

DESPACHO ECONÓMICO DE UNA RED DE ENERGÍA ELÉCTRICA
TRABAJO DE PROFUNDIZACIÓN

Ángela Patricia Clavijo Reyes



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ D.C.
NOVIEMBRE 2015

DESPACHO ECONÓMICO DE UNA RED DE ENERGÍA ELÉCTRICA
TRABAJO DE PROFUNDIZACIÓN

Ángela Patricia Clavijo Reyes

Director

Diego Alejandro Patiño Guevara, PhD



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ D.C.
NOVIEMBRE 2015

NOTA DE ADVERTENCIA

“La Universidad no se hace responsable de los conceptos emitidos por sus alumnos en sus proyectos de grado. Sólo velará porque no se publique nada contrario al dogma y la moral católica y porque los trabajos no contengan ataques o polémicas puramente personales. Antes bien, que se vea en ellos el anhelo de buscar la verdad y la justicia”.

Artículo 23 de la Resolución No 13, del 6 de julio de 1946. Por la cual se reglamenta lo concerniente a Tesis y Exámenes de Grado de la Pontificia Universidad Javeriana.

Muchas gracias a todas las personas involucradas en este proyecto, que me brindaron su apoyo y fueron un referente constante a la hora de superar los obstáculos encontrados. Como parte de estas personas incluyo a Dios por permitirme cumplir con este logro, a mi abuelito Eladio, a mi madre por creer siempre en mí, a mi director por todo su gran apoyo, todos mis compañeros que me brindaron su ayuda siempre que la necesite y a Gustavo por estar siempre incondicional para mí.

Ángela Patricia Clavijo

Tabla de contenido

1	INTRODUCCIÓN	7
2	ESTRUCTURA DE LA RED	9
2.1	GENERADOR SOLAR O FOTOVOLTAICO	10
2.1.1	CONVERSION BOOST DC/DC	11
2.1.2	COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA SOBRE EL PANEL SOLAR	12
2.2	GENERADOR EÓLICO.....	15
2.3	GENERADOR HIDRÁULICO	16
2.4	CARACTERISTICAS DE LAS BATERÍAS	16
2.5.1	INVERSOR DC/AC.....	17
2.5	NODOS DE CARGA.....	18
2.6	ESTRATEGIAS DE CONTROL.....	19
2.6.1	MPPT PANEL SOLAR	20
2.6.2	PITCH CONTROL EÓLICO/HIDRÁULICO	21
2.6.3	CONTROL DC/DC BIDIRECCIONAL.....	22
2.6.4	CONTROL VOLTAJE INVERSOR.....	¡Error! Marcador no definido.
3.	MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA EL DESPACHO ECONÓMICO	24
3.1	REPLICATOR DYNAMICS	25
3.2	DESARROLLO MATEMÁTICO	26
4.	RESULTADOS DEL DESPACHO ECONÓMICO	28
4.1	PERFIL DE RADIACIÓN SOLAR Y VIENTO	28
4.2	SOLUCIÓN AL DESPACHO ECONÓMICO POR REPLICATOR DYNAMICS.....	30
4.3	COMPORTAMIENTO GENERADOR SOLAR	32
4.4	COMPORTAMIENTO GENERADOR EÓLICO.....	33
4.5	COMPORTAMIENTO GENERADOR HIDRÁULICO.....	34
4.6	ESTABILIDAD BUS DC Y BALANCE DE POTENCIA	34
5.	CONCLUSIONES	36
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	37

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1 Características panel solar SUNPOWER SPR-305-WHT	10
Tabla 2 Valores convertidor Buck Boost	17
Tabla 3 Perfil de demanda Proyectado.....	19
Tabla 4. Resultado Despacho Economico.....	31
FIGURA 1 Esquema General de la microrred [2]	9
FIGURA 2. Diagrama de Bloques de la micro-red propuesta.....	9
FIGURA 3 Estructura Generador Solar [3].....	10
FIGURA 4 Curvas corriente vs Voltaje panel solar.....	11
FIGURA 5 Esquema conversor BOOST [5].....	11
FIGURA 6 Características panel solar	12
FIGURA 7 Efecto de la temperatura [18]	13
FIGURA 8 Curvas I-V y P-V con cambios en la temperatura.....	14
FIGURA 9 Comportamiento de la potencia con 25°C y 75°C.....	14
FIGURA 10 Compensación de las baterías ante la diferencia de carga.....	¡Error! Marcador no definido.
FIGURA 11 Modelo de generador Eólico/ Hidráulico [9].....	15
FIGURA 12 Características Turbina.....	15
FIGURA 13 Conversor Buck-Boost Bidireccional [15]	17
FIGURA 14 ESQUEMA DE CONVERTOR DC/AC	18
FIGURA 15 Potencia Estimada Vs Potencia Real.....	19
FIGURA 16 Curva potencia vs voltaje [21].....	20
FIGURA 17 Algoritmo control MPPT [7].....	21
FIGURA 18 Pitch Angle control.....	21
FIGURA 19 Esquema de la malla de control [4]	22
FIGURA 20 Señales de entrada a los sistemas de generación	28
FIGURA 21 Costos Estimados Sistemas de Generación	29
FIGURA 22 Resultados Despacho Económico.....	30
FIGURA 23 Salida generador Solar.....	32
FIGURA 24 Respuesta generador Eólico	33
FIGURA 25 Respuesta generador Hidráulico.....	34
FIGURA 26 Voltaje en el bus DC	35

1 INTRODUCCIÓN

La generación, el transporte y la distribución de energía eléctrica, son procesos que se efectúan a diario para permitir el avance y sostenibilidad de las ciudades actuales, respondiendo a la demanda de energía que crece día a día con los avances tecnológicos y con el crecimiento de la población mundial, haciendo necesario encontrar nuevas formas de generación que no afecten el medio ambiente y que constituyan una fuente inagotable de recursos.

Uno de los desafíos más grandes con el incremento de las energías renovables es el despacho de estas unidades, teniendo en cuenta los aspectos técnicos y comerciales de cada generador para poder entregar energía mediante una planeación periódica. Aparece entonces el concepto de micro-red eléctrica, en la cual se integran los generadores y los consumidores en estaciones cercanas, teniendo como beneficios: a) Disminución de pérdidas de potencia en la red de distribución, b) Mejora la capacidad de la red, c) Regulación de voltaje y frecuencia, d) Reduce las emisiones de CO₂ y mejora la operación y control del sistema [1].

Este tipo de micro-redes se divide en tres partes: Generación Distribuida, Cargas locales y Almacenamiento. En el presente trabajo, la generación será producida mediante un panel fotovoltaico, una turbina eólica y una turbina hidráulica [2] [3]; las cargas estarán representadas por 4 nodos que conmutarán durante el periodo de planeación para observar cambios en la demanda y por último la batería [4], se encargará de compensar las diferencias entre la potencia generada y la demandada.

El despacho económico de la micro-red se plantea como un problema de optimización el cual se solucionará evaluando el algoritmo Replicator Dynamics [5], teniendo a la salida la cantidad de potencia que debe entregar cada generador, con las restricciones técnicas de cada uno y los costos asociados a su operación [1] [6].

El objetivo general del presente trabajo es:

- Modelar y simular el despacho de energía eléctrica en una micro red mediante un problema de optimización de costos.

Para cumplir este objetivo es necesario apoyarse en los objetivos específicos los cuales se detallaran a continuación:

- Modelar el despacho de energía eléctrica mediante un problema de optimización con restricciones, tal que se maximice la utilidad total de la red
- Identificar, diseñar e implementar la técnica de control Replicator Dynamics para la gestión del despacho de energía en la micro red, teniendo en cuenta que esta debe adaptarse a la red eléctrica para los generadores solar, eólico e hidroeléctrico.

- Evaluar los efectos que tiene la temperatura sobre el despacho de energía eléctrica basada en energía fotovoltaica y sus posibles pérdidas en un panel solar.
- Validar los resultados obtenidos mediante simulación en MATLAB con 3 generadores y 4 nodos mediante la herramienta PowerSim de simulink.

Para cumplir con estos objetivos, en el primer capítulo se describe la micro-red desarrollada explicando sus componentes y características de operación, teniendo en cuenta los controladores implementados en cada uno de los sub-sistemas. En el tercer capítulo se formula el problema de optimización, describiendo el algoritmo utilizado y el desarrollo matemático para comprenderlo. En el cuarto capítulo se encuentran los resultados y análisis del despacho económico proyectado a 24 horas, analizando el desempeño del sistema.

2 ESTRUCTURA DE LA RED

Una micro-red es un sistema eléctrico de bajo voltaje donde la energía es generada cerca de los centros de consumo, permitiendo la integración de fuentes renovables y sistemas de apoyo como baterías que permiten compensar la naturaleza intermitente de estos generadores, balanceando el consumo de potencia [2].

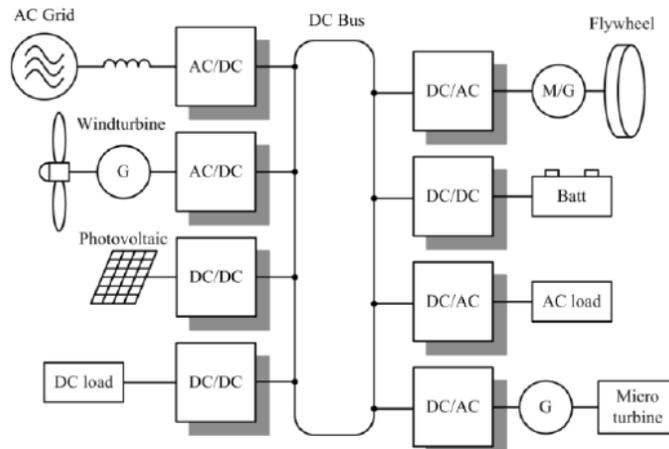


FIGURA 1 Esquema General de la microred [2]

En la figura 1, se encuentra el esquema básico de una micro-red DC, donde están los generadores renovables, las cargas y la batería de apoyo. Se utiliza una red DC porque al tener un voltaje de bus estable que permite la conexión directa con algunas cargas, la cantidad de convertidores es reducida y simple, los generadores y cargas se adaptan fácilmente sin necesidad de sincronizar señales y sirve como medio de comunicación.

El esquema general de la micro-red implementada se presenta en la figura 2, donde se escogió un voltaje de bus de $1000V_{DC}$ que es considerado como baja tensión.

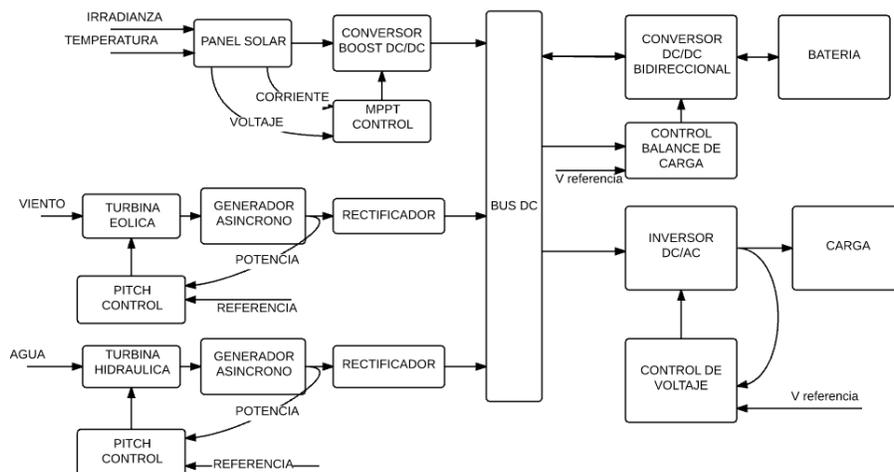


FIGURA 2. Diagrama de Bloques de la micro-red propuesta

En la figura 2 se tienen los 5 subsistemas implementados con sus respectivos elementos: Generador Solar, Generador Eólico, Generador hidráulico, Baterías, Carga AC, los cuales serán explicados a continuación.

2.1 GENERADOR SOLAR O FOTOVOLTAICO

El generador Fotovoltaico consta de 3 etapas (Panel Solar, Conversor DC/DC, Controlador MPPT). Un diagrama de bloques del sistema puede observarse en la figura 3.

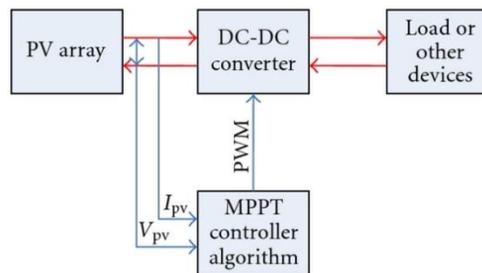


FIGURA 3 Estructura Generador Solar [3]

El primer elemento corresponde al modelo de panel fotovoltaico, para el desarrollo del proyecto se utilizó un bloque de simulink que contiene las características de un panel SUNPOWER SPR-305-WHT formado por un arreglo de 5 en serie por 66 en paralelo, las características de operación se encuentran en la tabla 1.

Característica	Valor nominal	Coefficiente de temperatura
Voltaje a circuito abierto	64.2 V	-0.177
Corriente de corto circuito	5.96 A	0.003516
Voltaje en MPPT	54.7 V	-0.186
Corriente en MPPT	5.58 A	-0.00212

Tabla 1 Características panel solar SUNPOWER SPR-305-WHT

Con los valores de la tabla 1, se calculan los valores de corriente y voltajes que van a estar a la salida del generador. El voltaje en MPPT es 54.7 V, este valor se multiplica por 5 que es la cantidad de módulos en serie obteniendo un voltaje en máxima potencia de 273.5 V, la corriente es 5.58 A y al multiplicar por los 66 módulos en paralelo se obtienen 368.28 A. Con estos valores se obtiene la potencia máxima que es 100KW. Estos valores se producen cuando la radiación solar del panel es 1000W/m². En la figura 4 se encuentran las curvas para diferentes valores de radiación solar, que son de gran utilidad para encontrar los valores máximos de despacho.

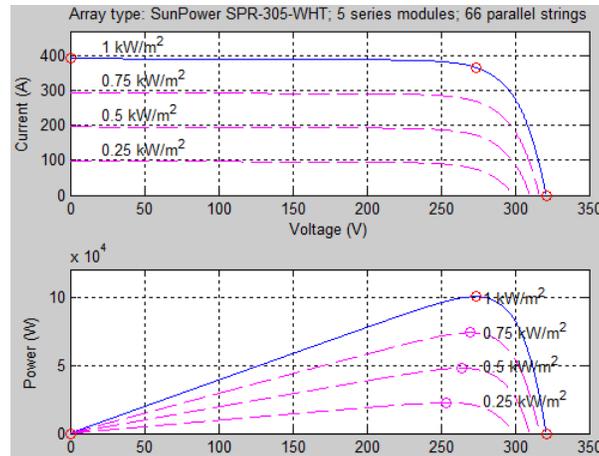


FIGURA 4 Curvas corriente vs Voltaje panel solar.

2.1.1 CONVERSOR BOOST DC/DC

El convertidor Boost DC/DC se comporta como un transformador en DC permitiendo que el voltaje de salida se eleve y puede controlarse mediante cambios en el Duty Cycle [7]. En la figura 5 se observa el esquema general de implementación de un convertidor.

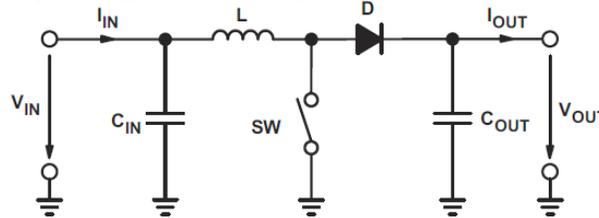


FIGURA 5 Esquema convertidor BOOST [5]

Este sistema tiene 2 estados (SW on y SW off), en el primer estado cuando el interruptor está encendido la inductancia se carga y cuando está apagado la inductancia se descarga [8] obteniendo a la salida un voltaje mayor que a la entrada.

Asumiendo una resistencia de carga equivalente de 10Ω se pueden calcular los valores de corriente del bus, ciclo útil, capacitancia e inductancia. Este valor se escogió por facilidades de cálculo.

$$I_{bus} = \frac{P}{V} = \frac{100000}{1000} = 100 \text{ A}$$

Al ser un convertidor tipo BOOST el ciclo útil se haya con la siguiente ecuación:

$$D = 1 - \frac{V_p}{V_{dc}} = 1 - \frac{273.5}{1000} = 0.7265$$

Donde V_p es el voltaje en máxima potencia del panel y V_{dc} es el voltaje nominal del bus DC. La inductancia se calcula de la siguiente forma:

$$L = \frac{V_p(V_{dc} - V_p)}{\Delta I_l f_s V_{dc}} = \frac{273.5(1000 - 273.5)}{(5)(5000)(1000)} = 7.9mH$$

Donde ΔI_l es el ripple de corriente en el inductor y f_s es la frecuencia de conmutación. El condensador de salida del convertidor se calcula mediante:

$$C_o = \frac{I_{dc}D}{f_s \Delta V_{dc}} = \frac{(100)(0.7265)}{(5000)(10)} = 1.5mF$$

Al ser un sistema conmutado, los tiempos de simulación son muy altos al igual que los recursos del computador, ya que son varios procesos corriendo iterativamente por lo que debería implementarse en un trabajo futuro, un sistema promedio que permita simular el sistema reduciendo los tiempos.

2.1.2 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE EL PANEL SOLAR

La temperatura de operación juega un rol muy importante en el proceso de conversión de energía. Tanto la eficiencia eléctrica como la potencia de salida del módulo fotovoltaico dependen de la temperatura de operación. La eficiencia de salida depende primordialmente del tipo de modulo fotovoltaico, los cuales pueden convertir en promedio entre 6 y 20% de la radiación incidente en electricidad, dentro de las características del panel implementado están las siguientes[19,20,21]:

STC Power Rating	305W
PTC Power Rating	280.6W ¹
STC Power per unit of area	17.4W/ft ² (187.0W/m ²)
Peak Efficiency	18.7%
Power Tolerances	-5%/+5%
Number of Cells	96
Nominal Voltage	not applicable
I _{mp}	5.58A
V _{mp}	54.7V
I _{sc}	5.96A
V _{oc}	64.2V
NOCT	45°C
Temp. Coefficient of Power	-0.38%/K
Temp. Coefficient of Voltage	-0.177V/K
Series Fuse Rating	15A
Maximum System Voltage	600V

FIGURA 6 Características panel solar[21]

Al estar compuestos por semiconductores, los paneles solares son sensibles a la temperatura, El efecto en la eficiencia eléctrica del panel puede obtenerse usando la ecuación fundamental de la potencia.

$$P_m = I_m V_m = (FF) I_{sc} V_{oc}$$

Donde FF es un factor de llenado, I_{sc} es la corriente de corto circuito y V_{oc} es el voltaje a circuito abierto. Los subíndices m en la primera parte de la ecuación hacen referencia al punto de máxima potencia en la curvas I-V. Incrementando la temperatura se reduce la banda de operación del semiconductor afectando la mayoría de los parámetros ya que se incrementa la energía de los electrones en el material. El voltaje de circuito abierto es el parámetro que más se afecta y su relación se puede observar en la figura 7.

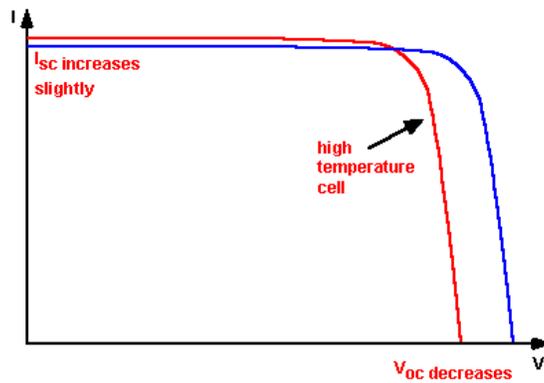


FIGURA 7 Efecto de la temperatura [18]

El factor de llenado también baja considerablemente con el aumento en la temperatura mientras que la corriente de corto circuito tiende a incrementar un poco por lo que el efecto puede relacionarse de la siguiente forma:

$$\eta_c = \eta_{ref} [1 - \beta_{ref} (T_0 - T_{ref}) + \gamma \log_{10} I(t)]$$

Donde η_{ref} es la eficiencia eléctrica del módulo a la temperatura de referencia y con una radiación solar de 1000 w/m^2 . β_{ref} es el coeficiente de temperatura, γ es el coeficiente de radiación solar. La eficiencia y el coeficiente de temperatura son brindados por el fabricante aunque pueden calcularse manualmente midiendo 2 temperaturas diferentes (T_0 y T_{ref}) ante un flujo de radiación solar determinado. Para hallar el coeficiente se utiliza la siguiente ecuación:

$$\beta_{ref} = \frac{1}{T_0 - T_{ref}}$$

Donde T_0 es la temperatura alta en la cual la eficiencia eléctrica del módulo cae a cero, en algunos módulos comerciales esta temperatura es aproximadamente 270°C . En la figura 8, se observan las curvas I-V y P-V para diferentes valores de temperatura, manteniendo constante la radiación solar

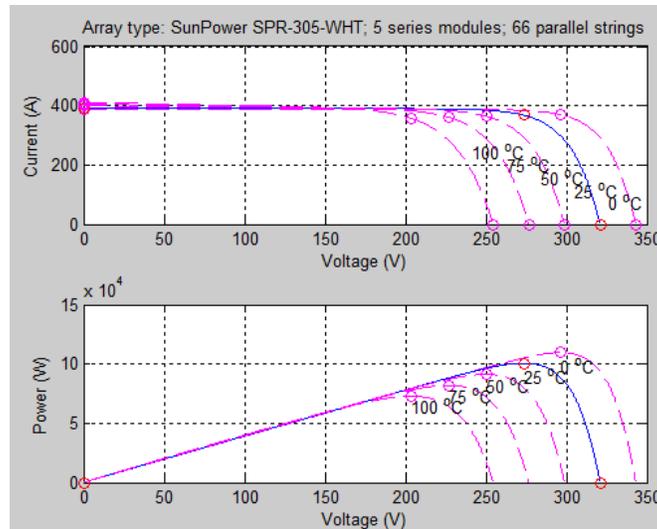


FIGURA 8 Curvas I-V y P-V con cambios en la temperatura

Para revisar el efecto de la temperatura en el sistema de despacho se le incluyó la simulación de la temperatura y se realizó una variación de ésta operando al punto de máxima potencia en donde se puede observar que la potencia que inicialmente era 100KW al cambiar la temperatura se reduce en un 19%, de este modo el despacho se puede ver afectado por que el modulo no puede entregar la potencia máxima cuando sea necesario, como se observa en la Figura 9.

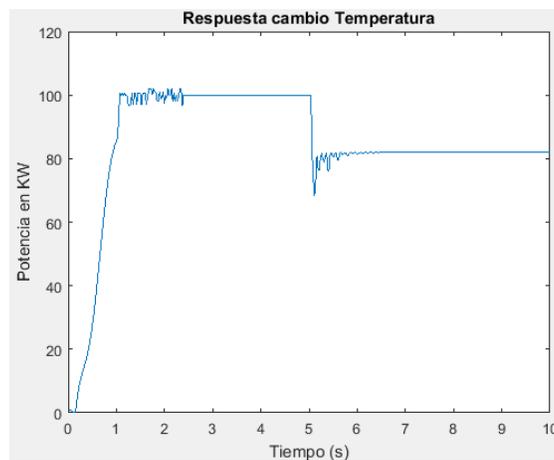


FIGURA 9 Comportamiento de la potencia con 25°C y 75°C

Esta prueba se ejecuta con temperatura ambiente de 25°C (de 0 a 5 segundos) y 75°C (de 5 a 10 segundos) observando los resultados en estado estable. Cuando este tipo de problemas se tienen asociados al panel solar, las baterías entran como el sistema de apoyo permitiendo que

el usuario final obtenga la potencia que está demandando. Como se observa en la figura 8, para el primer intervalo las baterías deben compensar 30KW que no fueron entregados por el panel y en el segundo intervalo debe entregar 50KW; estos 20KW de diferencia son a causa del incremento de la temperatura.

2.2 GENERADOR EÓLICO

Para el generador Eólico e hidráulico se utilizó el mismo principio de funcionamiento. Consiste en cinco elementos principales: la turbina, generador asíncrono, rectificador, transformador y pitch angle control. En la figura 6 se observa el modelo básico de un generador.

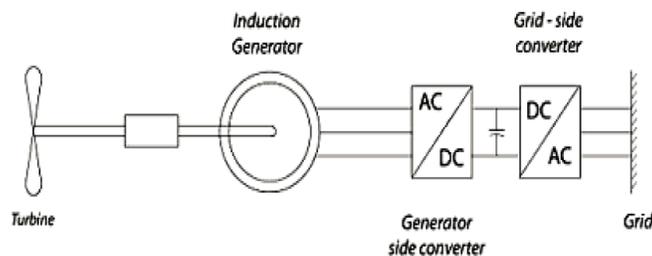


FIGURA 10 Modelo de generador Eólico/ Hidráulico [9]

La entrada a este sistema es la velocidad del viento en m/s que permite el movimiento de la turbina y genera un torque a la salida que entra al generador asíncrono, obteniendo a la salida la potencia nominal a la frecuencia determinada ya que a diferencia del modelo fotovoltaico esta señal se genera en AC [2] [10] [11].

Se utiliza una turbina eólica de la base de datos de simulink la cual tiene como entrada la velocidad del rotor, el ángulo de pitch y la velocidad del viento y a la salida está el torque, con estos datos se obtiene la figura 12, manteniendo el ángulo de pitch constante en 0 grados.

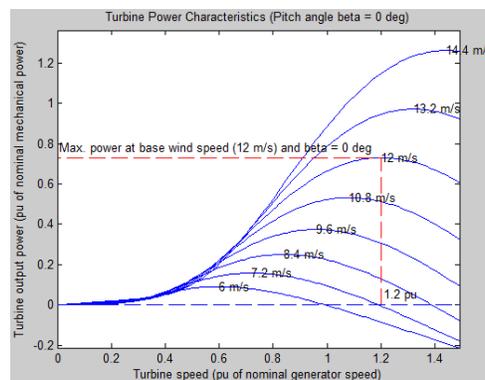


FIGURA 11 Características Turbina. Potencia Vs velocidad de torque

En la figura 7 puede observarse el comportamiento de la turbina ante diferentes velocidades de viento y su relación con la velocidad de la turbina. Al igual que el generador fotovoltaico

tiene un punto en el que opera con la máxima potencia entregando recursos con una eficiencia alta, sin embargo, para el presente proyecto no se incluyó el MPPT, sin embargo, se utiliza un control PI para estabilizar la potencia en la demanda.

El torque obtenido debe aplicarse a un generador asíncrono para poder obtener una potencia a la salida. El generador asíncrono también se encuentra en las librerías de Matlab y se ingresan los valores de operación del generador obteniendo a la salida la potencia deseada. Esta salida es una señal AC, por lo que es necesario pasar por una etapa de rectificación y de reducción del voltaje para poder conectarse al bus DC. Por esta razón, se implementa un transformador ideal que reduce el voltaje y alimenta el rectificador obteniendo a la salida un voltaje DC de aproximadamente 1000V. Sin embargo, para una aplicación de este sistema sería necesario diseñar detalladamente este tipo de circuitos.

2.3 GENERADOR HIDRÁULICO

La energía hidráulica es un tipo de energía renovable la cual se utiliza ampliamente en la industria colombiana para entregar la energía demandada por los usuarios. Es muy utilizada por su facilidad de instalación, mantenimiento e inversión. Existen dos tipos de centrales, una en que el agua que fluye se desvía por un canal y tuberías hasta alcanzar una turbina y generar electricidad; la otra forma que es la que se tiene en cuenta en este proyecto de profundización es basado en una presa donde basan su funcionamiento en el almacenaje de agua, vaciándolo por una tubería ubicada en la base de la presa que desemboca en una turbina, se utiliza este tipo de configuración para controlar la potencia controlando únicamente la velocidad del agua a la entrada. [12] [13] [14]

Para el generador hidráulico se utilizó el mismo principio de funcionamiento eléctrico que para el generador eólico. El sistema detallado se encuentra en la figura 7 de la sección 2.2, la diferencia radica en que no es necesario realizar un pitch control ya que la turbina tiene los ángulos fijos, la variable a controlar sería la velocidad en entrada del agua, este control se realiza con un controlador PI el cual sigue la referencia de potencia que se le da a la entrada, tratando de compensar la demanda.

2.4 CARACTERÍSTICAS DE LAS BATERÍAS

Se utiliza un banco de baterías de ion litio para la simulación, se selecciona este tipo de baterías ya tienen tiempo de carga cortos, tienen una vida útil con respecto a su relación costo/beneficio y tienen alta densidad de carga. Para poder integrarlas con la red, es necesario implementar un convertidor bidireccional Buck-Boost que permita cargar y descargar las baterías según las necesidades energéticas de la micro-red.

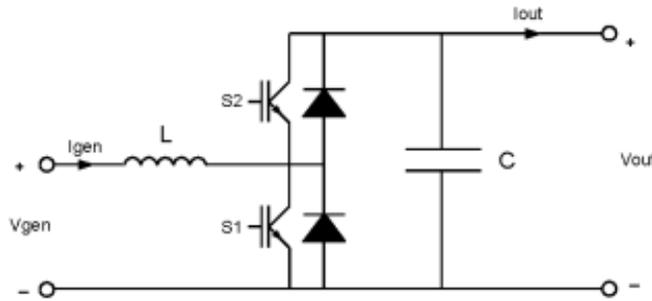


FIGURA 12 Conversor Buck-Boost Bidireccional [15]

En la figura 13 está el circuito de un conversor Buck-Boost Bidireccional, el cual es reductor- elevador para poder cargar las baterías cuando haya más potencia en el bus de la necesaria o descargarlas cuando la potencia demandada no sea cubierta por los generadores.

Para el cálculo de los componentes se utilizan las ecuaciones del convertidor Buck y Boost como se muestra a continuación:

BOOST	BUCK
$D = 1 - \frac{V_b}{V_{dc}} = 1 - \frac{500}{1000} = 0.5$	$D = \frac{V_b}{V_{dc}} = \frac{500}{1000} = 0.5$
$L = \frac{V_b(V_{dc}-V_b)}{\Delta I f_s V_{dc}} = \frac{500(1000-500)}{5(5000)(1000)} = 10\text{mH}$	$L = \frac{V_b(1-D)}{\Delta I f_s} = \frac{500(1-0.5)}{5(5000)} = 10\text{mH}$
$C_{Boost} = \frac{I_{dc} D}{f_s \Delta V_{dc}} = \frac{(100)(0.5)}{(5000)(10)} = 1\text{mF}$	$C_{Buck} = \frac{V_b(1-D)}{8L f_s^2 \Delta V_{dc}} = \frac{(100)(0.5)}{8(10\text{mH})(5000)(10)} = 2.5\mu\text{F}$

Tabla 2 Valores convertidor Buck Boost

En la tabla 2 se encuentran los valores de capacitancia e inductancia implementados en el conversor para realizar el despacho [16].

2.5.1 INVERSOR DC/AC

El inversor DC/AC permite la conexión entre el bus DC y la carga AC. El esquema de la figura 11 muestra la estructura básica del modelo. Es necesario un filtro LC a la entrada que reduzca el las oscilaciones de corriente y evite el ruido en el bus DC, a continuación se conecta con un puente H que consta de 4 transistores los cuales conmutan de acuerdo con el ciclo útil generado por la señal moduladora y de conmutación. [17]

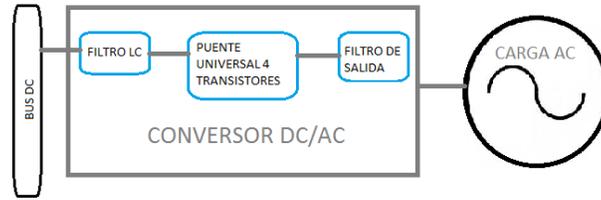


FIGURA 13 ESQUEMA DE CONVERTOR DC/AC

Se tiene un puente universal que hace parte de las librerías de simulink el cual tiene como entrada una señal DC que en este caso la entrega el Bus y a la salida tiene una señal AC con frecuencia de 60 Hz, cuya magnitud depende del índice de modulación que para este desarrollo se escogió como 0.9 en promedio ya que para compensar perturbaciones se utiliza un control que mantiene constante el voltaje a la salida el cual es de 900V pico a la salida, es decir 637Vrms.

Se definió que la carga tendrá 120Vrms y 60 Hz, por lo que es necesario utilizar un transformador que reduzca el voltaje del inversor a 120Vrms y para evitar ruido en la carga generado por la conmutación del inversor se coloca un etapa de filtrado a la salida con frecuencia de corte menor a la frecuencia de conmutación para evitar las componentes de alta frecuencia.

2.5 NODOS DE CARGA

Para simular las características de la carga se implementaron 4 nodos consumidores con diferentes potencias a lo largo del tiempo del despacho los cuales se conectan al bus DC mediante el inversor explicado en la sección 2.5. Los datos de demanda fueron obtenidos del SIEL con información real de la demanda de potencia en Colombia del año 2014, sin embargo, como los generadores solo pueden entregar 100KW en máxima potencia se escalaron los valores y se restringieron a 24 horas para proyectar la demanda esperada.

Hora	Potencia (W)	Hora	Potencia (W)	Hora	Potencia (W)
1	127984.184	9	153203.342	17	168208.6
2	122996.885	10	159833.819	18	163438.973
3	119941.299	11	166076.918	19	179627
4	118963.332	12	170216.392	20	165097.1
5	122296.808	13	167311.373	21	163394.7
6	130689.732	14	166117.71	22	167689.2
7	133855.784	15	166898.277	23	152014.973

8	142605.304	16	166115.696	24	137878.578
---	------------	----	------------	----	------------

Tabla 3 Perfil de demanda Projectado

Con los 4 nodos conmutando se tienen 4 valores de potencia diferente que se observan en la figura 10 como potencia carga. Por otro lado, se observa la demanda proyectada la cual tiene valores diferentes en todo el intervalo de planeación según datos obtenidos del sistema interconectado nacional. Las diferencias entre estos valores son compensados mediante la batería.

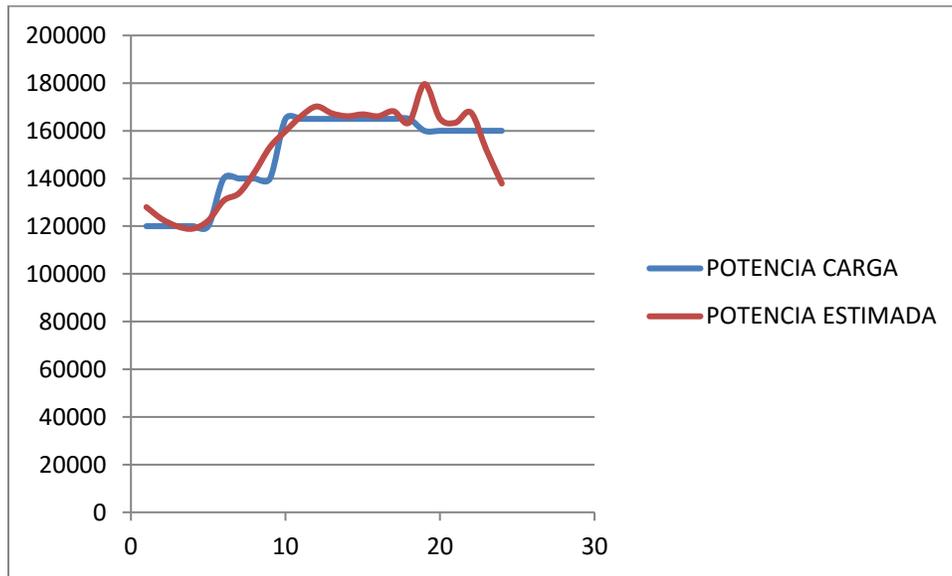


FIGURA 14 Potencia Estimada Vs Potencia Real

Los tiempos de simulación por ser un sistema conmutado son altos y para realizar la simulación con este perfil de carga es necesario dividir la simulación a trozos y unir los resultados al final.

2.6 ESTRATEGIAS DE CONTROL

Cada uno de los sistemas descritos en este capítulo tienen sus respectivos controladores para poder operar a máxima potencia o a la potencia que el despacho designe a cada uno de los generadores, a continuación se explicara el funcionamiento de cada uno.

2.6.1 MPPT PANEL SOLAR

El comportamiento del módulo fotovoltaico es no lineal como se observa en la figura 16, donde se puede apreciar que existe un único punto de eficiencia máxima y es necesario utilizar técnicas que permitan seguir el punto de máxima potencia. Hay varias técnicas que permiten encontrar este punto, cada una con sus ventajas y desventajas, las más utilizadas son [18] [19] [20]:

- Perturb & Observe (P&O)
- Incremental Conductance
- Fractional Open Circuit Voltage
- Fractional Short Circuit Current

Para el presente trabajo se escogió la técnica de Conductancia Incremental por que presenta mejor desempeño ante los cambios de radiación solar y temperatura. Esta técnica se fundamenta en seguir la pendiente de la curva PV buscando el punto donde la potencia sea máxima.

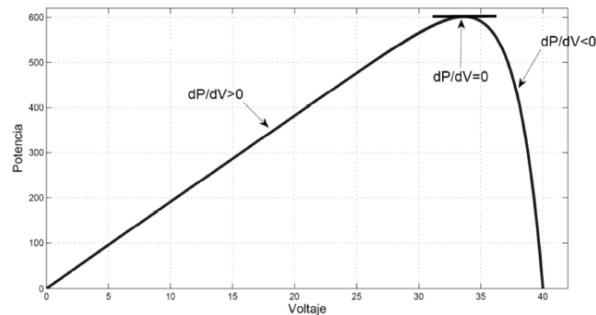


FIGURA 15 Curva potencia vs voltaje [21]

Como se observa en la figura anterior, la curva de potencia y voltaje tiene tres partes; una pendiente positiva, una pendiente negativa y un punto de máxima potencia en el cual la pendiente es cero. A continuación se muestra el algoritmo en donde existen iteraciones cuando las derivadas de voltaje y corriente son diferentes de 0 hasta que se estabilizan y llegan a cero y el sistema opera en su punto de máxima potencia.

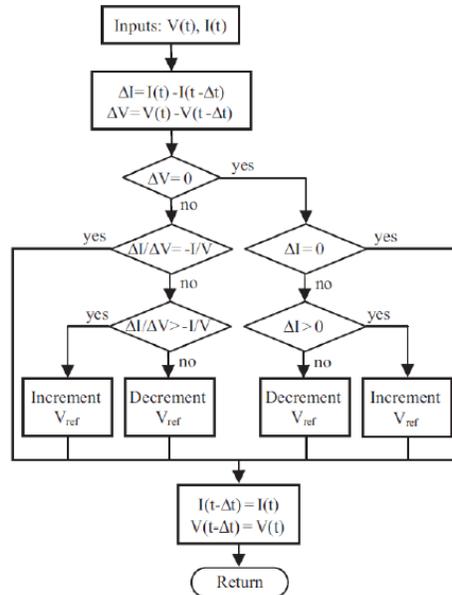


FIGURA 16 Algoritmo control MPPT [7]

El modulo Fotovoltaico continuará en su punto de máxima potencia mientras no haya cambios en la radiación solar y la temperatura, los cuales se estabilizarán dependiendo del tamaño del incremento o reducción.

Una vez conectado el generador al bus, existen 2 posibles pasos, el primero es entregar la energía a la batería y el segundo es entregar la energía a la carga. Para el caso en que se entrega a la carga, es necesario adicionar el convertor DC/AC, y en caso de que se entregue a la batería se utiliza el convertor Bidireccional, los controladores de ambos sistemas se explicaran en las siguientes secciones.

2.6.2 PITCH CONTROL EÓLICO/HIDRÁULICO

Para realizar el control de las turbina, se utilizó un “pitch angle control” inspirado en una sección del bloque de simulink “Wind Turbine Induction Generator”, donde se encuentra implementado un controlador PI para limitar la potencia de salida con la nominal o con una referencia. En la figura 14 se muestran las entradas y salidas del sistema:

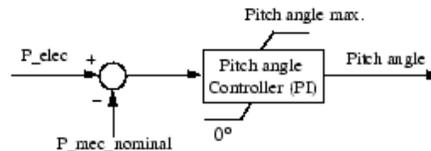


FIGURA 17 Pitch Angle control.

Este control mide la potencia generada por la turbina Eólica e Hidráulica y la compara con la referencia de potencia que entrega el Replicator Dynamics, es importante que la salida sea

igual a la referencia entregada para que el balance de potencias generadas y consumidas sea estable y no sea necesario el uso de sistemas de apoyo para balancear el sistema.

2.6.3 CONTROL DC/DC BIDIRECCIONAL

El control del convertor bidireccional busca mantener constante el voltaje del bus DC y balancear la potencia del bus. Cuando la señal de control está ON el circuito se comporta como un convertor Buck (Reductor) tomando la potencia sobrante y cargando la batería. En caso contrario, el circuito se comporta como un convertor Boost (Elevador), tomando la potencia de la batería para entregar a la carga y mantener el voltaje del bus constante. Esta señal de control se genera mediante un droop control el cual consta de dos secciones como se observa en la figura 19.

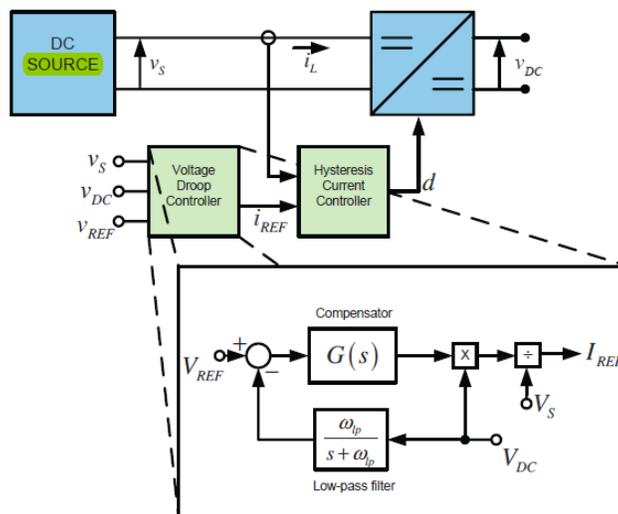


FIGURA 18 Esquema de la malla de control [4]

La primera parte consta de un droop control y tiene 3 entradas de voltaje que son el voltaje de la batería, el del bus DC y el de referencia, con las cuales se implementa un controlador PI cuya función de transferencia es:

$$G(s) = k_p \left[1 + \frac{1}{sT_i} \right]$$

La ganancia integral se obtiene así:

$$T_i = \frac{4}{\omega_{LP}} = \frac{4}{100} = 0.04$$

Donde ω_{LP} es la frecuencia de corte del filtro pasa bajos que se fijó en 100 rad/sec. Y la ganancia proporcional:

$$k_p = \frac{1}{R_{d,n}}$$

Donde $R_{d,n} = (1 - \frac{V_{dc}}{V_{ref}})(\frac{V_{dc}}{V_{ref}})\frac{V_{ref}^2}{P_r}$, P_r es la potencia nominal de las baterías. Obteniendo una constante proporcional de 1.25.

La salida de este primer bloque es la corriente de referencia que va a entrar a un control de corriente por histéresis, el cual se implementa midiendo la corriente en la inductancia y comparando con la salida del bloque de control, para estabilizar el bus DC teniendo en cuenta los cambios y perturbaciones presentados en el voltaje. Este sistema se implementa como apoyo para alcanzar un balance entre el suministro y la demanda el cual puede diferenciarse por fallos de estimación, fuentes intermitentes o daños en los equipos.

3. MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA EL DESPACHO ECONÓMICO

El problema de despacho económico [22] [23] es uno de los desafíos que se presentan en la operación de sistemas de potencia. Se trata como un problema de optimización donde el objetivo es reducir los costos totales de generación satisfaciendo las restricciones. Existen gran cantidad de métodos de optimización con los que se puede trabajar para abordar este tipo de problemas dentro de los cuales están los inspirados en teoría de juegos como el Replicator Dynamics.

El despacho es una tarea que debe realizarse diariamente en las estaciones generadoras, teniendo en cuenta los costos de operación, y las limitaciones técnicas de cada uno de los generadores en cada uno de los periodos estimados, por lo que los datos de entrada cambian dinámicamente y el optimizador debe responder de la mejor manera ante las diferencias de la demanda.

En el problema de despacho que se plantea en este trabajo los valores de trabajo son:

$$c_i^j = \text{Costo en COP por } \frac{KW}{h} \text{ del generador } i \text{ en el tiempo } j$$

$$P_{nomi}^j = \text{Potencia maxima del generador } i \text{ en el instante } j$$

$$u_i^j = \text{Utilidad del generador } i \text{ en el instante } j$$

$$P_d^j = \text{Potencia Demandada en el instante } j$$

$$P_{maxi}^j = \text{Potencia maxima del generador } i \text{ en el instante } j$$

$$P_{mini}^j = \text{Potencia minima del generador } i \text{ en el instante } j$$

La variable fundamental es:

$$p_i^j = \text{Potencia instantanea del generador } i \text{ en el tiempo } j$$

Con estos elementos se llega a la función objetivo y a las restricciones correspondientes al sistema de generación.

$$\begin{aligned} \text{MAX } u_{tot}(p_1, p_2, \dots, p_N) &= \sum_{i=1}^N u_i^j(p_i^j) \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^N p_i^j &= P_d^j == P_{nom}^j \\ P_{mini} &< P_i^j < P_{maxi} \end{aligned}$$

La potencia demanda se obtiene entonces con:

$$P_d^j = \sum_{i=1}^N P_i^{j*}$$

Es decir, la suma de las potencias óptimas en cada instante de tiempo debe ser igual a la potencia demanda. Para resolver el problema de optimización, se utiliza una función de utilidad basada en una función de costo cuadrática que se utiliza generalmente en problemas de despacho de generación distribuida [24] [25] [6]. La función es:

$$u_i(p_i) = \frac{-p_i}{c_i P_{ni}} (p_i - 2P_{ni}), \text{ para } i = 1, \dots, N$$

A partir de esta ecuación, se puede observar que la utilidad máxima es alcanzada cuando el generador entrega su máxima potencia. La forma de obtener esta ecuación será explicada en la sección 3.2.

3.1 REPLICATOR DYNAMICS

Para definir el problema de teoría de juegos se tomaran 2 jugadores denotados como P1 y P2, cada uno de estos jugadores tiene una ganancia la cual depende del orden en el que interactúen los jugadores siendo las respectivas ganancias θ_1 y θ_2 . Las estrategias de cada jugador tienen decisiones limitadas que son D1 y D2. Cada una de las decisiones que pueden tomar los jugadores depende de la decisión que tome el otro jugador por lo que el equilibrio de Nash se alcanza cuando los jugadores toman las mejores decisiones.[23,24]

Existen gran variedad de casos de estudio con poblaciones polimórficas, las cuales tienen un diverso conjunto de decisiones y los individuos no utilizan una única decisión, como por ejemplo la evolución biológica. Para atacar un problema de este tipo en el cual existe una dinámica poblacional que incluye n individuos y m decisiones se utiliza la técnica Replicator Dynamics, donde explica cómo una determinada población que utiliza una determinada estrategia se ve afectada por las estrategias del resto de la población.[25]

Los replicator dynamics se inspiran mediante la evolución biológica en donde las decisiones de cada uno de los individuos afecta lo que va a pasar con los otros, para enunciar el problema se tiene como premisa que cada individuo esta genéticamente programado para realizar la misma estrategia durante toda su vida a no ser que ocurran cambios drásticos en el proceso. Sin embargo, también hay estrategias mixtas donde el individuo varía de estrategia durante su vida

Taylor y Jonker [23] definen las dinámicas para las estrategias puras mediante las siguientes premisas:

1. Cada individuo está genéticamente programado para utilizar la misma estrategia pura durante toda su vida.

2. Cuando un individuo tiene un sucesor, éste le transfiere de manera inmediata la misma estrategia que ha venido utilizando.
3. La función de fitness de cada individuo cambia proporcionalmente a la tasa de reproducción neta de la población.

Dentro de la Técnica de Replicator Dynamics cada uno de los individuos posee una función característica conocida como función de fitness, la cual representa la dinámica de cada individuo y afecta la tasa de reproducción de la población ya que se asignan pesos diferentes a las decisiones para que el problema de optimización encuentre el óptimo.

3.2 DESARROLLO MATEMÁTICO

Se tiene un grupo de individuos de diferentes tipos, donde cada uno de ellos utiliza diferentes estrategias que le han sido programadas las cuales son transferidas a su descendencia sin modificaciones denotadas como H . Se denota como $x_i(t)$ el número total de individuos que están utilizando la estrategia i en el tiempo t y mediante esto se puede definir el tamaño total de la población como:

$$P = \sum_{i=1}^N x_i(t) \quad [1]$$

Por otro lado, se tiene el vector $p(t)$, el cual indica la cantidad total de individuos que utilizan cada estrategia; $p(t)=[p_1(t), \dots, p_n(t)]^T$, a partir de estos dos elementos se llega a la siguiente ecuación:

$$p_i = \frac{x_i}{P}$$

Donde se define el estado de la población, es decir, la cantidad de individuos que utiliza la estrategia pura i para un determinado tiempo t . Dentro de las restricciones del Replicator dynamics debe cumplirse que esta relación para todas las estrategias en un tiempo t sea 1:

$$\Delta = \{p(t) \in \mathbb{R}_+^N : \sum_{i=1}^N p_i(t) = 1\} \quad [2]$$

Ahora, se define la relación de cambio de los individuos que están utilizando la estrategia pura i en el tiempo t de la siguiente forma

$$\frac{dx_i}{dt} = (k + f_i - \lambda)x_i \quad \forall i \in H$$

Donde f_i es la función de fitness asociada a una estrategia determinada y representa la dinámica de la estrategia a lo largo del tiempo. K y λ representan la tasa de natalidad y mortandad de los individuos en una población, los cuales se asumirán como constantes.

La tasa de cambio de la población total es

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \sum_{i=1}^N \frac{\partial x_i}{\partial t} = \sum_{i=1}^N (k + f_i - \lambda)x_i = (k - \lambda) \sum_{i=1}^N x_i + \sum_{i=1}^N f_i x_i$$

Reduciendo se obtiene:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = (k - \lambda)P + \sum_{i=1}^N f_i p_i P = (k - \lambda + \bar{f})P$$

Donde \bar{f} es la función de fitness promedio, la cual está definida como:

$$\bar{f} = \frac{1}{P_d} \sum_{i=1}^N p_i f_i(p_i) \quad [3]$$

Ya que las proporciones cambian con el tiempo se realiza la derivada

$$\begin{aligned} \frac{dx_i}{dt} &= \frac{d(Pp_i)}{dt} = p_i \frac{dP}{dt} + P \frac{dp_i}{dt} \\ P \frac{dp_i}{dt} &= \frac{dx_i}{dt} - p_i \frac{dP}{dt} \\ &= (k + f_i - \lambda)p_i P - p_i(k - \lambda - \bar{f})P \\ &= (f_i - \bar{f})p_i P \end{aligned}$$

De donde se obtiene la ecuación del Replicator Dynamics

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = \beta p_i(t)(f_i - \bar{f}) \quad [4]$$

En la ecuación se puede observar que se llega a una estabilidad cuando la función de fitness es igual a la función de fitness promedio, el factor β es utilizado para llegar rápidamente a la convergencia de cada una de las estrategias.

Para obtener la función de fitness y utilizarla en este método, se realiza la derivada de la utilidad obteniendo:

$$\frac{2}{c_i} \left(1 - \frac{P_i}{P_{nomi}} \right)$$

La cual tiene la misma forma que la función de logística utilizada en biología [26].

4. RESULTADOS DEL DESPACHO ECONÓMICO

Para realizar la simulación del despacho económico se buscó correr la simulación con datos reales de consumo y de generación. El objetivo era estimar la potencia de un periodo de 24 horas para realizar el despacho, sin embargo, el sistema implementado al utilizar subsistemas conmutados tenía tiempos de respuesta muy lentos y ocupaba gran cantidad de recursos del computador, por lo que no es posible simular el despacho completo, de tal manera que se escalonaron los tiempos de simulación y se dividió en partes por que la memoria del computador no era suficiente para procesar el sistema completo. No se tienen en cuenta las impedancias de entrada a cada uno de los generadores.

4.1 PERFIL DE RADIACIÓN SOLAR Y VIENTO

El escenario de simulación implementado, para el panel solar utiliza los datos del National Radiation Data Base pertenecientes a los registros del año 2010 de una estación monitoreo en Colorado. El perfil de viento se obtuvo de [27], los datos aparecen en millas por hora pero se escaló para ingresar los valores en m/s y se escaló para cumplir con las restricciones de la turbina eólica.

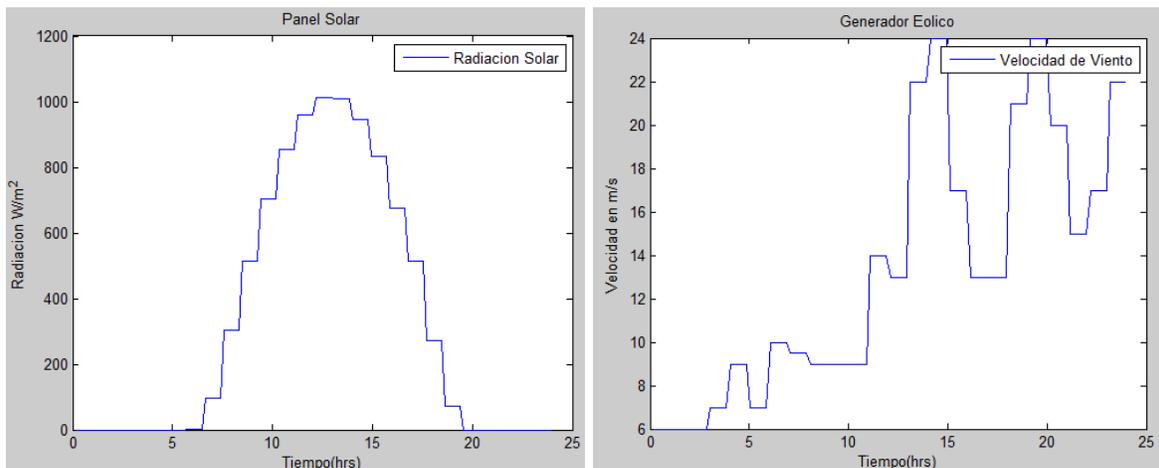


FIGURA 19 Señales de entrada a los sistemas de generación

El sistema Hidráulico no tiene una entrada ya que es la variable que se desea controlar, por lo tanto la única entrada que tiene este sistema es la potencia que indica la salida del Replicator Dynamics.

Con los datos de entradas al sistema se puede continuar con el análisis de la potencia máxima de cada uno de los generadores ya que guarda sus proporciones, es decir, mientras más radiación solar, mayor potencia el sistema es capaz de entregar y a su vez, mientras mayor

Como se observa en la figura 21, el perfil de costos del generador solar se comporta de forma inversa que la radiación solar y la potencia máxima, reduciendo costos cuando hay mayor potencia disponible y aumentándolos cuando el generador no puede cumplir con la demanda. El rango de precios del panel solar esta entre 210 COP y 310 COP por KW/h. El generador eólico no tiene un patrón de generación como el panel solar, sin embargo, sus costos también oscilan de forma proporcional con el perfil de viento y de potencia máxima; los rangos de este sistema están entre 180 COP y 230 COP, son menores que el solar ya que sus componentes tienen mayor vida útil y sus costos de mantenimiento son menores. Por último, los costos asociados al generador hidráulico son constantes ya que siempre tienen la misma potencia máxima disponible, de esta forma se estima un valor de 180 COP, ya que son sistema con vida útil larga y costos de operación y mantenimiento bajos.

4.2 SOLUCIÓN AL DESPACHO ECONÓMICO POR REPLICATOR DYNAMICS

Los datos que se ingresan al optimizador son las potencias máximas y los costos de generación durante los 24 intervalos de tiempo, los costos asociados a estas potencias y la potencia total a distribuir entre los generadores disponibles.

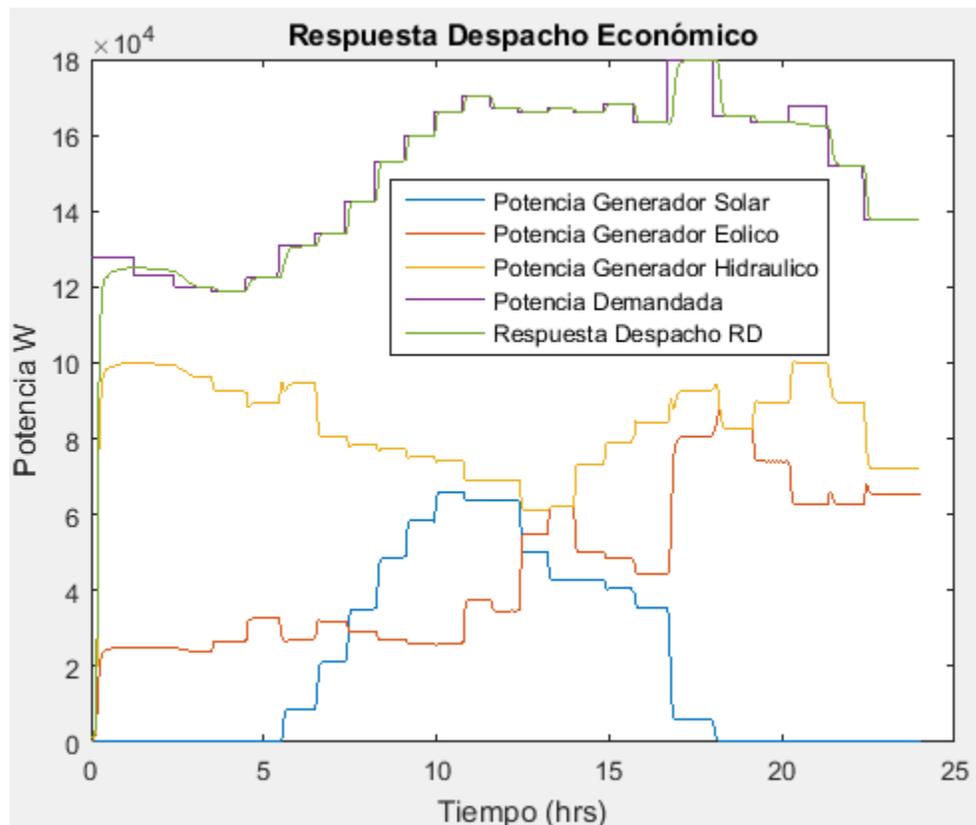


FIGURA 21 Resultados Despacho Económico

En la figura 22, se observan 5 señales correspondientes a la potencia que debe despachar cada generador, la suma de estas 3 potencia y el perfil de demanda de la red. Se puede apreciar que la salida del despacho sigue la referencia de potencia con un error menor al 1% durante todos los intervalos de tiempo, las diferencias más marcadas son por los tiempos de establecimiento y convergencia del Replicator Dynamics, sin embargo luego de un transitorio todos los intervalos tienden a converger como se observa en la tabla 4. De esta imagen se puede observar que el sistema se comporta de manera adecuada asignando correctamente los recursos a cada elemento de la red.

En el intervalo 22, la referencia de potencia no es igual que el resultado obtenido ya que la potencia que exige el sistema es mayor que la potencia que puede entregar en ese intervalo de tiempo, por lo tanto la batería entregara la potencia necesaria para complementar el valor de diferencia y poder balancear el consumo y la demanda.

INTERVALO	P DESPACHO (W)	P GENERADA (W)
1	127984	126010
2	122997	124220
3	119941	120140
4	118963	118970
5	122297	122240
6	130690	130654
7	133856	133840
8	142605	142630
9	153203	153210
10	159834	159820
11	166077	166090
12	170216	170240
13	167311	167310
14	166118	160100
15	166898	166940
16	166116	165170
17	168209	168210
18	163439	163450
19	179627	186488
20	165097	147630
21	163395	107420
22	167689	162360
23	152015	152000
24	137879	137890

Tabla 4. Resultado Despacho Económico

En la tabla 4 se encuentran los resultados obtenidos, para comparar más fácilmente los valores esperados y los obtenidos.

4.3 COMPORTAMIENTO GENERADOR SOLAR

En la Figura 23, se observa la referencia de potencia que debe seguir el generador fotovoltaico durante un intervalo de tiempo y la potencia a la salida del sistema, se sobreponen para observar el comportamiento con respecto a lo deseado.

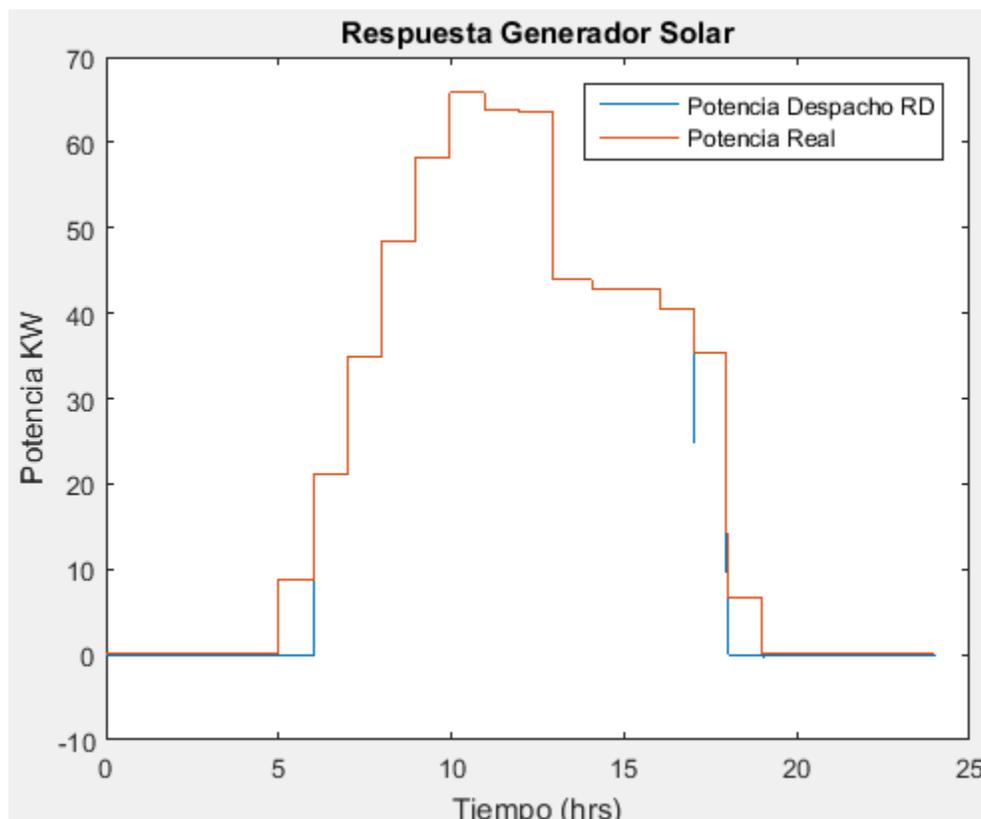


FIGURA 22 Salida generador Solar

Se puede observar que el sistema de generación fotovoltaica sigue las referencias de potencia cuando la entrada es suficiente para generar potencia a la salida. En los intervalos 1-5 y 19-24, la potencia deseada es 100W sin entradas de radiación solar, los cuales no pueden ser entregados por el panel, pero son compensados por la batería, la razón de este valor a pesar de no tener radiación solar es que el Replicator Dynamics está basado en teoría evolutiva y en el momento en que algún generador sea cero, la población se extingue y no podrá generar resultados en otro momento posterior.

En el intervalo 6 y 18 la potencia esperada no es posible generarla con la entrada de radiación solar que se tiene en ese periodo, por lo que también es necesario que las baterías compensen este valor. De ahí en adelante el sistema entrega los valores deseados con algunos transitorios que son pequeños y por la escala de la imagen no se alcanzan a observar.

4.4 COMPORTAMIENTO GENERADOR EÓLICO

A diferencia del sistema fotovoltaico las oscilaciones que se presentan en este generador son grandes, sin embargo están oscilando sobre la potencia deseada y en promedio están entregado el resultado que se desea, en estos tramos oscilatorios la batería respalda al sistema para que se entregue lo que se necesita sin afectar la carga.

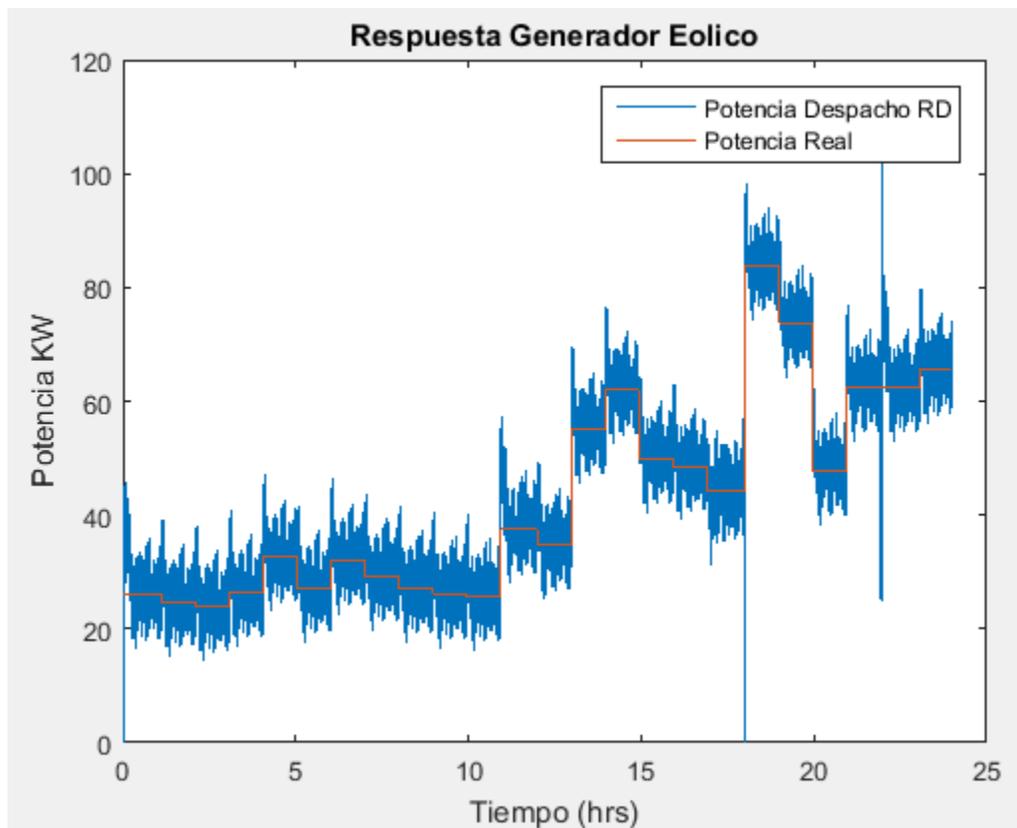


FIGURA 23 Respuesta generador Eólico

Se puede observar en la Figura 24, la potencia deseada vs la potencia entregada con oscilaciones durante la estabilización y picos grandes durante el transitorio, estos problemas pueden solucionarse encontrando un controlador más robusto que puede aplicarse en trabajos futuros sobre la planta.

4.5 COMPORTAMIENTO GENERADOR HIDRÁULICO

Al igual que el sistema operado por el generador eólico, este sistema presenta oscilaciones sobre el punto de operación proveniente en su mayoría de una débil acción de control. Al no tener un modelo definido de la planta es difícil realizar sus controladores, en trabajos futuros puede mejorarse las características de la planta para evitar los transitorios y utilizar menores tiempos de simulación.

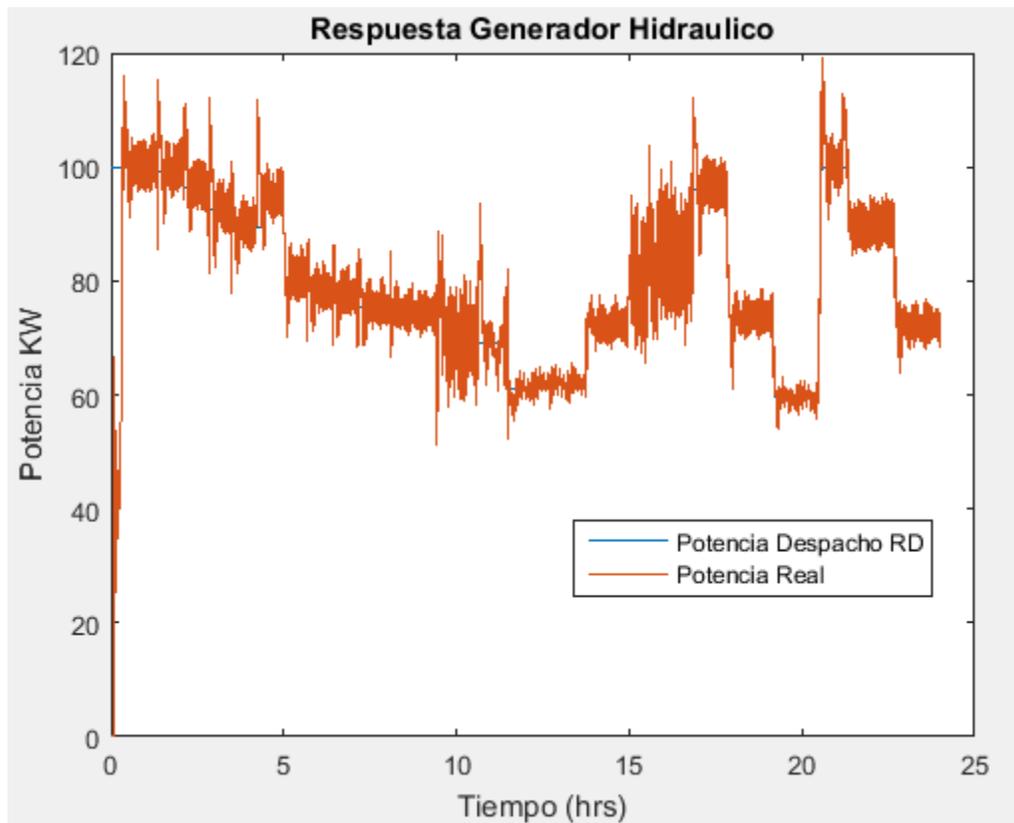


FIGURA 24 Respuesta generador Hidráulico

A pesar de no tener un control óptimo sobre este sistema las oscilaciones son menores que en el generador eólico para la mayoría de periodos, sin embargo los ruidos de alta potencia en un sistema real afectarían considerablemente el desempeño del sistema.

4.6 ESTABILIDAD BUS DC Y BALANCE DE POTENCIA

Por último se tiene el balance de potencia sobre la carga y la estabilidad del bus. En la gráfica a continuación, se puede observar que el voltaje del bus DC se mantiene constante con un error de aproximadamente el 5% a excepción de ciertos transitorios ocasionados por los cambios en las potencias, hay 24 cambios en el voltaje, los cuales reflejan los momentos en que cada uno de los generadores cambia su frecuencia para poder seguir el despacho.

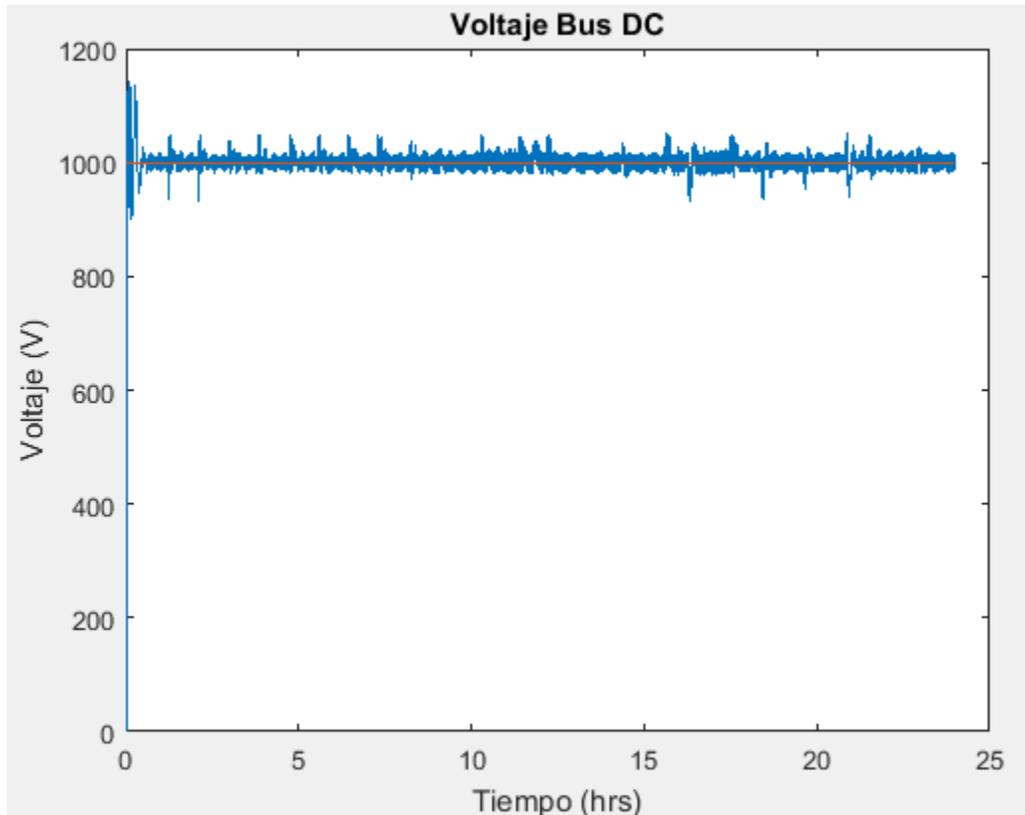


FIGURA 25 Voltaje en el bus DC

Por otro lado, el balance de potencia entre los nodos consumidores y generadores funciona correctamente entregando a la carga, la potencia que demanda durante los 24 intervalos, suministrando la potencia esperada. En estos resultados no se tuvo en cuenta la temperatura del panel ya que no se tenían valores de referencia para ingresar durante las 24 horas, sin embargo, como se explicó en el capítulo 2, cuando la temperatura sube la potencia a la salida disminuye por lo que debe compensarse con los sistemas de apoyo.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo de profundización plantea un modelo de optimización basado en teoría de juegos que se conoce como replicator dynamics, utilizado en sistemas distribuidos de energía ya que se caracteriza por utilizar todos los recursos disponibles y llegar a un equilibrio en el cual ninguna otra respuesta habría tenido mejor desempeño, la razón de implementar este tipo de sistemas es que ha sido investigado ampliamente en los últimos años y ha dado soluciones favorables con sus resultados.

Al tener un sistema balanceado, la potencia generada o demandada debe tener la misma magnitud, de forma que lo que sea generado, tenga una carga que lo consuma, sin embargo, para apoyo en casos de diferencias en este balance, están las baterías las cuales compensan estas diferencias como se observó en el proyecto, en un caso en que estuviera conectado a la red también podría apoyarse de esta para satisfacer las necesidades energéticas cuando los generadores renovables no sean suficientes.

Para ejecutar el sistema, se definieron los valores de potencia máxima, costos y potencia demandada para verificar que el despacho se comporta según lo esperado ya que la distribución de las potencias es proporcional a las características de cada generador, teniendo en cuenta el costo variable y los cambios en las potencias máximas restringidas por las entradas a lo largo del tiempo, de forma tal que cada generador entrega lo que debería para alcanzar un equilibrio de Nash que permita una solución óptima..

Al analizar el efecto de la temperatura en las simulaciones, se observó que a medida que la temperatura se incrementa, las pérdidas se incrementan y la potencia que entrega el panel disminuye, estas pérdidas están dadas por un factor de pérdida por temperatura determinado por el material con el que está fabricado el panel; estos valores son compensados por las baterías.

Al integrar los valores con la planta, los resultados no son tan estables como se esperaría, la configuración del sistema y la sintonización de los controladores de las plantas no se encuentran operando de la mejor manera porque no se realizó la caracterización del sistema, sin embargo, los resultados son lo suficientemente cercanos como para poder validar las características de la planta, así como el soporte que brindan las baterías cuando la potencia en la carga es mayor o menor que en los generadores.

Como desarrollo futuro se plantea cambiar el esquema de los generadores por un modelo promedio desarrollado en Matlab que se comporte más rápidamente ya que las simulaciones eran muy pesadas y no permitieron realizar una prueba con tiempos grandes de simulación ya que se demoraba horas y utilizaba gran cantidad de los recursos del computador.

Otro punto a desarrollar en el futuro, es implementar el sistema a pequeña escala para revisar si la distribución que se realiza mediante el replicator si es la más efectiva, además podría compararse con otro tipo de optimización como PSO para encontrar cual se comporta mejor y en qué casos específicos.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. P. a. N. Quijano, «A Population Dynamics Approach for the,» *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, vol. 58, nº 10, pp. 4559-4567, 2011.
- [2] G. J. Herbert, «A review of wind energy technologies,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, pp. 1117-1145, 2007.

- [3] G. R. Timilsina, «Solar energy: Markets, economics and policies,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 449-465, 2012.
- [4] R. A. F. Ferreira, «Analysis of Voltage Droop Control Method for dc,» de *10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, 202.
- [5] N. Quijano, *Tutorial en Teoría de Juegos y Teoría de Juegos Evolutiva*, Bogota, 2010.
- [6] N. Q. Andres Pantoja, «Dispatch of Distributed Generators Using Replicator Dynamics,» *Complexity in Engineering*, 2010.
- [7] E. Bass, *Diseño e Implementación de un Convertidor Estático para Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red con Seguimiento del Punto de Máxima Potencia..*
- [8] T. Instruments., *Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage*, Texas Instruments, 2009.
- [9] V. Ramakrishnan, *Simulation Study of wind Energy Conversion Systems*, Bharath University, 2009.
- [10] E. M. J. J. a. V. G. M. Singh, «Simulation for Wind Turbine Generators—With FAST and MATLAB-Simulink Modules,» Technical Report, NREL/TP-5D00-59195, 2014.
- [11] B. B. Rui You, «A Novel Wind Turbine Concept Based on an Electromagnetic Coupler and the Study of Its Fault Ride-through Capability,» *energies*, vol. 6, pp. 6120-6136, 2013.
- [12] EPEC, *La tecnología hidroeléctrica*, Cordoba, Argentina.
- [13] PALL, «Power Generation,» Washington, NY.
- [14] M. Odeh, «A Summary of Environmentally Friendly Turbine Design Concepts,» DOE/ID/13741, Idaho, 1999.
- [15] D. R. Northcott, «Design of a Bidirectional Buck-Boost DC/DC Converter for a Series Hybrid Electric Vehicle Using PSCAD/EMTDC,» de *Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2009.
- [16] A. A. G. MARCELA GONZÁLEZ VALENCIA, *Diseño estático de un convertidor DC/DC reductor-elevador bidireccional*, Pereira, 2009.

- [17] N. MOHAN, Power Electronics, United States: John Wiley & Sons, INC, 2003.
- [18] T. Eswam, «Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques,» *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, vol. 22, n° 2, pp. 439-449, 2007.
- [19] D. V. Soubhagya Kumar Dash, «Comparative Analysis of Maximum Power Point (MPP) Tracking Techniques for Solar PV Application using MATLAB Simulink,» de *IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering*, Jaipur, India, 2014.
- [20] S. A. Md. Ismail Hossain, «Design and Implementation of MPPT Controlled Grid Connected Photovoltaic System,» de *IEEE Symposium on Computers & Informatics*, 2011.
- [21] I. V. Banu, *Modeling of Maximum Power Point Tracking Algorithm for Photovoltaic Systems*, Faculty of Electrical Engineering: Iasi, Romania.
- [22] H. A. B. Rodrigo A. F. Ferreira, «Analysis of Voltage Droop Control Method for dc Microgrids with Simulink: Modelling and Simulation,» de *10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, 2002.