

Experimental evaluation of Fuzzy controller performance applied in autonomous photovoltaic system

Cleonor Crescêncio das Neves ^a, Renan Landau Paiva de Medeiros ^b, Walter Barra Junior ^a, Florindo Antônio de Carvalho Ayres Junior ^b, Felipe Kioshi Yoshino ^a & Adrian Eduardo Gonzalez Barreda ^b

^a Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil. cleonor.neves@ufam.edu.br, walbarra@ufpa.br, felipekyo@hotmail.com,

^b Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Amazonas, Brasil. renanlandau@ufam.edu.br, florindoayres@ufam.edu.br, adrianbarreda@yahoo.com

Received: April 4th, 2019. Received in revised form: November 15th, 2019. Accepted: November 28th, 2019.

Abstract

This paper aiming to show an experimental evaluation of classic pole placement and Fuzzy controller design applied on the DC link voltage control in autonomous photovoltaic system in order to ensure the stability and desired performance. First stage shows the mathematical model to describe the dynamic behaviour, so was linearized the system around the operational point based on Taylor series approach. In sequence was performed the computational analysis using MATLAB software. Furthermore, was performed the experimental assessment about the dynamic behaviour in open loop of the autonomous photovoltaic system, mainly electrical variables of the system. In second stage, the experimental evaluation realized for these approaches (PI-classic and PI-Fuzzy) was applied on the system, assessing the dynamic behaviour in closed-loop ensuring the stability and desired performance subject to voltage setpoint variation. Finally, were compared the design control techniques and the experimental results shows the Fuzzy controller outperforms the classical design technique.

Keywords: autonomous photovoltaic system; PI-Fuzzy controller; classic PI controller and Pole placement technique.

Evaluación experimental del rendimiento de los controladores Fuzzy aplicados en un sistema fotovoltaico autónomo

Resumen

En este artículo se pretende llevar a cabo una evaluación experimental de la utilización de técnicas de asignación de polos en el control Fuzzy aplicadas al flujo de CC en un sistema fotovoltaico autónomo, con el fin de garantizar una condición de estabilidad y un determinado rendimiento para la operación del sistema. Es presentado en la primera etapa del trabajo un modelo matemático que describe adecuadamente el comportamiento dinámico en cuestión fue linealizado el sistema en torno a un punto de operación haciendo uso de las series de Taylor, seguido por el análisis en un ambiente computacional del modelo linealizado del sistema fotovoltaico. Posteriormente, se evaluó de manera experimental el comportamiento dinámico en lazo abierto del sistema fotovoltaico autónomo, observando sus principales variables eléctricas (voltaje y corriente eléctrica). En la segunda etapa del trabajo, se investigó experimentalmente la aplicación de las técnicas de diseño de controladores PI clásico y controladores Fuzzy, con el objetivo de evaluar el comportamiento dinámico del sistema en lazo cerrado y garantizar la estabilidad de este, para pruebas en la variación del voltaje de referencia. Por fin, se presentaron los resultados de la evaluación experimental que demostró un mejor desempeño del controlador Fuzzy en comparación al controlador proyectado por la metodología clásica, cuando utilizada una planta fotovoltaica autónoma.

Palabras clave: sistemas fotovoltaicos autónomos; controlador PI-Fuzzy; controlador PI clásico y técnica de asignación de polos.

How to cite: Neves, C.C., Medeiros, R.L.P., Junior, W.B., Junior, F.A.C.A., Yoshino, F.K. and Gonzalez-Barreda, A.E., Experimental evaluation of Fuzzy controller performance applied in autonomous photovoltaic system. DYNA, 86(211), pp. 354-362, October - December, 2019.

1. Introducción

La región amazónica presenta gran potencial para utilizar la generación fotovoltaica, debido a un alto nivel de irradiancia en torno de 5000 a 5300 W/m². En este sentido, las técnicas de control clásicas y avanzadas se utilizan para controlar la tensión de salida en el sistema autónomo. Muchos trabajos abogan por el uso de un sistema de control robusto, que tienen como propósito garantizar la estabilidad del sistema fotovoltaico autónomo y la seguridad del usuario para una banda de incertidumbres determinada (Jahangir, 2012), (Sahraoui, 2014) (Drid, 2014). Los trabajos de búsquedas en mejoras de la eficiencia en los convertidores son también una de las etapas del sistema, además de otras fuentes alternativas como: energía eólica, energía de gas natural, energía hidroeléctrica y energía solar (Pinto,2016).

Basado en la importancia de la energía solar para la comunidad, por ser limpia y silenciosa, el sentido de la investigación se ha dirigido, a partir de la aplicación de técnicas de control para para el buen desempeño de las variables de salida ante la presencia de perturbaciones como temperatura y sombreado, la teoría de control Fuzzy empleando el modelo Mamdani ha alcanzado las expectativas de rendimiento además, permitió la conexión a la red eléctrica del sistema fotovoltaico, creando a su vez la característica de generación distribuida y dando una nueva reconfiguración del sistema eléctrico de potencia, donde el consumidor pasa a tener la capacidad de generar localmente su propio consumo (Fernández, 2014).

Varios trabajos hacen uso de un proyecto de un control PI a través de metodologías de redes neuronales y técnicas de optimización (Saad, 2006) (Bastos, 2014). Otro trabajo que trata de metodologías avanzadas de proyectos de control aplicados en sistemas de distribución de energía se encuentra en (Yazdani, 2009), estos proyectos son basados en sistemas inteligentes de control. Ante estos precedentes de investigación, este trabajo presenta un análisis de la metodología en un ambiente estructurado bajo la plataforma Arduino, en el cual funciona un sistema fotovoltaico aislado controlado por un PI-Fuzzy.

Debido al alto costo de la instauración del sistema fotovoltaico, demostrado con el sistema autónomo en (Pinto, 2016), este trabajo pretende realizar el control y mejorar el desempeño del sistema, en un ambiente que no posea red eléctrica.

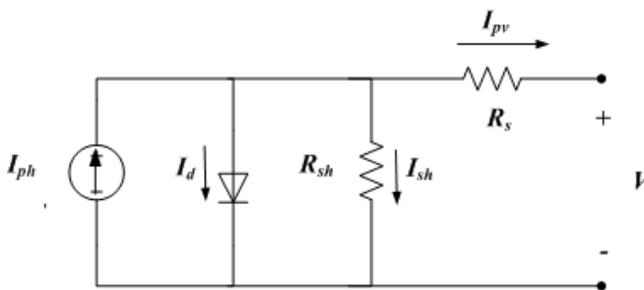


Figura 1. Circuito equivalente de una célula fotovoltaica. Fuente: Los Autores.

Este artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta el modelo matemático de un generador fotovoltaico; en la sección 3 se muestra el proyecto de un controlador PI-Fuzzy; en la sección 4 es presentada la metodología utilizada; en la sección 5 es presentado el análisis de los resultados obtenidos y por último, en la sección 6 se exhiben las consideraciones finales y las conclusiones del estudio desarrollado.

2. Modelo del generador fotovoltaico

2.1. Modelo matemático no lineal del modelo fotovoltaico

El modelo eléctrico equivalente del generador fotovoltaico presenta las pérdidas de voltaje y de corriente, que son las resistencias R_s y R_{sh}, respectivamente, de acuerdo con la Fig. 1. La resistencia en serie (R_s) representa las pérdidas de calor por efecto Joule que ocurren en las propias células a través de la resistencia eléctrica del material y de la resistencia de los contactos metálicos de la misma. La resistencia en paralelo (R_{sh}) proviene de las pérdidas acarreadas por corrientes parásitas que circulan en las células debido, principalmente, a las pequeñas imperfecciones en la estructura del material o impurezas (Ding, 2014) (Dyreson, 2014) (Lorent, 2014).

En un circuito ideal, las resistencias R_s y R_{sh} pueden ser despreciadas, sin embargo se utilizará el modelo de la Fig. 1. Así, la ecuación que expresa la corriente entregada (I_{pv}) en la carga será dada por las Ec. (1) - (2).

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{1}$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \left(e^{\frac{V + R_s I}{m_{pn} V_{term}}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \tag{2}$$

Todos los parámetros utilizados en las ecuaciones anteriores se describen en la tabla 3.

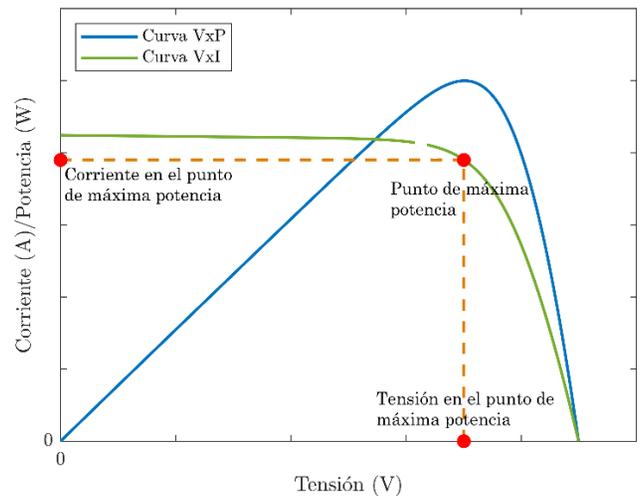


Figura 2. Curva característica de voltaje, corriente y potencia de un panel fotovoltaico. Fuente: Los Autores.

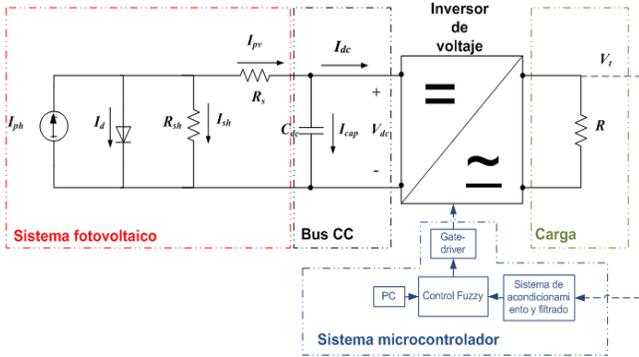


Figura 3. Sistema fotovoltaico autónomo.
Fuente: Los Autores.

2.2. Curvas características de voltaje, corriente y potencia

Para que la ecuación (1) sea igual a la ecuación (2), es necesario que las resistencias R_{sh} y R_s sean infinitas y cero, respectivamente. Valores bajos de R_{sh} causan una reducción en la corriente debido a la relación entre voltaje y corriente (pérdidas en las células), por el hecho de que parte de la corriente fotogenerada, fluye internamente por el generador fotovoltaico. Valores elevados de R_s aumentan la caída de tensión interna del generador, limitando la corriente fotogenerada y consecuentemente la potencia máxima generada. La Fig. 2 representa la curva característica de corriente, tensión y potencia de un sistema fotovoltaico.

2.3. Dinámica del sistema fotovoltaico

El modelo dinámico del sistema fotovoltaico se dará por la constitución de un flujo de CC, a través del cual el panel fotovoltaico va a ser cargado, este a su vez será interconectado a un inversor de tensión y así alimentará una carga local. La Fig. 3 representa un diagrama genérico de un sistema fotovoltaico autónomo.

Observando la Fig. 3, se puede obtener la siguiente ecuación para representar la dinámica de un sistema fotovoltaico autónomo.

$$I_{pv} = I_{cap} + I_{dc} \quad (3)$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} \left(I_{pv} - \frac{3m^2 V_{dc}}{8R} \right) \quad (4)$$

$$I_{dc} V_{dc} = 3 \frac{\left(\frac{\sqrt{2}}{4} m V_{dc} \right)^2}{R} \quad (5)$$

$$I_{dc} = \frac{3m^2 V_{dc}}{8R} \quad (6)$$

Considerando que $R_s \ll R_{sh}$ (Resistencia en serie mucho menor que la resistencia en paralelo), Se puede escribir la siguiente relación.

$$I_{pv} = I_{ph} - A \left(e^{\frac{V}{2.1 \times m_{pn} \times V_{term} + V_{cc}}} - 1 \right) \quad (7)$$

Para la representación en espacio de estados, es necesario adoptar las variables de entrada, de estado y de salida a fin de obtener la función de transferencia del sistema linealizado en un punto de operación, considerando lo siguiente:

Variable de entrada - Índice de modulación del variador
Variable de salida - Voltaje de salida de CA del variador
Variable de estado - Voltaje de entrada CC del variador
De esta forma, se verifican las siguientes relaciones.

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} \left(I_L - AB - \frac{3m^2 V_{dc}}{8R} \right) \quad (8)$$

$$B = \left(e^{\frac{V}{2.1 \times m_{pn} \times V_{term} + V_{cc}}} - 1 \right) \quad (9)$$

Para un estudio sobre pequeñas variaciones de las señales, en torno a un punto de operación se realizará la linealización del sistema a través de la serie de Taylor, de esta forma, se obtiene el siguiente sistema linealizado.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x} &= a \Delta x + b \Delta u \\ \Delta y &= c \Delta x + d \Delta u \end{aligned} \quad (10)$$

$$a = \left[\frac{\frac{V_{DC}^o}{2.1 C_{DC} m_{pn} V_{term} V_{CA}}}{2.1 C_{DC} m_{pn} V_{term} V_{CA}} + \frac{3(m^o)^2}{4 R C_{DC}} \right] \quad (11)$$

$$b = -\frac{3m^o V_{DC}^o}{4 R C_{DC}} \quad (12)$$

$$c = \frac{\sqrt{2}}{4} m^o \quad (13)$$

$$d = \frac{\sqrt{2}}{4} V_{DC}^o \quad (14)$$

A partir de la representación en espacio de estado, se define la siguiente función de transferencia.

$$G(s) = \frac{V_t(s)}{m(s)} = \frac{cb}{s+a} + d \quad (15)$$

Organizando la Ec. (15) se obtiene:

$$G(s) = \frac{V_t(s)}{m(s)} = \frac{ds + (ad + b)}{s + a} \quad (16)$$

Al definir la función de transferencia del sistema linealizado, es posible proyectar un controlador para un determinado punto de operación del sistema fotovoltaico autónomo.

3. Diseño del controlador PI-Fuzzy

Para el estudio que va a ser implementado en este artículo, se hará una breve introducción de la metodología de control Fuzzy que será utilizada para la realización del control de la tensión CC del Generador Fotovoltaico (GF). En este sentido el sistema Fuzzy está formado por 4 componentes: un procesador ubicado en la entrada que realiza la fuzzificación de los datos de entrada, una base de reglas, una máquina de inferencia para la toma de decisiones y un procesador que proporciona un vector de salida (Wang,1996)(Fernandez,2014).

El controlador PI-Fuzzy tiene dos entradas: el error y la derivada del error (variación instantánea del error), y en la salida la derivada de la señal de control (dU) (Wang,1996). En resumen, el controlador PI-Fuzzy hace una búsqueda del valor ideal de la señal de control (U) para ser aplicada en la planta, teniendo como parámetros de referencia el error y la variación del error del sistema. Para el proyecto del controlador PI-Fuzzy, se utilizó el método de Mamdani y las funciones de pertinencias utilizadas para el error y la variación del error fueron triangulares, como se muestra en la Fig. 4.

Las abreviaturas NVB, NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB y PVB significan: Negative Very Big, Negative Big, Negative Medium, Negative Small, zero, Positive Small, Positive Medium, Positive Big y Positive Very Big. y representan las funciones de pertinencia para el grado de negatividad o positividad de las variables error y derivada del error.

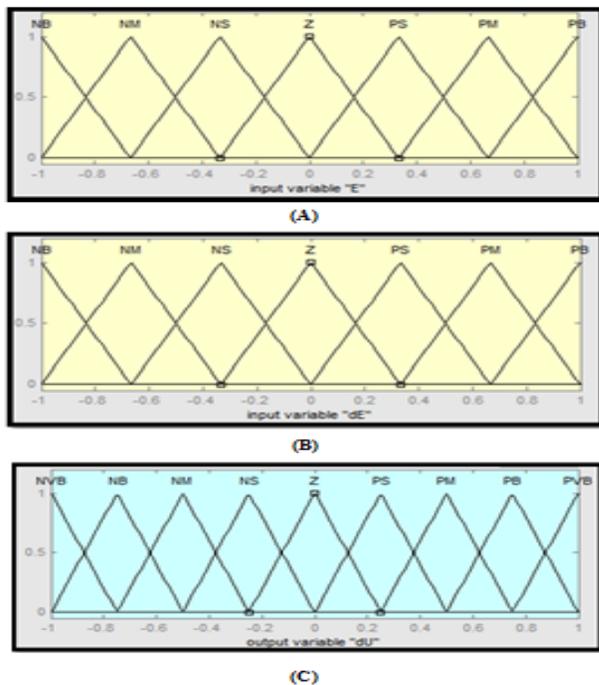


Figura 4. Función de pertinencia de las entradas y salidas del sistema Fuzzy. (A) - Función de pertinencia de la entrada error. (B) - Función de pertinencia de la entrada derivada del error. (C) - Función de pertinencia de la salida derivada de la señal de control.

Fuente: Los Autores.

De acuerdo con las funciones de pertinencia presentadas anteriormente, se puede observar que las variables de entrada y salida del sistema Fuzzy admite valores correspondientes al intervalo de [-1, 1]. Por lo tanto, es necesario limitar los valores de las variables dE y E además de ampliar el valor de salida dU para que el sistema opere de la forma deseada. La Tabla 1 presenta la base de reglas constituida para la implementación del controlador Fuzzy. La Fig. 5 presenta un diagrama de flujo del proceso de diseño del controlador PI-Fuzzy.

La Fig. 6 muestra el diagrama de bloques del sistema fotovoltaico modelado con el controlador PI-Fuzzy.

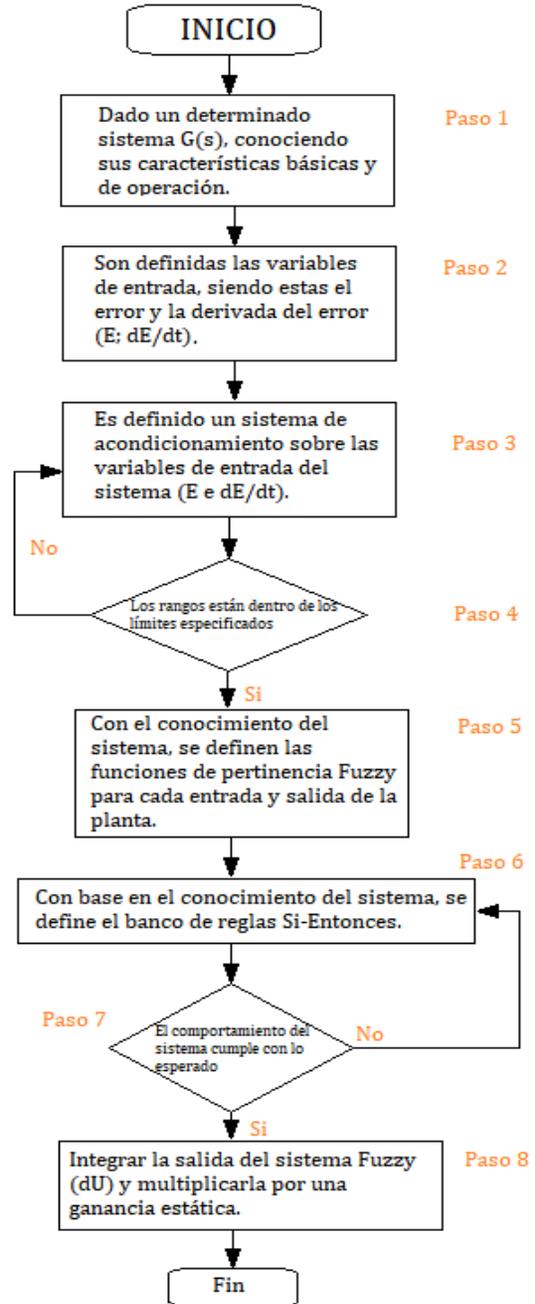


Figura 5. Diagrama de flujo del proyecto de un controlador Fuzzy. Fuente: Los Autores.

Tabla 1.
Base de reglas para el controlador PI-Fuzzy.

| | | | | | | | |
|----------|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|
| dE \ E | NB | NM | NS | Z | PS | PM | PB |
| NB | NVB | NVB | NVB | NB | NM | NS | Z |
| NM | NVB | NVB | NB | NM | NS | Z | PS |
| NS | NVB | NB | NM | NS | Z | PS | PM |
| Z | NB | NM | NS | Z | PS | PM | PB |
| PS | NM | NS | Z | PS | PM | PB | PVB |
| PM | NS | Z | PS | PM | PB | PVB | PVB |
| PB | Z | PS | PM | PB | PVB | PVB | PVB |

Fuente: Los Autores.

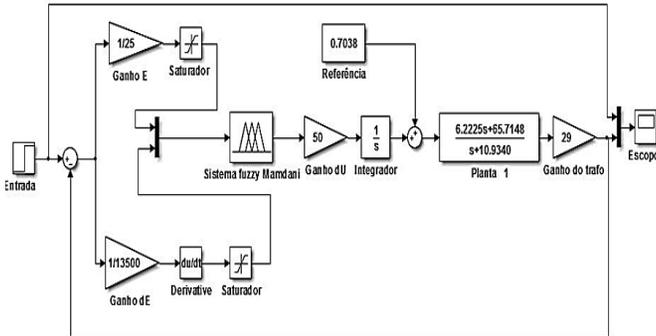


Figura 6. Diagrama de bloques del controlador Fuzzy simulado.
Fuente: Los Autores.

4. Metodología

En este trabajo, se desarrolló un modelo matemático que describe adecuadamente la dinámica de un panel fotovoltaico, a continuación, con el objetivo de alcanzar un desempeño deseado, se proyectó un controlador con el fin de realizar la estabilización del bus de CC, así como obtener un rendimiento satisfactorio para el sistema. Inicialmente, se desarrolló un estudio computacional, utilizando el entorno del software MATLAB, para analizar la interacción de las estrategias de control propuestas en el sistema fotovoltaico. A continuación, se desarrollaron las pruebas simuladas y prácticas en un sistema real para verificar las características del panel fotovoltaico, a través de la observación de las curvas de corriente y tensión del sistema, seguidamente, se realizó una evaluación de la dinámica del modelo matemático obtenido, comparando los resultados reales con los resultados simulados. En consecuencia, se desarrolló un sistema embarcado, para implementar los controladores diseñados y aplicarlos en el sistema real. Para la realización de la parte práctica de este estudio, se utilizó el siguiente panel fotovoltaico con la instrumentación desarrollada, como muestra la Fig. 7. La Tabla 2 presenta las especificaciones técnicas del panel utilizado para la realización del estudio. Para el desarrollo del modelo matemático, así como para el desarrollo de la simulación, se utilizó el punto operacional presentado por los parámetros de la Tabla 3.

Tabla 2.
Especificaciones técnicas del panel utilizado.

| Param. | Uni. | Valor | Descripción |
|------------|------|-------|---|
| P_{max} | W | 240 | Potencia máxima del panel. |
| I_{pmax} | A | 8.02 | Corriente generada en el punto de máxima potencia generada. |
| V_{pmax} | V | 29.5 | Tensión generada en el punto de máxima potencia generada. |
| I_{sc} | A | 8.54 | Corriente de corto circuito. |
| V_{oc} | V | 37.03 | Tensión de circuito abierto del panel. |

Fuente: Hoja de datos, panel Kiocera.

Tabla 3.
Valores de los parámetros de una correa transportadora.

| Var. | Uni. | Val. | Descripción |
|--------------|----------|-------------------------|---|
| Q | C | 1.602×10^{-19} | Carga do electrón |
| K | J/K | 1.381×10^{-23} | Constante de Boltzman |
| T_o | K | 300 | Temperatura de operación |
| V_{term} | mV | 25.86 | Tensión térmica |
| m_{pn} | - | 1.2 | Factor de dualidad |
| V_{ca} | V | 22.3 | Tensión de circuito abierto |
| I_{cc} | A | 4.21 | Corriente de corto circuito |
| V_{pmax} | V | 17.6 | Tensión en el punto de máxima potencia |
| I_{pmax} | A | 4.0 | Corriente en el punto de máxima potencia |
| R_p | Ω | 106.2 | Resistencia paralela |
| C_{DC} | mF | 10 | Capacidad |
| m^o | - | 0.7038 | Índice de modulación del inversor |
| R^o | Ω | 400 | Carga |
| V^{o}_{dc} | V | 17.6 | Tensión do link CC |
| V^o_i | V | 4.3793 | Tensión de fase del lado CA del inversor. |

Fuente: Los Autores.



Figura 7. Sistema fotovoltaico. (A) Panel fotovoltaico Atersa. (B) Banco de lámparas para emulación de la irradiación. (C) Sistema embarcado desarrollado.

Fuente: Los Autores.

Si se utiliza el valor de los parámetros contenidos en la Tabla 3, se puede obtener la siguiente función de transferencia que representa la dinámica del sistema fotovoltaico, como muestra la ecuación 17.

$$G(s) = \frac{V_i(s)}{m(s)} = \frac{6.2225s + 65.7148}{s + 10.9340} \quad (17)$$

5. Análisis de resultados

5.1. Evaluación experimental del sistema fotovoltaico operando en lazo abierto

Para la realización de la evaluación experimental del comportamiento dinámico del sistema fotovoltaico, se hace necesario la observación del comportamiento de las curvas de tensión y corriente conjuntamente con la asociación de dos módulos fotovoltaicos, inicialmente se observa su comportamiento con estos paneles conectados en serie y en paralelo, con carga de alimentación de una batería de 12V y los módulos se encuentran en la asociación serie, de esta forma el gráfico se inicia con un valor de tensión cercano a 42 V, ver Fig. 8. Teóricamente, el valor de tensión de esta asociación debería ser de 44,6 V, esta diferencia se debe al hecho de que la temperatura de operación del módulo es diferente al del estándar (25°C), pues en el momento de la realización del experimento los sensores térmicos indicaban el valor de 39,8°C, siendo este valor medido en el centro de la parte posterior de cada panel. En el momento en que la llave selectora ajusta la tensión de salida para la batería, la tensión cae y comienza a fluir una corriente de carga por la misma, después de unos segundos, se cambia la asociación de serie a paralelo, doblando el valor de la corriente. Se puede verificar tales situaciones a través de la Fig. 8, donde se observa que la curva de color blanco representa el nivel de tensión y la curva de color rojo representa el nivel de corriente.

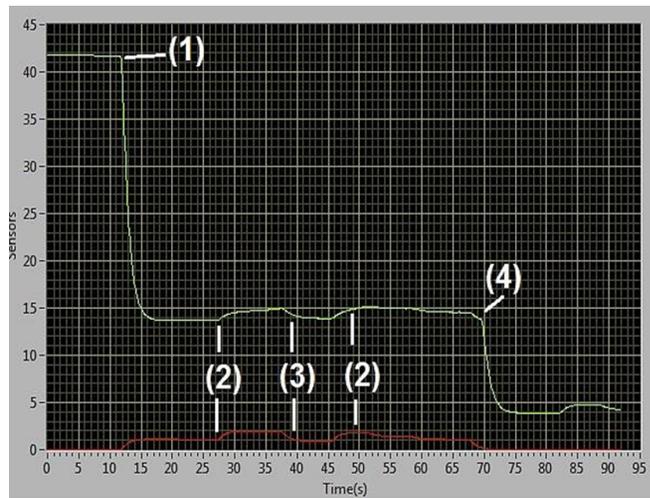


Figura 8. Curvas de tensión y corriente según la asociación de los paneles fotovoltaicos.
Fuente: Los Autores.

Se puede observar que hay cuatro transiciones, que se produjeron por las siguientes razones:

1. Llave de salida de la asociación serie de módulos en la batería.
2. Cambio de combinación de serie a paralelo.
3. Cambio de combinación de paralelo a serie.
4. Desconexión del generador.

5.2. Validación del modelo matemático desarrollado

Con el fin de validar el modelo desarrollado, se realizó la prueba de lazo abierto en el sistema real, comparándolo con el comportamiento del sistema simulado. La Fig. 9 presenta el comportamiento de la planta real y del modelo simulado.

Se puede verificar en la Fig. 9, que el modelo desarrollado representa adecuadamente el sistema en cuestión, validando de esta manera el modelo matemático obtenido.

5.3. Evaluación en ambiente computacional del sistema fotovoltaico operando en lazo cerrado con los controladores implementados

Para la aplicación del control de tensión del bus CC, se desarrolló un controlador discreto a través del método indirecto de proyecto de controladores, se proyectó el controlador en el dominio continuo de la frecuencia y luego se transportó el resultado para el dominio de tiempo discreto haciendo uso del método de Tustin, para el diseño del controlador clásico por la técnica de asignación de polos. A continuación, se utilizó el método de Tustin para la obtención del equivalente discreto del sistema, con el tiempo de muestreo de 0.01 segundos, obteniéndose la relación (18). La Tabla 4 representa las especificaciones de rendimiento utilizadas para el proceso de obtención del controlador clásico.

$$C(z) = \frac{-93.87772z + 108.1245}{z - 1} \quad (18)$$

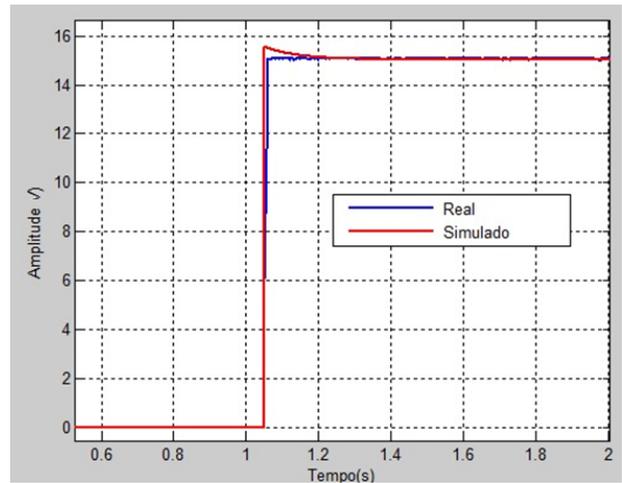


Figura 9. Validación del modelo fotovoltaico desarrollado, comparando ambos modelos tanto el sistema real como el simulado.
Fuente: Los Autores.

Tabla 4.

Especificación de rendimiento deseada para el sistema en lazo cerrado malla cerrada.

| Param. | Uni. | Valor | Descripción |
|--------|------|------------|-------------------------------|
| T_s | seg. | ≤ 0.1 | Tiempo de asentamiento |
| ξ | - | 0.7 | Coefficiente de amortiguación |

Fuente: Los Autores.

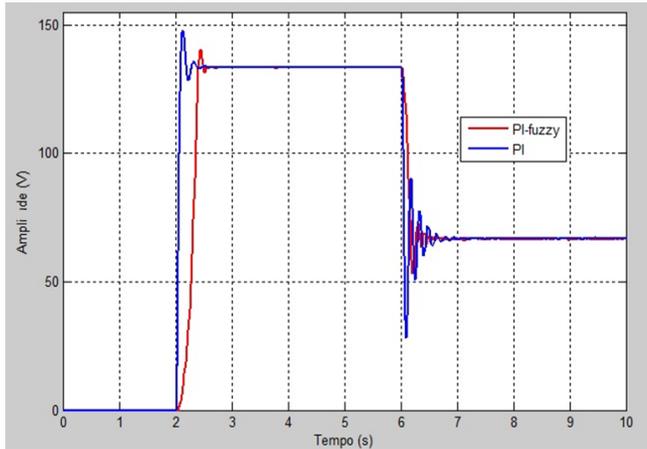


Figura 10. Análisis en ambiente computacional de la variación del setpoint de tensión. Fuente: Los Autores.

A continuación, se comparó el controlador clásico con el controlador Fuzzy de baja ganancia. La Fig. 10 representa la respuesta en lazo cerrado de un sistema fotovoltaico, haciendo uso de las dos estrategias de control arriba citadas. En la Fig. 10, se observa que el sistema se inicia en 2 segundos, presentando una tensión de referencia de 127 V, a los 6 segundos se produce un cambio del setpoint a 60 V.

Se observa en la Fig. 10, que el controlador PI-Fuzzy con bajo valor de ganancia, tiene un pequeño retardo para la realización del control durante el arranque, sin embargo, este presenta un valor reducido del máximo sobrepaso y un tiempo de asentamiento menor, cuando comparado con el controlador PI proyectado por la técnica de asignación de polos.

Con el fin de mejorar la respuesta transitoria del sistema con el controlador Fuzzy, se ha incrementado la ganancia estática en una proporción de 10 veces. La Fig. 11 presenta la respuesta del sistema fotovoltaico, haciendo uso de las dos estrategias de control abordadas en este estudio, la estrategia de control Fuzzy y clásica tuvieron sus aumentos estáticos amplificados en una proporción de 10 veces.

Se observa en la Fig. 11 que el aumento de la ganancia estática proporcionó una sensible mejora en la respuesta transitoria del sistema, de modo que el controlador mediante la asignación de polos tornó el sistema menos oscilatorio y disminuyó el tiempo de asentamiento, también se observa que dicho aumento de la ganancia en el controlador Fuzzy proporcionó una mejora en la respuesta transitoria y disminuyó el tiempo de retraso durante la partida del sistema. Se verificó una mejora también a través de la disminución del tiempo de asentamiento del sistema.

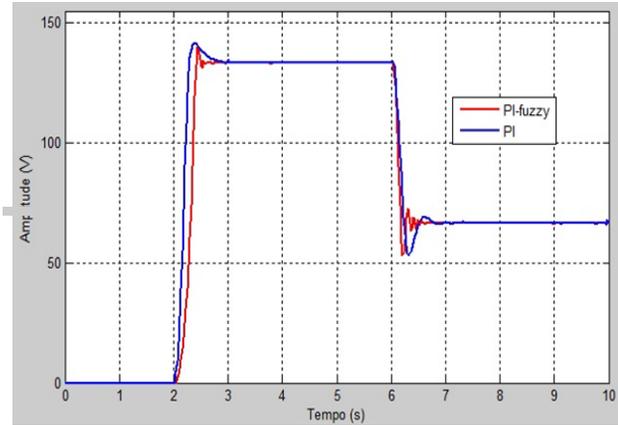


Figura 11. Análisis en ambiente computacional de la variación del (setpoint) punto de consigna de tensión. Fuente: Los Autores.

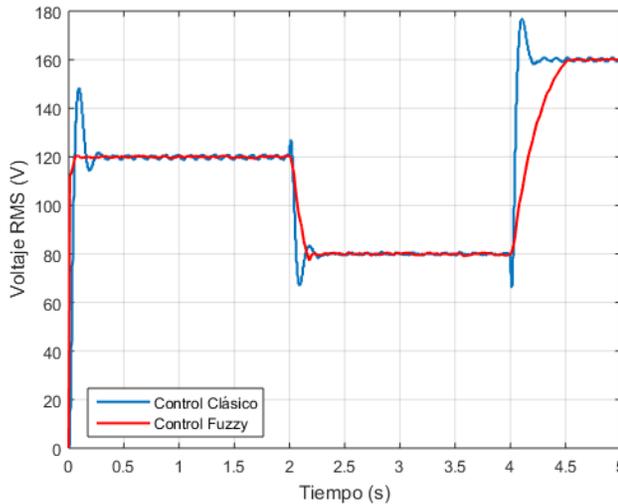


Figura 12. Evaluación experimental de la variación del punto de consigna de tensión de referencia. Fuente: Los Autores.

5.4. Evaluación experimental del sistema fotovoltaico operando en lazo cerrado con los controladores proyectados

Después de un breve análisis y evaluación del comportamiento del sistema en ambiente computacional, se realizó un análisis experimental con relación a la comparación de los resultados presentados por las respectivas técnicas de control.

La Fig. 12 representa la respuesta en lazo cerrado de un sistema fotovoltaico real, utilizando las dos estrategias de control arriba citadas. En esta figura se observa que en el momento de partida del sistema hay un aumento en la tensión, por parte del controlador clásico, mientras que el controlador Fuzzy presenta un menor tiempo de asentamiento inferior al del controlador clásico, ratificando los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas con el modelo desarrollado. A continuación, se realizó una variación del punto de consigna (setpoint) del valor de referencia de la

tensión, con el objetivo de observar el comportamiento dinámico de los controladores. De este modo se observa que el controlador Fuzzy presentó un mejor desempeño con relación al controlador clásico, presentando bajo sobrepaso, así como menor tiempo de asentamiento, corroborando los resultados obtenidos a través del entorno computacional.

La Fig. 13 representa la señal de control del convertidor de potencia conectado al bus CC, mostrando el ciclo de trabajo de la llave estática.

Se observa en la Fig. 13, una mayor variación de la señal de control por parte de la metodología Fuzzy en comparación a la clásica, así como una mayor demanda energética. Tal hecho se justifica con el fin de suavizar las oscilaciones de la tensión de salida y garantizar el desempeño deseado a través del controlador implementado.

La Fig. 14 representa la evaluación experimental del error relativo, dado en porcentaje relacionado a la salida del sistema fotovoltaico. Se observa en la Fig. 14 que el error relativo relacionado al sistema en lazo cerrado con la aplicación del controlador Fuzzy presenta menor amplitud, ratificando el buen desempeño de la técnica de control Fuzzy en comparación a la técnica clásica de control.

La Tabla 5 presenta un análisis comparativo entre la aplicación de las dos técnicas de control propuestas (Control Fuzzy versus Control Clásico (técnica de asignación de polos), para observar la evaluación de algunos parámetros de desempeño, siendo estos: tiempo de asentamiento, máximo sobrepaso y la función de costo ISE (Integral Square Error).

En la Tabla 5 se muestran los valores de rendimiento del sistema con ambas estrategias de control aplicadas en este trabajo, así como sus respectivas evaluaciones en ambiente de simulación y experimental, se verificó que el controlador Fuzzy para ambas pruebas tanto experimental como computacional presentó mejores índices de desempeño y de rendimiento, corroborándose de este modo su utilización para aplicaciones en sistemas fotovoltaicos.

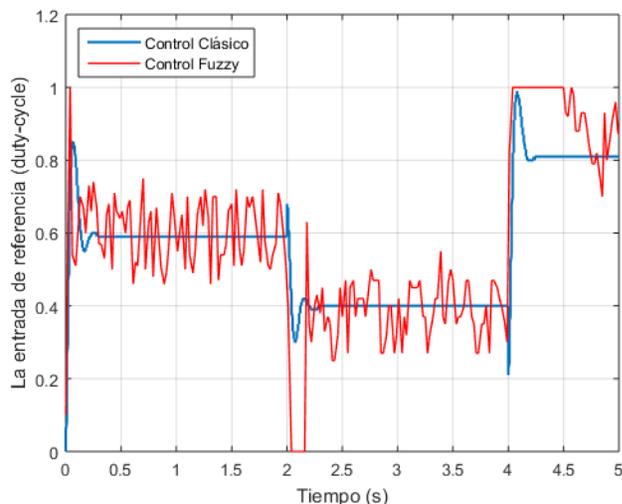


Figura 13. Evaluación experimental de la señal de control de las técnicas de control abordadas, caracterizando el ciclo de trabajo de la llave estática del convertidor de potencia del bus CC.

Fuente: Los Autores.

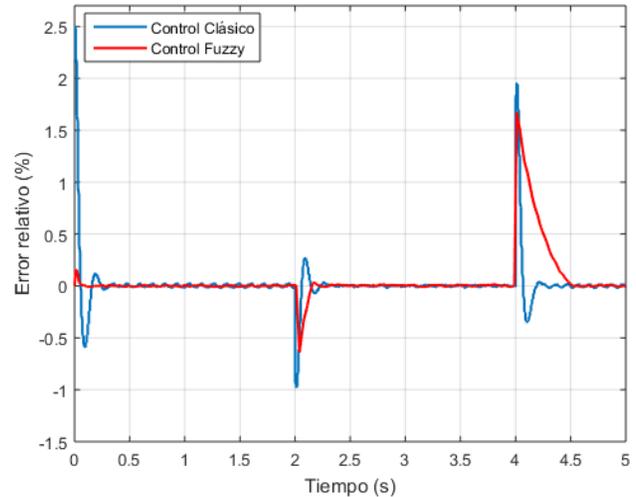


Figura 14. Evaluación experimental del error relativo porcentual de la salida del sistema fotovoltaico.

Fuente: Los Autores.

Tabla 5.

Análisis comparativo de los parámetros de desempeño de las metodologías de control empleadas.

| | | Par | Val. | Uni | Descripción |
|---------------------|----------------|-------|-------------------------|------|-------------------------------|
| Controlador Clásico | Sist. Simulado | T_s | 0.65 | seg. | Tiempo de asentamiento |
| | | M_p | 11.82 | % | Máximo Sobrepaso |
| | | ISE | 3.521×10^{-4} | - | Integral del error cuadrático |
| Controlador Fuzzy | Sist. Simulado | T_s | 0.25 | seg. | Tiempo de asentamiento |
| | | M_p | 7.87 | % | Máximo Sobrepaso |
| | | ISE | 1.033×10^{-4} | - | Integral del error cuadrático |
| Controlador Clásico | Sist. Real | T_s | 0.42 | seg. | Tiempo de asentamiento |
| | | M_p | 22.67 | % | Máximo Sobrepaso |
| | | ISE | 4.5521×10^{-4} | - | Integral del error cuadrático |
| Controlador Fuzzy | Sist. Real | T_s | 0.06 | seg. | Tiempo de asentamiento |
| | | M_p | 0.33 | % | Máximo Sobrepaso |
| | | ISE | 2.0826×10^{-5} | - | Integral del error cuadrático |

Fuente: Los Autores.

6. Conclusiones

Este trabajo presentó una propuesta del modelado de un sistema fotovoltaico autónomo, así como la validación del modelo dinámico propuesto y la realización de una evaluación experimental de las estrategias de control PI clásico (método de asignación de polos) y PI-Fuzzy aplicadas a un sistema fotovoltaico real, con el objetivo de realizar un control de tensión del bus CC y realizar una variación de la tensión de referencia en la salida del sistema. Se realizó un

análisis comparativo, a través de pruebas experimentales en un sistema real fotovoltaico con las técnicas de control clásico y control Fuzzy. Los resultados obtenidos demostraron un rendimiento superior del controlador Fuzzy con relación al controlador clásico, en cuanto a la evaluación del comportamiento dinámico del sistema fotovoltaico, en el que el controlador Fuzzy presentó un tiempo de asentamiento inferior al del controlador clásico, así como la reducción de la tensión, cuando se sometió el sistema a la prueba de variación de la tensión de referencia. De este modo, los resultados confirman un mejor rendimiento del controlador Fuzzy para su aplicación en un sistema fotovoltaico autónomo.

Agradecimientos

Agradecemos a la UFPA, IFAM, UFAM, FAPEAM, CNPQ, CAPES y al grupo de investigación e-CONTROLS, por el financiamiento de este estudio.

Referencias

- [1] Ding, K., Zhang, J., Bian, X. and Xu, J., A simplified model for photovoltaic modules based on improved translatio equation. *Solar Energy*, 101, pp. 40-52, 2014. DOI: 10.1016/j.solener.2013.12.016
 - [2] Gomez-Lorente, D., Pedrazzi, S., Zini, G., Rosa, A.D. and Tartarini, P., Mismatch losses in PV power plants. *Solar Energy*, 100, pp. 42-49, 2014. DOI: 10.1016/j.solener.2013.11.026
 - [3] Dyreson, A.R., Morgan, E.R., Monger, S.H. and Acker, T.L., Modeling solar irradiance for large PV power plants using a 45- sensor network and the wavelet variability model. *Solar Energy*, 110, pp. 482-495, 2014. DOI: 10.1016/j.solener.2014.09.027
 - [4] Fialho, L., Melicia, R., Mendes, V.M.F, Viana, S., Rodrigues, C., Estanqueiro, A., A simulation of integrated photovoltaic conversion into electric grid. *Solar Energy*, 110, pp. 578-594, 2014. DOI: 10.1016/j.solener.2014.09.041
 - [5] Fernandez, F.S., Munõz-Garcia, M.A. and Saminger-Platz, S., Detecting clipping in photovoltaic solar plants using Fuzzy systems on the feature space. *Solar Energy*, 132, pp. 345-356, 2016. DOI: 10.1016/j.solener.2016.03.013
 - [6] Pinto, J.T.M., Amaral, K.J. and Janissek, P.R., Deployment of photovoltaics in Brazil: scenarios, perspectives and policies for low-income housing. *Solar Energy*, 133, pp. 73-84, 2016. DOI: 10.1016/j.solener.2016.03.048
 - [7] Carvalho, C.R.F., Sistema fotovoltaico isolado: uma aplicação prática no projeto xapuri. Lavras: Trabalho de Conclusão de Curso Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Brasil, 2013, 46 P.
 - [8] Saad, N.H., Sattarand, A.A. and Mansoar, A.M., Artificial neural controller for maximum power point tracking of photovoltaic systems. In: The Eleventh International Middle East Pomer Systems Conference (MEPCON'2006), Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, El-minia University, El-minia, Egypt, 2006.
 - [9] Yazdaniand, A. and Dash, P.P., A control methodology and characterization of dynamics for a photovoltaic (PV) system interfaced with a distribution network. In: *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(3), pp. 1538-1551, 2009.
 - [10] Bastos, R.F., Aguiar, C.R., Gonçalves, A.F.Q. and Machado, R.Q., An intelligent control system used to improve energy production from alternative sources with DC/DC integration. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(5), pp. 2486-2495, 2014.
 - [11] Drid, S., Chrifi-Alaoui, L., Bussy, P. and Ouriagli, M., Robust control of the photovoltaic system with improved maximum power point tracking. In: IX International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2014.
 - [12] Hossain, M.J., Saha, T.K., Mithulananthan, N. and Pota, H.R., Robust control strategy for PV system integration in distributed system. *Applied Energy*, 99, pp. 355-362, 2012. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.05.027
 - [13] Sahraoui, H., Drid, S., Chrifi-Alaoui, L., Ouriagli, M. and Bussy, P. Robust control of the Boost converter applied in photovoltaic systems using second order sliding mode. In: 15th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control & Computer Engineering - STA'2014, Hammamet, Tunisia, Dec., 2014.
 - [14] Wang, L.-X., A course in Fuzzy system and control. Prentice-Hall, 1st Ed., 1996.
- C.C. das Neves**, received the BSc. in Mathematics, MSc. in Electrical Engineering, in 1991, 2012, respectively, from the Federal University of Amazonas (UFAM) and Federal University of Pará (UFPA), Brazil, respectively. He is currently an associate professor at the Department of Control and Automation Engineering at IFAM. Currently, he is a PhD. student in Electrical Engineering at UFPA. He has experience in electrical engineering with emphasis on industrial automation and control systems and applied math. His research topics are robust control techniques, mathematical applications, photovoltaic system and distributed generation. ORCID: 0000-0003-0463-6842
- R.L.P. de Medeiros**, received the BE., MSc. and Dr. degrees in Electrical Engineering, in 2013, 2014, and 2018, respectively, from the Federal University of Pará (UFPA), Brazil. He is currently an associate professor at the Department of Electrical Engineering at UFAM. He has experience in electrical engineering with emphasis on automation and control of industrial and electrical power systems, multivariable robust control and application. Since 2017 he is full time research of the (e-CONTROLS) a research group interesting in any topics of the dynamic and control systems with emphasis in electric power system control. His main areas of expertise and research interest are related a nonlinear control, multivariable robust control, modeling and design a robust control for electrical power systems. ORCID: 0000-0002-1645-2736
- W. Barra Junior**, received the BE., MSc. and Dr. degrees in Electrical Engineering, in 1991, 1997, and 2001, respectively, from the Federal University of Pará (UFPA), Brazil. He is currently an associate professor at the Department of Electrical Engineering at UFPA. He has experience in electrical engineering with emphasis on automation and control of industrial and electrical power systems. His main research topics are modeling and robust control of industrial and electric power systems. ORCID: 0000-0003-0246-7264
- F.A. de C. Ayres Junior**, received the BE., MSc. and Dr. degrees in Electrical Engineering, in 2013, 2014, and 2018, respectively, from the Federal University of Pará (UFPA), Brazil. He is currently an associate professor at the Department of Electrical Engineering at UFAM. He has experience in electrical engineering with emphasis on automation and control of industrial and electrical power systems, fractional order controller, robust control and application. Since 2018 he is full time research of the (e-CONTROLS) a research group interesting in any topics of the dynamic and control systems with emphasis in electric power system control. His main areas of expertise and research interest are related a fractional order control and identification, modeling and design a robust control for electrical power systems ORCID: 0000-0002-0266-1019
- F.K. Yoshino**, received the BSc. Electrical Engineering in 2015, from the Federal University of Pará, Brazil. His main areas of expertise are fuzzy control and modeling of the dynamic systems. ORCID: 0000-0002-0923-5119
- A.E. Gonzalez-Barreda**, received the Bs. Control and Automation Engineering in 2014, from the Universidad de Oriente, Venezuela. Currently, stay coursing the Master degree in Electrical Engineering in Federal University of Amazonas – UFAM. Since 2018 is full time researcher of the (e-CONTROLS) a research group interesting in any topics of the dynamic and control systems with emphasis in electric power system control. His main areas of expertise are robust control, modeling and control of the non-linear dynamic systems and automatic control. ORCID: 0000-0003-3806-7924