

Sistema de control de red basado en eventos con función de compensación lineal.

Event-based network control system with linear compensation function.

Autor¹ BONILLA, Paul A.

Autor² MANITIO, Darwin A.

Resumen

Los sistemas de control tradicionales trabajan con canales de comunicación exclusivos para dispositivos de campo. Un sistema de control red se caracteriza por usar un único medio para comunicarse con todos los elementos de campo y cerrar los diferentes bucles en un sistema a lazo cerrado. Uno de los principales problemas son los retardos aleatorios en transmisión de datos que comprometen la estabilidad del proceso de control. Se desarrolla un sistema de control en red basado en eventos con diferentes algoritmos de control, para valorar el funcionamiento y limitaciones de trabajar con procesos de control asíncronos. Para compensar los retardos de la red se implementa el control por eventos que introduce diferentes intervalos de trabajo para enviar información, optimizando los recursos del sistema. Durante la ausencia de información por los retardos, se activa una función lineal basada en datos de actuadores y sensores para compensar la acción de control.

Palabras clave: Sistemas de control en red; Control asíncrono; Sistemas no deterministas; Control por eventos; Algoritmos de control.

Abstract

Traditional control systems work with communication channels exclusively for field devices. A network control system is characterized by

¹ Docente. Tecnología Superior en Electrónica. Instituto Superior Tecnológico Tsa-Chila. paulbonilla@tsachila.edu.ec

² Docente. Tecnología Superior en Electrónica. Instituto Superior Tecnológico Tsa-Chila. darwinmanitio@tsachila.edu.ec



Revista Académica y
Científica

julio – diciembre

Vol. 1, N° 1, 2020

pp. 48 – 68

ISSN:2737 – 6214

<https://istvicenteleon.edu.ec/victectl>

Recibido: 15/05/2020

Aceptado: 15/07/2020



using a single means to communicate with all the field elements and close the different loops in a closed-loop system. One of the main problems is the random delays in data transmission that compromise the stability of the control process. An event-based network control system with different control algorithms is developed to assess the operation and limitations of working with asynchronous control processes. To compensate for network delays, event control is implemented that introduces different work intervals to send information, optimizing system resources. During the absence of information due to delays, a linear function based on data from actuators and sensors is activated to compensate for the control action.

Keywords: Network control systems; Asynchronous control; Non-deterministic systems; Event control; Control algorithms.

1. Introducción

La industria ha evolucionado acorde a las necesidades de nuevas eras con un mercado que exige sus productos de forma acelerada, los múltiples procesos deben ser monitorizados y controlados continuamente para garantizar la mayor calidad de los artículos de venta. En la industria se puede agrupar dos tipos de redes para los diferentes niveles de la pirámide de automatización: información e industriales (Salt & V. Casanova, 2008). Varios elementos distribuidos por la planta no trabajan de manera aislada, las redes industriales surgieron como una solución para comunicarlos. Las redes de información basadas en protocolo internet (por sus siglas en inglés IP – Internet Protocol) se han limitado a trabajar en los últimos niveles de la pirámide de automatización, esto es debido a que trabaja con gran volumen de datos y su respuesta no es en tiempo real. Las redes de información solo han sido aplicadas a tareas de transmisión de datos o comercio electrónico, un sistema de control basado en redes de información presenta una generalización de comunicaciones en la pirámide de automatización (Gamiz & Gamiz, 2011). Los sistemas de control convencionales usan múltiples medios de comunicación exclusivos entre controlador y los diferentes actuadores y sensores de campo, los sistemas de control en red (en adelante NCS por sus siglas en inglés Network Control Systems) se caracterizan por usar un único medio para comunicarse con todos los elementos de campo, no tan

solo sensores y actuadores sino todo dispositivo capaz de obtener una dirección IP (Casanova, 2005).

Las redes de información tienen un gran potencial en sistemas de control, sin embargo, los diferentes problemas que se presentan por ser un sistema de comunicación no determinístico, limitan su aplicación en varios campos de acción. Uno de los principales problemas de NCS son los retardos aleatorios en transmisión de datos, las redes de información basadas en direcciones IP presentan períodos asíncronos en la comunicación de la red. Al existir un único medio de comunicación la cantidad de dispositivos comprometen la eficiencia de la red incrementando los tiempos de retardo (Salt & V.Casanova, 2008). La acción del controlador depende de la evolución temporal de la variable de interés, muchos procesos requieren de respuestas en tiempo real con valores de frecuencias de muestreo elevadas.

Muchos investigadores han propuesto diferente tipos soluciones que pueden reducir el efecto de los retardos aleatorios en la comunicación como:

- Sistema de control en red no lineal basado en el control FNN (red neuronal difusa) que se utiliza para resolver problemas de retardos de red en vista de que los sistemas no lineales a menudo están involucrados en incertidumbres, arquitectura compleja y dificultad para modelar y simular en condiciones de red. Basado en el modelado modularizado TPCS de Matlab / Simulink (Feng, Da-I, & Ding, 2015).
- Algoritmos de control no lineales de dos entradas y dos salidas para NCS con retrasos de tiempo aleatorios no gaussianos, donde se investiga una regresión automática no lineal general. La media móvil con modelo exógeno se utiliza para describir la planta (Bogdan, Wilamowski, & Irwin, 2016).
- Estrategia de control tolerante a fallas basada en la función de compensación de red neuronal de función de base radial para una clase de sistema de control en red con retardo de tiempo aleatorio (Chuan, Yifei, & Qingwei, 2017).

– Sistemas de control en red distribuidos en función de pares gráficos y topologías de red dedicada, control basado en eventos (Xiaohua, Fuwen, & Qing-Long, 2017).

El control basado en eventos se define cuando el lazo de realimentación está cerrado solo si un evento indica que el error de la señal controlada excede de un límite tolerable y desencadena una transmisión de datos desde los sensores a los controladores y los actuadores (Pillajo & Hincapie, 2018). Los múltiples beneficios que se obtienen de control por eventos son básicamente la liberación de carga innecesaria de trabajo para el controlador y red ya que solo es necesario realizar una respuesta bajo ciertos parámetros del sistema y no del tiempo.

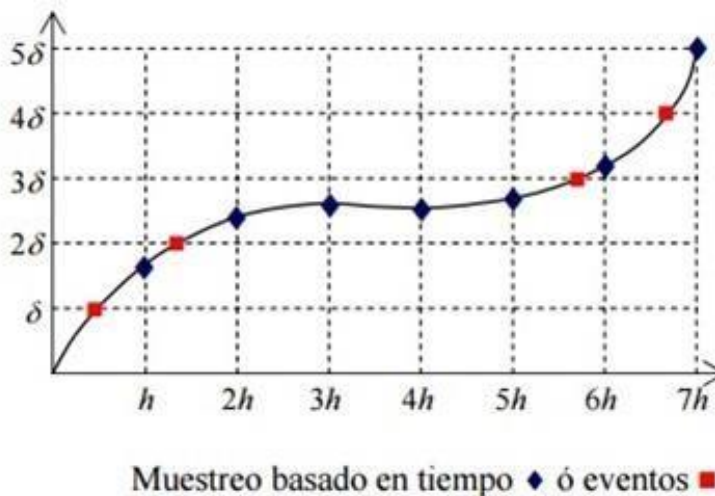


Figura 1. Muestreo basado por eventos y tiempo. Fuente: Pillajo & Hincapie (2018).

Los NCS son una tecnología en desarrollo que presenta múltiples problemas por ser sistemas de comunicación no deterministas. El presente proyecto se plantea establecer conocimiento práctico y teórico para la aplicación de redes de información en sistemas de control en red basado en eventos. Varias soluciones se limitan a simulaciones, al implementar un NCS en la realidad se puede valorar las posibles soluciones. También se implementa otro algoritmo para compensar la ausencia de información producida por los retardos de la red, una

función lineal basada en los datos de sensores y actuadores que estimará el posible comportamiento de la planta.

En este trabajo se analiza la eficiencia del control por eventos y la función lineal de compensación en 2 procesos de control. La planta PID y de temperatura son de respuesta rápida y lenta, respectivamente. En la planta PID la variable medida presenta una elevada sensibilidad ante una acción en el sistema. Para sistemas de este tipo se requiere de una elevada frecuencia de muestreo, la variable medida cambia drásticamente en valores menores al segundo. Posiblemente la respuesta del actuador no equilibra el sistema por los retardos introducidos por la red. La variable medida en el proceso de temperatura no es tan volátil ante una acción, mantiene una cierta estabilidad temporal. En primer lugar, se describe las características y dispositivos del NCS implementada. A continuación, se revisan los algoritmos de control y configuraciones de red programados en los controladores, se establece el ciclo de trabajo de los nodos. Finalmente, con los resultados obtenidos del sistema se presenta el comportamiento de un sistema de control asíncrono en red, como afecta el control por eventos y la función lineal de compensación a la estabilidad del sistema.

2. Metodología

La metodología a usar está basada en un estudio teórico y empírico. Se utiliza varias estrategias para la recolección y posterior análisis de datos.

2.1. Diseño del sistema

Se explica las características de cada elemento de la red. Se detallan los procesos de control y la distribución de sensores, actuadores y controlador en los diferentes bucles de control. Se define la arquitectura de la red.

2.2. Desarrollo del prototipo

Se explica el funcionamiento de los diferentes nodos, como se gestiona la información entre sensores, actuadores y controlador de la

red. Se detalla el funcionamiento de los algoritmos de control, control por eventos y función lineal de compensación.

2.3. Recolección de datos

Por medio de la aplicación Emoncms se registran los valores de sensores y actuadores del sistema. El sistema se encarga de gestionar los diferentes parámetros para conectarse con la aplicación en el internet.

2.4. Análisis y valoración de resultados

Se analiza los parámetros de estabilidad de la planta, el tiempo de muestreo asíncrono. El efecto que tiene el control por eventos y la función lineal para compensar los retardos de la red.

3. Resultados

3.1. Características de NCS.

Las diferentes estaciones se crearán usando la plataforma Arduino (ethernet shield y Dragino Yun) como un sistema independiente capaz de generar control y comunicación. Los diferentes sensores y actuadores de los módulos deben enviar y recibir información a un controlador central vía wi-fi o Ethernet, como se puede observar en la Figura 2. Los sensores y actuadores inteligentes tienen un conjunto de funciones diseñadas o programadas en un único dispositivo (Robinson, Baliga, & Kumar, 2005).

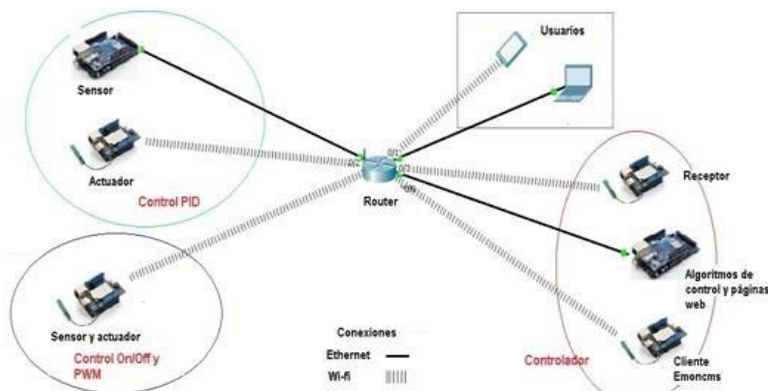


Figura 2. Diagrama de NCS.

Para la creación de NCS se tomaron 2 procesos donde estarán distribuidos los diferentes sensores y actuadores inteligentes vinculados vía Ethernet o Wi-Fi al controlador central. El controlador central también envía los valores de las variables de interés a una aplicación de internet (Emoncms), que permite graficar y registrar su evolución temporal. Cada sensor y actuador tiene su propia dirección IP que le permite gestionar los diferentes datos como cliente o servidor. El router de la red configura características como: direcciones fijas, contraseñas, reconocimiento de direcciones MAC, conectividad con redes externas y nuevos usuarios en la red.

3.2. Primera planta de control (PID – Ball and Beam)

Ball & Beam es un sistema que consiste en una pelota que puede rodar por la inclinación de una superficie que está conectada a unos ejes con un servo motor.

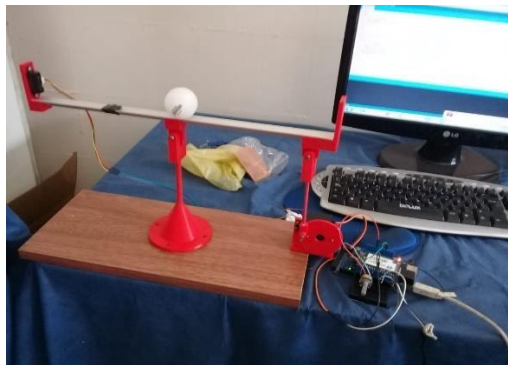


Figura 3. Ball and Beam.

La posición de la pelota depende básicamente del ángulo del servo motor, existen otros parámetros que se deben de considerar del sistema como: peso de la pelota, rozamiento, material de la pelota y superficie, dimensión de los ejes de transmisión.

En el proceso Ball & Beam, la variable medida presenta una elevada sensibilidad ante una acción en el sistema. Para sistemas de este tipo se requiere de una elevada frecuencia de muestreo, la variable medida cambia drásticamente en valores menores al segundo. La respuesta del actuador no equilibra el sistema por los retardos introducidos por la red. Entre cada actualización de la distancia de la pelota en el proceso Ball & Beam, se pierde información del

comportamiento del sistema. No existe un tiempo específico que garantice la recepción de datos en la central de control. También existe un retardo en el receptor Dragino Yun, ya que recibe los datos de las dos estaciones. Para mejorar la recepción de la información del sensor de distancia inteligente Ethernet, se incluye un receptor en la central de control, se incrementa un Dragino Yun más para recibir exclusivamente la información de la estación PID.

3.3. Segunda Planta de control se simula un proceso de industria lanera, en específico de tintura

En la industria lanera el proceso de tinturado presenta múltiples problemas en la obtención de un producto final homogéneo que retenga todo el colorante aplicado. Los diferentes factores que intervienen en el proceso son: tipos de colorantes, auxiliares químicos, pH de la solución, temperatura, etc. El proceso de tinturado de Lana no tratada consiste en depositar la lana en solución química que es sometida a diferentes temperaturas. Para emular este proceso se controlará la temperatura con un cautín que está conectado a un relé (Control on/off), cuando la temperatura exceda el valor de referencia un ventilador (Control PWM) se encenderá. Para medir la temperatura se usa el sensor Lm35.

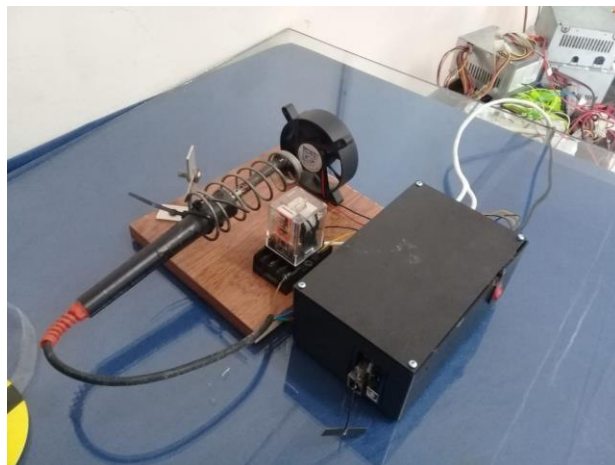


Figura 4. Segunda Planta, proceso de industria lanera.

La temperatura debe variar lentamente iniciando desde 30 o 40°C en un intervalo de tiempo, después la temperatura debe incrementar en diferentes variaciones de grado por minuto, esto

depende del tipo de colorante que se use. Para colores pastel y tonos claros la temperatura tope es de 80°C, para el resto de colores es de 92°C a 96°C, para garantizar la correcta migración del colorante hacia la lana se deja reposar durante 15 o 20 minutos en la temperatura tope (Lancovi, 2000).

3.4. Nodo central

En este nodo se implementa el controlador, los diferentes valores de los sensores son analizados para generar una respuesta que es enviada a los actuadores que están distribuidos en la red. También se encarga de enviar la información a la aplicación Emoncms para su posterior visualización.

3.5. Arquitectura cliente-servidor

Para comunicar los diferentes nodos de la red se usa la arquitectura cliente - servidor. En una aplicación se modela cómo interactúan un conjunto de clientes que usan estos servicios. Los algoritmos de control PID, PWM y On/Off están programados en el servidor.

Los clientes están implementados en la primera y segunda planta de control, realizan peticiones a diferentes puertos del servidor, como respuesta obtienen ciertas acciones de control o información del sistema. Por medio del protocolo Http (Petición-respuesta) se envían información etiquetada de sensores y actuadores.

3.6. Algoritmos de control del proceso de tintura

La variable medida en el proceso de tintura no es tan volátil ante una acción, mantiene una cierta estabilidad temporal. Se puede definir al proceso de tintura como un sistema de reacción lenta. A continuación, se detalla el algoritmo efectuado por el nodo central y la estación de tintura, como se puede observar en la Figura 5.

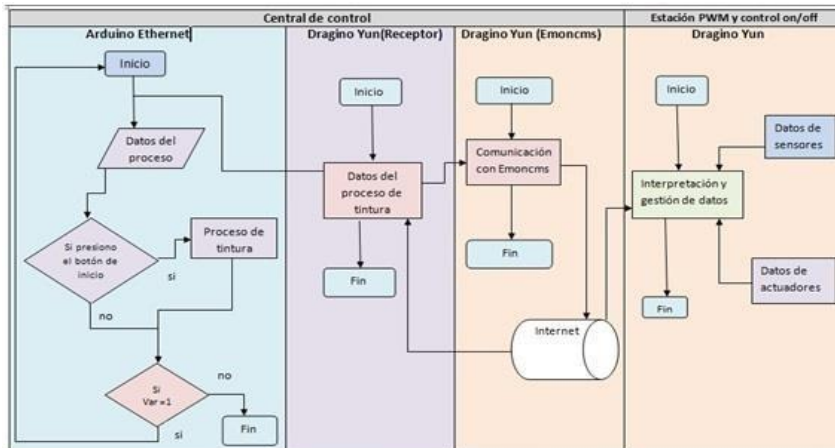


Figura 5. Flujograma del proceso de tintura.

La Central de control recibe el valor de temperatura del proceso de tintura que es comparado con el valor de referencia para obtener el error. Dependiendo si el error es positivo o negativo, el relé encenderá o apagará el caudín con un tiempo de conmutación que no permitirá un desgaste de las partes mecánicas del relé. PWM actuará dependiendo del error, el ciclo de trabajo del ventilador es directamente proporcional al error positivo, si el error es negativo el ventilador se apagará.

3.7. Algoritmos de proceso PID

Los problemas presentes por los retardos introducidos por trabajar en una red no determinista, tienen un grave efecto en la estabilidad de la estación PID. A nivel de red y hardware no existe alguna solución que elimine los retardos, a nivel de software se puede introducir algoritmos de control que definan que hacer mientras no existe información del sistema.

Una solución para compensar la ausencia de información es obtener la función de la planta y acoplar diferentes valores del actuador, se estabiliza el sistema de tiempo discreto con retardo variable en el tiempo, y se obtiene el parámetro de controlador correspondiente (Ma, Pan, & Zhou, 2016). También se acoplan algoritmos de compensación dinámica, esta estrategia propuesta hace que el sistema de bucle cerrado sea estable bajo suposiciones suaves. Los resultados de la simulación muestran como mejoran el rendimiento del sistema (Ahn, Orlik, Guo, Wang, & Chenyang, 2019). También se puede adaptar un

predictor adaptativo y esquemas de compensación, para evaluar estos algoritmos se utiliza el software True Time Matlab (Gamal, Sadek, Mohamed, & Abou-elSaoud, 2016). Todas estas soluciones abren nuevas perspectivas para mejorar la eficiencia de NCS, sin embargo, se basan solo en simulaciones. Es necesario implementar algoritmos de compensación en un sistema real.

En el presente proyecto se propone una función de compensación lineal que se activa por eventos. Se deben analizar las propiedades físicas que influyen sobre la variable medida. La repuesta del sistema ante una acción tiende a dar una intuición de lo que puede pasar en un futuro sin necesidad de tomar una muestra del sistema.

Se debe programar ciertos criterios de las características físicas del sistema y programarlas en el controlador. Los valores intuitivos llenarán los espacios que existen mientras la red no tiene una respuesta, es decir, se desplegará una serie de cálculos para establecer una respuesta adicional. Dentro de la programación se incluye un contador que vuelve a cero cada vez que llega un dato de la estación PID. El algoritmo PID solo funciona cuando el contador es cero, es decir, cuando llega un dato legítimo del sensor de distancia de la estación PID. Durante el tiempo variable entre datos legítimos, se superpone una función lineal que considera los últimos datos del servomotor.

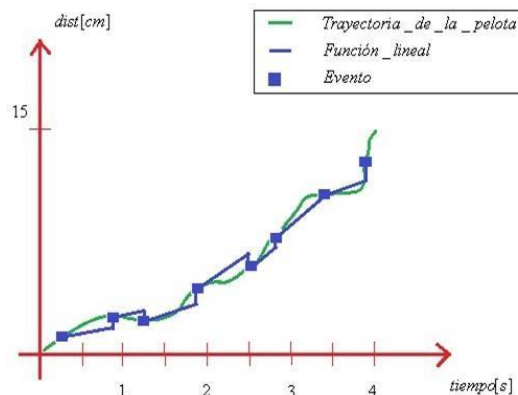


Figura 6. Función lineal de compensación.

Para establecer la pendiente de la función lineal, se toma en cuenta el ángulo del servomotor, se estableció un rango de giro de 65° hasta 105°. Al estar el servo motor en un ángulo en un intervalo de 85°

a 89° , la pendiente es cero debido a que la fuerza que mueve a la pelota actúa solo en el eje y. La pendiente es positiva y es inversamente proporcional al ángulo del servomotor cuando se encuentra en ángulos menores a 85° . La pendiente es negativa y es directamente proporcional al ángulo del servomotor cuando se encuentra en ángulos superiores de 89° . A continuación, se detalla el algoritmo efectuado por el nodo central y el proceso PID, como se puede observar en la Figura 7.

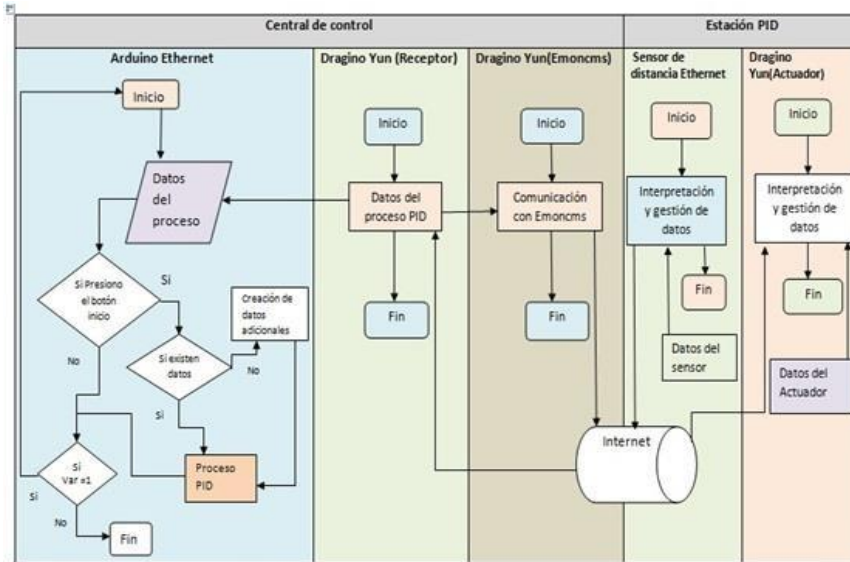


Figura 7. Flujograma del proceso de PID.

3.8. Control por eventos

Los sistemas de control por eventos se basan en la evolución dinámica del sistema para realizar una acción de control, en los sistemas convencionales el avance del tiempo define las acciones de procesamiento y comunicación. Los múltiples beneficios que se obtienen de control por eventos son básicamente la liberación de carga innecesaria de trabajo para el controlador y red ya que solo es necesario realizar una respuesta bajo ciertos parámetros del sistema y no del tiempo (S.Dormido, J.Sánchez, & E.Kofman, 2008). Para definir un evento se debe analizar las características del sistema, cuando es necesario ejecutar las actividades de control y comunicación, el mejor criterio para adaptar un evento son el error y el tiempo (Guinaldo, Sánchez, & Dormido, 2017). También se pueden activar diferentes canales de comunicación basada en eventos en redes híbridas

cableadas–inalámbricas, para mejorar la eficiencia de la red (Du, Qi, Fei, & Wang, 2017).

En el presente proyecto se generan eventos basado en el error en tiempo. La primera planta (PID) deja de enviar información si el error está en los intervalos de -0.25 y 0.25 durante 250ms (activa evento).

La segunda planta (tintura) deja de enviar información si el error está en los intervalos de -0.5 y 0.5 durante 800ms (activa evento). Cuando el error esta fuera de los rangos establecidos, empieza nuevamente la solicitud de información al controlador. Bajo estas condiciones, si el sistema está equilibrado no debe existir transmisión de información entre sensores– actuadores y el controlador.

3.9. Open Energy Monitor (emonCms)

Open Energy Monitor es una herramienta capaz de monitorizar y almacenar diferentes tipos de variables, la principal ventaja es que es de código abierto. Emoncms es una aplicación Web para el almacenamiento y visualización de datos, pudiendo ser instalado en un servidor local o conectarse en un servidor externo en la red. Las herramientas gratuitas que ofrece Emoncms son suficientes para el desarrollo de este proyecto, existen otros beneficios que se adquieren si cancela una cierta cantidad de dinero, la información puede ser descargada en un documento en excel. Dragino Yun puede establecer comunicación con Emoncms, enviando una petición a un servidor a través de la red. Se programan las dos claves que Emoncms otorga para la transferencia y gestión de datos.

Cualquier dispositivo que este en la capacidad de conseguir una dirección IP por el router de la red, puede ser un usuario de la aplicación de control. Los dispositivos pueden comunicarse con los diferentes sistemas de control conectándose vía wifi o Ethernet con el router de la red.

3.10. Sistemas de control proceso de tintura

Se puede escoger entre los dos tipos de tintura, blanco–negro y colores. El tipo de tintura Blanco–Negro y colores, deben de cumplir con los parámetros establecidos, ver Tabla 1. Al finalizar el proceso

automáticamente el ventilador se enciende a la máxima velocidad para bajar la temperatura del caudín.

Tabla 1. *Tabla de tintura.*

	Paso 1		Paso 2		Paso 3	
Tipo	Temperatura [°C]	tiempo [min]	Temperatura [°C]	tiempo [min]	Temperatura [°C]	Tiempo [min]
B/N	40	8	40—70	8	70	5
Colores	40	5	40—70	10	70	6

Con los datos obtenidos en Emoncms, se compara la evolución temporal de la temperatura ideal y medida. Se puede observar la simetría entre las dos gráficas para los dos tipos de tintura, como se muestra en la Figura 8.

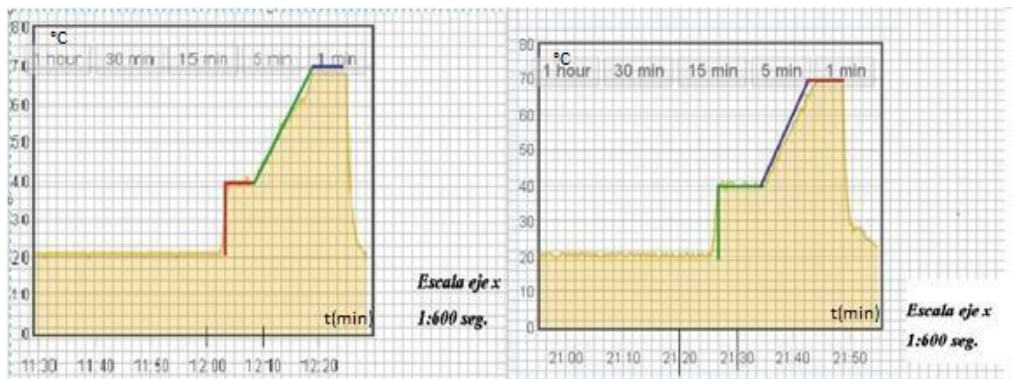


Figura 8. Gráficos de tintura a color y blanco/negro.

Para este proceso no es necesario establecer una función lineal de compensación, el sistema se equilibra incluso con los retardos de la red.

3.11. Sistema de control PID en red

Se analiza la evolución del sistema sin la función de compensación. El sistema no se equilibra, la variable medida cambia drásticamente por la respuesta del actuador. Ver Figura 9.

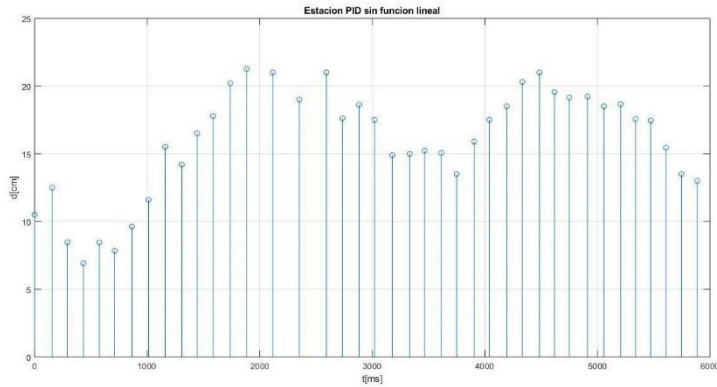


Figura 9. Estación PID sin función lineal de compensación.

Para obtener los valores y parámetros del sistema PID, se somete a actuar al proceso por calibración basado en prueba y error, se observa cómo responde el control ante los retardos. Las diferentes lecturas del sensor y los valores introducidos por la función lineal dependen básicamente de la eficiencia de la red. Entendiendo la naturaleza asíncrona del sistema, el proceso es sometido a valores iniciales para analizar el comportamiento del PID con los valores adicionales de las funciones lineales. Se inicia con valores bajos en las pendientes y k_p , el objetivo es ver como las funciones lineales se comportan con los eventos. El criterio para definir el valor de la pendiente, es que los datos generados tengan una coherencia que ayude a definir el comportamiento de la pelota, una tendencia que complemente la ausencia de datos en el PID, ver Tabla 2. Los valores de $k_p=1.5$, $k_d=1.0$ y $k_i=0.01$, son los valores de coeficientes que permiten equilibrar al sistema. Ver Figura 10.

Tabla 2. Valores de la pendiente de la función lineal.

Pendiente		
Angulo del servomotor(Intervalos)		
[65° - 88°]	[88° - 89°]	[89° - 105°]
0.01	0	-0.01
0.01	0	-0.01
0.01	0	-0.01
0.01	0	-0.01

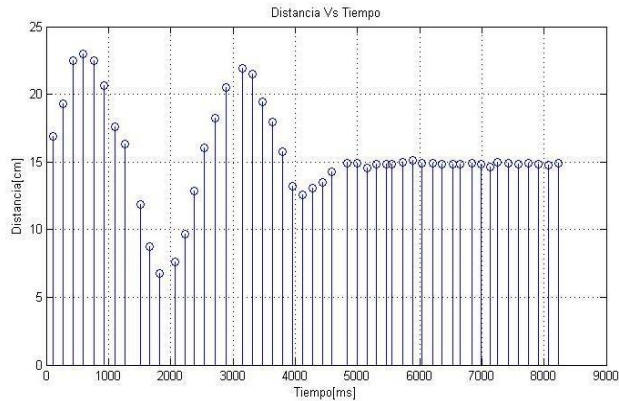


Figura 10. Estación PID con función lineal de compensación.

3.12. Retardos de la red.

El controlador tiene 2 contadores que registra el tiempo entre petición de los nodos, cada vez que llega una petición de las plantas se reinicia el contador.

Cuando las dos plantas están enviando datos el tiempo de muestreo tiene un promedio de 221 ms. Si nos fijamos en las figuras 9 y 10 los datos del sensor llegan de forma aleatoria, no hay un tiempo de muestro exacto. Cuando el proceso PID llega a equilibrarse, la planta deja de enviar información al controlador, el tiempo de muestreo baja considerablemente. Ver figura 11.

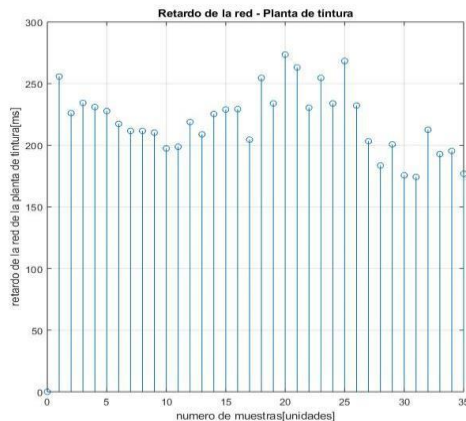


Figura 11. Retardo de la red – Planta de tintura.

El promedio del tiempo de muestreo es de 148ms, cuando solo trabaja la planta PID el retardo presenta las mismas características.

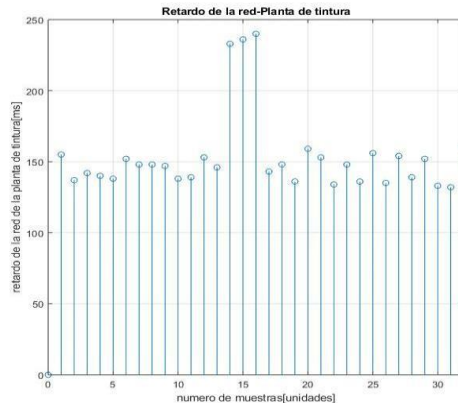


Figura 12. Retardo de la red – Planta de tintura (solo trabaja la planta de tintura).

4. Discusión

Es necesario analizar los sistemas con las siguientes variables: tiempo de muestreo asíncrono, tiempo de estabilidad, error del sistema, efecto de la función lineal de compensación en la estabilidad del sistema, efecto del control por eventos en los tiempos de muestreo.

La primera planta se estabiliza incluso con los retardos de la red, el tiempo de muestreo asíncrono no afecta el algoritmo de control. Tampoco fue necesario introducir una función lineal durante la ausencia de información.

En la segunda planta el tiempo de muestro asíncrono deteriora la acción de control, el sistema nunca se estabiliza, ver figura 9. Al introducir la función lineal de compensación, la respuesta del actuador es más estable y el error tiende a cero, el sistema se equilibra a los 5 segundos, ver figura 10.

Cuando las dos plantas están enviando información al controlador, el tiempo de muestreo tiene un promedio de 221ms, ver figura 11. Cuando el error de la estación PID tiende a 0, el tiempo de muestreo es de 148ms, ver figura 12. Se puede observar el efecto del control por eventos en el sistema, solo se gestiona la información cuando es necesario. Cuando los 2 sistemas estén equilibrados no existe comunicación entre controlador y sensores– actuadores,

liberando de trabajo innecesario a los nodos. En la tabla 3 se puede apreciar cómo afecta el control por eventos al tiempo de muestreo.

Tabla 3. *Efecto del control por eventos al tiempo de muestreo.*

	Activación de eventos			
Primera Planta (tintura)	1	1	0	0
Segunda Planta (PID)	1	0	1	0
Tiempo de muestreo (Promedio) en ms	0	148	148	221

5. Conclusiones

Para el desarrollo de la presente investigación se implementó un sistema de control en red basado en eventos. Las plantas de control solo inician la transferencia de información bajo ciertas condiciones. Cuando los sistemas no están equilibrados el valor de la variable medida llega al controlador para generar una respuesta que es enviada al actuador. De esta manera se puede apreciar como el control por eventos afecta al tiempo de muestreo de la red (ver tabla 3). Incluso si los procesos de control no requieren de información, los nodos de la red entran en estado de reposo ahorrando recursos de procesamiento, energía y de red.

En un sistema real se pueden presentar un mayor número de nodos en la red, por lo cual el control por eventos mejora significativamente la eficiencia de la red, sin embargo, existe la posibilidad que todos los sistemas envíen datos simultáneamente

comprometiendo el equilibrio de los procesos de control. Cuando las 2 plantas necesitan información el tiempo de muestreo sube a 221 ms, el proceso PID no se equilibra.

En el caso del proceso de tintura la reacción es lenta, el sistema se equilibra incluso con las 2 plantas enviando información. En diferentes áreas existen procesos que trabajan con tiempos de muestreo mayores de 1 segundo, por lo tanto, los NCS pueden ser una excelente herramienta en estos sistemas.

Muchos investigadores presentan soluciones innovadoras para compensar los retardos de la red, sin embargo, sus demostraciones solo se basan en simulaciones, así es que, es necesario implementar un sistema real donde se pueda apreciar las ventajas y vulnerabilidades del control por evento y algoritmos para compensar los retardos de red. Dado lo anteriormente expuesto, la función lineal de compensación surge de la idea de que podría pasar si no se puede monitorear un proceso, así toma los últimos datos de la planta para intuir una respuesta. Se puede observar cómo se comporta el sistema sin la función lineal de compensación (ver figura 9), la variable medida cambia abruptamente y el sistema no se equilibra.

Al usar la función lineal de compensación, la respuesta del controlador tiende a equilibrar el sistema (ver figura 10), la variable cambia paulatinamente sin tener picos abruptos, dando como resultado que el sistema se equilibre a los 5 segundos (ver figura 10).

El sistema implementado permite equilibrar los procesos, el control por eventos y la función lineal aportan significativamente al comportamiento óptimo de las plantas. Los NCS se presentan como una alternativa para comunicar los elementos que componen un sistema de control a lazo cerrado, sin embargo, se requiere de un análisis específico por ser procesos de control asíncrono donde el número de nodos, procesos de control y retardos propios de la red determinen la estabilidad del sistema.

6. Referencias

Ahn, H., Orlik, P., Guo, J., Wang, Y., & Chenyang, L. (2019). Programación dinámica óptima de sistemas de control

BONILLA, Paul A.
MANITIO, Darwin, A.

Sistema de control de red basado en eventos con
función de compensación lineal.

inalámbricos en red. Conferencia internacional ACM/IEEE
sobre sistemas ciberfísicos.

- Bogdan, M., Wilamowski, J., & Irwin, D. (2016). *Industrial Communications Systems* – CR-Press.
- Casanova, V. (2005). *Sistemas de control basados en red, modelado y diseño de estructuras de control*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Chuan, Z., Yifei, W., & Qingwei, C. (2017). Control adaptativo de tolerancia a fallas para una clase de sistema de control en red con retardo de tiempo aleatorio basado en red neuronal. *Yantai: IEEE*.
- Dormido, Sánchez, & Kofman. (2008). Muestro, Control y Comunicación Basados en eventos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 5–26.
- Du, D., Qi, B., Fei, M., & Wang, Z. (2017). Control cuantificado de sistemas de control en red activados por eventos distribuidos con restricciones híbridas de comunicación de redes cableadas e inalámbricas. *Ciencias de la información*.
- Feng, P., Da-l, i. C., & Ding, y. X. (2015). Control de red neuronal difuso para sistema de control en red no lineal. *Guilin: IEEE*.
- Fisher, A. (1995). *Dyeing methods for wool*. Australian.
- Gamal, M., Sadek, N., Mohamed, R., & Abou-elSaoud, A. (2016). Compesación de retardo utilizando el predictor Smith para el sistema de control en red inalámbrica. *Alexandria Engineering Journal*.
- Gamiz, J., & Gamiz, J. (2011). *Ethernet como soporte de sistemas de control en red Técnica Industrial*.
- Guinaldo, M., Sánchez, J., & Dormido, S. (2010). Diseño de un sistema de control anticipado basado en paquetes para control en red. *Ninth Conferencia Iberoamericana en sistemas, cibernética e informática*.
- Guinaldo, M., Sánchez, J., & Dormido, S. (2017). Control en red basada en eventos: de lo centralizado a lo distribuido. *Revista iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*.
- Lancovi, A. (2000). Algunos problemas de tintura de lana y sus técnicas. *Manager, International Wool Dyeing Service*.
- Lian, F., Moyne, J., & Tilbury, D. (2001). Performance evaluation of control network; Ethernet, control net and device net. *Control Systems IEEE*.
- Ma, J., Pan, F., & Zhou, L. (2016). *Modelado y estabilización de un sistema de control de red inalámbrica con retraso en el tiempo*. Sage journals.
- Pillajo, C., & Hincapie, R. (2018). *Wireless Network Control Systems*. Quito: Editorial Universitario Abya Yala.

