

Implementación de un sistema de telecontrol por internet usando microcontroladores embebidos como tarjeta de adquisición de datos

Internet telecontrol system implementation using microcontrollers as data acquisition card

Jorge Salvador Valdez Martínez* , Jesse Yoe Rumbo Morales , Alberto Miguel Beltrán Escobar, Iván Alcalá Barojas , Luis Jaime López Vega, Enrique Contreras Calderón

Universidad Tecnológica Emiliano Zapata del Estado de Morelos
Av. Universidad Tecnológica No.1 Col. Palo escrito, Emiliano Zapata, Morelos
[jorgevaldez, jesserumbo, miguelbeltran, ivanalcala, luislopez, enriquecontreras]@utez.edu.mx

PALABRAS CLAVE:

Arquitectura de software, Sistema de Telecontrol, Tiempo de telecontrol, Raspberry PI, LabVIEW, Microcontroladores.

KEYWORDS:

Software architecture, Telecontrol system, Telecontrol time, Raspberry PI, LabVIEW, Microcontrollers.

RESUMEN

En este trabajo se presenta la implementación de la arquitectura de un sistema de telecontrol en internet utilizando como tarjeta de adquisición de datos a microcontroladores. Para lograrlo, se modeló un sistema de primer orden inestable con amplificadores operacionales el cual fue controlado mediante un esquema cliente - servidor desarrollada a partir de una arquitectura de telecontrol. Cabe mencionar que el cliente de este esquema, fue desarrollado en un sistema operativo de tiempo compartido (Windows7) usando Labview 2016, el cual se encarga de visualizar, monitorear y generar la señal de control para el sistema inestable mediante el microcontrolador configurado como tarjeta de adquisición de datos. El servidor que se encarga de enviar la señal de control calculada al cliente, se desarrolló en un sistema operativo de tiempo real no crítico (Raspbian) usando POSIX como software de programación, el cual al tener un módulo de medición de tiempos, se obtuvo la magnitud de los tiempos involucrados en el proceso de telecontrol, así como sus momentos de probabilidad. Estas medidas descriptivas en conjunto con una serie de definiciones propuestas en este trabajo, sirvieron para poder validar el desempeño de la implementación del sistema de telecontrol

ABSTRACT

This paper presents the implementation of the telecontrol system architecture over internet using microcontrollers as data acquisition card. To achieve this, an unstable first order system was modeled with operational amplifiers which it was controlled by a client - server scheme developed from the telecontrol architecture proposed. It is worth mentioning that the client of this scheme was developed in a time-sharing operating system (Windows7) using Labview 2016, which it is in charge of visualizing, monitoring and generating the control signal for the unstable system by means of the microcontroller configured as a data acquisition card. The server that is responsible for sending the control signal calculated to the client, was developed in a soft real-time operating system (Raspbian) using POSIX as programming software, which it is provided with a time measurement module for obtaining the magnitude of the times involved in the telecontrol process, and their statistical averages or moments. These descriptive measures together with a series of definitions proposed in this paper, served to validate the performance of the telecontrol system implementation.

Recibido: 28 de junio de 2017 • Aceptado: 10 de noviembre de 2017 • Publicado en línea: 12 noviembre de 2018

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente en Internet se pueden encontrar diversas aplicaciones y/o aparatos que tienen por objeto presentar u ofrecer la opción de poder manipular remotamente (telecontrolar) a un sistema físico. Las empresas que han trabajado sobre plataformas en telecomunicaciones ven como una opción viable el explotar los recursos ofrecidos por el Internet, acercando (virtualmente) a un equipo o sistema lejano sin necesidad de desplazarse físicamente al lugar, solamente usando como interfaz de control un teclado y un monitor. Sin embargo, el telecontrol no es simplemente “mando de un aparato, máquina o sistema, ejercido a distancia [1]”. Para que un sistema físico sea controlado a distancia se deben tener en consideración los siguientes factores: Tipo de medio de transmisión de información sobre el cual se comunicarán el sistema controlado y el sistema controlador; normas para la manipulación remota y automatización; transductores que permitirán la conversión de la información, así como la arquitectura de comunicación entre los sistemas involucrados en el proceso de telecontrol.

En este trabajo se mostró que la arquitectura de telecontrol de sistemas pueden ser implementados en múltiples sistemas operativos usando un software de desarrollo industrial (Labview 2016MR), así como en POSIX (Portable Operating System Interface), el cual es una familia de estándares de programación especificados por la sociedad IEEE Computer Society, para mantener la compatibilidad de software entre sistemas operativos basados en UNIX. POSIX define la interfaz de aplicación de programación (API por sus siglas en inglés de Application Programming Interface) entre línea de comandos e interfaces gráficas [2].

La justificación que se tuvo para esta investigación es que los factores computacionales que se consideran actualmente para poder explicar a los tiempos de telecontrol, no son suficientes para determinar el desempeño de un sistema telecontrolado y la explicación es que estos tiempos no se han abordado en el sentido del análisis de la medición, tanto de los tiempos de procesamiento como de los tiempos de transporte obtenidos a través de sistemas operativos dedicados al estudio de Sistemas en Tiempo Real que permitan medir los tiempos involucrados con alta precisión y exactitud.

Al considerar los factores computacionales, se permitiría analizar y crear modelos matemáticos que representen a los tiempos involucrados en el proceso

de transmisión y recepción de información, y así crear técnicas de minimización del efecto de los tiempos de respuesta en los Sistemas de Telecontrol en Tiempo Real basados en la medición de los tiempos variantes observados así como la implementación de mejores esquemas de sistemas tolerantes a fallos ya que aumenta la predecibilidad del sistema al conocer el comportamiento de los tiempos de procesamiento y transporte [3].

Además, coincidiendo con el estudio desarrollado por M. Zaera en [4], en el área de la fabricación industrial existe una demanda creciente de aplicaciones de tiempo real capaces de proporcionar determinismo y una eficiente opción de monitoreo y control en el proceso de producción. Ya que se busca que los desarrollos cumplan con las restricciones temporales impuestas por los Sistemas de Control en Tiempo Real y por tanto es necesaria su constante investigación. Esto es debido a que necesitan una representación de acuerdo a sus propias dinámicas; por esta razón se plantea la necesidad de medir y caracterizar el comportamiento de la dinámica de los tiempos de ejecución así como los tiempos de transporte involucrados en el proceso de comunicación.

Para lograr esto, se propuso implementar un sistema de telecontrol de bajo costo, bajo el esquema de comunicación cliente servidor, usando microcontroladores embebidos como tarjeta de adquisición de datos. El cliente del sistema de telecontrol fue implementado en un sistema operativo de tiempo compartido (Windows 7MR) usando el software Labview 2016MR. Mientras que el servidor fue desarrollado en un sistema operativo de tiempo real no crítico (Raspbian) usando POSIX. Cabe mencionar que en el servidor se tiene un módulo que es capaz de medir los tiempos involucrados en el proceso de telecontrol, así como de obtener las medidas descriptivas que permitan caracterizar los tiempos de telecontrol.

La organización del artículo queda de la siguiente manera. En la sección uno se vio una introducción general del tema a abordar. En la sección 2 se definirán algunos conceptos concernientes a los tiempos involucrados en el proceso de telecontrol. En la sección 3 se describirá la arquitectura del sistema de telecontrol implementado. En la sección 4 se muestran los resultados obtenidos de la implementación desarrollada, así como su análisis. Y las conclusiones se podrán leer en la sección 5.

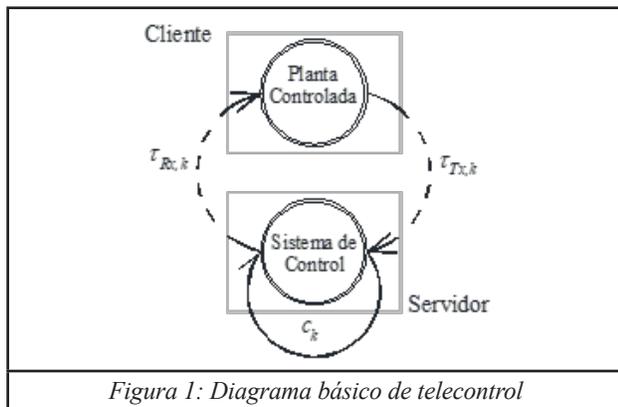
2. SISTEMAS DE TELECONTROL EN TIEMPO REAL

P. Guevara y J. J. Medel en [5], plantean que todo sistema en tiempo real interactúa con el mundo real, donde el tiempo en que se produce su salida es significativo. Y la entrada, generalmente corresponde a algún instante t_1 del mundo físico y la salida corresponde a un instante t_2 ; la diferencia temporal entre la entrada y la salida del sistema está dada por tiempos de respuesta ocasionados por un tiempo de ejecución C_k , así como de tiempos de transporte τ_k conformado por los tiempos de transmisión $\tau_{Tx,k}$ y de recepción $\tau_{Rx,k}$ de información involucrados en el proceso de control del sistema remoto (Ver figura 1); esto es:

$$t_2 = t_1 + C_k + \tau_{Tx,k} + \tau_{Rx,k} \quad (1)$$

Con $t_2, t_1, C_k, \tau_{Tx,k}, \tau_{Rx,k} \in \mathbf{R}^+$ y $k \in \mathbf{Z}^+$. Dados en unidades temporales [UT].

Estos tiempos $C_k, \tau_{Tx,k}$ y $\tau_{Rx,k}$ deben estar acotados dentro de un intervalo $\in (0, d_k]$ para considerarse como una respuesta puntual con $d_k \in \mathbf{R}^+$, donde d_k es el plazo impuesto por el sistema físico controlado para no ser alterado negativamente. Cuyo valor de d_k se obtendrá por criterios de muestreo dados por el criterio de H. Nyquist [6] o V. A. Kotel'nikov [7].



Entonces, tomando en consideración la figura 1, los tiempos que intervienen en el proceso de telecontrol, pueden definirse de la siguiente manera [3].

Definición 1 (Tiempo de Transmisión en un Sistema de Telecontrol en Tiempo Real). El tiempo de transmisión $\tau_{Tx,k} \in \mathbf{R}^+$ en un sistema de telecontrol en tiempo real es el tiempo en que transcurre en el envío de información

desde el cliente de telecontrol hasta el servidor de telecontrol en el intervalo $k \in \mathbf{Z}^+$.

Definición 2 (Tiempo de Recepción en un Sistema de Telecontrol en Tiempo Real). El tiempo de recepción $\tau_{Rx,k} \in \mathbf{R}^+$ en un sistema de telecontrol en tiempo real es el tiempo en que transcurre en el envío de información desde el servidor de telecontrol hasta el cliente de telecontrol en el intervalo $k \in \mathbf{Z}^+$.

Definición 3 (Tiempo de Ejecución en un Sistema de Telecontrol en Tiempo Real). El tiempo de ejecución $C_k \in \mathbf{R}^+$ en un sistema de telecontrol en tiempo real, es el tiempo en que se procesa la información en el intervalo $k \in \mathbf{Z}^+$ hasta completarse el procesamiento sin considerar los bloqueos por lectura o escritura en los canales de comunicación, desalojos del procesador u otro tipo de suspensiones.

Definición 4 (Tiempo de Transporte en un Sistema de Telecontrol en Tiempo Real). El tiempo de transporte $\tau_k \in \mathbf{R}^+$ en un sistema de telecontrol en tiempo real es la suma algebraica del tiempo de transmisión $\tau_{Tx,k} \in \mathbf{R}^+$ y el tiempo de recepción $\tau_{Rx,k} \in \mathbf{R}^+$ en el intervalo $k \in \mathbf{Z}^+$. De tal manera que:

$$\tau_k = \tau_{Tx,k} + \tau_{Rx,k} \quad (2)$$

Definición 5 (Tiempo de Telecontrol en Tiempo Real). El tiempo de telecontrol en tiempo real $T_{Tc,k} \in \mathbf{R}^+$, es la suma algebraica del tiempo de ejecución $C_k \in \mathbf{R}^+$ y el tiempo de transporte $\tau_k \in \mathbf{R}^+$ en el intervalo $k \in \mathbf{Z}^+$. De tal manera que:

$$T_{Tc,k} = C_k + \tau_k \quad (3)$$

Entonces teniendo en consideración estas definiciones, (1) se puede reescribir de la siguiente manera:

$$T_{Tc,k} = C_k + \tau_{Tx,k} + \tau_{Rx,k} \quad (4)$$

El tiempo de telecontrol $T_{Tc,k}$, tiene como referencia en tiempo, un plazo d_k , el cual se tratará siempre de ser cumplido. Lo que conlleva a considerar la siguiente definición,

Definición 6 (Sistema de Telecontrol en Tiempo Real Crítico). Todo sistema de telecontrol en tiempo real crítico (hard) es aquel sistema de telecontrol que para todo intervalo de evolución, el tiempo de telecontrol $T_{Tc,k}$ en tiempo real cumple su plazo d_k , esto es:

$$T_{Tc,k} < d_k \quad \text{con } T_{Tc,k}, d_k \in \mathbf{R}^+ \text{ y } k \in \mathbf{Z}^+ \quad (5)$$

Existen factores externos que generan un tiempo de respuesta ante la petición de comunicación que puede sobrepasar el plazo d_k , asignado. Y si la suma de los tiempos de respuesta excede el plazo d_k del intervalo mencionado impuesto por el sistema a controlar se tendrá un tiempo de respuesta tardío, lo que comprometerá al tiempo de telecontrol $T_{Tc,k}$, y afectará considerablemente la salida el sistema telecontrolado, pues el sistema de telecontrol en tiempo real podría no proporcionar las respuestas adecuadas de control en los tiempos adecuados ocasionando menor uso de los recursos, bajo rendimiento de los procesos de control, gasto de energía, etc. Con esto es posible plantear una nueva definición.

Definición 7 (Sistema de Telecontrol en Tiempo Real no Crítico). Todo sistema de telecontrol en tiempo real no crítico (soft) es aquel sistema de telecontrol donde el primer momento de probabilidad del conjunto de tiempos de telecontrol $E\{T\}$ en tiempo real cumple su plazo d_k , esto es:

$$E\{T\} < d_k \quad \text{con } T = \{T_{Tc,k} \mid 0 < k < n\}, d_k \in \mathbf{R}^+ \text{ y } k, n \in \mathbf{Z}^+ \quad (6)$$

Cabe mencionar que el primer momento de probabilidad $E\{x_i\}$ es la media o valor esperado de una variable aleatoria x_i es denotada por μ . Entonces la media de una variable aleatoria se considera como una cantidad numérica alrededor de la cual los valores de la variable aleatoria tienden a agruparse [8]. Y la función de con la cual se obtiene, se denota por la ecuación (7):

$$E\{x_i\} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} = \mu \quad (7)$$

En tanto que el segundo momento de probabilidad

o varianza de una variable aleatoria es una medida de la dispersión de sus valores alrededor de la media μ y se denota por σ^2 [8]. La función con la cual se obtiene, se define mediante la ecuación :

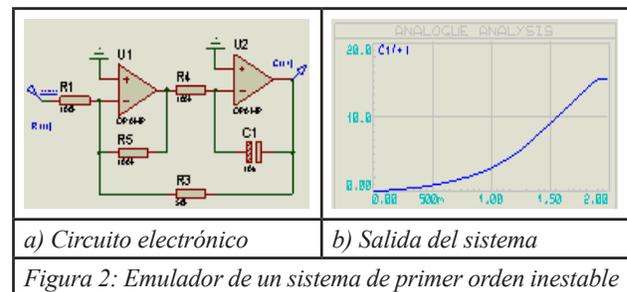
$$E\{x_i\}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right]^2 = \sigma^2 \quad (8)$$

3. ARQUITECTURA DE UN SISTEMA DE TELECONTROL

Para representar adecuadamente la arquitectura de un sistema es necesario contar con varios diagramas o vistas [9], en donde cada una de estas vistas es una estructura de la arquitectura del sistema, que muestran una parte del sistema como un conjunto de componentes, conectores y restricciones sobre sus tipos y relaciones para complementar la visión integral del sistema [10].

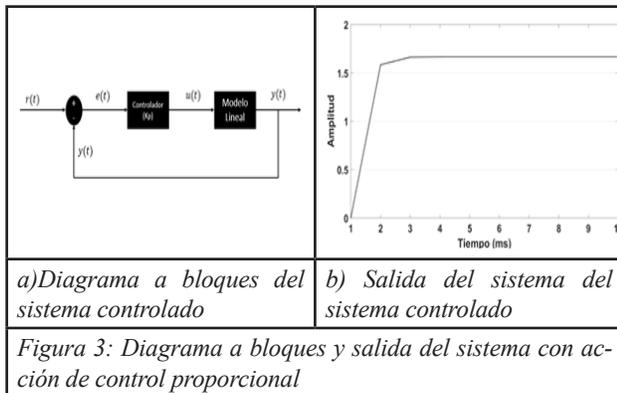
En este sentido, en este trabajo se pretendió replicar el trabajo de Valdez y otros [11] en donde se propuso un esquema de telecontrol de tipo Cliente - Servidor (Sistema controlado - Sistema Controlador) en tiempo real del modelo lineal de un sistema de primer orden inestable construido con amplificadores operacionales. En la figura 2, se puede observar el circuito electrónico empleado (figura 2a) y la respuesta del sistema (figura 2b). Cuya función de transferencia se puede apreciar en (9):

$$G(s) = \frac{1}{s-2} \quad (9)$$

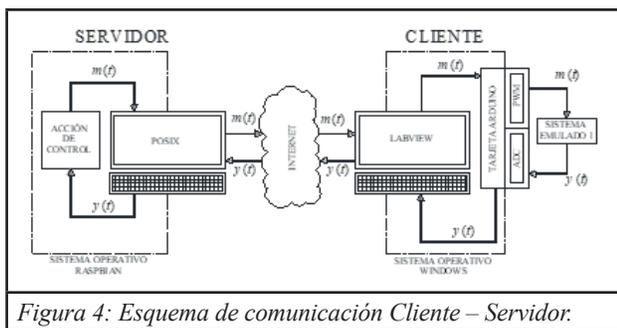


Debido a que en lazo abierto el sistema tiende a converger hasta los 15 v, se plantea un control para lograr un poco de robustez y tratar de converger rápidamente en un voltaje de 1.8. Observando este problema se realizó una acción de control que se aplicará al sistema,

este será de tipo proporcional con una ganancia de K_p de 5, el cual se sintonizó con el método de Ziegler-Nichols a partir de la curva en lazo abierto que se muestra en la figura 2(b), posteriormente se construyó el diagrama a bloques con su controlador (ver figura 3(a)) (figura 3(b) en lazo cerrado para observar su comportamiento y verificar que con esa ganancia tiene una respuesta rápida, manteniendo una amplitud de 1.8).



El sistema de telecontrol está construido sobre un esquema cliente servidor basado en TCP debido a que éste genera un circuito virtual que asegura la llegada de los paquetes de información en comparación con UDP. Y permite comunicar a los sistemas (controlado y controlador), enviando la información en forma de "strings" o palabras (caracteres alfanuméricos) entre ambas computadoras, permitiendo al usuario el control y monitoreo totalmente a distancia. El esquema se puede apreciar en la figura 4.



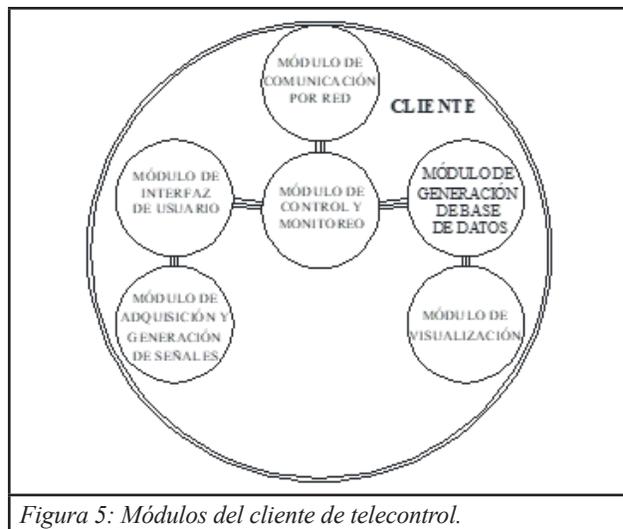
En la figura 4, se observa que se aplicará la acción de control proporcional en forma remota, a un sistema de naturaleza inestable, con el fin de observar el comportamiento de su salida, así como el efecto en el tiempo de intercambio de información al usar microcontroladores para adquirir y generar señales de control.

3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ARQUITECTURA DEL CLIENTE

El cliente fue desarrollado en el software de desarrollo industrial Labview 2016^{MR}, debido a que ofrece la posibilidad de interactuar con sistemas físicos mediante el uso de dispositivos digitales (FPGA, Microcontroladores, Tarjetas de adquisición de datos), así como monitorear y desplegar en forma gráfica la información emitida por los sistemas [12]. El dispositivo digital usado fue una tarjeta Arduino Nano^{MR}, la cual tiene un microcontrolador de la empresa AVR, el cual cuenta con un convertidor analógico digital multiplexado a 16 canales, así como 16 canales de generación de PWM. Cuya salida fue acondicionada para poder generar la acción de control correcta.

La construcción del cliente fue basado en [13], y está formado por 6 módulos (ver figura 5) y su descripción se presenta a continuación [3]:

Módulo de comunicación por red. Este módulo de manera similar que su contraparte en el proceso servidor, está a cargo de establecer un circuito virtual para realizar el intercambio de información entre la red de computadoras. Para realizar esta acción es necesario que el usuario proporcione la dirección IP del servidor remoto y los puertos a utilizar, el intercambio de información entre el proceso servidor y el proceso cliente se realiza a través de una sola dirección IP.



Módulo de control/monitoreo. Este módulo permite al usuario ingresar desde el teclado de la máquina en la cual se ha desarrollado la aplicación en Labview

2016^{MR}, los parámetros necesarios para hacer la acción de control correspondiente. Adicionalmente se encarga de monitorear la variable a controlar, cuyo valor será preparado para ser enviado por el módulo de comunicación por red.

Módulo de generación de bases de datos. Este módulo se encarga de generar un archivo que contiene todos los datos enviados a través del socket por el módulo servidor, ya que esta información en su totalidad será ocupada por el módulo de visualización y en este sentido es importante asegurar su integridad.

Módulo de interfaz de usuario. Este módulo funge como interfaz gráfica al usuario para poder realizar las siguientes acciones: inicio o paro en la ejecución de la aplicación que reside en el módulo cliente, ingresar la dirección IP del módulo servidor remoto, ingresar los números de puerto del circuito virtual para el control del sistema de primer orden inestable, así como los tiempos de ejecución, recepción y transmisión del sistema de telecontrol generados por el enlace de comunicación.

Módulo de visualización. Este módulo permite al usuario visualizar los datos enviados por el módulo servidor a través del socket de comunicación. La principal función de este módulo es recopilar la información enviada y presentarla en forma de gráfica de dos dimensiones al usuario.

Módulo de adquisición/generación de datos. Este módulo permite convertir la información leída del socket del formato tipo string a una variable de tipo doble que el programa Labview 2016 pueda interpretar correctamente y direccionar la información a una tarjeta de adquisición de datos.

3.2. DESCRIPCIÓN DE LA ARQUITECTURA DEL SERVIDOR

En este caso, a diferencia del trabajo de Valdez y otros [11] se usó solo un servidor programado en POSIX en el sistema operativo Raspbian de la computadora Raspberry Pi Modelo 1. Y proporciona a la acción de control de tipo proporcional al sistema remoto, el cual fue sensado y controlado en el cliente. La construcción de los servidores fue basado en [12 y 13], y está formado por 7 módulos (ver figura 6) y su descripción se presenta a continuación.

Módulo de comunicación por red. Este módulo proporciona las condiciones necesarias para poder iniciar la comunicación por red y a través de sockets entre el servidor y el cliente, para lo cual es necesario definir los puertos a utilizar.

Módulo de sincronización de procesos. Cuando un dato es enviado de un proceso a otro a través de un canal de comunicación llamada tubería o puertos de comunicación (sockets) es importante establecer una secuencia ordenada para realizar la lectura y escritura de la información, de lo contrario los procesos participantes se bloquean de manera inevitable. Es por esa razón que este módulo es importante para asegurar la escritura y la lectura de la información en el momento que se necesite.

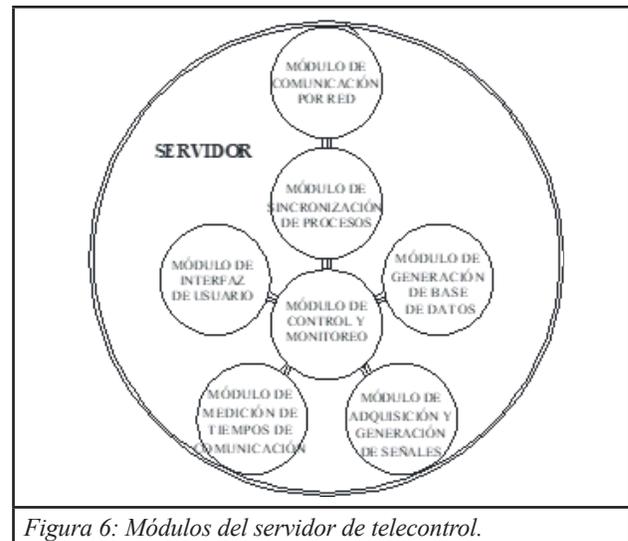


Figura 6: Módulos del servidor de telecontrol.

Módulo de monitoreo/control. En función de los valores obtenidos en forma remota, este módulo ejecuta los procesos que se encargan de hacer el cálculo de la acción de control correspondiente del sistema físico que se desea controlar. De igual forma puede desplegar los valores que serán enviados por el canal de comunicación.

Módulo de generación de bases de datos. Este módulo se encarga de generar los archivos de tipo texto por cada uno de los procesos concurrentes programados, tal y como es la medición de los tiempos involucrados en el proceso de telecontrol.

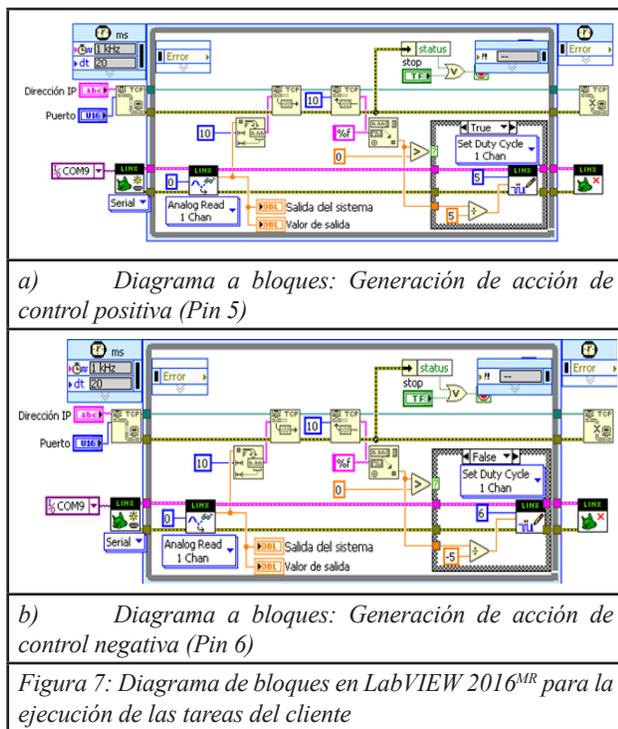
Módulo de interfaz de usuario. Este módulo sirve de interfaz gráfica al usuario para poder compilar y ejecutar los procesos concurrentes que fueron programados, en este sentido este módulo podría permitir aparte de visualizar los valores de las variables calculadas, ingresar vía teclado valores que afecten al comportamiento del sistema remoto controlado.

Módulo de adquisición/generación de datos. Este módulo es usado para obtener información de sistemas físicos a través de puertos de entrada/salida o de tarjetas de adquisición de datos.

Módulo de reconstrucción de tiempos de comunicación. Es el módulo encargado de obtener la medición de los tiempos involucrados en el proceso de telecontrol, para después caracterizarlos. Cabe aclarar que una función adicional de este módulo es la de reconstrucción de los tiempos involucrados mediante filtrado digital y fue usado con éxito en [3].

4. RESULTADOS

En la figura 7 se presenta el diagrama a bloques de la interfaz de usuario del cliente hecho en el software de desarrollo industrial Labview 2016^{MR}.

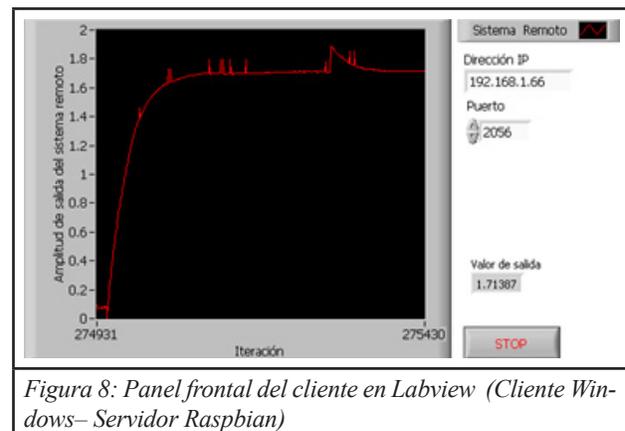


En esta figura se puede observar la sección de comunicación por internet basada en TCP. Así como la configuración hecha mediante LYNX^{MR} para que el microcontrolador pudiera adquirir datos de la salida del sistema inestable de primer orden emulados con amplificadores operacionales. Los cuales fueron enviados por internet a partir de un puerto (socket) mediante el protocolo TCP, para poder recibir posteriormente la acción de control programada en el servidor, la cual es enviada, dependiendo de que si su valor es positivo al pin de generación de PWM número 5 (ver figura 7a). En caso de que sea negativo, será enviado al pin 6 (ver figura 7b). La salida de estos pines fue acondicionada mediante

el uso de un amplificador operacional configurado como restador y la salida de este, fue conectada a la entrada del sistema inestable de primer orden. Y el tiempo de muestreo definido en la estructura de tiempo time loop de Labview 2016^{MR} (Ver figura 7 en cuadro rojo), fue de 20 milisegundos.

Cabe mencionar que LYNX^{MR} es un proyecto de código abierto de Digilent y está diseñado para facilitar el desarrollo de aplicaciones embebidas usando LabVIEW, esto es debido a que LINX^{MR} incluye VIs para la manipulación de sensores embebidos más comunes, y para tener acceso a periféricos como E/S digitales, E/S analógicas, PWM, I2C, SPI y UART [12].

La interfaz gráfica se aprecia en la figura 8. En ella se graficó la señal de la salida del sistema controlado, que corresponden al sistema remoto (línea roja). También se puede observar la dirección IP y el puerto de donde se adquirirá el valor de la acción de control del servidor remoto. En la figura 8 se puede apreciar la salida del sistema, usando el cliente basado en Labview 2016^{MR}, el cual tiene habilitado el puerto 2056 en la dirección IP 192.168.1.66.



Para el caso del servidor desarrollado en POSIX en el sistema operativo Raspbian de Raspberry Pi, se desarrolló tomando en consideración el diagrama de bloques mostrado en la figura 9.

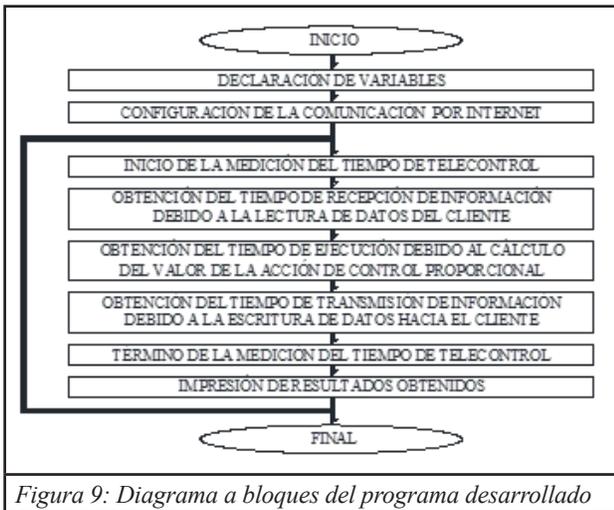


Figura 9: Diagrama a bloques del programa desarrollado

Del programa desarrollado, además de proporcionar la acción de control proporcional, se tiene una sección para la medición de los tiempos involucrados en el proceso de telecontrol, así como su caracterización estadística: El tiempo de recepción $\tau_{Rx,k}$, el tiempo de transmisión $\tau_{Tx,k}$, el tiempo de ejecución C_k y el tiempo de telecontrol $T_{Tc,k}$ obtenido de la suma de los tres tiempos mencionados. Estas mediciones son obtenidas en cada cálculo del valor de la acción de control, y los valores de los tiempos medidos son mostrados a partir de la figura 10, 11 y 12.

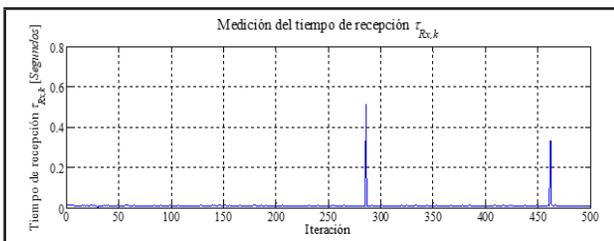


Figura 10: Tiempo de recepción $\tau_{Rx,k}$ medido

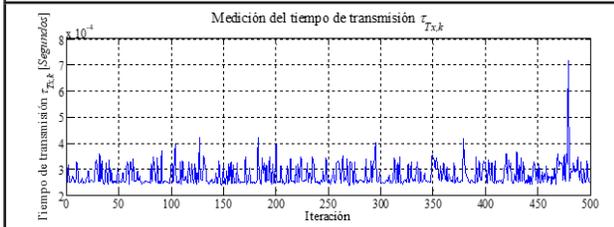


Figura 11: Tiempo de transmisión $\tau_{Tx,k}$ medido

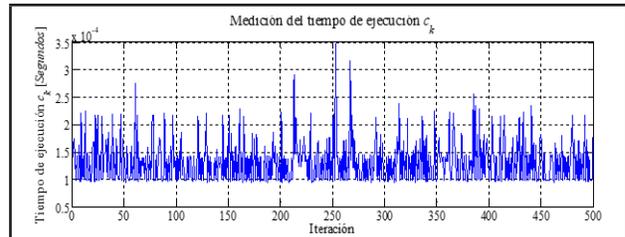


Figura 12: Tiempo de ejecución C_k medido

De los tiempos obtenidos, se pudo observar que el tiempo de recepción $\tau_{Rx,k}$ es el que tiene mayor magnitud, seguido del tiempo de transmisión $\tau_{Tx,k}$ y por último el tiempo de ejecución C_k . Para demostrar la utilidad de las definiciones previamente presentadas, se propone usar la definición 5 con el fin de obtener el tiempo de telecontrol $T_{Tc,k}$ en función de (4), en donde la suma de los tres tiempos originan al tiempo de telecontrol $T_{Tc,k}$, el cual dependiendo de su duración puede afectar a la dinámica del sistema que se desea controlar, tal y como se puede observar en la figura 13.

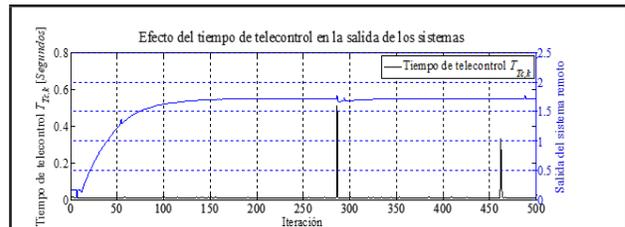
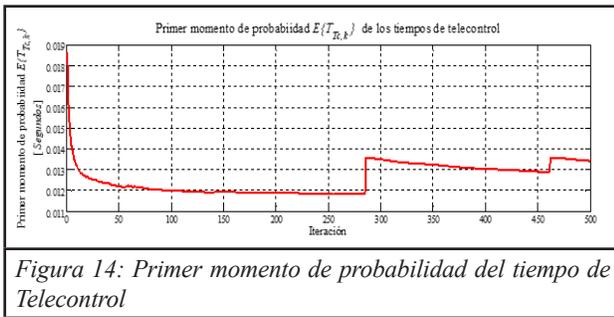


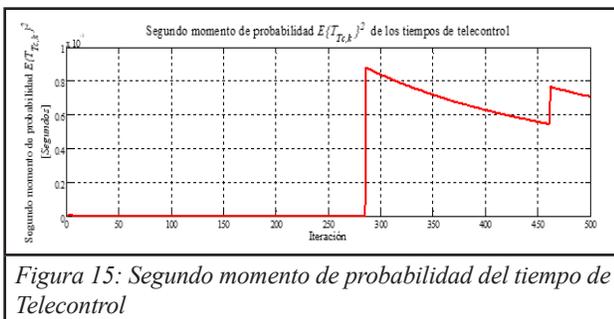
Figura 13: Tiempo de telecontrol $T_{Tc,k}$ medido y su efecto en la salida del sistema controlado

En la gráfica 13 se puede ver que en una región de la respuesta obtenida del sistema inestable telecontrolado, se aprecia la alteración negativa sobre la dinámica de su comportamiento, originada por el incremento del tiempo de telecontrol en ese intervalo temporal. Cuyo efecto no fue tan perceptible, debido a que la suma de los tiempos involucrados C_k , $\tau_{Tx,k}$ y $\tau_{Rx,k}$ están acotados dentro de un intervalo $\in (0, d_k]$ (dado por el tiempo de muestreo), lo que puede considerarse como una respuesta puntual con $d_k \in \mathbf{R}^+$.

Para asegurar la acotación de intervalos, se utilizaron medidas descriptivas como los momentos de probabilidad descritos en (7) y (8), cuyo comportamiento, se observa en las figuras 14 y 15.



Del primer momento de probabilidad, se puede observar que al inicio de la evolución del sistema, la media aritmética alcanza un valor de 0.019 segundos para después colocarse alrededor de los 0.012 segundos. Y cuando la salida del sistema telecontrolado presenta una alteración negativa que modifica su comportamiento, es cuando hay una variación alrededor de su primer momento de probabilidad denotado por su segundo momento (ver figura 15) de 0.9×10^{-3} [segundos²] pero esta variación no es suficiente como para inestabilizar al sistema telecontrolado, ya que su primer momento de probabilidad trata de regresar a una región cercana (de 0.013 segundos) a la media aritmética inicial.



Ahora, tomando en consideración las definiciones previamente mencionadas, se determinará qué tipo de sistema en tiempo real es. Para ello de la definición 6, del análisis visual se puede decir que este sistema de telecontrol no es crítico, debido a que a lo largo de todo el intervalo de evolución, el tiempo de telecontrol $T_{Tc,k}$ en tiempo real no cumple el plazo d_k , establecido por el tiempo de muestreo, ya que presenta un incremento en su tiempo de comunicación en ciertas regiones, haciendo que (5) no se cumpla.

Pero a partir de la definición 7, se puede determinar que es un sistema en tiempo real no crítico debido a que el primer momento de probabilidad analizado en la figura 14 del conjunto de tiempos de telecontrol $E\{T\}$

en tiempo real cumple su plazo d_k , designado por el tiempo de muestreo, afirmando lo mostrado en (6).

5. CONCLUSIONES

De los resultados mostrados, de su análisis y de su discusión, se pueden obtener las siguientes conclusiones, sobre la implementación del sistema de telecontrol por internet:

1) En este trabajo se implementó en un banco de pruebas para el estudio de los tiempos involucrados en sistemas de telecontrol por internet a partir de una arquitectura de software desarrollada en [11]. A diferencia de este trabajo se utilizó como tarjeta de adquisición de datos el microcontrolador ATmega328P que está integrado en la tarjeta de desarrollo Arduino Nano. Y se pudo observar que es una alternativa viable a bajo costo para poder ser utilizado para realizar el control digital de la emulación de un sistema de primer orden inestable construido con amplificadores operacionales.

2) La arquitectura de software de tipo modular del banco de pruebas desarrollado, permitió el estudio de telecontrol a sistemas físicos basado en un esquema tipo cliente-servidor multiplataforma, y así pueda el sistema de telecontrol ser implantado bajo diferentes contextos; como en este trabajo que fue ideado para que el servidor opere bajo el sistema operativo en tiempo real no crítico Raspbian para la computadora Raspberry PI y para que el cliente trabaje bajo el sistema operativo de tiempo compartido Windows utilizando un medio de comunicación como el Internet.

3) En el medio de comunicación empleado, se usó el protocolo de comunicación TCP el cual ofrece una garantía de entrega de la información que está presente en el sistema de telecontrol tipo cliente-servidor, aunque debido a su construcción es la que origina los valores de tiempos de transmisión y recepción más altos en comparación con los tiempos de ejecución y varían de acuerdo a las aplicaciones de software, intrusiones informáticas, virus, sistemas operativos, incluso también del uso de las tarjetas de adquisición de datos.

4) El servidor, además de calcular el valor de la acción de control, fue capaz de obtener la magnitud de las restricciones temporales involucradas en el proceso de telecontrol (tal y como el tiempo de ejecución c_k , el tiempo de recepción $R_{x,k}$ y de transmisión $T_{x,k}$), así como el valor del primer y segundo momento de probabilidad para poder concluir a partir de las definiciones planteadas en este trabajo que el sistema de telecontrol es de tipo no crítico (soft)

REFERENCIAS

1. Real Academia de la Lengua Española. Definición de telecontrol. España. Recuperado el 23 de octubre del 2017, de <http://dle.rae.es/?id=ZLX5yDd>
2. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Portable Operating System Interface (POSIX)—Part 1: System Application Program Interface (API) [C Language]. Institute of Electrical and Electronics Engineers. USA, 1995.
3. Valdez, J. S. Medición, Caracterización y Reconstrucción de los Tiempos de Ejecución y Transporte para Sistemas de Telecontrol en Tiempo Real. PhD Thesis, Instituto Politécnico Nacional. México, 2015.
4. Zaera M. Evaluación de Sistemas Operativos de Tiempo Real con Planificación Dinámica y Gestión de Recursos Compartidos Aplicados a la Monitorización de Procesos de Fabricación Industrial. PhD Thesis, Universidad Politécnica de Valencia, España, 2002.
5. Guevara, P. and Medel J. J. Introducción a los sistemas de tiempo real. Capítulo 2: Uso de las Computadoras en Sistemas en Tiempo Real. México, Editorial Politécnico. 2003.
6. Nyquist H. (1928) Certain Topics in Telegraph Transmission Theory. In: Proceedings of the IEEE. 2002, 90(2), 280-305. Recuperado el 17 de enero del 2015 de http://ens.dsi.unimi.it/classici/Nyquist_1928.pdf
7. Kotel'nikov V. A. On the transmission capacity of "ether" and wire in electrocommunications. In: Proceedings of the first All-Union Conference on the technological reconstruction of the communications sector and the development of low-current engineering URSS. 1933, 5-23. Recuperado el 17 de enero del 2015 de <http://ict.open.ac.uk/classics/1.pdf>
8. Kreyszig, E. Matemáticas avanzadas para ingeniería Vol. 2, México, Limusa Wiley.. 2005
9. Bass, L., Clements P. and Kazma R.. Software Architecture in Practice. Sei Series In Software Architectures. Sweden Addison Wesley, 2002.
10. Hurtado, S. Representación de la arquitectura de software usando UML. Sistemas y Telemática. 2006, 1, 63-75
11. Valdez, J. S., Villanueva J. and Vázquez J., Workbench's implementations based in telecontrol system software architecture. In: Proceedings of the International Congress of Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering, México, 2016, 150-155
12. Labview 2016MR Software, National Instruments. USA, 2016.
13. Valdez J. S., Guevara P. and Delgado G., Arquitectura de un Sistema para Telecontrol por Internet para la Simulación en Tiempo Real de un Motor de Corriente Continua, In: Proceedings of the VIII Congreso Internacional "Tendencias Tecnológicas en Computación 2012. México, 2012.

SEMBLANZA



Jorge Salvador Valdez Martínez. Doctor en Ciencias en Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica, Maestro en Tecnología Avanzada e Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica todos del Instituto Politécnico Nacional. Es profesor de Tiempo completo en la Universidad Tecnológica "Emiliano Zapata". Forma parte del Sistema Estatal de Investigadores como Investigador nivel

C, así como al Sistema Nacional de Investigadores como Candidato al Sistema. Las áreas de interés giran en torno a la aplicación, enseñanza, desarrollo e investigación de tecnología en el área de las comunicaciones y electrónica así como en áreas afines: Sistemas Computacionales, Control automático, Sistemas en Tiempo Real, Tecnologías de la Información, Modelado de sistemas, Mecatrónica



Jesse Yoe Rumbo Morales. Doctor en Ciencias en Electrónica (CENIDET), Maestro en Ingeniería de Manufactura (IPN) e Ingeniero en Mecatrónica (TesCo). Profesor de tiempo completo en la Universidad Tecnológica Emiliano Zapata (UTEZ). Profesor de la Maestría en Mecatrónica en la Universidad de Guadalajara (U de G). Las áreas de investigación son: Modelado, identificación de sistemas y control de procesos (neumáticos, eléctricos, térmicos, hidráulicos, mecánicos). Actualmente se ha enfocado en trabajar con la producción de bio-combustibles (bioetanol), en el cual modela y controla este tipo de procesos. Así mismo los tipos de controladores con los que trabaja son; control adaptable, Control predictivo (MPC y OMPC), Control H-infinito, control geométrico.

Actualmente se ha enfocado en trabajar con la producción de bio-combustibles (bioetanol), en el cual modela y controla este tipo de procesos. Así mismo los tipos de controladores con los que trabaja son; control adaptable, Control predictivo (MPC y OMPC), Control H-infinito, control geométrico.



Alberto Miguel Beltrán Escobar. Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica área Control Automático por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). Ingeniero en Electromecánica por el Instituto Tecnológico de Zacatepec (ITZ), con especialidad en Sistemas Mecatrónicos y Electrónicos. Profesor de tiempo completo en la Universidad Tecnológica

Emiliano Zapata del Estado de Morelos (UTEZ), sus áreas de interés son el control de sistemas dinámicos, modelado e identificación de sistemas, diseño e implementación de sistemas de control digital o embebidos mediante plataformas libres. Actualmente realiza actividades docentes impartiendo asignaturas de sistemas de control, modelado de sistemas lineales, diseño, simulación, programación e implementación de sistemas electrónicos, analógicos y digitales entre otros, así como la dirección de proyectos de robótica y control en la UTEZ



Iván Alcalá Barojas. Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica con especialidad en Electrónica de potencia egresado de CENIDET. Ingeniero en Electrónica egresado del Instituto Tecnológico de Orizaba. Profesor de tiempo completo titular "A" y coordinador de la carrera de Mecatrónica en la Universidad Tecnológica Emiliano Zapata del Estado de Morelos (UTEZ). Tiene

experiencia docente desde el 2002. Pertenecer al Sistema Estatal de Investigadores del Estado de Morelos. Actualmente coordina los proyectos de Robótica VEX y el Centro de Excelencia de certificación de National Instruments Nivel 3. Las áreas de interés e investigación son: Robótica, Diseño asistido por computadora, programación en LabVIEW y la automatización.



Luis Jaime López Vega. Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica, en el área de Control Automático egresado del CENIDET (Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico), Ingeniero Electromecánico, con especialidad en Mecatrónica, egresado del ITZ (Instituto Tecnológico de Zacatepec), actualmente Profesor investigador de la UTEZ (Universidad Tecnológica de Emiliano

Zapata), forma parte del Sistema Estatal de Investigadores. Las áreas de interés giran en torno a la aplicación, enseñanza, desarrollo e investigación de tecnología en el área de la Automatización y el Control Automático, así como en áreas afines: Modelado de Sistemas, Sistemas lineales, Sistemas no lineales, Control tolerante a Fallas, Identificación de Sistemas, entre otros.



Enrique Contreras Calderón. Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica opción diseño mecánico por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), e Ingeniero Electromecánico por el Instituto Tecnológico de Zacatepec. Forma Parte de Sistema Estatal de Investigadores nivel B. Cuenta con reconocimiento de profesor con perfil deseable de, PRODEP

(Programa para el Desarrollo Profesional docente) Actualmente se desempeña como Profesor Investigador Asociado C en la Universidad Tecnológica Emiliano Zapata del Estado de Morelos (UTEZ), realizando actividades de diseño asistido por computadora con el software SolidWorks, y manufactura asistida por computadora. Es responsable del Cuerpo académico de Automatización y Robótica en la UTEZ, Las áreas de interés giran en torno a la aplicación, enseñanza, desarrollo e investigación de tecnología en el área de ahorro de energía.