

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**La Tecnología del 50/50: Como diseñar un controlador  
óptimo para un sistema híbrido hidráulico fotovoltaico de  
generación eléctrica.  
Proyecto de Investigación**

**Andrea Carolina Hidalgo Olaya**

**Ingeniería Eléctrica y Electrónica**

Trabajo de titulación presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Ingeniero Electrónico

Quito, 18 de noviembre de 2015

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ  
COLEGIO CIENCIAS E INGENIERIAS

**HOJA DE CALIFICACIÓN  
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**La Tecnología del 50/50: Como diseñar un controlador  
óptimo para un sistema híbrido hidráulico fotovoltaico de  
generación eléctrica.**

**Andrea Carolina Hidalgo Olaya**

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Raúl Ruiz, MSc

Firma del profesor

---

Quito, 18 de noviembre de 2015

## Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: \_\_\_\_\_

Nombres y apellidos: Andrea Carolina Hidalgo Olaya

Código: 00103957

Cédula de Identidad: 0604516310

Lugar y fecha: Quito, noviembre de 2015

## RESUMEN

*Durante las últimas décadas unos de los principales problemas que han preocupado al ser humano es que la generación eléctrica tenga un bajo impacto al medio ambiente, sea efectiva y de bajo costo. Una de las soluciones planteadas ha sido la generación eléctrica híbrida utilizando recursos renovables. En este documento se presenta un controlador para un sistema híbrido conformado por energía hidráulica y energía fotovoltaica. Dicho controlador es uno del tipo PID (Proporcional Integral Derivativo) pero lo que busca es lograr un control óptimo y mejorado, para lo cual se emplean algoritmos evolutivos y adaptativos. Existen varios tipos de Algoritmos Evolutivos (EA), sin embargo, en el presente trabajo se va a comprobar la optimización del controlador PID por medio de "Particle Swarm Optimization" por sus siglas en ingles PSO, el mismo que es un algoritmo derivado de EA, además de emplear la teoría de los controladores adaptativos. Los modelos de la planta de generación eléctrica híbrida con el controlador PID y el algoritmo de optimización PSO y adaptativo son implementados en Matlab y Simulink. Para poder comprobar la factibilidad del controlador diseñado se realizarán las simulaciones en lazo abierto y cerrado.*

*Palabras clave: Controlador PID, algoritmos evolutivos, PSO, control adaptativo, optimización, recursos renovables, generación eléctrica híbrida, hidráulica, fotovoltaica.*

## ABSTRACT

*During the last years one of the main problem that people is worried about is the electric generation with a low environmental impact, effective and with low cost. One of the answers for this problem has been the hybrid electric generation using renewables resources. In this document a PID controller for a hybrid system is implemented, which is formed by hydraulic and photovoltaic energy. The PID controller has de aim of make an optimal control in the whole plant through evolutionary and adaptive algorithms. There are many types of evolutionary algorithms but this document is focused on “Particle Swarm Optimization” for its acronym PSO. The models of the hybrid power generation plant with a PID controller and optimization algorithms PSO and adaptive are implemented in Matlab and Simulink. In order to test the feasibility of the controller, there are two simulations in open and closed loop.*

*Key words: PID Controller, evolutionary algorithms, adaptive controller, optimization, renewable resources, hybrid electric generation, hydraulic, photovoltaic.*

## TABLA DE CONTENIDO

<b>Introducción .....</b>	<b>9</b>
<b>Desarrollo del Tema.....</b>	<b>11</b>
<b>Generación Eléctrica.....</b>	<b>11</b>
<b>Energía Hidráulica .....</b>	<b>11</b>
Turbinas.....	13
Almacenamiento por bombeo .....	14
Escenario actual.....	15
Costos.....	16
<b>Energía Fotovoltaica.....</b>	<b>18</b>
El Potencial del Sol .....	20
Tipo de Sistemas Fotovoltaicos.....	21
<b>Sistemas Híbridos de Generación Eléctrica .....</b>	<b>22</b>
Configuración.....	23
<b>Controladores PID.....</b>	<b>26</b>
Sintonización.....	30
<b>Optimización por Enjambre de Partículas-Particle Swarm Optimization (PSO) y Control Adaptativo .....</b>	<b>32</b>
Optimización por Enjambre de Partículas (PSO).....	32
Control Adaptativo.....	38
<b>Descripción del modelo .....</b>	<b>44</b>
<b>Resultados.....</b>	<b>53</b>
<b>Conclusiones .....</b>	<b>59</b>
<b>Referencias bibliográficas .....</b>	<b>61</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Costos central hidroeléctrica.....	16
Tabla 2. Coeficientes controlador PID.....	29
Tabla 3. Factores PID .....	31
Tabla 4. Analogía Aves vs. PSO.....	32
Tabla 5. Ventajas y desventajas del algoritmo PSO .....	36

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Acoplamiento DC .....	24
Figura 2. Acoplamiento AC .....	25
Figura 3. Acoplamiento AC/DC .....	26
Figura 4. Esquema controlador PID.....	27
Figura 5. Algoritmo PSO .....	37
Figura 6. Esquema ARX .....	40
Figura 7. Planta Fotovoltaica. ....	45
Figura 8. Planta Hidráulica .....	47
Figura 9. Planta híbrida.....	49
Figura 10. Controlador.....	51
Figura 11. Código optimización. ....	52
Figura 12. Sistema híbrido lazo abierto .....	54
Figura 13. Sistema híbrido lazo cerrado. ....	55
Figura 14. Lazo cerrado planta fotovoltaica .....	57
Figura 15. Lazo abierto planta fotovoltaica. ....	57
Figura 16. Lazo cerrado planta hidroeléctrica. ....	58
Figura 17. Lazo abierto planta hidroeléctrica. ....	59

# INTRODUCCIÓN

El impacto que la generación eléctrica por medio de combustibles fósiles como el carbono y el petróleo, o la generación nuclear, es muy grande debido a las emisiones de gases como el dióxido de carbono o del gran riesgo directo para la vida humana que estos representan, respectivamente (Enríquez, 2013). Por ejemplo se tiene que el carbono es el responsable del 50% al 90% de dióxido de carbono existente en la atmósfera (Ciesla, 2011) el mismo que es uno de los gases de efecto invernadero causantes del cambio climático y del calentamiento global. Es por estas razones que durante las últimas décadas una de las principales preocupaciones del ser humano ha sido el cambio climático generado por la industrialización del planeta. Este gran problema ha llevado a que las investigaciones y avances tecnológicos se centren no sólo en facilitar la vida de la sociedad sino también en reducir el impacto de dichos avances sobre el medio ambiente. Por este motivo muchas investigaciones y estudios se están realizando sobre métodos de generación eléctrica no convencionales, como es en este caso la generación eléctrica híbrida, es decir generación eléctrica conformada por dos tipos de sistemas de generación, que en su mayoría son recursos renovables, como en este caso en particular es un sistema conformado por generación hidráulica y fotovoltaica.

En el caso de la generación eléctrica fotovoltaica funciona por medio de paneles solares que son los encargados de extraer la irradiación solar y así producir energía eléctrica, en este tipo de energía uno de los factores claves son los recursos naturales que además de no ser eternos suelen tener una dependencia directa a la variabilidad de la irradiación solar, es decir, necesita un sistema de apoyo para cuando sus recursos no sean suficientes, por todo esto se la complementa con otro tipo de generación eléctrica, es este caso la generación hidráulica, la cual produce energía por medio de la caída del agua para que de esta manera se muevan grandes turbinas entonces, la combinación de los dos sistemas de generación es lo

que se conoce como sistema híbrido, la fusión de dos tipos de sistemas en la generación eléctrica para así poder aprovechar al máximo sus características y sobre todo tener el menor impacto sobre el medio ambiente, es decir obtener una generación eléctrica limpia. El sistema además de los principales elementos como la turbina y los paneles fotovoltaicos, está formado por bloques de convertidores AC/DC, DC/AC y DC/DC, y por el bloque de control, es decir el bloque encargado de que se cumplan con las características adecuadas y determinadas del sistema (Chintawar & Bachawad, 2015). Por lo tanto una de las piezas claves en todo sistema es la ejecución de un control óptimo.

En este trabajo se usa un controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) el cual se basa principalmente en el diseño de un controlador óptimo, lo cual se alcanza mediante buena elección de variables o ganancias  $K_p$ ,  $K_d$  y  $K_i$  de dicho controlador (Ogata, 2010). El método más utilizado y conocido para elección de dichas variables es el método de sintonización de Ziegler- Nichols, el cual no siempre resulta ser el óptimo, por lo cual se va utilizar un tipo de algoritmo evolutivo PSO en conjunto con un algoritmo adaptativo. Estos algoritmos se caracterizan por una rápida convergencia y fácil ejecución, la misma que se basa principalmente en ir delimitando el número de posibilidades para así poder escoger la mejor para cada situación dada del sistema además de adaptarse a los cambios que presenta el sistema y de no depender de los parámetros de la planta (Jawad, 2013). Si bien es cierto cuando se habla de un sistema de generación eléctrica lo importante es tener un control sobre parámetros como el voltaje, potencia activa(P), reactiva(Q) y frecuencia para así poder cumplir con los requerimientos del consumidor (Ronald, Romero, & Falcones). Se debe tener en cuenta que para cada parámetro que se desee controlar es necesario acoplar un control diferente, por lo que para este trabajo en específico se decidió desarrollar el control para el voltaje en el inversor. Cuando se habla de un sistema de generación eléctrica aislado se tiene

que controlar dos parámetros principales, el voltaje y frecuencia para así tener un equilibrio entre generación y demanda (Aguilera Realpe, 2013).

Ahora bien en el caso del presente trabajo solo se controla voltaje por lo que no se puede hablar de un sistema aislado sino de un sistema conectado a la red eléctrica grande, con la finalidad que el sistema grande de generación eléctrica se encargue del control de la frecuencia, que en el caso del Ecuador es Central Hidroeléctrica Paute-Molino. Otro aspecto importante en el presente trabajo es que se considera una carga no variable en el tiempo conectada al sistema híbrido de generación eléctrica (Aguilera Realpe, 2013).

## **DESARROLLO DEL TEMA**

### **Generación Eléctrica**

La energía eléctrica constituye una de las formas de energía más usadas en la sociedad, ya que ésta constituye la base fundamental para el desarrollo en todo aspecto de la sociedad y la humanidad, es por esto que la generación eléctrica es un aspecto muy importante, el mismo que como su nombre lo indica es la generación de energía eléctrica por medio de la transformación de otro tipo de energía como por ejemplo: cinética, potencial, térmica, luminosa o mecánica. Existen varios métodos o mecanismo utilizados para dicha transformación como lo son el uso de turbinas moviéndolas ya sea por medio de viento o agua (Valenciaga, 2001).

### **Energía Hidráulica**

Se define como energía hidráulica a aquella forma de energía renovable producida o generada por medio de la utilización de embalses de gran altura donde se almacena el agua, es decir se tiene energía potencial, la misma que en cierto momento se transforma en energía

cinética al cambiar de nivel de agua y entrar ésta en movimiento; cuando el agua fluye mueve las turbinas, se transforma la energía cinética en energía mecánica (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Power Resources Office, 2005). La turbina hace girar el rotor del generador, el cual es el que transforma dicha energía mecánica en energía útil para el planeta: la energía eléctrica. En resumen, cuando el agua cae debido a la fuerza de gravedad mueve las turbinas y generadores que producen la electricidad. Los embalses o reservorios cumplen el mismo rol de las baterías, al almacenar energía en forma de agua cuando la demanda sea baja y la producción de energía máxima durante los periodos de pico diarios y estacionales, y en el caso contrario liberar el agua cuando se necesite mover las cuchillas de las turbinas y así producir energía (Crane).

Una central hidroeléctrica por lo general está formada por una represa que se encarga de almacenar el agua, un “aliviadero” el mismo que libera el sobrante de agua de una manera controlada y una “casa de máquinas” que contiene canales que conducen el agua hacia las turbinas que convierten el caudal lineal en caudal rotativo (Crane). El generador y la turbina están interconectados para que de esta manera la rotación de la turbina provoque que el rotor del generador gire. Otras partes de una central hidroeléctrica son los diques y las estructuras de control, los mismos que no participan directamente en la generación eléctrica (Crane).

La represa crea una altura desde la cual el agua cae, una compuerta lleva el agua desde el reservorio hasta la turbina. El rápido movimiento del agua empuja las cuchillas de la turbina, las mismas que encienden la parte móvil del generador eléctrico, el rotor. Cuando las bobinas del rotor cortan el flujo por el estator la electricidad es producida. Este concepto fue descubierto por Michael Faraday en 1831 cuando él se dio cuenta que la electricidad podía ser generada por medio de la rotación de magnetos dentro de bobinas de cobre (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Power Resources Office, 2005).

Una vez que la electricidad es producida, ésta debe ser transportada o llevada a donde se la necesite, es decir a los hogares, negocios, escuelas, etc. Las represas por lo general están ubicadas en lugares remotos y alejados de las ciudades por lo que la energía debe ser transportada a través de largas distancias hasta los usuarios (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Power Resources Office, 2005).

Toda la electricidad producida en una planta eléctrica pasa primero por transformadores los cuales elevan el voltaje para que de esta manera pueda viajar largas distancia por medio de las líneas eléctricas causando bajas pérdidas. En las subestaciones locales, los transformadores reducen el voltaje para que así la electricidad pueda ser dirigida hacia un área determinada (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Power Resources Office, 2005).

Esta energía eléctrica obtenida se caracteriza por ser energía limpia y sin mayor impacto en el ambiente, aunque la construcción de una central hidroeléctrica representa una gran inversión. Sin embargo ecológicamente hablando las centrales hidroeléctricas provocan la lixiviación de los metales contenidos en grandes áreas de tierra y roca, esto debido a la inundación con agua ácida, se ha observado además que los peces de estas zonas presentan bioacumulación de mercurio. Estas inundaciones también ocasionan que los hábitats de ciertos organismos y peces se destruyan, alterando así el equilibrio ecológico. La energía hidráulica tiene la habilidad de responder rápidamente a las variaciones en las cargas o a perturbaciones del sistema, estas plantas se constituyen como los medios de producción de electricidad más eficientes, con una eficiencia del 90%. Todas estas características hacen que los proyectos hidroeléctricos sean atractivos (International Hydropower Association, 2013).

### **Turbinas**

Existen dos tipos básicos de turbinas: de impulso y de reacción; pero existen variaciones o mejoras sobre estos dos tipos de turbinas. El tipo específico de turbina

usado en una planta eléctrica depende de los requerimientos operacionales y económicos que se tenga (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Power Resources Office, 2005).

Las turbinas de reacción son el tipo de turbinas más ampliamente usado. Una turbina de reacción es una rueda horizontal o vertical que funciona con dicha rueda totalmente sumergida, reduciendo de esta forma la turbulencia. La turbina de reacción tiene el mismo principio de funcionamiento que una regadera giratoria de césped donde el agua en un punto central está bajo presión y se escapa por los extremos de las cuchillas, causando así rotación (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Power Resources Office, 2005).

Las turbinas de impulso al igual que las de reacción son ruedas horizontales o verticales, que usan la energía cinética del agua golpeando las cuchillas que causan rotación. En este tipo de turbinas las cuchillas están situadas de tal manera que el agua fluye a 170° dentro de una especie de cubierta que rodea a la rueda. Después de girar las cuchillas, el agua cae hacia el fondo de la cubierta de la rueda y fluye hacia afuera (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Power Resources Office, 2005).

Hoy en día en la mayoría de las centrales hidroeléctricas los turbogeneradores están orientados verticalmente, es decir son estructuras que sobresalen el piso de las centrales, aunque en sí toda la estructura está por debajo del piso. En algunas centrales modernas se han adoptado algunos métodos antiguos, en los que el canal de agua rodea por completo al turbogenerador (Crane).

### **Almacenamiento por bombeo**

Es un método para mantener el agua en reserva para cuando se den períodos de picos de demanda. Este almacenamiento es el bombeo del agua hacia piscinas

ubicadas arriba de la planta eléctrica en un momento en el cual la demanda de energía es baja, esto durante la media noche. Entonces el agua se la deja fluir hacia atrás a través del turbogenerador en momentos en los cuales la demanda de energía es alta y una carga alta está conectada al sistema. La gran ventaja que presenta el almacenamiento por bombeo es que los reservorios son relativamente pequeños por lo que los costos de construcción son menores en comparación con los métodos de las centrales hidroeléctricas convencionales (International Hydropower Association, 2013).

### **Escenario actual**

Muchos países están en vía de implementación de un nuevo diseño conocido como la tecnología de las turbinas de velocidad variable. Ésta permitirá una mejor provisión de servicios de soporte a la red eléctrica, en términos de calidad y suministro. En el año 2012 Francia empezó la actualización de 485MW en un proyecto de almacenamiento por bombeo con turbinas de velocidad variable, con lo que se estima que este proyecto genere un adicional de 70MWh. La producción mundial hidroeléctrica produce 3288TWh, equivalente al 16.3% de la producción eléctrica global en el 2008 (International Hydropower Association, 2013).

Actualmente el estado ecuatoriano está ejecutando muchos proyectos hidroeléctricos como:

- Coca Codo Sinclair de 1500 MW
- Sopladora de 500 MW
- Mazar de 180 MW
- Toachi Pilatón de 320 MW
- Minas La Unión de 380 MW
- San Bartolo de 53.7 MW

- Delsi Tanisagua de 116 MW
- Quijos de 50 MW (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable)

Las centrales hidroeléctricas más grandes se encuentran en la cuenca del Amazonas, donde la estación lluviosa ocurre entre los meses de abril y septiembre, y la estación seca ocurre entre octubre y marzo, todo lo contrario a lo que sucede en la cuenca del Pacífico. Es por esto que el mantenimiento de las centrales hidroeléctricas está programado para la estación seca y el mantenimiento de las centrales termoeléctricas en la estación lluviosa (Crane). El mantenimiento de los equipos de una central hidroeléctrica se divide en dos tipos: el mantenimiento eléctrico y el mantenimiento mecánico. Un mantenimiento es necesario debido, por ejemplo, a que las palas del rodete, el tubo de conducción de agua y el tubo de aspiración sufren daños cuando la presión del agua es inferior a la presión de su vapor, formándose así burbujas de gas y la turbulencia provocada por éstas erosiona los materiales que están en contacto con el agua (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Power Resources Office, 2005).

### Costos

Los costos de construcción de una central hidroeléctrica dependen de muchos factores como por ejemplo, la categoría, el modo de almacenamiento, la salida y la carga, en la Tabla 1 se detalla cada uno de los aspectos antes mencionados (International Energy Agency, 2010).

*Tabla 1. Costos central hidroeléctrica.*

Categoría	Salida	Almacenamiento	Carga	Costo(USD M/MW)
Pequeña	< 10MW	Caudal de río	Carga base	2-4

Mediana	10-100MW	Caudal de río	Carga base	2-3
Mediana	100-300MW	Presa y reservorio	Base y pico	2-3
Grande	>300MW	Presa y reservorio	Base y pico	<2

Nota. Recuperado de International Energy Agency. Copyright 2010.

Se debe tener en cuenta que cada proyecto necesita de un estudio individual debido a la naturaleza única de cada central hidroeléctrica, como son: la localización del proyecto, el tamaño y número de reservorios y la potencia suministrada a la carga de base y pico.

Por otro lado, están los costos de generación, por lo general están en el rango de 50 a 100 USD/MWh, estos costos están determinados por la cantidad de electricidad producida anualmente, estos costos se ven reducidos si el tiempo de vida de la central hidroeléctrica es extendido, por lo general estos proyectos son construidos con una vida útil de 50 a 100 años, con lo que la inversión se ve totalmente recuperada. Los costos mantenimiento y operación están estimados entre 5 a 20 USD /MWh para una central mediana o grande, claro que esto depende de la cantidad de producción eléctrica anual que la planta tenga. (International Energy Agency, 2010).

En Ecuador como se había mencionado antes se tiene en marcha el proyecto de la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair de 1500MW de potencia, con una estimado de producción de energía anual de 10370 GWh y una inversión de 2200 millones de dólares, este proyecto tenía como fecha de entrega para el primer semestre del 2014 sin embargo esto no se cumplió y ahora se espera que entre en funcionamiento para febrero de 2016. Los costos de generación en Ecuador están presentando un decrecimiento con un precio de 37.84 USD/MWh en 2008 a 32.24USD/MWh en 2017 (Salazar & Rudnick, 2008).

## Energía Fotovoltaica

El principio básico de la generación de la energía fotovoltaica es el efecto fotoeléctrico, el mismo que consiste en la absorción de fotones y emisión de electrones, es decir es la conversión de la luz en energía eléctrica. Los sistemas fotovoltaicos están formados por celdas que son las encargadas de dicho trabajo. Estas celdas fotovoltaicas tienen en su interior capas de materiales semiconductores que forman un campo eléctrico, positivo de un lado y negativo del otro, causando así que fluya electricidad. La energía eléctrica generada se usa como suministro para una carga, es decir para encender un foco por ejemplo. Para formar un sistema fotovoltaico más grande, se pueden conectar varias celdas o módulos. Muchas veces se piensa que para que la generación fotovoltaica exista es necesario la existencia del luz del sol intensa pero esto no es así ya que la generación se puede dar con normalidad en un día nublado o con lluvia ya que basta con la luz del día (European Photovoltaic Industry Association. EPIA, 2011).

Uno de los principales impedimentos o dificultades que presenta la energía fotovoltaica es el alto costo de instalación frente a una baja eficiencia, por lo que su uso se lo restringía para lugares aislados de difícil acceso y con requerimientos de potencia mínimos. Todo este escenario ha cambiado a medida que la tecnología ha ido avanzando ya que hoy en día la energía fotovoltaica tiene un costo mucho más asequible, alrededor de un 22% menos que en años anteriores, lo que ha hecho que su uso se extienda ya no solo en zonas aisladas sino también para conexiones con la red de electricidad. Se tiene que para el término del año 2010 más de 35GW fueron provenientes de electricidad fotovoltaica, además que es una energía totalmente libre de emisiones de CO<sub>2</sub>, todo esto hace pensar que para el año 2050 al menos un 20% de la demanda de energía mundial va a estar cubierta por la generación fotovoltaica. También la eficiencia de los módulos solares era de un 19.5% en el 2010 y se espera que para el 2020 sea de un 23%, con un límite de eficiencia de 30%. En los paneles

solares de unión múltiple el límite de eficiencia alcanza el 87% (European Photovoltaic Industry Association. EPIA, 2011).

El uso del recurso natural más abundante y que provee de energía gratuita, el sol, tiene varios beneficios de los cuales a continuación se explican:

- Es una energía totalmente limpia es decir su huella en el medio ambiente es nula, el promedio de uso de un panel son al menos 25 años, de tal manera que el nivel de generación de cada panel va en concordancia con su costo, por lo que también se tiene que el costo de inversión al instalar una red de paneles puede ser recuperada en un rango de 6 meses a 3 años, dependiendo del nivel de tecnología.
- Es muy versátil, es decir ésta puede ser instalada ya sea a la mitad de una red de distribución eléctrica o ser usada de forma descentralizada e independiente.
- Tiene un gran potencial de hacer o convertir a las ciudades en lugares más amigables con el medio ambiente ya que puede ser fácilmente integrada al medio urbano.
- No tiene límites substanciales para su desarrollo ya que la capacidad material e industrial es abundante, y se ha demostrado en los últimos años donde las exigencias en países como en Alemania y Japón han sido fácilmente cubiertas (European Photovoltaic Industry Association. EPIA, 2011).

Las partes principales de un sistema de generación solar son

- Módulos y celdas fotovoltaicos

Las celdas son los elementos básicos del sistema fotovoltaicos y por lo general están hechas de silicio cristalino o de material semiconductor alternativo distribuido en capas finas sobre un soporte de bajo costo.

Las celdas están conectadas entre sí para formar los módulos, estos están normalmente encerrados entre una cubierta transparente y un soporte a prueba de agua, los módulos con semiconductores alternativos por lo general están encerrados

entre dos hojas de vidrio por que no necesitan estar enmarcados. Los módulos pueden ser conectados en serie, formando los conocidos arreglos, para así incrementar el voltaje producido y luego estos arreglos conectados en serie para así incrementar la corriente (European Photovoltaic Industry Association. EPIA, 2011).

- Inversor

Los inversores son indispensables para sistemas fotovoltaicos conectados a la red, ya que transforman la corriente directa (DC), generada por los módulos fotovoltaicos, a corriente alterna (AC). Es decir, este elemento hace que el sistema fotovoltaico sea compatible con la red de distribución eléctrica y con las aplicaciones eléctricas más comunes (Alliance for Rural Electrification, 2015).

- Baterías

Los sistemas fotovoltaicos independientes requieren una batería donde guardar energía para futuros usos. Las baterías están conectadas al arreglo fotovoltaico por medio de un controlador de carga, el mismo que protege a las baterías ante una descarga o sobrecarga (Alliance for Rural Electrification, 2015).

- Estructura soporte para que los paneles puedan ser orientados hacia el sol (Alliance for Rural Electrification, 2015).

## **El Potencial del Sol**

En promedio cada metro cuadrado de terreno sobre la Tierra está expuesto a suficiente luz solar como para generar 1700kWh de energía cada año usando la tecnología existente (European Photovoltaic Industry Association. EPIA, 2011).

Mientras sólo una parte de la radiación solar puede ser usada para generar electricidad, ésta pérdida de eficiencia no constituye un desperdicio de un recurso finito como lo es en el caso de la energía producida por medio de la quema de

combustibles fósiles. Según los cálculos de la Agencia Internacional de Energía, si el 4% de las áreas secas desérticas del mundo fueran usadas para sistemas fotovoltaicos, la demanda total de energía primaria podría estar cubierta (European Photovoltaic Industry Association. EPIA, 2011).

### **Tipos de Sistemas Fotovoltaicos**

Existen básicamente dos tipos de sistemas, los que son empleados para aplicaciones que necesitan bastante potencia y aquellos empleados para aplicaciones de pequeña potencia. Hoy en día los dos tipos de sistemas están funcionando ya sea en casas para producir su propia electricidad, en lugares donde no es accesible la conexión a la red grande de energía o en medio de la red de energía como complemento a todo el sistema eléctrico (European Photovoltaic Industry Association. EPIA, 2011)..

- Sistemas conectados a la red

Cuando se tiene el sistema fotovoltaico conectado a la red se puede dar el escenario en el que exista un exceso de energía el cual debe ser devuelto a la red de electricidad, la mayoría de sistemas fotovoltaicos existentes son instalados en áreas como hogares y edificios de negocios, lo que ha hecho que el concepto de “prosumer” sea cada vez más usado, es decir que el usuario pueda ser consumidor o productor de energía y puede vender a la empresa de electricidad el exceso de energía que este tenga (Gerhardt, 2015).

A nivel de uso industrial, los sistemas fotovoltaicos pueden producir grandes cantidades de electricidad, las plantas de generación pueden ir desde los kW hasta los MW. Los paneles para estos fines por lo general son instalados sobre lugares de terreno libres, sin embargo su montaje no está limitado a estos lugares ya que también son instalados sobre edificios

industriales o almacenes, terminales o estaciones de trenes (Alliance for Rural Electrification, 2015).

- Sistemas independientes o no conectados a la red.

Estos sistemas debido a que se sustentan por sí solos, necesitan de un sistema de respaldo para cuando su producción sea excesiva o nula, para esto cuentan con un sistema de baterías. Los sistemas industriales independientes son usados para comunicaciones móviles en áreas remotas, navegación marina, señalética en carreteras, y plantas de tratamiento de agua, entre otros. Estos sistemas constituyen una buena opción en cuanto a su costo y efectividad ya que en zonas remotas el costo del cableado es alto. Los sistemas fotovoltaicos pueden cubrir desde las necesidades básicas de un hogar o proveer de energía suficiente a varios hogares, una comunidad entera o negocios pequeños (Alliance for Rural Electrification, 2015).

## **Sistemas Híbridos de Generación Eléctrica**

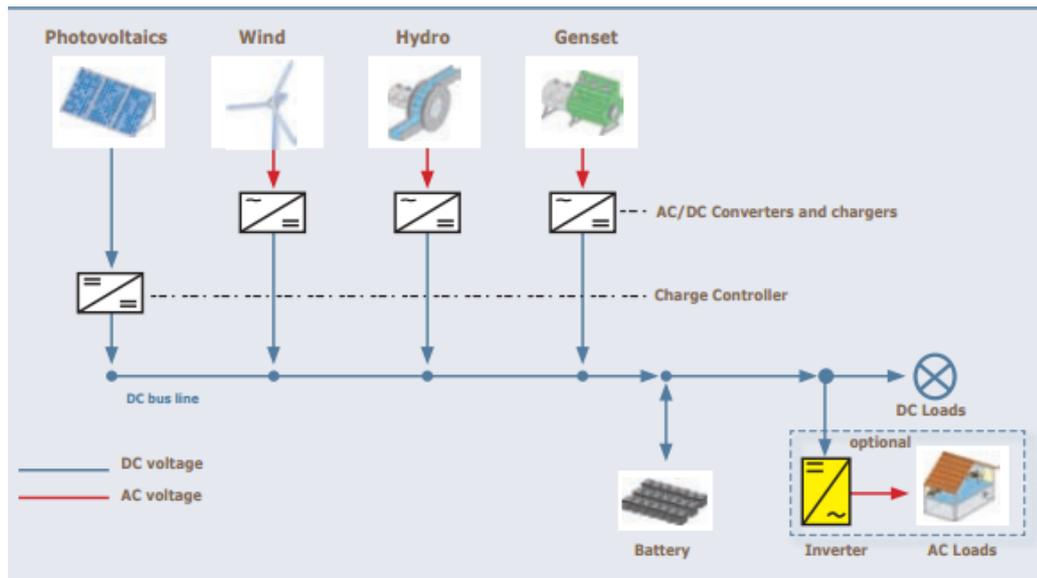
La combinación de sistemas de generación eléctrica diferentes pero complementarios basados en energías renovables, es conocida como un sistema híbrido. Estos sistemas pueden estar conectados a la red eléctrica o bien pueden funcionar de manera independiente, conocidos en inglés como sistemas en modo stand-alone, los mismos que en los últimos años han sido bastante utilizados debido a sus beneficios y facilidades (Mendoza, 2004). Una de las principales características de los sistemas híbridos es que logran fusionar las mejores características de cada una de las fuentes de energía y así proveer de electricidad de alta calidad, con un rango de potencia que puede ir desde 1kW hasta varios cientos de kW. Los sistemas híbridos tienen altos niveles de eficiencia, confiabilidad y funcionamiento por largo plazo, por lo que pueden ser usados como sistemas de respaldo a la red eléctrica o también

como soluciones energéticas en estaciones de telecomunicaciones o cuartos de emergencia en hospitales (Alliance for Rural Electrification, 2015).

### **Configuración**

Como ya se mencionó antes, un sistema híbrido combina dos o más fuentes de energía renovable, como por ejemplo paneles fotovoltaicos, turbinas de agua o viento y tecnologías convencionales como la quema de recursos fósiles. Estos sistemas también incluyen recursos de electrónica de potencia y baterías de almacenamiento de electricidad. Las configuraciones pueden ser clasificadas de acuerdo al voltaje con el cual estos sistemas estén acoplados, es decir usando líneas DC, AC y combinadas (Alliance for Rural Electrification, 2015).

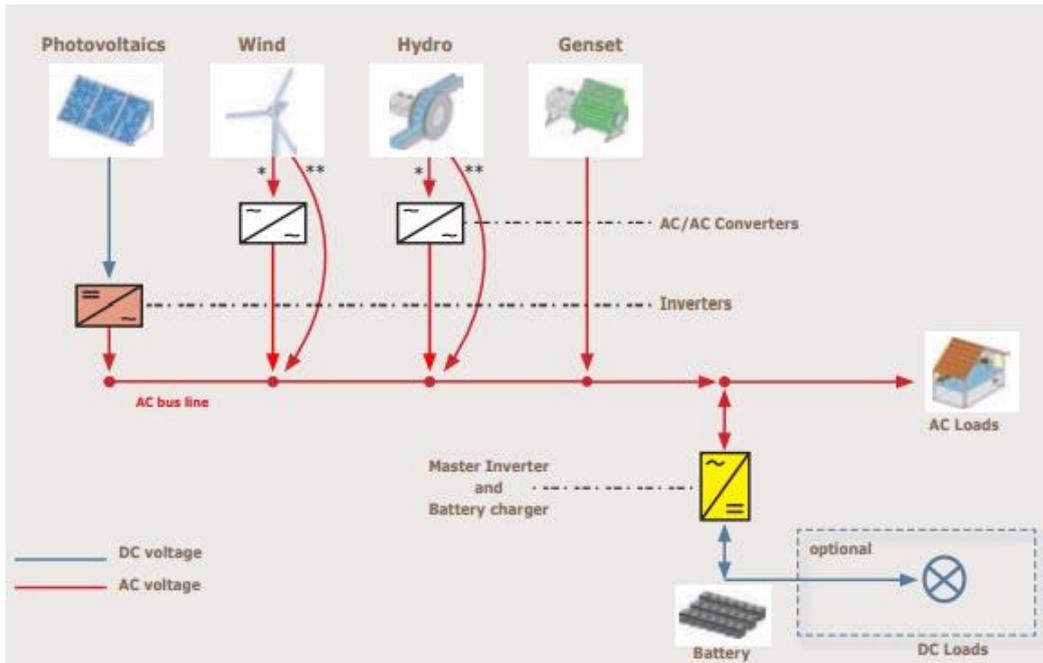
- Acoplamiento DC: Todos los componentes de generación eléctrica están conectados a una línea DC desde la cual se cargan las baterías. Los componentes AC necesitan un conversor AC/DC. Las baterías están protegidas de que exista una sobrecarga o descarga mediante un controlador de carga, por lo que éstas suplen de potencia a la carga DC de acuerdo a la demanda existente, las cargas AC pueden ser alimentadas por un inversor. (Ver Nota. Recuperado de Alliance for Rural Electrification. Copyright 2015).
- Figura 1) (Alliance for Rural Electrification, 2015).



Nota. Recuperado de Alliance for Rural Electrification. Copyright 2015.

Figura 1. Acoplamiento DC.

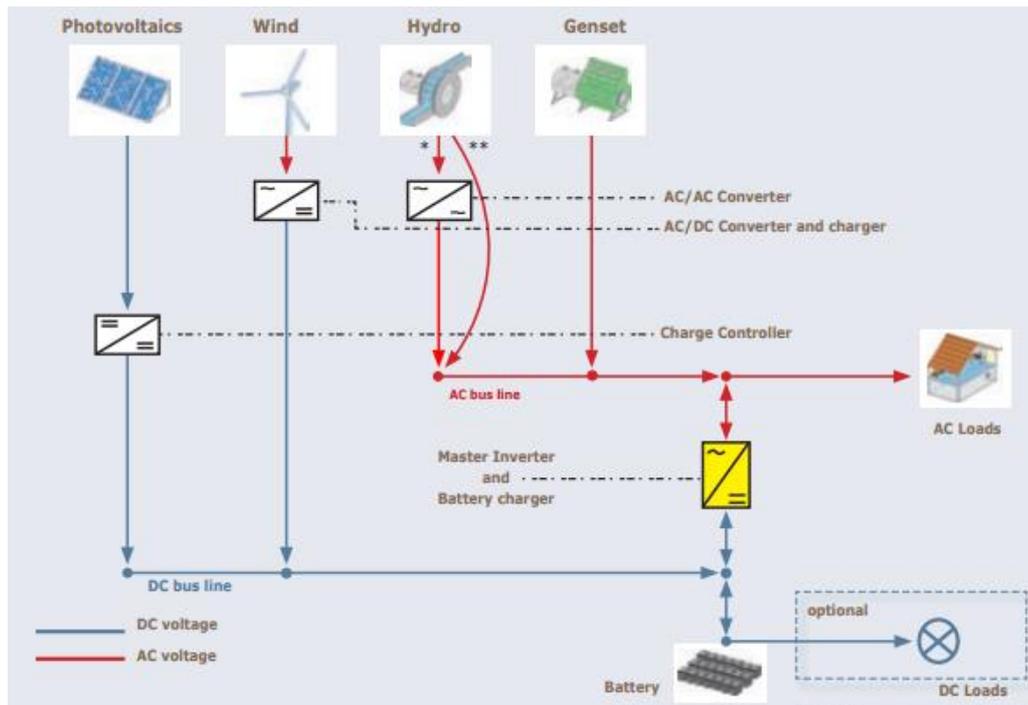
- Acoplamiento AC: En este caso todos los componentes inmersos en la generación eléctrica están conectados a una línea AC, por lo que los componentes AC pueden ser conectados directamente a la línea AC o también pueden usar un convertidor AC/AC para que así crear un acoplamiento más estable de los componentes. En las dos opciones debe existir un inversor bidireccional que se encargue de controlar la energía suministrada para las cargas AC y para las baterías, en el caso de las cargas DC estas pueden ser alimentadas por las baterías. (Ver Nota. Recuperado de Alliance for Rural Electrification. Copyright 2015).
- Figura 2) (Alliance for Rural Electrification, 2015).



Nota. Recuperado de Alliance for Rural Electrification. Copyright 2015.

Figura 2. Acoplamiento AC

- Líneas AC/DC: En este caso los componentes generadores de electricidad están conectados en ambos lados del inversor, el mismo que controla el suministro de energía hacia las cargas AC, para las cargas DC se puede usar, al igual que en el caso anterior, las baterías. En la línea AC, los componentes AC pueden estar directamente conectados a la línea AC o usar un convertidor AC/AC para crear el acoplamiento más estable de los componentes. (Ver Nota. Recuperado de Alliance for Rural Electrification. Copyright 2015).
- Figura 3) (Alliance for Rural Electrification, 2015).



Nota. Recuperado de Alliance for Rural Electrification. Copyright 2015.

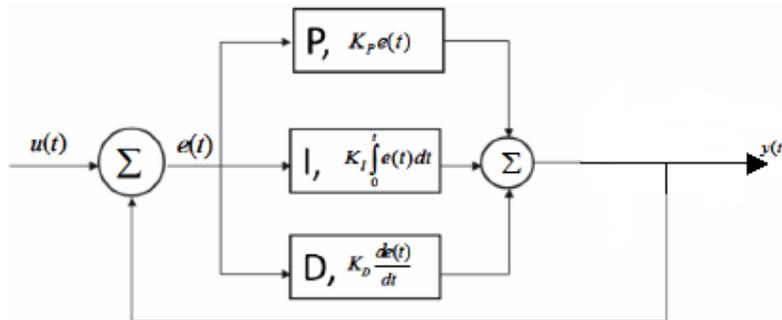
Figura 3. Acoplamiento AC/DC

Como se puede ver, en todos los modos de conexión posible se tiene la presencia de un inversor el mismo que es el encargado de convertir la corriente continua generada en este caso específico por el módulo de los paneles fotovoltaicos, a corriente alterna la cual es la que se usa en la mayoría de las aplicaciones eléctricas (Amer, Namaane, & M'Sirdi, 2013). Por lo que en este documento se pretende crear un controlador PID para dicho inversor y crear una versión optimizada de dicho controlador por medio del uso de los algoritmos PSO y de control adaptativo, los mismos que están basado en el comportamiento de los organismos en la naturaleza y de cómo adaptarse a cambios existentes en su alrededor o medio. Tanto el diseño del controlador como el método de optimización son explicados a continuación.

## Controladores PID

La idea central de un sistema de control es la de tratar de que una planta se comporte de acuerdo a los parámetros establecidos o requeridos por el usuario. Los valores a controlar

de un sistema pueden ser muy variados como por ejemplo la temperatura y velocidad, todo dependerá del tipo de sistema y de los requerimientos que el usuario tenga (M. Alvarez, 2007). En este caso en particular el controlador PID va a estar encargado de controlar el voltaje del sistema, es decir el voltaje presente en la carga de la planta de generación eléctrica.



*Nota. Recuperado de Ingeniería de Control Moderno. Copyright 2010.*

*Figura 4. Esquema controlador PID*

De la Nota. Recuperado de Ingeniería de Control Moderno. Copyright 2010.

Figura 4 se puede observar que el error  $e(t)$  es calculado mediante la resta del set point  $u(t)$  menos la variable del proceso  $y(t)$  en cualquier instante del tiempo (Ogata, 2010). La ecuación de la entrada del controlador estaría determinada por la ecuación 1 (National Instruments, 2011):

$$y(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Donde:

- $K_p e(t)$ : Es el término proporcional, es decir  $K_p$  es la ganancia proporcional del controlador.
- $K_i \int_0^t e(t) dt$ : Es la parte integral del controlador con su respectiva ganancia  $K_i$ .

- $K_d \frac{de(t)}{dt}$ : Constituye la parte derivativa del controlador con su ganancia derivativa  $K_d$  (Ogata, 2010).

Usando estos tres términos y ajustando la entrada  $u(t)$  el controlador disminuye el error. La función de transferencia del controlador PID quedaría entonces como sigue, en la ecuación 2 (Ogata, 2010):

$$K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{K_p s^2 + K_i s + K_d s^3}{s} \quad (2)$$

Los controladores Proporcionales Integrales Derivativos constituyen los más usados en el control industrial, debido a que su rendimiento es confiable y su simplicidad de desarrollo esto en una amplia gama de condiciones operativas (National Instruments, 2011). Un controlador PID está basado o su eje principal son tres coeficientes, proporcional, integral y derivativo, estos coeficientes son los que determinan el óptimo funcionamiento del controlador, es decir son los parámetros a determinarse (Jawad, 2013).

- Coeficiente Proporcional

Este componente depende de la diferencia existente entre el valor definido o set point y la variable del proceso, es decir el error. Dicha variable se refiere al parámetro del sistema que se necesita controlar, mientras que el set point es el valor requerido para la variable del proceso. En el caso del controlador que se está diseñando en este trabajo la variable a controlar es el voltaje y el set point es el dado por la carga. La ganancia proporcional  $K_c$  al verse incrementada, hará que la velocidad del control del sistema también aumente, sin embargo si  $K_c$  es muy grande la variable del proceso empezará a tener oscilaciones y por lo tanto el sistema se volverá inestable (National Instruments, 2011).

- Coeficiente Integral

Este componente suma el error a través del tiempo, lo que da como resultado que una mínima variación del error cause que este coeficiente aumente. Si el error es cero entonces la respuesta de este coeficiente detendrá su incremento lo que a su vez provocará que el error en estado estable sea cero. Este error en estado estable es la diferencia final existente entre la variable del proceso y el set point (National Instruments, 2011).

- Coeficiente Derivativo

Dicho coeficiente causa un decrecimiento de la salida en el caso de que la variable del proceso tenga un incremento rápido. La respuesta derivativa es proporcional al ratio de cambio de la variable del proceso. Por otro lado se tiene que si se aumenta el tiempo de derivación el control del sistema sea más estable, es decir el sistema responda de mejor manera a los cambios y al error existente. Sin embargo el tiempo de derivación que se usa generalmente es pequeño ya que la respuesta derivativa es altamente sensible al ruido existente en la variable del proceso por lo que puede ocasionar que el control del sistema sea inestable (National Instruments, 2011).

En resumen las características en lazo cerrado de los coeficientes de un controlador PID, se presentan a continuación en la Tabla 2 (Control Tutorials for Matlab and Simulink, 2015):

*Tabla 2. Coeficientes controlador PID*

Respuesta en lazo cerrado	Tiempo de Subida	Sobreelongación	Tiempo de Asentamiento	Error en estado estable
Kp	Decrece	Aumenta	Cambio pequeño	Decrece
Ki	Decrece	Aumenta	Aumenta	Eliminado
Kd	Cambio pequeño	Decrece	Decrece	No cambia

Nota. Recuperado de Control Tutorials for Matlab and Simulink. Copyright 2015.

### **Sintonización**

Otro de los factores determinantes en un buen diseño de un controlador es la sintonización de sus coeficientes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ , para así poder tener una respuesta lo más óptima posible. Existen varios métodos de sintonización de estos coeficientes, como el método de “prueba y error” y el método de Ziegler- Nichols, que son los más utilizados.

En el caso del método de prueba y error las variables  $K_i$  y  $K_d$  son establecidos en cero y la variable  $K_p$  se la varia de forma incremental hasta que la salida del lazo comience a oscilar (Ogata, 2010). Como se sabe a medida que la ganancia proporcional  $K_p$  aumenta el sistema se vuelve más rápido, con este factor ya determinado para obtener la salida deseada, el próximo paso es establecer el factor integral de tal manera que éste detenga las oscilaciones, este factor reduce el error en estado estable pero incrementa la sobreelongación, el cual no siempre es malo ya que ayuda a que la respuesta del sistema sea más rápida. El último factor, el derivativo, es ajustado o determinado de tal manera que el error en estado estable sea cero. El valor del factor derivativo se lo va aumentando de tal manera que el lazo sea lo suficientemente rápido para alcanzar el set point dado por la carga del sistema. El aumento en el factor derivativo ocasiona que la sobreelongación disminuya y se mantenga una ganancia alta con estabilidad pero con el sistema altamente sensible al ruido. Como se ve no siempre se va a poder tener todos los factores funcionando en su punto más óptimo, es decir siempre se va tener que comprometer alguna característica para así mejorar otra característica, todo esto dependerá de las propiedades de funcionamiento que se necesiten en el sistema (Ogata, 2010).

El método de sintonización de Ziegler- Nichols es bastante similar al método antes descrito, donde los factores I y D son establecidos como cero y a P se lo incrementa hasta que el lazo comienza a oscilar. Una vez que la oscilación empieza, la ganancia crítica  $K_c$  y el periodo de oscilación  $P_c$  son factores que aparecen en el sistema. Los factores P, I y D son ajustados en lazo cerrado de la siguiente manera, en la Tabla 3 (Ogata, 2010):

*Tabla 3. Factores PID*

Control	$P_c$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5K_c$	-	-
PI	$0.45K_c$	$P_c/1.2$	-
PID	$0.60K_c$	$0.5P_c$	$P_c/8$

Nota. Recuperado de Ingeniería de Control Moderno. Copyright 2010.

Las ventajas de este método son:

- Solo se necesita variar el coeficiente P
- Incluye la dinámica de todo el proceso lo cual permite tener una mejor visión del comportamiento del sistema (James Bennett, 2006).

Las desventajas que este método podría presentar serían las siguientes:

- El proceso de sintonización puede llevar bastante tiempo.
- Existe la posibilidad de que se entre en zonas inestables al momento de probar el factor P, con lo que se puede tener un sistema fuera de control (James Bennett, 2006).

## Optimización por Enjambre de Partículas - Particle Swarm Optimization (PSO) y Control Adaptativo

### Optimización por Enjambre de Partículas (PSO)

Como se ha descrito anteriormente para lograr un óptimo funcionamiento del controlador PID se tiene que establecer correctamente los factores  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ . Para lo cual en el presente trabajo se pondrá en ejecución el algoritmo de optimización PSO.

El algoritmo PSO es un método de optimización desarrollado en 1995 por Kennedy y Eberhart, el cual consiste o se basa en el comportamiento social de organismos, por ejemplo el banco de peces o bandadas de aves (Qinghai, 2010). La bandada de aves buscan su comida en conjunto sin embargo, siempre va a existir una ave que pueda buscar de mejor manera la comida, es decir, dicha ave tiene una mejor percepción del lugar donde existe comida siendo así esta ave la mejor fuente de información de la bandada, en el caso de que todos los miembros de la bandada siguieran a esta ave con mejor percepción, estarían siguiendo a la información correcta por lo que eventualmente conseguirían comida (Qinghai, 2010). Ahora bien este comportamiento es análogo a la PSO de la siguiente manera, en la Tabla 4 (Gómez & Franco, 2011):

*Tabla 4. Analogía Aves vs. PSO*

Bandada de Aves	PSO
Movimiento de las aves de un lugar a otro	Desarrollo de la solución del enjambre
Información correcta	Solución óptima
Fuente de comida	Solución óptima de todo el recorrido

En el algoritmo PSO la solución óptima es encontrada por medio de la cooperación existente o dada por cada individuo del enjambre (Gómez & Franco,

2011). El algoritmo puede ser usado en muchas áreas como: optimización de funciones, clasificación de modelos, entrenamiento de redes neuronales, procesamiento de señales, sistemas de control y adaptación automática de control (Gómez & Franco, 2011).

Básicamente en el algoritmo PSO el enjambre está formado por “n” partículas y la posición de la cada partícula es una posible solución en el espacio D-dimensional. Las condiciones de las partículas cambian de acuerdo a los tres siguientes principio (Mathworks):

1. Mantener la inercia
2. Cambiar la condición de acuerdo a la posición óptima
3. Cambiar las condiciones de acuerdo a la posición óptima de todo el enjambre (Mathworks).

Como se mencionó antes en este algoritmo se toma en cuenta a cada individuo del enjambre, lo que hace que la posición de cada partícula del enjambre esté directamente afectada tanto por la posición óptima durante su movimiento, es decir por la experiencia individual, como por la posición óptima de todo su entorno, es decir la experiencia cercana. Cuando todo el enjambre está en el entorno de cierta partícula la solución óptima de dicho entorno es igual a la solución óptima de todo el enjambre. Cada partícula está representada por cuatro indicadores, posición, velocidad, la posición óptima de cada individuo y la posición óptima del entorno. La velocidad y posición de cada partícula están dadas por las ecuaciones 3 y 4 respectivamente (Gómez & Franco, 2011):

$$V_{id}^{k+1} = wV_{id}^k + c_1r_1^k(p_{best_{id}}^k - x_{id}^k) + c_2r_2^k(g_{best_d}^k - x_{id}^k) \quad (3)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (4)$$

Donde:

- $V_{id}^k$ : velocidad de la partícula  $i$  en el tiempo o iteración  $k$  y la cantidad de la dimensión  $d$  de su posición.
- $X_{id}^k$ : posición de la partícula  $i$  en el tiempo o iteración  $k$  y la cantidad de la dimensión  $d$  de su posición.
- $p_{best_{id}}^k$ : es la cantidad de la dimensión  $d$  del individuo  $i$  en su posición óptima de en la iteración  $k$ .
- $g_{best_d}^k$ : es la cantidad de la dimensión  $d$  de todo el enjambre, en su posición óptima de en la iteración  $k$ .
- $c_1, c_2$ : son los pesos de la velocidad que regulan la extensión de la búsqueda tanto de la partícula en todo el enjambre como de la partícula óptima de forma individual.
- $r_1^k, r_2^k$ : son valores aleatorios que se encuentran entre el 0-1.
- $w$ : función de ponderación (Gómez & Franco, 2011).

La ecuación 3 es usada por lo general para obtener la función de ponderación y se la reemplaza en la ecuación 1 (Gómez & Franco, 2011):

$$w = \frac{w_{max} - [(w_{max} - w_{min}) \times iter]}{iter_{max}} \quad (5)$$

Donde:

- $w_{max}$ : Peso inicial.
- $w_{min}$ : Peso final.
- $iter_{max}$ : Número máximo de iteración.
- $iter$ : Número de iteración.

Para evitar que la partícula se encuentre lejos del espacio de búsqueda, la velocidad de la partícula en cierta posición, es establecida entre dos límites:  $-v_{dmax}$  y  $v_{dmax}$ . Si el valor en cualquiera de los dos casos es muy grande la solución va a estar

muy lejos de la mejor solución, y si el valor es muy pequeño la solución será la solución local óptima. En cuanto a los pesos de la velocidad si estos son muy pequeños provocarán que la partícula se encuentre lejos de su destino, por otro lado si dichos pesos son muy grandes harán o bien que la partícula se dirija repentinamente a su destino, o harán que la partícula vaya mucho más allá de su destino. Por lo general los valores de estos parámetros son iguales, es decir  $c_1 = c_2$ , y se los establece con un valor de 2 (Gómez & Franco, 2011).

Un número grande del peso de la inercia  $w$  facilita la búsqueda global, mientras que un valor pequeño de  $w$  facilita la búsqueda local. De esta manera si se realiza una disminución lineal del peso de la inercia durante el curso del funcionamiento del PSO, se obtiene el mejor desempeño posible de este algoritmo (Gómez & Franco, 2011).

Resumiendo el algoritmo PSO se basa en las siguientes reglas:

- Usa un número de miembros o partículas que forman un enjambre en movimiento dentro del llamado “espacio de búsqueda”. Este enjambre lo que hace es tratar de encontrar la mejor solución (Amer, Namaane, & M'Sirdi, 2013).
- Cada partícula es tratada como un punto en un el espacio dimensional  $N$ , la cual ajusta su “vuelo” de acuerdo a su experiencia individual y de acuerdo a la experiencia de las otras partículas dentro del enjambre (Amer, Namaane, & M'Sirdi, 2013).
- Cada partícula hace un seguimiento de sus coordenadas en el espacio de soluciones, el mismo que está relacionado con la mejor solución alcanzado hasta el momento por la partícula. Este valor es llamado el mejor personal ( $p_{best}$ ) (Amer, Namaane, & M'Sirdi, 2013).

- Otro valor que el PSO hace seguimiento es el mejor valor obtenido por la partícula en su “vecindario”, es decir en sus cercanías, este valor es llamado como  $g_{best}$  (Amer, Namaane, & M'Sirdi, 2013).
- El concepto básico del algoritmo PSO es acelerar cada partícula hacia sus valores de  $p_{best}$  y  $g_{best}$ , esto a través de los pesos y valores aleatorios  $c_1, c_2, r_1^k$  y  $r_2^k$ , respectivamente (Amer, Namaane, & M'Sirdi, 2013).

En el caso de la optimización de un controlador PID, cada partícula tiene tres componentes  $K_p, K_i$  y  $K_d$ , estos componentes son actualizados por el algoritmo PSO en cada iteración, para de esta manera poder encontrar los valores  $p_{best}$  y  $g_{best}$ , de esta forma el algoritmo converge a una solución óptima. Las soluciones potenciales, es decir las partículas “vuelan” a través de todas las dimensiones del problema siguiendo a las partículas óptimas (Jawad, 2013). El algoritmo PSO tiene ventajas respecto a otros métodos en tiempo de ejecución, costos y resultados, además que en este método solo se necesita fijar pocos parámetros. En la siguiente Tabla 5 se listan las ventajas y desventajas de este algoritmo (Qinghai, 2010):

Tabla 5. Ventajas y desventajas del algoritmo PSO

Ventajas	Desventajas
Está basado en la inteligencia, por lo que puede ser usado en investigación científica e ingenieril.	Este método tiende a realizar una optimización parcial, lo que provoca menor exactitud al regular la velocidad y dirección.
La búsqueda puede ser ejecutada de acuerdo a la velocidad de la partícula. Durante el desarrollo de algunas generaciones sólo la partícula óptima transmite la información.	No puede resolver problemas de dispersión.

---

La velocidad de la búsqueda es bastante rápida.

No puede resolver problemas de sistemas no coordinados, como lo son los campos de energía y las reglas de movimiento de partículas en el campo de energía.

Los cálculos son sencillos, ya que ocupa la mayor capacidad de optimización posible. asume un numero de código real que es decidido por la solución, es decir el número de dimensiones es igual a la constante de la solución

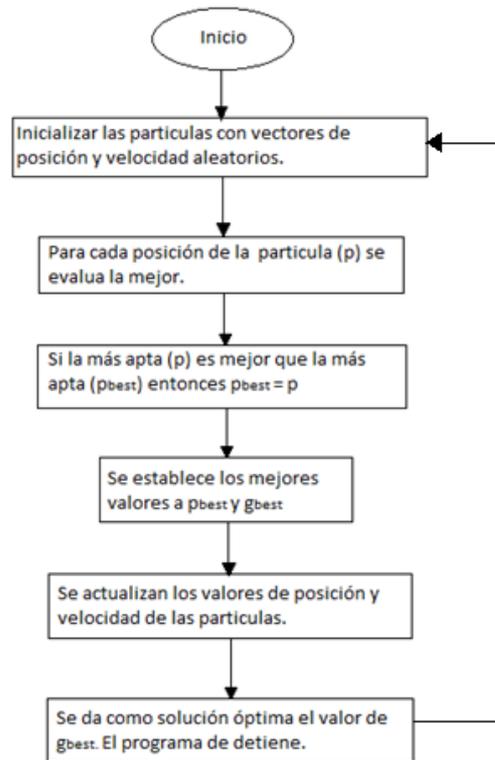
---

*Los pasos que se siguen para el desarrollo del algoritmo en Matlab son los siguientes, presentados en la Nota. Recuperado siguientes, presentados en la Nota. Recuperado de Ali Tarique & Gabbar. Copyright 2013.*

Figura 5. Algoritmo PSONota. Recuperado de Ali Tarique & Gabbar.

Copyright 2013.

Figura 5 (Tarique & Gabbar, 2013):



Nota. Recuperado de Ali Tarique & Gabbar. Copyright 2013.

Figura 5. Algoritmo PSO

## Control Adaptativo

Por otro lado se tiene el método de control adaptativo, el cual es un método que surge en los años de 1950 con el fin de aplicarlo a sistemas de vuelo de aviones, el mismo que se basaba en un modelo de referencia, junto con éste también surgió un modelo que ajustaba la posición de los polos para así tener una regulación cuadrática óptima (Gómez Martínez & Mendoza Avendaño, 2009). Sin embargo estos modelos presentaron muchos problemas lo que llevó al desinterés en el control adaptativo hasta que en los 70s con los avances computacionales se desarrolló un esquema de control adaptativo por modelos de referencia mucho más estable aunque aún presentaban inestabilidad frente a pequeñas perturbaciones del sistema. En décadas posteriores se desarrolló un método de control adaptativo robusto el cual permitía controlar plantas lineales variantes en el tiempo, de las cuales no se conocían sus parámetros, luego este

control fue también aplicado a plantas no lineales obteniendo resultados óptimos en la respuesta transitoria y en estado estable.

El control adaptativo como su nombre lo indica es aquel que es capaz de adaptarse a los diferentes cambios que presente un sistema, es decir el controlador puede tener cambios en tiempo real. El funcionamiento básico de este tipo de controlador es muy similar al PSO ya que de igual manera las constantes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  son establecidas de igual manera que en el algoritmo PSO. El objetivo básico del control adaptativo es mantener un desempeño consistente del sistema cuando este tiene parámetros desconocidos e impredecibles (Lavretsky).

El control adaptativo usa una serie de técnicas de adaptación que de forma continua y automática miden las diferentes variables dinámicas de la planta las compara con unos parámetros deseados y mediante la diferencia existente el controlador modifica sus características, manteniendo de esta manera las variables de la planta en el rango deseado. Existen dos tipos de control adaptativo, el directo y el indirecto. El modo directo es cuando la parametrización del modelo de la planta se lo hace en términos de los parámetros del controlador, los mismos que son calculados de forma inmediata es decir sin cálculos intermedios. Por otro lado en el modo indirecto se tiene que la estimación de los parámetros de la planta es en línea y éstos son usados para la estimación de los parámetros del controlador. Esto quiere decir que será necesario el uso de una ley de adaptación y un estimador de parámetros. Para el presente controlador se va a usar uno del tipo adaptativo autoajutable, el cual almacena tanto las entradas como las salidas de la planta en un solo vector y mediante la estructura ARX y el algoritmo PSO se determinan los parámetros de la planta y el controlador (Landau, Lozano, Saad, & Karimi, 2011).

El control adaptativo usa técnicas de auto sintonización por lo que es necesario un bloque de identificación en donde los valores de las constantes de la planta sean calculadas (Gómez Martínez & Mendoza Avendaño, 2009). La estructura ARX es una técnica de identificación que estima los valores de las constantes de la planta, para identificar los parámetros de la planta se utiliza como referencia sus señales de entrada y salida. La estructura ARX usa la siguiente ecuación (Gómez Martínez & Mendoza Avendaño, 2009):

$$y(k) = \sum_{i=1}^n a_i y(k-i) + \sum_{i=1}^n b_i u(k-i) + e(k) \quad (6)$$

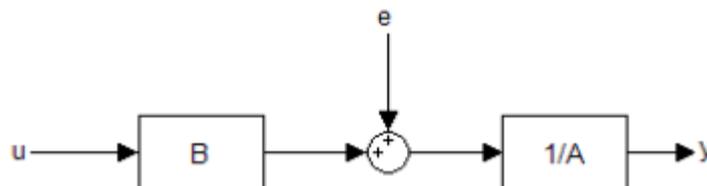
Donde:

- $y(k)$ : Salida actual del sistema.
- $u(k-i)$ : Entradas para diferentes instantes de tiempo.
- $y(k-i)$ : Salidas para diferentes instantes de tiempo.
- $a_i$ : Coeficientes para las salidas anteriores del sistema.
- $b_i$ : Coeficientes para las entradas actuales y siguientes del sistema.
- $e(k)$ : Ruido estocástico.
- $n$ : Orden del sistema (Gómez Martínez & Mendoza Avendaño, 2009).

El esquema del modelo ARX quedaría de la siguiente manera, Nota.

Recuperado de José Alberto Gómez & German Mendoza. Copyright 2009.

Figura 6 (Gómez Martínez & Mendoza Avendaño, 2009):



Nota. Recuperado de José Alberto Gómez & German Mendoza. Copyright 2009.

Figura 6. Esquema ARX

La ecuación de este modelo en el plano Z sería la siguiente (Gómez Martínez & Mendoza Avendaño, 2009):

$$Y(z) = \frac{B(z^{-1})}{1-A(z^{-1})} U(z) + \frac{1}{1-A(z^{-1})} E(z) \quad (7)$$

Donde:

- $Y(z)$ : Salida del sistema discretizada.
- $U(z)$ : Entrada del sistema discretizada.
- $E(z)$ : Ruido del sistema discretizado.
- $A(z^{-1}) = a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_nz^{-n}$
- $B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_nz^{-n}$  (Gómez Martínez & Mendoza Avendaño, 2009).

Como se mencionó antes existen dos grupos de técnicas de control adaptativo las directas e indirectas, pero dentro de estas existen otras técnicas, las mismas que son descritas a continuación:

- **Ganancia programable (Gain Scheduling)**

Esta

- **Control Adaptativo por modelo de referencia (MRAC)**

Un

- **Control Adaptativo autoajustable (STR)**

El

Para

- **PID Autoajustable basado en margen de fase prefijado**

$Gcz-1=p0+p1z-1+p1z-21-z-1=P(z-1)1-z-1$  (8 y se considera una planta

$b1$  y  $b2$  iguales a cero,  $Gcz-1=b0z-k1-a1z-1-a2z-2$  (9) (Gómez Martínez &

Mendoza Avendaño, 2009).

$$G_c(z^{-1}) = \frac{p_0 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} = \frac{P(z^{-1})}{1 - z^{-1}} \quad (8)$$

$$G_c(z^{-1}) = \frac{b_0 z^{-k}}{1 - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2}} \quad (9)$$

Los valores  $a_n$  y  $b_n$  de la planta son estimados para así poder calcular los valores de  $p_0$ ,  $p_1$  y  $p_2$  del controlador. Las siguientes ecuaciones se usan para lo descrito antes (Gómez Martínez & Mendoza Avendaño, 2009):

$$p_0 = \frac{1}{\hat{b}_0 T_c^2 (2k+1)} \quad (10)$$

$$p_1 = -\hat{a}_1 P_0 \quad (11)$$

$$p_2 = -\hat{a}_2 P_0 \quad (12)$$

Donde:

- $\hat{a}_1$ ,  $\hat{a}_2$  y  $\hat{b}_0$ : Coeficientes estimados de la planta.
- $k$ : Retardo de la planta.
- $T_c$ : Tiempo de control

El coeficiente  $\hat{b}_0$  puede ser calculado por medio de la ganancia del sistema y el tiempo  $T_c$  es aproximadamente  $2/3$  de un  $\tau$  (Gómez Martínez & Mendoza Avendaño, 2009).

- **PID autoajutable basado en asignación de polos**

Para este método se selecciona la posición de un polo triple, es decir un polo con la misma ubicación con el propósito de modificar el comportamiento de la planta  $Gp z^{-1} = b_1 z^{-1} - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2}$  (13, para así calcular el polinomio característico del sistema en lazo cerrado, el polo que se seleccione debe ser mayor que 1 y debe estar en la zona de estabilidad del plano  $z$  (Gómez Martínez & Mendoza Avendaño, 2009).

$$G_p(z^{-1}) = \frac{b_1 z^{-1}}{1 - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2}} \quad (13)$$

$$(z^{-1} - a)^3 = z^{-3} - 3az^{-2} + 3a^2z^{-1} - a^3 \quad (14)$$

$z^{-1} - a^3 = z^{-3} - 3az^{-2} + 3a^2z^{-1} - a^3$  (14 se obtienen las siguientes ecuaciones

(Gómez Martínez & Mendoza Avendaño, 2009):

$$p_0 = \frac{1}{b_1} \left( 1 + a_1 - \frac{3}{a} \right) \quad (15)$$

$$p_1 = \frac{1}{b_1} \left( a_2 + a_1 - \frac{3}{a^2} \right) \quad (16)$$

$$p_2 = -\frac{1}{b_1} \left( a_2 + \frac{1}{a^3} \right) \quad (17)$$

Ahora con estos valores y la  $G_c(z^{-1}) = \frac{p_0 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} = \frac{P(z^{-1})}{1 - z^{-1}}$  (8 se pueden

obtener los valores del controlador PID (Gómez Martínez & Mendoza Avendaño, 2009):

$$K_p = -(p_1 + 2p_2) \quad (18)$$

$$K_i = (p_0 + p_1 + p_2) \quad (19)$$

$$K_d = p_2 \quad (20)$$

## Descripción del modelo

En este trabajo se van a emplear dos sistemas de generación eléctrica, conectados entre sí de forma paralela, el controlador está diseñado para establecer un control sobre el voltaje del sistema por lo que este último no puede manejarse como un sistema independiente sino que necesariamente debe estar conectado a la red grande de generación eléctrica para que ésta sea la encargada de controlar la frecuencia del sistema. La finalidad de este modelo es obtener una respuesta estable del sistema, para lograr esto se diseñó un controlador que pueda acoplarse a las características que el sistema presente. Por lo tanto el objetivo principal del

controlador es obtener el voltaje deseado a la salida del inversor y por consiguiente en la carga, que tanto el sistema hidráulico como el fotovoltaico poseen. La descripción de cada parte del modelo se la hace a continuación:

- Modelo Planta Generación Fotovoltaica

Como se ve en la Figura 7 los primeros elementos de la planta son una fuente DC, un inductor y un capacitor, cuya función es la de una batería. Pasa a un diodo, el mismo que evitará que la corriente regrese hacia la batería; luego pasa a un bloque donde se convierte el voltaje DC a voltaje sinusoidal AC. Los armónicos y ruido producidos por el inversor son filtrados por un filtro LC (Meshram, Agnihotri, & Gupta, 2012).

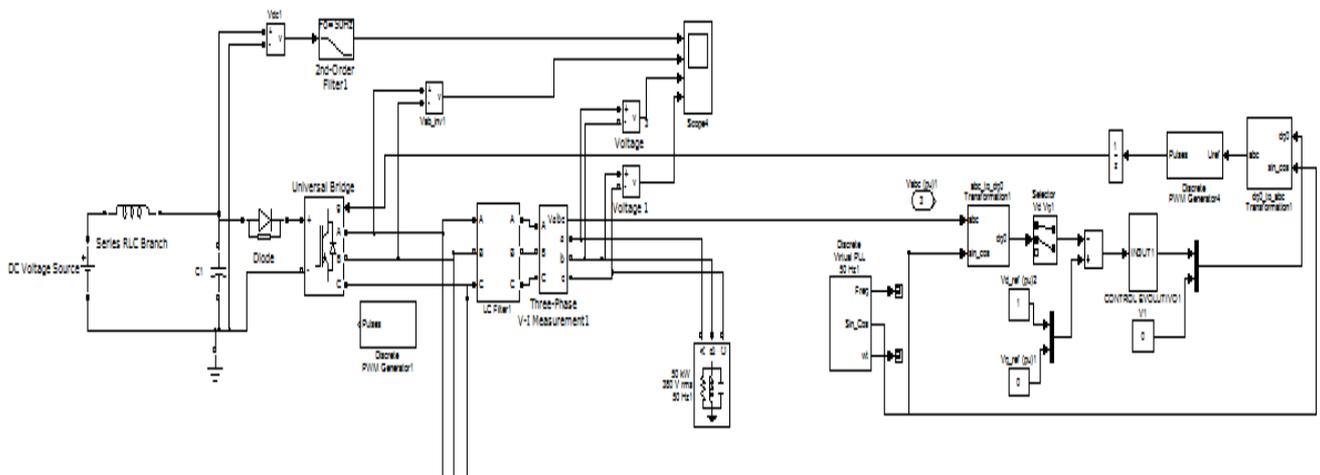
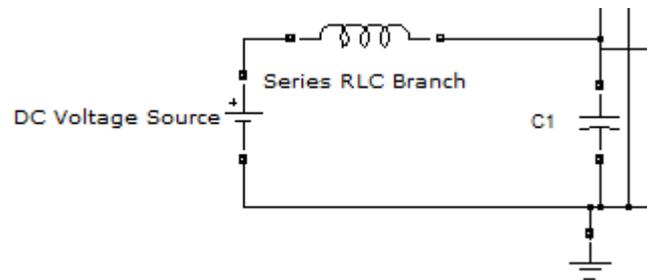


Figura 7. Planta Fotovoltaica.

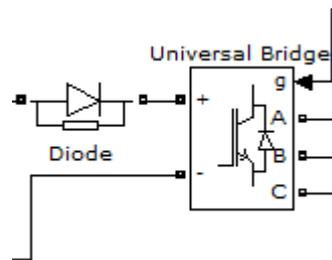
Más en detalle cada bloque de la planta fotovoltaica se describe a continuación:

- En este bloque se presentan tres elementos una fuente DC que cumple la función de baterías de planta. Luego están un inductor y un capacitor los mismos que forman un filtro LC que servirá para que la señal obtenida del voltaje DC sea más “suave”. El valor escogido para el inductor es de

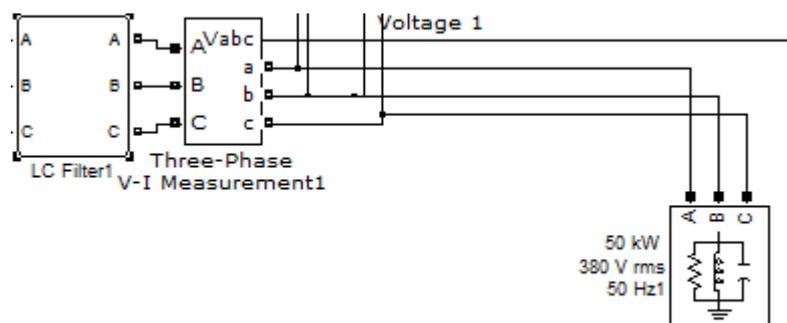
$L=500\mu\text{H}$  y para el capacitor de  $C=7000\mu\text{F}$  (Meshram, Agnihotri, & Gupta, 2013).



- El siguiente elemento es un diodo el mismo que evita la posible existencia de un retorno de corriente hacia las baterías. Luego se tiene un inversor que transforma la corriente DC proveniente de los arreglos fotovoltaicos, a corriente AC. La señal AC es obtenida en forma de una onda escalonada.



- La última parte de lo que sería el sistema fotovoltaico, excluyendo la parte de control, es un filtro LC de tres fases y un elemento de medición de voltaje y corriente. El filtro LC es usado para convertir la señal de onda escalonada en una señal de onda puramente sinusoidal. El inductor tiene un valor de  $L=2\text{mH}$  y un banco de capacitores de  $3\text{kVar}$ . Por último se conecta a una carga de  $50\text{Kw}$  y frecuencia de  $60\text{ Hz}$  (Meshram, Agnihotri, & Gupta, 2012).



- Planta Generación Hidráulica

En el sistema hidráulico se tiene primero un generador de 25kV, luego está un transformador que convierte los 25kV en 600V. El rectificador es el encargado de convertir el voltaje AC en DC, este último voltaje es nuevamente convertido a sinusoidal AC por medio del inversor PWM. La salida del inversor PWM tiene armónicos que son filtrados por medio de un filtro LC (Meshram, Agnihotri, & Gupta, 2012). El modelo completo se presenta en la Figura 8.

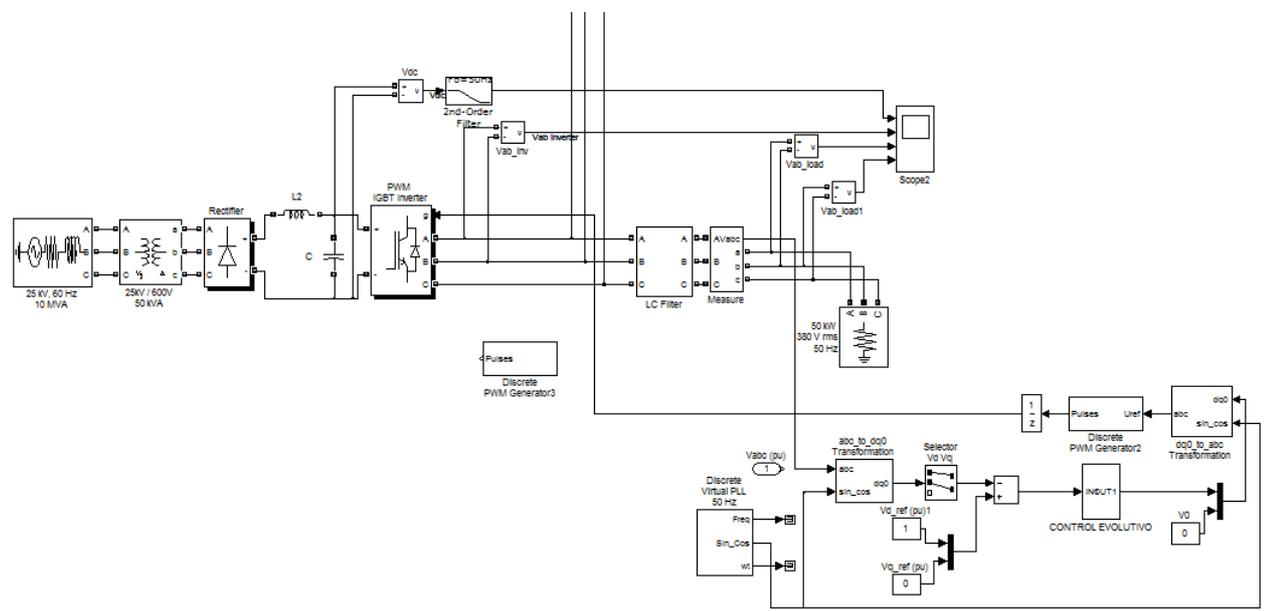
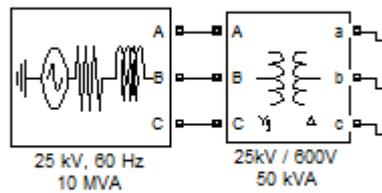


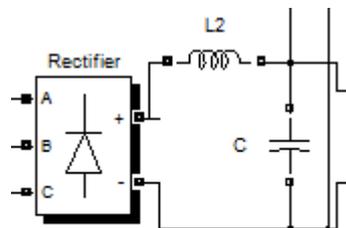
Figura 8. Planta Hidráulica

Cada parte del sistema hidráulico es descrito a continuación:

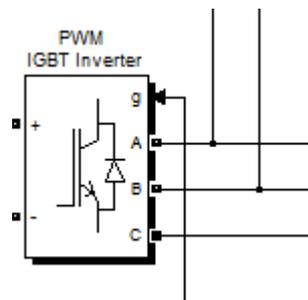
- El primer elemento constituye en sí el generador el mismo que tiene una capacidad de 25kV, el cual está conectado a un transformador para de esta manera poder obtener un voltaje de 600V, y tener los mismos valores de la planta fotovoltaica y poderse conectar entre sí.



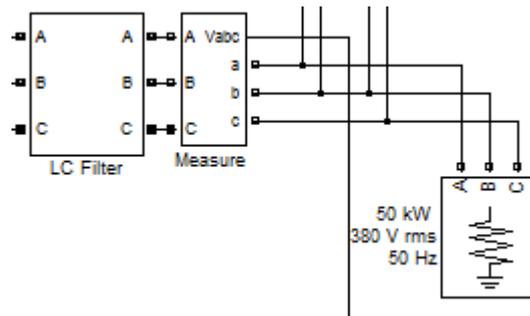
- Una vez transformado el voltaje a 600V esta señal entra a un rectificador para que sea transformada a una señal DC. Esta señal DC contiene ondulaciones, las cuales serán eliminadas por medio de un filtro LC, con  $L=100\mu\text{H}$  y  $C=5000\mu\text{F}$  (Meshram, Agnihotri, & Gupta, 2012).



- La señal DC deseada pasa ahora al bloque de un inversor PWM, el mismo que convierte la señal DC en una señal AC.



- La señal AC pasa a un filtro LC de tres fases con valores numéricos de  $L=2\text{mH}$  y un banco de capacitores de 3kVar (Meshram, Agnihotri, & Gupta, 2012). El siguiente elemento ayuda en la medición del voltaje y corriente para después ser conectado a una carga de 50kW Y 60Hz.



- Sistema Híbrido

Para poder formar el sistema híbrido se conecta de forma paralela con acoplamiento AC, los sistemas hidráulico y fotovoltaico son integrados a la red grande energía eléctrica de 132kV, 2500MVA. Un transformador de 50MVA, 132kV/11kV es usado para llevar el voltaje AC de la red al voltaje del sistema híbrido, una vez esto conectado en forma paralela se conecta una carga de 2MW (Meshram, Agnihotri, & Gupta, 2013). Como se puede ver en el esquema cada planta mantiene sus características individuales, como por ejemplo la parte de control, ya que como cada sistema trabaja como un sistema distinto, esto es de forma individual cada planta tiene un comportamiento diferente al que lo tiene cuando están conectadas. De igual manera el control debido a su naturaleza adaptable a cualquier característica del sistema, también funciona de manera distinta cuando las plantas están conectadas y cuando no están conectadas. De igual manera el sistema se lo conecta a una carga constante.

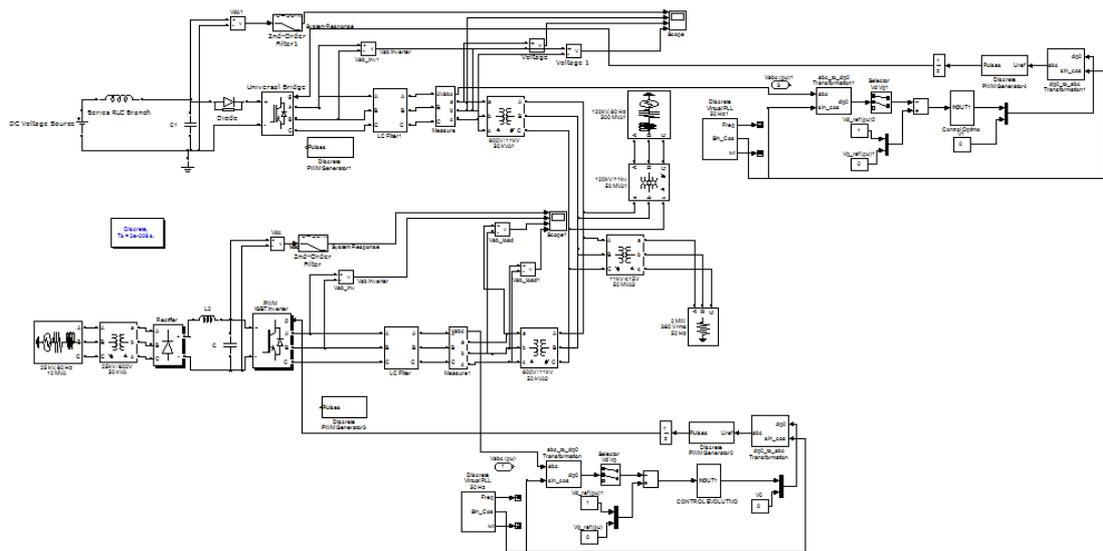


Figura 9. Planta híbrida

- Controlador

En cuanto al controlador se usó el esquema de control adaptativo autoajustable STR, es decir se utiliza las señales de entrada y salida de la planta. Como se había mencionado el sistema propuesto está conectado a la red grande de generación eléctrica para que sea esta la encargada de controlar la frecuencia del sistema híbrido. Por lo tanto el único valor que se controla es el del voltaje, es decir la variable a controlar es el voltaje y el set point es el valor del voltaje dado en la carga que en este caso es de 600V. Los valores de potencia activa y reactiva no se toman en cuenta ya que no se tiene una carga variable (Ronald, Romero, & Falcones).

En el sistema propuesto se tiene dos inversores PWM, uno para cada planta, a este inversor se le aplica el controlador PID. Este controlador tiene la estructura de la Figura 10. Este es el esquema que es conectado a la cada una de las plantas, los bloques por los que está formado constituyen principalmente elementos requeridos por Simulink para la adquisición de datos y selección de señales; por ejemplo, existe

un selector al pasar la señal trifásica al control. Y es este último bloque el que constituye en sí el controlador, del cual el esquema se presenta en la Figura 11.

El método que se usó para el controlador es el del tipo STR, esto por su facilidad de programación. Básicamente este controlador está formado por un algoritmo de estimación de parámetros, donde se encentra la teoría del PSO, un bloque de diseño o mecanismo identificador ARX y un controlador o regulador con parámetros ajustables. El esquema mostrado está formado por una ganancia que hace el sistema sea estable, un switch que selecciona los coeficientes provenientes del control adaptativo, los bloques del controlador PID. Además se puede ver que existe un reloj el mismo que ayuda a que se inicien las variable de manera y en el tiempo adecuados, es decir si el reloj no está en el tiempo cero las variable no son iniciadas. El reloj junto con las variables controladas por el algoritmo y un retraso de tiempo entran en un switch el mismo que dependiendo de las condiciones del sistema envía las constantes al modelo del controlador PID para así obtener la salida que del bloque control óptimo. Este bloque se conecta al inversor por medio de otros bloques que hacen que la señal trifásica del inversor pueda ser analizada por el controlador para así realizar el control y por último obtener la salida que se puede conectar al inversor. Los parámetros del controlador serán determinados por medio del bloque llamado “Matlab function”, donde se encuentra el código ARX y PSO, el mismo que está descrito en la Figura 12. En el código se obtienen las constantes del controlador PID por medio de los algoritmos PSO y Adaptativos. Lo último es obtener la salida, la

misma que será conectada a la planta.

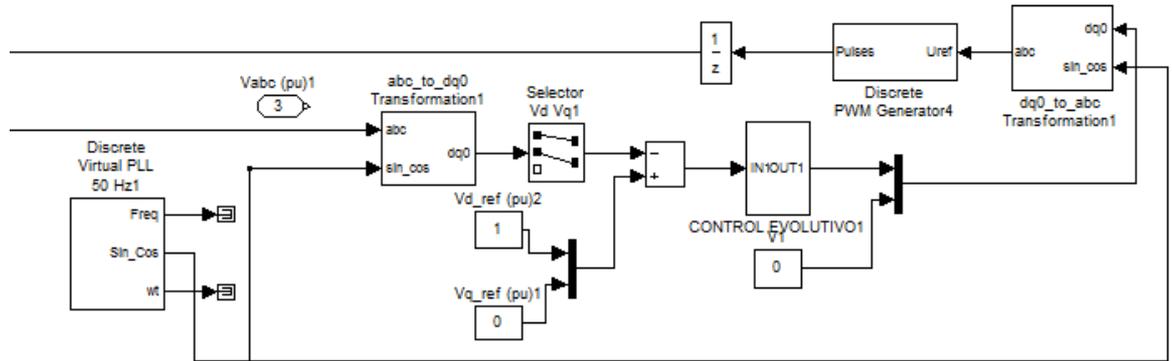


Figura 10. Esquema controlador completo

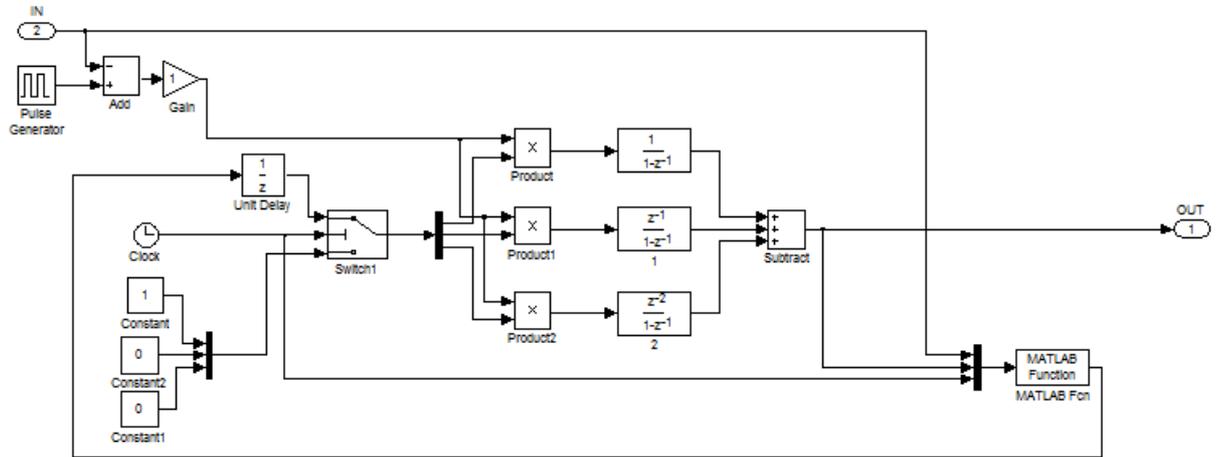


Figura 11. Controlador.

```

function [out] = pro(in1)%Entrada: in1 (vector triple, incluye: salida planta, entrada planta, reloj)
%Salidas: out (vector con los coeficientes an y bn respectivamente, de la forma [an bn])
global u y U Y orden p0 p1 p2 Tc k%Se declaran las variables globales del sistema; esto es necesario para mantener
%almacenadas dichas variables a través de las iteraciones de Simulink
if in1(3) == 0 %pregunta si el reloj está en cero
clc %si está en cero, se inicializan las variables
orden = [2 1 1]; %orden del sistema que se desea hallar con el ARX
u = zeros(50,1); %vector para ventaneo de las entradas de la planta
U = iddata([]); %objeto iddata necesario para calcular el ARX, entradas
y = u; %vector para ventaneo de las salidas de la planta
Y = U; %objeto iddata necesario para calcular el ARX, salidas
Tc = 1; %tiempo de muestreo del sistema
k = 1; %retardo del sistema (se asume 1 por defecto)
p0 = 1; p1 = 0; p2 = 0;%Valores iniciales para p0, p1 y p2.
else
u = [u(2:50); in1(2)]; %última entrada en la planta en la última posición del vector u
y = [y(2:50); in1(1)]; %última salida en la planta en la última posición del vector y
%A continuación se calcula el ARX en periodos de tiempo de 3 segundos, evitando cálculos excesivos.
if mod(in1(3),3) == 0 %pregunta si el reloj es un múltiplo entero de 3
set(U,'InputData',u); %inyecta el vector u en el objeto iddata U
set(Y,'OutputData',y); %inyecta el vector y en el objeto iddata Y
Z = [Y,U];
M = arx(Z,orden); %cálculo del ARX
an = get(M,'a'); %se extraen los coeficientes an
bn = get(M,'b'); %se extraen los coeficientes bn
b0 = dcgain(tf(bn,an,0.1)); %cálculo de b0 para estimar los coeficientes p_n
p0 = 1/(b0*Tc^2*(2*k+1)); %estimación de p0
p1 = -an(2)*p0; %estimación de p1
p2 = -an(3)*p0; %estimación de p2
end
end
out = [p0 p1 p2]; %salida, alimenta la entrada p_n del controlador PID

```

Figura 12. Código optimización.

La Figura 12 nos muestra el código usado para calcular la identificación de la planta y así determinar sus parámetros y los del controlador PID. Se usó las ecuaciones de control basado en asignación de polos, es decir se buscaba eliminar todo polo que desestabilizaba el sistema. Además se desarrolla el método de identificación ARX para determinar el orden y otros parámetros de la planta para que así el controlador pueda funcionar de manera adecuada y la respuesta del sistema sea óptima (Lavretsky).

## RESULTADOS

La finalidad del control a ser diseñado es obtener un sistema híbrido estable, es decir con valores de tiempo de asentamiento y sobreelongación pequeños con referencia al voltaje en la carga, además de que dicho controlador sea óptimo y de fácil ejecución. Estos objetivos se lograron mediante el uso de algoritmos que establecen de manera automática los valores de las constantes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  de un controlador PID. El controlador diseñado en este trabajo se adapta a las características o parámetros que se establezcan en la planta, es decir si bien es cierto el controlador depende de los parámetros de la planta éste se adapta a cualquier tipo de parámetros que la planta tenga. El funcionamiento de todo lo antes dicho se lo pudo comprobar por medio de la simulación de la planta en distintas configuraciones. Para comprobar que el controlador funciona de manera adecuada, es decir que mantiene estable al sistema, se realizaron las simulaciones del sistema híbrido en lazo abierto y cerrado. Esto se hace con la finalidad de comprobar el correcto funcionamiento del controlador y por lo tanto de la planta, puesto que la planta en lazo abierto no posee control alguno se pudo ver cuán inestable todo el sistema es en comparación con el lazo cerrado en el cual existe retroalimentación y por lo tanto el control es aplicado a la planta, esperando de esta forma una respuesta estable del sistema.

Por otro lado para constatar que se estaba ejecutando un control adaptativo y que el algoritmo de optimización estaba cumpliendo su función, se realizó simulaciones de cada uno de los sistemas por separado tanto en lazo abierto como en lazo cerrado, es decir se desconectó el sistema fotovoltaico del sistema hidráulico y se verificó que se esté realizando la acción de control. Las gráficas que se obtuvieron como resultados de las diferentes simulaciones se presentan a continuación, cada figura está formada por cuatro gráficas, donde la primera representa la respuesta del sistema medida antes de que la señal entre en el

inversor y que representa como la planta funciona al conectarse a una carga en el caso de los sistemas individuales y al conectarse a la red grande de energía en el caso del sistema híbrido completo, después está la salida del inversor antes del filtro, la tercera y cuarta gráfica representan el voltaje existente en la carga. Todas estas gráficas son de voltaje versus el tiempo de simulación.

- Sistema híbrido en lazo abierto

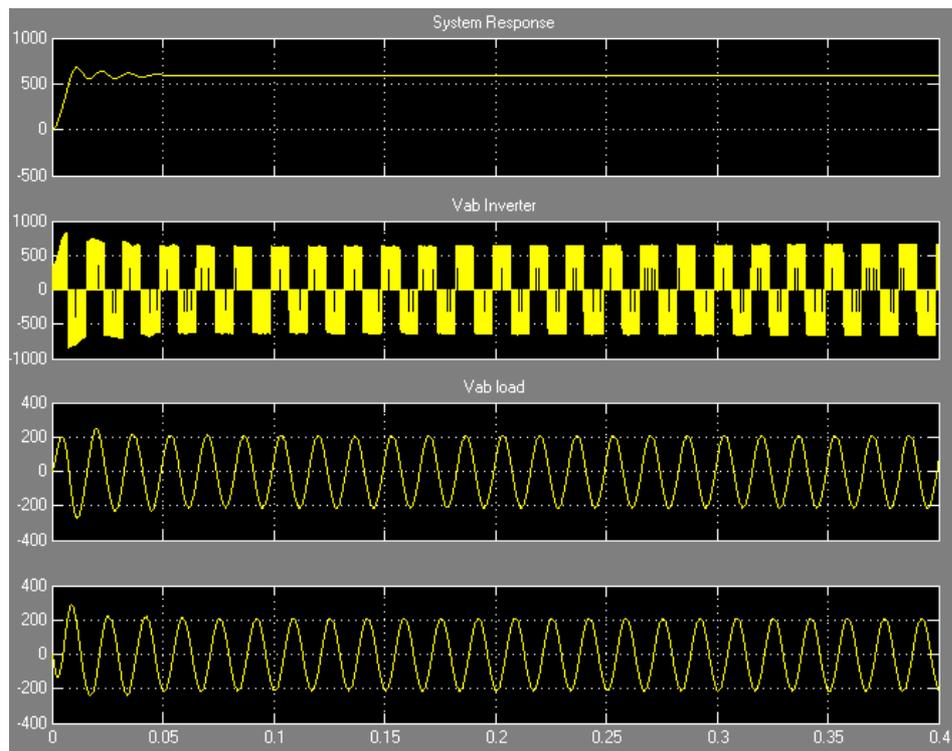


Figura 13. Sistema híbrido lazo abierto

- Sistema híbrido en lazo cerrado

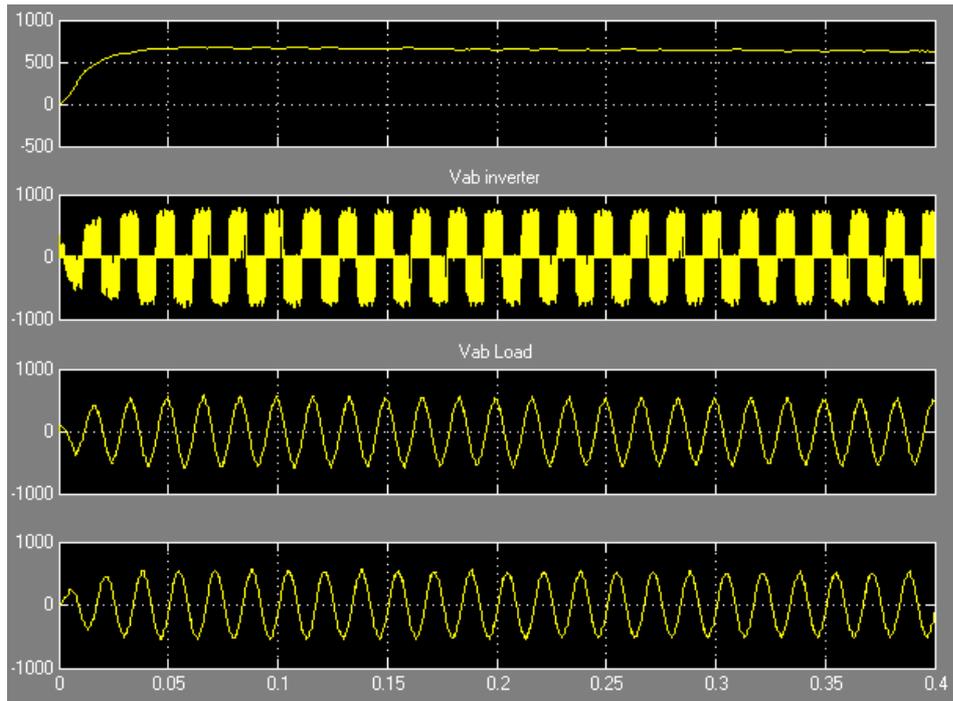


Figura 14. Sistema híbrido lazo cerrado.

Las gráficas anteriores fueron obtenidas del sistema hidráulico conectado al sistema fotovoltaico y estos a su vez conectados a la red de energía grande y a una carga constante, la gráfica de la respuesta del sistema es medida antes del inversor a la salida del filtro LC, el Vab Inverter a la salida del inversor y el Vab Load en la carga del sistema hidráulico. Como se puede ver cuando se aplica el control la respuesta del sistema contiene mejoras, por ejemplo la sobreelongación con control es mucho más baja con la aplicación del control, el tiempo de asentamiento en lazo abierto es de 0.05s mientras que en lazo cerrado es de 0.04s.

Cabe mencionar que para este trabajo no se conoce nada de la planta ya que el controlador no lo necesita, es decir se adapta a cualquier tipo de parámetros que tenga la planta. Esto se lo puede demostrar al desconectar los convertidores entre sí cada uno se comporta como una planta distinta y sin embargo el controlador seguirá ejecutando de manera adecuada.

- Planta Fotovoltaica

La Figura 15 y la Figura 16 muestran el comportamiento de la planta fotovoltaica con y sin control, respectivamente. En la Figura 15 se tiene una menor sobreelongación y tiempo de asentamiento comparándolos con los obtenidos en lazo abierto, es decir sin la acción de control.

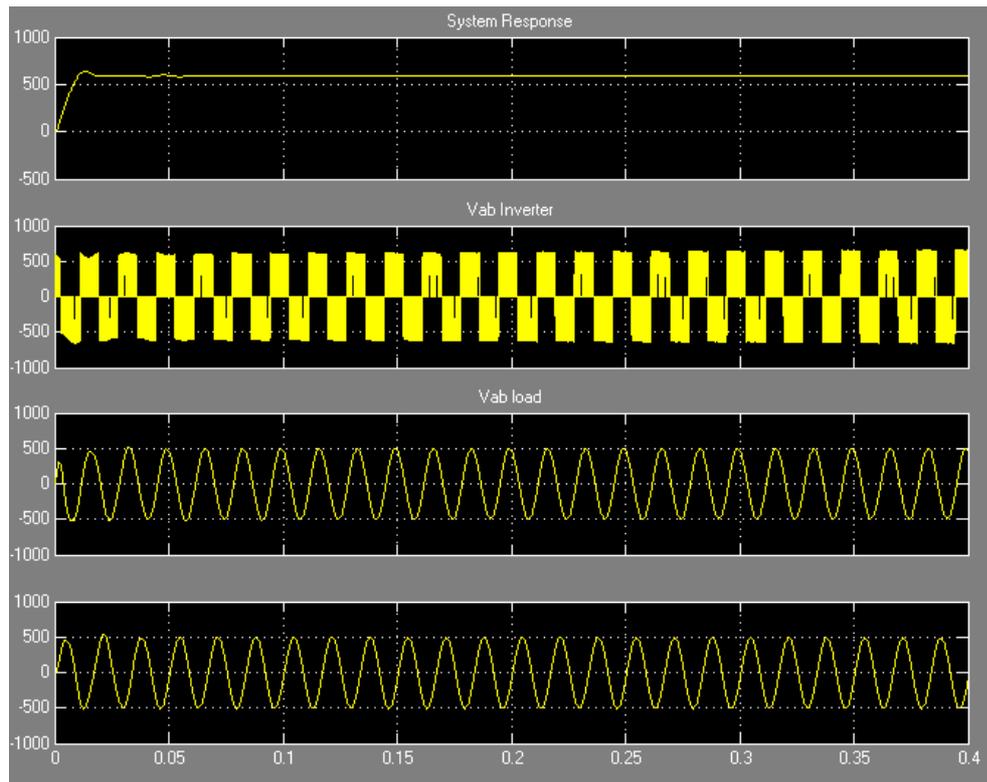


Figura 15. Lazo cerrado planta fotovoltaica

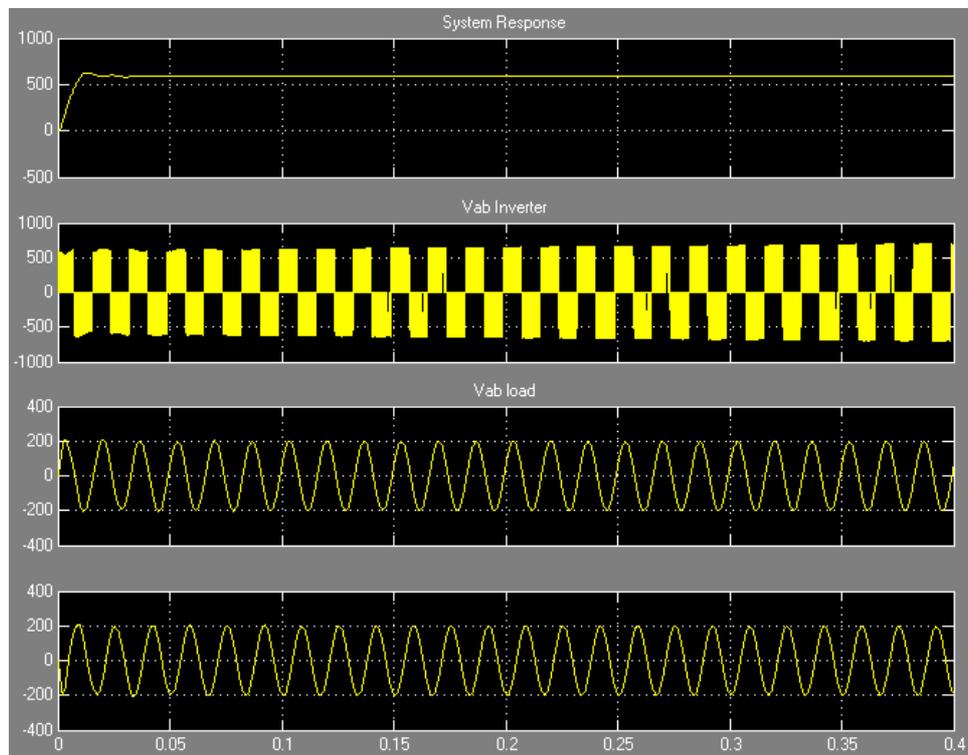


Figura 16. Lazo abierto planta fotovoltaica.

- Planta Hidroeléctrica

Al igual que en la planta fotovoltaica, en la planta hidroeléctrica se tienen los dos resultados de simulación. En la Figura 17 se ve que existe un gran pico de sobreelongación con un tiempo de asentamiento de la mitad comparado con el de la Figura 18, la misma que no tiene acción de control por lo que el tiempo de asentamiento es el doble. En este caso se ve que el sistema controlado tiene un pico de sobreelongación mayor al no controlado por lo que se podría decir que no existe acción de control sin embargo el voltaje en la carga del sistema de la Figura 17 es de 600V mientras que el de la Figura 18 está muy por debajo de los 600V que se debería tener en la carga.

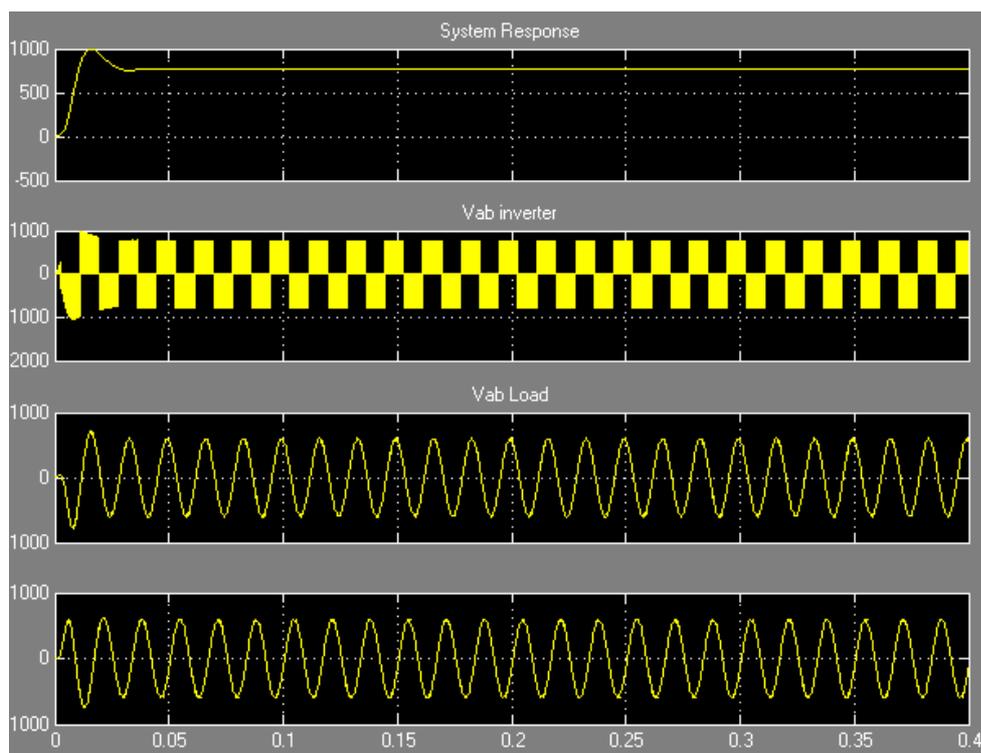


Figura 17. Lazo cerrado planta hidroeléctrica.

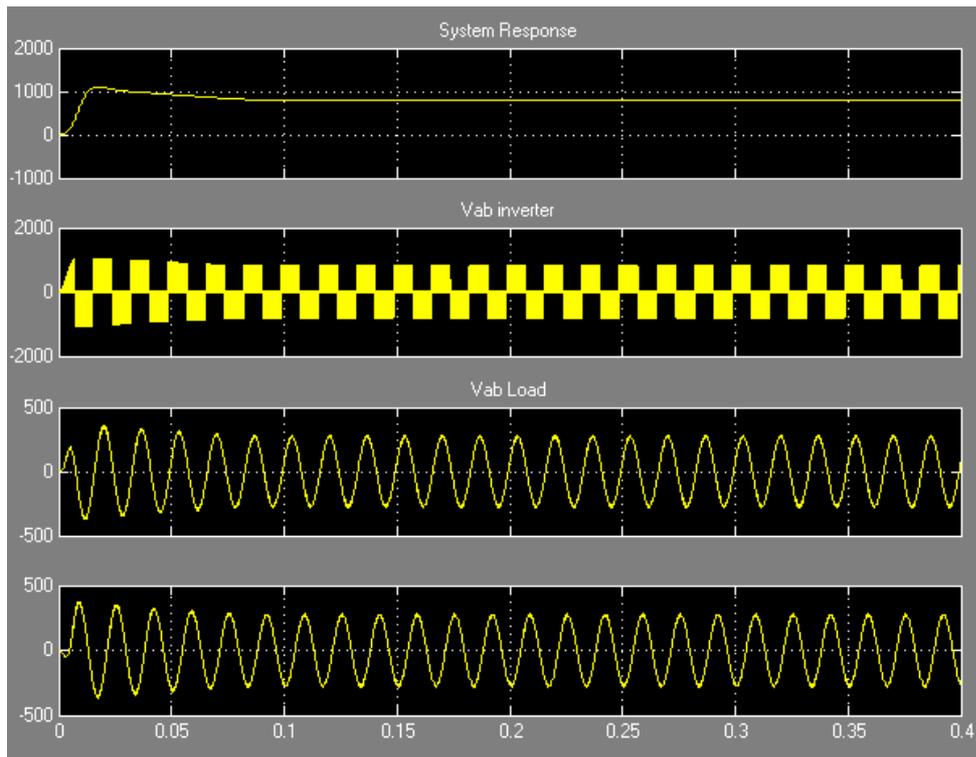


Figura 18. Lazo abierto planta hidroeléctrica.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó un análisis de un controlador óptimo para un sistema híbrido de generación eléctrica conectado a la red grande de energía eléctrica. El sistema propuesto puede ser implementado en áreas donde las energías tanto solar como hidráulica son factibles de producir, es decir se tiene la existencia de dichos recursos naturales. La energía solar e hidráulica son energías intermitentes debido a que dependen totalmente de recursos provenientes de la naturaleza. Por esta razón es que un sistema de generación eléctrica conformado por un solo tipo de energía renovable no es factible. El objetivo del controlador diseñado es regular el voltaje a la salida del inversor tanto de la planta hidroeléctrica como de la planta fotovoltaica. Además se tenía como objetivo que sea un controlador con características óptimas de funcionamiento, esto se logró mediante la aplicación de algoritmos que establecían las constantes del controlador PID de forma automática, además que permitan que el controlador sea capaz de adaptarse a cualquier cambio que el sistema presente. El

funcionamiento del controlador es analizado por medio de las diferentes configuraciones que el sistema tiene, es decir la parte de generación hidráulica y fotovoltaica por separado y conectadas entre sí. Las simulaciones muestran que, como se esperaba, el controlador diseñado es muy versátil y se adapta a las condiciones que el sistema establezca, ya que en cada una de las configuraciones la respuesta en el sistema y el voltaje en la carga obtenidos fueron los adecuados. Para futuros trabajos se podría analizar el funcionamiento del controlador cuando el sistema se le conecta a una carga variable. Por otro lado también se podría analizar su funcionamiento de manera aislada es decir un sistema stand-alone, para lo cual sería necesario implementar un control de frecuencia.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera Realpe, R. M. (julio de 2013). *Generación de un Catálogo de las Centrales Hidroeléctricas del Ecuador mediante una Herramienta SIG*. Recuperado el 12 de noviembre de 2015, de ESPE:  
<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/7165/1/T-ESPE-047397.pdf>
- Alliance for Rural Electrification. (25 de septiembre de 2015). *Hybrid Power Systems Based on Renewable Energies: A suitable and cost-competitive solution for rural electrification*. Obtenido de  
[http://www.ruralelec.org/fileadmin/DATA/Documents/06\\_Publications/Position\\_papers/ARE-WG\\_Technological\\_Solutions\\_-\\_Brochure\\_Hybrid\\_Systems.pdf](http://www.ruralelec.org/fileadmin/DATA/Documents/06_Publications/Position_papers/ARE-WG_Technological_Solutions_-_Brochure_Hybrid_Systems.pdf)
- Amer, M., Namaane, A., & M'Sirdi, N. K. (2013). *Optimization of Hybrid Renewable Energy Systems Using PSO for Cost Reduction*. Recuperado el 10 de octubre de 2015, de [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- Chintawar, P. P., & Bachawad, M. R. (junio de 2015). *Power Quality Improvement Wind/PV Hybrid System by using Facts Device*. Recuperado el 12 de octubre de 2015, de [http://www.ijareeie.com/upload/2015/june/24\\_Power\\_NEW.pdf](http://www.ijareeie.com/upload/2015/june/24_Power_NEW.pdf)
- Ciesla, W. M. (2011). *Cambio Climático Bosques y Ordenación Forestal: Una Visión de Conjunto*. Roma: FAO.
- Control Tutorials for Matlab and Simulink. (30 de septiembre de 2015). *Introduction: PID Controller Design*. Obtenido de  
<http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction&section=ControlPID>
- Crane, M. (s.f.). *Producción y Distribución de Energía Eléctrica*. Recuperado el 6 de septiembre de 2015, de  
<http://www.oect.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo3/76.pdf>
- Enríquez, G. (2013). *Tecnologías de Generación de Energía Eléctrica*. Limusa.
- European Photovoltaic Industry Association. EPIA. (2011). *Solar Generation: Solar Photovoltaic Electricity Empowering the World*. Recuperado el 10 de septiembre de 2015, de Greenpeace:  
<http://www.greenpeace.org/international/Global/international/publications/climate/2011/Final%20SolarGeneration%20VI%20full%20report%20lr.pdf>
- Gerhardt, W. (11 de mayo de 2015). *Prosumers: A New Growth Opportunity*. Obtenido de CISCO:  
[https://www.cisco.com/web/about/ac79/docs/wp/Prosumer\\_VS2\\_POV\\_0404\\_FINAL.pdf](https://www.cisco.com/web/about/ac79/docs/wp/Prosumer_VS2_POV_0404_FINAL.pdf)
- Gómez Martínez, J. A., & Mendoza Avendaño, G. (11 de mayo de 2009). *Aplicación del Control Adaptativo a Procesos Industriales Tipo SISO*. Recuperado el 11 de octubre

de 2015, de

[http://repository.upb.edu.co:8080/jspui/bitstream/123456789/433/1/digital\\_17521.pdf](http://repository.upb.edu.co:8080/jspui/bitstream/123456789/433/1/digital_17521.pdf)

Gómez, & Franco, J. A. (septiembre de 2011). *Un Algoritmo Basado en la Optimización por Enjambre de Partículas para el Problema de Asignación Axial 3-Dimensional*.

Recuperado el 5 de octubre de 2015, de

<http://posgrado.itlp.edu.mx/uploads/4f33d8bfedc85.pdf>

International Energy Agency. (2010). *Renewable Energy Essentials: Hydropower*.

Recuperado el 10 de septiembre de 2015, de

[http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/hydropower\\_essentials.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/hydropower_essentials.pdf)

International Hydropower Association. (2013). *Hydropower Report*. Recuperado el 10 de septiembre de 2015, de <https://www.hydropower.org/sites/default/files/publications-docs/2013%20IHA%20Hydropower%20Report.pdf>

James Bennett, A. B. (19 de octubre de 2006). *PID Tuning Via Classical*. Recuperado el 30 de septiembre de 2015, de

[https://controls.engin.umich.edu/wiki/index.php/PIDTuningClassical#Ziegler-Nichols\\_Method](https://controls.engin.umich.edu/wiki/index.php/PIDTuningClassical#Ziegler-Nichols_Method)

Jawad, H. J. (2013). *Particle Swarm Optimization Based Optimum PID Controller for Governor System of Synchronous Generator*. Recuperado el 13 de octubre de 2015, de <http://www.iasj.net/iasj?func=fulltext&aId=80766>

Landau, I., Lozano, R., Saad, M., & Karimi, A. (2011). *Adaptive Control: Algorithms, Analysis and Applications*. Recuperado el 29 de octubre de 2015, de Springer: [www.springer.com/.../9780857296634-c1.pdf](http://www.springer.com/.../9780857296634-c1.pdf)

Lavretsky, E. (s.f.). *Adaptive Control: Introduction, Overview, and Applications*. Recuperado el 29 de octubre de 2015, de

[http://www.cds.caltech.edu/archive/help/uploads/wiki/files/140/IEEE\\_WorkShop\\_Slides\\_Lavretsky.pdf](http://www.cds.caltech.edu/archive/help/uploads/wiki/files/140/IEEE_WorkShop_Slides_Lavretsky.pdf)

M. Alvarez, J. G. (octubre de 2007). *Diseño e Implementación de un Sistema de Control de Frecuencia y Voltaje*. Recuperado el 26 de octubre de 2015, de Revista Tecnológica ESPOL: <http://www.rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/viewFile/161/105>

Mathworks. (s.f.). *Particle Swarm Optimization Algorithm*. Recuperado el 3 de octubre de 2015, de <http://www.mathworks.com/help/gads/particle-swarm-optimization-algorithm.html?refresh=true>

Mendoza, J. L. (octubre de 2004). Recuperado el 25 de septiembre de 2015, de Control Supervisorio Difuso para un Sistema Híbrido de Generación Eléctrica.

Meshram, S., Agnihotri, G., & Gupta, S. (december de 2012). *A Modern Two DOF Controller for Grid Integration with Solar Power Generator*. Recuperado el 10 de octubre de 2015, de International Journal of Electrical Engineering and Technology: [www.jifactor.com](http://www.jifactor.com)

- Meshram, S., Agnihotri, G., & Gupta, S. (30 de mayo de 2013). Recuperado el 16 de octubre de 2015, de Performance Analysis of Grid Integrated Hydro and Solar Based Hybrid Systems: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/697049>
- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (s.f.). *Proyectos de Generación*. Recuperado el 5 de octubre de 2015, de <http://www.energia.gob.ec/coca-codo-sinclair/#>
- National Instruments. (29 de marzo de 2011). *PID Theory Explained*. Recuperado el 30 de septiembre de 2015, de <http://www.ni.com>
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderno*. Madrid : Pearson Education.
- Qinghai, B. (febrero de 2010). *Analysis of Particle Swarm Optimization Algorithm*. Recuperado el 3 de octubre de 2015, de <http://www.ccsenet.org/journal/index.php/cis/article/viewFile/5131/4314>
- Ronald, C., Romero, M., & Falcones, S. (s.f.). *Diseño del Control y Simulación de un Sistema de Generación Eléctrica basado en Módulos Fotovoltaicos un Inversor Monofásico conectado a la Red y Baterías como unidad de Almacenamiento*. Recuperado el 30 de octubre de 2015, de ESPOL: [//www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/16034/1/Diseño%20del%20Control%20y%20Simulación%20de%20un%20Sistema%20de%20Generación%20Eléctrica%20Basado%20en%20Módulos%20Fotovoltaicos.pdf](http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/16034/1/Diseño%20del%20Control%20y%20Simulación%20de%20un%20Sistema%20de%20Generación%20Eléctrica%20Basado%20en%20Módulos%20Fotovoltaicos.pdf)
- Salazar, G., & Rudnick, H. (2008). *Hydro Power Plants in Ecuador: A technical and Economic Analysis*. Recuperado el 10 de octubre de 2015, de <http://web.ing.puc.cl/power/paperspdf/SalazarRudnick.pdf>
- Tarique, A., & Gabbar, H. A. (21 de marzo de 2013). *Particle Swarm Optimization Based Turbine Control*. Recuperado el 25 de septiembre de 2015, de <http://dx.doi.org/10.4236/ica.2013.42018>
- U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Power Resources Office. (julio de 2005). *Hydroelectric Power*. Recuperado el 14 de septiembre de 2015, de <http://www.usbr.gov/power/edu/pamphlet.pdf>
- Valenciaga, F. (noviembre de 2001). *Control de Estructura Variable en Sistemas Híbridos de Generación de Energía*. Recuperado el 18 de septiembre de 2015, de [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/1359/Documento\\_completo\\_.pdf?sequence=37](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/1359/Documento_completo_.pdf?sequence=37)