.
- [32] *Hydraulic Turbine and Control Models for System Dynamic Studies*, 1992, IEEE Transactions on Power Systems.
- [33] CAMACHO, E., SAMAD, T., GARCÍA-SANZ, M., HISKENS, I. *Control for Renewable Energy and Smart Grids*, 2011.
- [34] DINCER, I. *Renewable energy and sustainable development: a crucial review*, (1999), Arabia Saudita.
- [35] ACCIONA. Disponible en: <https://www.accion.com>.

- [36] WUSTENHAGEN, R., WOLSINK, M., BURER, M. *Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept*, 2007.
- [37] SAHOO, N., ELAMWAZUTHI, N., LIM, B. *PV Panel Modelling using Simscape*, Malasia.
- [38] WASYNEZUK, O. *Dynamic Behavior of a Class of Photovoltaic Power Systems*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. -PAS-102, No. 9, September 1983.
- [39] KONG, F. *Linear and Nonlinear Model of Hydro Generator System with Surge and its Simulation*, 2017 2nd International Conference on Energy, Power and Electrical Engineering.
- [40] SHARMA, J., KUMAR, A. *Development and Implementation of Non-Linear Hydro Turbine Model with Elastic Effect of Water Column and Surge Tank*, 2014, International Journal of Electrical and Electronics Research, Vol. 2, Issue 4, pp: (234-243).
- [41] HANNETT, L., FARDANESH, B. *Field Tests to Validate Hydro Turbine-Governor Model Structure and Parameters*, IEEE Transactions on Power System, Vol. 9, No. 4, November 1994.
- [42] ABDULHAMED, H., REZA, K. *Wind Turbine Control Using PI Pitch Angle Controller* Universidad de Strathclyde, Glasgow, UK.
- [43] DHAR, S., SRIDHAR, R., AVASTHY, V. *Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays* SRM University, Chennai.
- [44] PANDIARAJAN, N., MUTHU, R. *Mathematical modeling of photovoltaic module with Simulink*, 2011, India.
- [45] HUGHES, A. *What's Behind an MPPT Algorithm?* Disponible en: <https://www.civicsolar.com/article/whats-behind-mppt-algorithm>.
- [46] GARCÍA, A. *Maximum Power Point Tracking Algorithms for Solar Photovoltaic Systems*, 2017, Universidad Politécnica de Madrid.
- [47] SANZ, D. *Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications*, 2010, Aalto University.
- [48] VIVAS, C. *Implementación de un Supervisor Basado en Sistemas Multiagentes (SMA)*, 2014, Universidad de Los Andes, Venezuela.
- [49] RUÍZ, L., BERISTÁIN, J., SOSA, I., HERNÁNDEZ, J. *Estudio del Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia Perturbar y Observar*. REVISTA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y COMPUTACIÓN, Vol. 8 No. 1, DICIEMBRE 2010.
- [50] CHOUDHARY, D., SAXENA, A. *Incremental Conductance MPPT Algorithm for PV System Implemented Using DC-DC Buck and Boost Converter*. Vol. 4, August 2014, pp.123-132.
- [51] HADAJ, P., NOWAK, M. *MPPT ALGORITHMS USED IN PHOTOVOLTAICS*. Rzeszów University of Technology.
- [52] BIANCHI, F., DE BATTISTA, H., MANTZ, R. *Wind Turbine Control Systems Principles, Modelling and Gain Scheduling Design*, Springer-Verlag London Limited 2007. ISBN-13: 9781846284922.
- [53] *Generador Síncrono* . Disponible en: https://es.m.wikipedia.org/wiki/Generador_s%C3%ADncrono.
- [54] JOHANSSON, T., MCCORMICK, K., NEIJ, L., TURKENBURG, W. *The Potentials of Renewable Energy*

- [55] SOSA, K., SPINETTI M. *Wind Turbine Dynamics*. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- [56] WONHAM, W. *Supervisory Control of Discrete-Event Systems*, Universidad de Toronto.
- [57] CANTARELLI, M. *Control system design using Supervisory Control Theory: from theory to implementation*, 2006.
- [58] COLOMER, J., MELÉNDEZ, J., AYZA J. *Sistemas de Supervisión: Introducción a la Monitorización y Supervisión Experta de Procesos, métodos y herramientas*, Volume 1, 2000.
- [59] ZHAOHUI, C. *Modeling and Simulation for an 8 kW Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic Power System*
- [60] SANGWONGWANICH, A., YANG, Y., BLAABJERG, F. *Development of flexible active power control strategies for grid-connected photovoltaic inverters by modifying MPPT algorithms*. 2017.

www.bdigital.ula.ve