

# Embedded Diagnostics of Conveyor Belts Actuated by Induction Motors

Francisco J. Arriaga-Méndez, Omar F. Mendiola-Meza, Eliseo Vargas-Mascorro, and Luis E. González-Jiménez, *Member, IEEE*

**Abstract**—Frequently, companies with conveyor belts face problems to keep them working as expected. Currently, there are many automatic conveyor failure diagnostic techniques but most of them require complex instrumentation schemes or algorithms. This paper presents a fault diagnostic scheme for conveyor belts actuated by an induction motor. The system retrieves information from a current sensor and a voltage sensor located in the input line of the motor to detect irregular behaviors with an algorithm based on statistic indices. The main features of the solution are: non-invasive for a pre-existing conveyor, embedded implementation, simple and effective algorithm, and low cost instrumentation. This proposal is the starting point for a more complex solution that detects irregularities more accurately using more variables of the system in future work.

**Index Terms**— Conveyor belt, AC motor, fault detection, current sensor, voltage sensor, encoder

## I. INTRODUCCIÓN

Las bandas transportadoras son ampliamente utilizadas en compañías que van desde farmacéuticas y empresas de paquetería hasta constructoras y minería. Estas industrias, por lo general, tienen un proceso de producción automatizado o necesitan mover una gran cantidad de objetos en un área en particular. Es un hecho que las compañías que utilizan bandas transportadoras frecuentemente se enfrentan con problemas para mantenerlas funcionando como se espera. Algunos de estos problemas son: desalineamiento de la banda, rasgaduras transversales y longitudinales en la banda, atascamientos, fricción de la banda en algún componente mecánico, vibración excesiva, elongación de la banda por desgaste, subtensión, sobretensión, entre otras. En algunas ocasiones la red de bandas puede llegar a abarcar kilómetros, incluso existen lugares en los que no es posible acceder para una persona, lo que hace muy difícil diagnosticar el estado actual en el que están operando. De la misma manera, es común que los encargados del mantenimiento de las bandas transportadoras no se den cuenta

de las fallas hasta que es demasiado tarde y la línea tenga que ser parada de emergencia, provocando así grandes pérdidas económicas para la empresa.

Actualmente, existen técnicas que buscan solucionar esta problemática. Muchas de éstas, además de ser sistemas automáticos, reducen los problemas relacionados con la falta de experiencia del personal de mantenimiento, ya que si no se hace una inspección adecuada al equipo algunas anomalías podrían pasar desapercibidas [1]. Una de estas soluciones es un sistema de detección conductiva integrada, la cual consiste en una matriz magnética integrada en el transportador y sensores en el exterior para monitorear el comportamiento de este [2]. Otra solución propuesta consiste en un sistema para inspeccionar bandas transportadoras con sistemas de visión. Este sistema dedicado a la industria minera funciona emitiendo una intensa luz para que una cámara obtenga imágenes de alta calidad de la banda, y después procesar estas imágenes con un algoritmo para detectar anomalías [3]. Además, existe la identificación por radio frecuencia (RF) en el uso para la detección de rasgaduras de la banda. Este sistema consiste en un transpondedor conectado a una cinta conductora adherida a la banda y un escáner que se coloca a 150 mm debajo de la superficie de la banda de tal forma que cuando la banda se rasga, el bucle conductor se destruye y el código de identificación no será enviado, detectando así la falla [4]. Por otro lado, en [5] se propone el uso de sensor de temperatura y de corriente del actuador eléctrico de la banda para detectar fallas, y en [6] agregan acelerómetro y sensor de vibración al sistema de detección en el marco del internet de las cosas. Sin embargo, estas soluciones necesitan de una instalación a lo largo de toda la banda transportadora, lo cual aumenta de manera significativa el costo y la complejidad de instalación y mantenimiento.

En muchos casos, las bandas transportadoras son accionadas por un motor eléctrico de CA (corriente alterna) cuyo par se transmite a la banda por medio de un motorreductor y cuya velocidad es fija o controlada por un variador de frecuencia. De esta manera, el eje de salida del motor alcanza la velocidad y par eléctrico necesarios para mantener a la banda transportadora trabajando efectivamente. Como en el caso de cualquier motor eléctrico que mueve una carga, el comportamiento general del transportador se ve reflejado en las señales eléctricas (voltaje y corriente) y mecánicas (par, velocidad y aceleración) del motor.

El análisis de señales eléctricas para medir par y eficiencia de motores eléctricos en el área industrial es un campo ya estudiado, y los resultados obtenidos son confiables. Existe el caso de una implementación inalámbrica, en la que el procesamiento de señales eléctricas se realiza en un sistema

F. J. Arriaga-Méndez is with the Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO AC), Tlaquepaque, Jalisco, México, (e-mail: se722850@iteso.mx).

O. F. Mendiola-Meza is with the Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO AC), Tlaquepaque, Jalisco, México, (e-mail: se683769@iteso.mx).

Eliseo Vargas-Mascorro is with the Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO AC), Tlaquepaque, Jalisco, México, (e-mail: se711099@iteso.mx).

L. E. González-Jiménez is with the Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO AC), Tlaquepaque, Jalisco, México, (e-mail: luisgonzalez@iteso.mx).

embebido conectado al motor, y sólo los resultados son enviados inalámbricamente con un error menor al 2% [7]. El inconveniente de esta propuesta es el costo puesto que requiere la implementación de una comunicación inalámbrica estable en un ambiente industrial. De la misma forma, Kyusung Kim y Alexander G. Parlos [8] desarrollaron un sistema para diagnosticar fallas en motores de inducción con estrategias basadas en neuropredicadores y wavelets con señales de voltaje, corriente y velocidad como entradas. En este estudio se obtuvo una efectividad de detección superior al 93%.

También se han hecho análisis de velocidad, aceleración y par en motores con encoders incrementales. J. Voldán [9] realizó un estudio para calcular el momento de torsión de un motor controlado por un variador de frecuencia. En este trabajo, los datos obtenidos por el encoder se compararon con los obtenidos en una simulación de los motores. Los resultados fueron similares a pesar de que utilizarse un encoder de un solo canal. En otro estudio se realiza un experimento en el que se intenta calcular el par inicial de un motor de corriente directa a partir de la velocidad y aceleración angular del eje, las cuales son obtenidas con un encoder incremental [10]. En este estudio se concluye que para estimar el par de una manera más precisa sería mejor incluir lecturas de corriente y voltaje.

El uso integrado del enfoque de sensar el motor eléctrico para detectar fallas en la banda transportadora completa, se ha integrado con algoritmos complejos como redes neuronales difusas [11] o *wavelets* y SVM (*Support Vector Machine*) [12]. Sin embargo, el usar algoritmos de esa complejidad encarece el sistema embebido y alarga el proceso de entrenamiento de la solución final.

Debido a lo mencionado anteriormente, la solución propuesta en este documento consiste en un dispositivo para diagnosticar bandas transportadoras (CDD por sus siglas en inglés, *Conveyor Diagnostic Device*) actuadas por un motor de CA. Este dispositivo monitorea el comportamiento del sistema midiendo las señales de corriente y voltaje del motor, así como la velocidad angular del eje del motor. Para esto, se adquieren las señales del sensor de corriente, sensor de voltaje y encoder acoplados al sistema. Estas señales se convierten en la entrada de un algoritmo de diagnóstico, basado en medidas estadísticas, que detecta anomalías y comportamientos inusuales para reportarlas al usuario. A diferencia de las soluciones antes mencionadas, el CDD sólo se empotra en el motor eléctrico que mueve la banda transportadora lo que reduce significativamente el costo y complejidad de la implementación y el mantenimiento. Los estudios sobre señales eléctricas y mecánicas antes mencionadas respaldan el enfoque con el que el CDD busca resolver la problemática propuesta.

El documento está organizado de la siguiente manera. En el capítulo II se definen las fallas a ser detectadas por la propuesta. Luego, en el capítulo III, se describe la solución propuesta, incluyendo la arquitectura de hardware y firmware, la plataforma experimental, el algoritmo de detección y las medidas estadísticas en las que se basará su funcionamiento. Después, se presentan los resultados experimentales en el capítulo IV. Finalmente, se reportan las conclusiones del documento y se establece el trabajo futuro considerado.

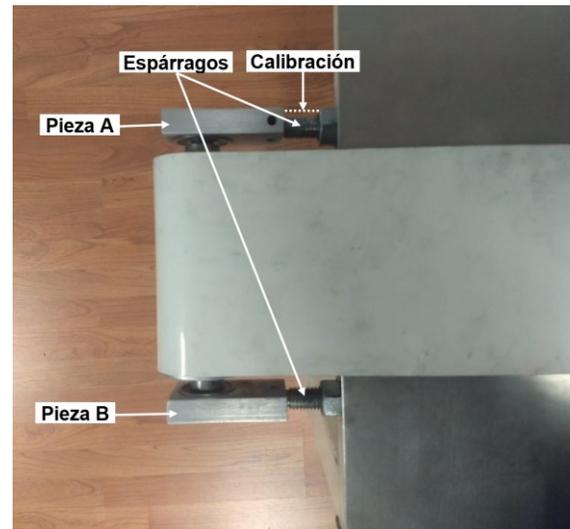


Fig. 1. Sistema de ajuste de tensión de la banda transportadora.

## II. DEFINICIÓN DE LAS FALLAS A DETECTAR

Entre las fallas más comunes en una banda transportadora actuada por motor eléctrico se destacan: desalineamiento de la banda, vibración y fricción de la banda por algún componente externo, fallas eléctricas del motor y fallas del sistema de transmisión (poleas o caja de engranes) [13], [14]. Debido a esto, la primera etapa de este proyecto consistió en reproducir las fallas antes mencionadas y validar si estas generaban un patrón detectable en el sensor de corriente, de voltaje y encoder de una banda transportadora real usada como plataforma experimental.

Para poder determinar un cambio en las señales de los sensores, se definieron los parámetros de la operación normal de la banda, para luego modificarlos y reproducir las fallas. El parámetro principal que se modificó es el de la tensión en la banda, la cual se modifica por medio de dos espárragos que sostienen al rodillo terminal, tal como se muestra en la Fig. 1.

La manera en la que se calibra esta tensión es midiendo la distancia en centímetros que existe entre la tuerca de ajuste y la pieza que sostiene al rodillo (Pieza A o B). Tomando como base los antecedentes, los experimentos realizados y los sensores elegidos, se definieron las siguientes fallas a detectar:

- NF. Estado normal: La banda permanece alineada, sin fricción externa y con una tensión de 4 cm.
- F1. Desalineamiento: La banda se desalinea del rodillo terminal alrededor de 1 cm desde la orilla de éste hasta la orilla de la banda, no existe fricción externa y la tensión se mantiene normal.
- F2. Con fricción externa: La banda se desalinea de los dos rodillos hasta el punto en que se monta alrededor de 0,5 cm sobre las piezas A y B, y la tensión se mantiene normal.
- F3. Sobretensión: La banda permanece alineada, sin fricción y con una tensión de 4,6 cm.
- F4. Subtensión: La banda permanece alineada, sin fricción y con una tensión de 3,4 cm.

El proceso de caracterización de las fallas con base en los resultados experimentales se muestra más adelante en el documento.

### III. SOLUCIÓN PROPUESTA

#### A. Arquitectura del Sistema

La solución es un sistema embebido compuesto por un sensor de corriente colocado en serie con la línea de alimentación del motor, un sensor de voltaje conectado en paralelo a la alimentación y un encoder acoplado al eje del motor para obtener su velocidad y calcular su aceleración. Como interfaces de interacción con el usuario, el dispositivo incluye un botón de reinicio (*reset*) y una interfaz de comunicación serial RS232 para conectar una PC. Esta última permite la configuración y el registro de las variables durante los experimentos. En la Fig. 2 se muestra un diagrama con los componentes que conforman el sistema y sus interfaces. El área titulada **Gabinete** indica los elementos que están dentro del gabinete del prototipo.

#### B. Plataforma Experimental

Los experimentos del proyecto se realizaron en el sistema mostrado en la Fig. 3. Este se compone por una banda transportadora accionada por un motor eléctrico de CA monofásico, una interfaz para las señales eléctricas en toda la plataforma, un acoplamiento mecánico para fijar el encoder y el CDD en su gabinete. Las dimensiones del sistema completo son 90,8 cm de altura, 80,65 cm de largo y 30,48 cm de ancho. El rodillo motriz, por un lado, se adhiere a la base estructural con un espárrago, y por el otro se acopla al eje de salida del motorreductor con dos opresores. Al mismo tiempo, el rodillo terminal se adhiere por sus dos extremos con espárragos. Todos los espárragos cuentan con 2 tuercas cada uno, que sirven para fijarlos a la base, y ajustar la tensión de la banda. Una descripción más detallada de este sistema puede ser encontrado en el Apéndice de este documento.

#### C. Hardware del Sistema

La banda es accionada por un motor Dayton 1L536 de 115/230 VCA, de 16 a 30 RPM, y 1/15 de HP. El sensor de voltaje se implementó por medio de un divisor de voltaje calibrado al rango de entrada del ADC (del inglés *Analog to Digital Converter*) del microcontrolador.

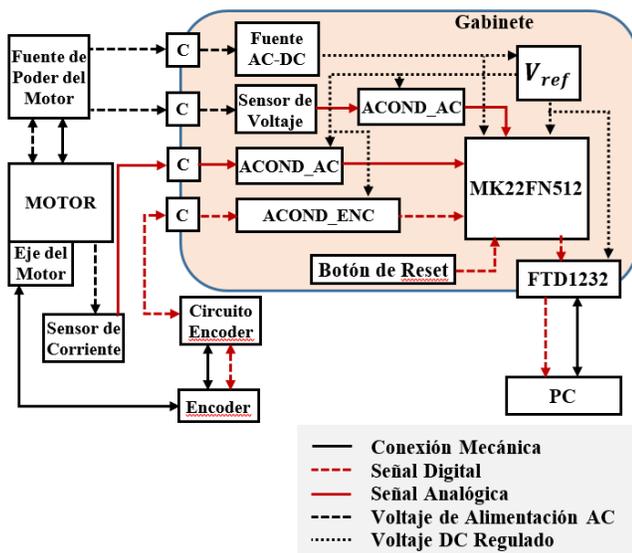


Fig. 2. Diagrama de componentes del sistema de diagnóstico propuesto.

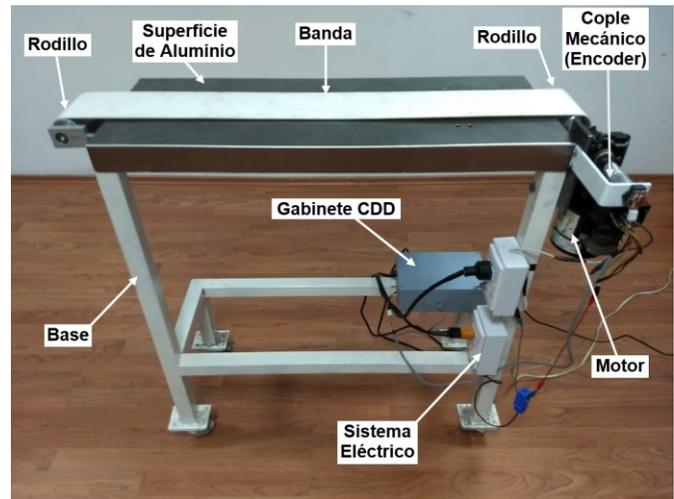


Fig. 3. Plataforma experimental y sus principales componentes.

Además, incluye 2 fusibles de 1 A como protección contra una sobre corriente y un varistor de 450V para protegerlo en caso de una sobretensión. Se colocaron varias resistencias en serie para distribuir el consumo de potencia, evitando el sobrecalentamiento, lo que nos permite usar resistencias de baja potencia que coadyuvan a minimizar el tamaño del circuito y el consumo de energía.

El sensor de corriente utiliza un transformador de núcleo dividido modelo SCT013-020 basado en el estándar GB 1208-2006 y con las siguientes características: rango de medición de corriente de 0 a 20 A, máxima salida de voltaje de 1V, precisión de  $\pm 1\%$ , temperatura de operación de  $-25^{\circ}\text{C}$  a  $70^{\circ}\text{C}$  y frecuencia de trabajo de 50-1 kHz. Para su implementación, el gancho de la bobina cubre uno de los cables que alimentan al motor, de esta forma el sensor actúa bajo el principio de un transformador eléctrico, donde el devanado primario consta de una sola espira (el cable que alimenta el motor) y el secundario es una bobina que tiene el sensor. Bajo este principio, la corriente alterna que fluye por el devanado primario genera un campo magnético variable que se induce en el devanado secundario con un núcleo ferromagnético que pone las cargas en movimiento y genera un voltaje en las terminales de la bobina, la cual se conecta a una resistencia de muestreo que consume la potencia generada y a partir de ahí se tiene el voltaje que se va a conectar a nuestro circuito acondicionador y al ADC del microcontrolador.

El sensor encoder usado es óptico incremental con serie 600-128-C24. Tiene 2 canales de salida en cuadratura desfasadas  $90^{\circ}$ , con velocidad máxima de 300 RPM y par máximo de 0,011Nm. Para poder usar el encoder se diseñó un circuito, con un regulador de 5 V para la de alimentación, su voltaje de entrada son 12 V que provienen de la fuente AC-DC, se agregaron 2 LED con una resistencia *pull-up* a 5 V conectado a la señal A y B respectivamente. Esto funciona como indicador visual del buen funcionamiento del encoder.

El microcontrolador utilizado es el MK22FN512 de la serie Kinetis de *NXP Semiconductors* a 120 MHz con núcleo ARM Cortex-M4 de 32 bits. Cuenta con dos ADC de 16-bit y dos comparadores analógicos con DACs de 6-bit. Como interfaces, cuenta con 2 módulos SPI, uno de I<sup>2</sup>S y 3 de UART.

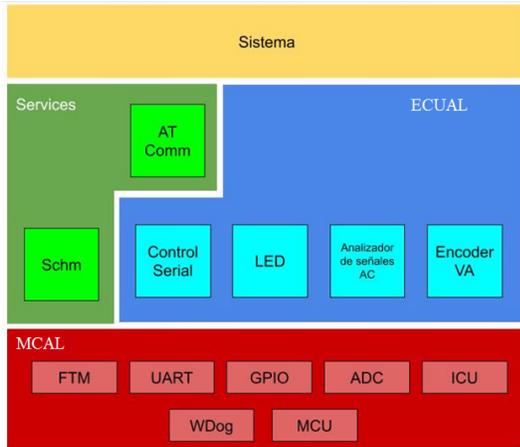


Fig. 4. Arquitectura del firmware de la solución propuesta.

#### D. Firmware

La solución de firmware propuesta está estructurada en un modelo de capas basado en el estándar de arquitectura de software de AUTOSAR [15]. Un diagrama de estas capas y sus librerías se muestran en la Fig. 4.

A continuación, se describirán las capas referidas en la arquitectura de firmware del sistema:

**C1. Capa MCAL (Micro-Controller Abstraction Layer).** Es la capa más baja y está compuesta por las siguientes librerías:

- Flex Timer Module (FTM).* Se usa para la generación de una base de tiempo de 500  $\mu$ s usado por el programador de tareas o *scheduler* y provee las interfaces para configurar la captura de los sensores.
- Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART).* Controla la transmisión y recepción de datos por el puerto correspondiente del microcontrolador.
- General-Purpose Input/Output (GPIO).* Configura el propósito de los pines de entrada/salida del microcontrolador.
- Analog-to-Digital Converter (ADC).* Se encarga de la configuración y coordinación de las lecturas de los diferentes canales de ADC, con los 2 módulos que tiene incluidos el microcontrolador.
- Input Capture Module (ICU).* Usa las interfaces de GPIO y FTM para poder detectar cambios de flanco en señales digitales y con esto generar interrupciones en el microcontrolador.
- WatchDog (WDog).* Configura el perro guardián del microcontrolador, el cual sirve para reiniciar el sistema en caso se quede anclado en algún punto de su ejecución.
- Microcontroller Unit (MCU).* Se encarga de inicializar los relojes del microcontrolador.

**C2. Capa ECUAL (Electronic Control Unit Abstraction Layer).** Contiene las siguientes librerías de control de software:

- Control Serial* se encarga de la transmisión y recepción de tramas de comandos AT.
- LED (Light Emitting Diode).* Controla el encendido o apagado de los LED como interfaz de comunicación con el usuario.

- Analizador de Señales de CA.* Obtiene las muestras de los módulos de CA y los convierte a su valor numérico correspondiente (voltaje o corriente). Además, las procesa para obtener su valor RMS y su frecuencia.
- Encoder VA.* Se encarga de decodificar la señal de cuadratura del encoder incremental, interpretar las señales A y B del encoder para calcular la velocidad y aceleración angular del eje del motor.

#### C3. Capa de Servicios

- Schm (Schedule Manager).* Se encarga del agendamiento y ejecución de tareas considerando la prioridad asignada. También se encarga del agendamiento de tareas con una base de tiempo periódica, cuidando de distribuir el procesamiento del CPU de manera uniforme para cada tarea.
  - AT Comm.* Se encarga de validar los comandos AT (o comandos de Hayes) que son admitidos por la librería de control serial y ejecuta la tarea correspondiente. También provee las interfaces para poder enviar datos por el puerto serial.
- C4. Capa de Sistema.** Se encarga de analizar la información recolectada y procesada por las librerías *Encoder VA* y *Analizador de Señales de AC*, y de ejecutar el algoritmo principal de detección de fallas.

#### E. Cálculo y Procesamiento de las Señales de AC

La implementación para la obtención de datos de voltaje y corriente es la misma, con excepción de la unidad, canal de ADC y las fórmulas para calcular su valor real. Estas fórmulas se deducen a partir de las características del sensor utilizado y su hoja de especificaciones. El término “señal AC” será utilizada para hacer referencia a ambas señales (voltaje y corriente). El módulo de ADC del microcontrolador, utilizado para muestrear la señal AC, está configurado con un período de muestreo de 490 microsegundos. Cada vez que una muestra de ADC está lista se activa una tarea que calcula el valor instantáneo de la señal AC y lo guarda en un registro o *buffer* circular, para después ejecutar un algoritmo que detecta cruces por cero en el flanco de bajada. Si este es detectado, se activa otra tarea para calcular el valor RMS y la frecuencia del último ciclo guardado en el *buffer* circular de valores instantáneos. Entonces, se utiliza la siguiente fórmula

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N V_i^2}{N}} \quad (1)$$

donde  $V_i$  es el valor instantáneo de voltaje y  $N$  es el número de muestras por ciclo. La frecuencia  $f$  de la señal se calcula como

$$f = (T_m N)^{-1} \quad (2)$$

con  $T_m$  es el período de muestreo. Debido al desfase que existe entre la frecuencia de la señal y el periodo de muestreo por parte del módulo ADC, el número de muestras por ciclo no es constante. Con la configuración implementada, cada 10 ciclos aproximadamente hay una muestra extra lo que provoca ruido en el cálculo RMS y de frecuencia. Para aminorar esta perturbación se implementó un filtro basado en la derivada de las magnitudes en los cruces por cero de la señal. Con este filtro el ruido se redujo hasta un 95%. Los *buffers* de frecuencia, valor RMS y valor instantáneo son utilizados posteriormente por la aplicación para el algoritmo de detección de fallas.

La velocidad y aceleración angulares del eje del motor se calculan utilizando un encoder con resolución de 128 pulsos por revolución (PPR) por lo que el motor girará  $\theta_p = 2,8125^\circ$  por pulso. Entonces, el cálculo de la velocidad angular  $\omega$  en grados por segundo resulta como

$$\omega = \frac{\Delta_p \theta_p}{T} \quad (3)$$

donde  $\Delta_p$  es el número de pulsos contabilizados en cada muestra y  $T$  es el período de muestreo. La conversión a revoluciones por minuto queda como  $\omega_{RPM} = \omega/6$ .

Finalmente, la aceleración angular se obtiene de la definición de derivada discreta de la siguiente manera

$$\alpha = \frac{\omega_k - \omega_{k-1}}{T} \quad (4)$$

Los resultados experimentales que sirvieron para validar si la información obtenida con los sensores propuestos permite la detección de las fallas definidas se describen a detalle en la siguiente sección.

#### IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

##### A. Caracterización de las Fallas

Todas las pruebas realizadas se desarrollaron con 30 segundos del sistema en estado normal e inmediatamente después se generaba la falla correspondiente por otros 30 segundos. Las gráficas presentadas a continuación muestran los primeros 15 segundos de los datos de corriente capturados durante el estado normal y con la falla presente.

El primer intento realizado fue tratar de identificar algún patrón de comportamiento que se repitiera durante todos los experimentos de una falla. Después de extensivas pruebas, no nos fue posible aislar algún criterio de caracterización usando los sensores de voltaje y corriente por separado. Sin embargo, se logró identificar un patrón de comportamiento de la falla al analizar la carga que representaba el motor a su fuente de alimentación. Esta la definimos como

$$R = \frac{V}{I} \quad (5)$$

donde  $V$  es el voltaje e  $I$  es la corriente, obtenidos por sus respectivos sensores. Como ejemplo de la caracterización de las fallas usando este concepto de carga se muestra la Fig. 5 en la cual se muestran las comparaciones realizadas entre el comportamiento normal de la carga calculada del motor y el comportamiento con cada una de las fallas a detectar. Estos experimentos se realizaron con las características de tensión, traslape y desalineamiento definidas en la sección II con el objetivo de modificarlas durante la etapa de detección que se presenta en la siguiente sección.

Se aprecia que existe una pequeña diferencia entre la carga calculada en las 4 fallas con respecto a la misma variable en estado normal. Para este caso de pruebas, las líneas de tendencia que más se alejan de la normalidad son el caso donde la banda se encontraba desalineada (F1) y cuando la banda se encontraba friccionando con el soporte del rodillo (F2). Cabe destacar que una etapa de acondicionamiento digital utilizada consistió en un filtro digital que descartó datos espurios en las mediciones. Adicionalmente, se obtuvieron la media, la desviación estándar y el error porcentual del comportamiento de la carga durante las fallas respecto al comportamiento sin falla, cuyos resultados se muestran en la Tabla I.

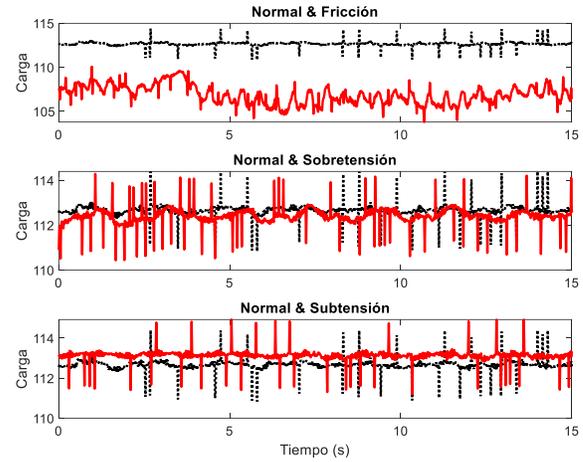


Fig. 5. Caracterización de las fallas mediante el cálculo de la carga del sistema. En todas las gráficas, la línea punteada corresponde al comportamiento normal y la línea continua a la falla correspondiente.

TABLA I  
ÍNDICES ESTADÍSTICOS DE LA CARGA

Estado	Promedio	Desviación Estándar
NF. Normal	112,2766	0,3535802
F1. Desalineada	112,3171	0,4283434
F2. Fricción Externa	112,1895	0,3723666
F3. Sobretensión	112,3859	0,3523991
F4. Subtensión	112,8661	0,2666091

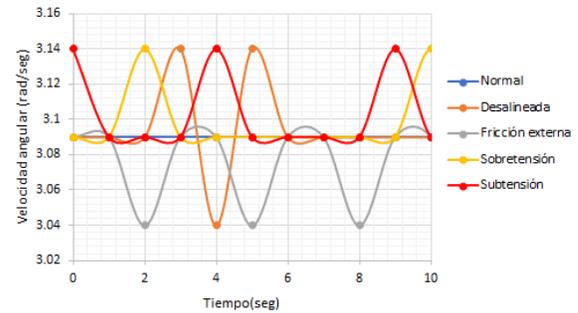


Fig. 6. Gráfica de la velocidad angular respecto al tiempo durante los diferentes experimentos de caracterización.

Por otro lado, los resultados que se obtuvieron para la velocidad angular obtenida por el encoder son mostradas en la Fig. 6. Debido a que la dinámica de la velocidad angular es más lenta que la de la corriente, los experimentos se realizaron por 10 segundos, pero siguiendo la misma metodología establecida para el sensado de corriente. Se puede apreciar que durante el comportamiento **Normal** la velocidad se mantiene durante todo el tiempo en 3,09 rad/s. Luego, el comportamiento obtenido en las fallas **Desalineada**, **Sobretensión** y **Subtensión** es caracterizado por pequeños cambios en la velocidad. Mientras tanto, durante el comportamiento de **Fricción Externa** se puede notar un cambio considerable, el cual oscila entre los 3,09 rad/s y los 3,04 rad/s. La Tabla II muestra el promedio y la desviación estándar de cada una de las pruebas. En ella se puede apreciar que la mayor diferenciación se puede obtener de la desviación estándar entre el estado **Normal** y la falla **Fricción Externa**.

TABLA II  
ÍNDICES ESTADÍSTICOS DE LA VELOCIDAD ANGULAR

Estado	Promedio (rad/s)	Desviación Estándar (rad/s)
NF. Normal	3,09	0
F1. Desalineada	3,095	0,0095
F2. Fricción Externa	3,0725	0,011375
F3. Sobretensión	3,0975	0,006375
F4. Subtensión	3,1025	0,009375

Finalmente, es necesario destacar que los experimentos se realizaron sin carga a transportar por la banda. Esto se decidió debido a que se realizaron los mismos experimentos con una carga máxima de 60 kg, cuyo valor es mucho mayor al valor de carga nominal de bandas de tamaño similar al utilizado en este trabajo, y se generaron patrones muy similares a los obtenidos sin carga.

### B. Diagnóstico de las Fallas

Con estos datos se determinaron los márgenes de los índices estadísticos que se emplearon para la detección. Por ejemplo, la desviación estándar del estado normal es de 0,3535 por lo que las variaciones de carga que estén dentro de una vecindad de este valor no pueden ser detectados por el sistema ya que son consideradas como ruido de la señal.

Por lo tanto, los valores obtenidos para la desviación estándar y el promedio de la carga calculada en cada una de las fallas permitieron establecer un algoritmo para su detección. La excepción la representó la falla de **Desalineada**, ya que los cálculos desarrollados no permitieron detectarla con fiabilidad.

El algoritmo obtenido se muestra en el diagrama de la Fig. 7 donde los valores F2, F3 y F4 se definieron usando los valores del promedio y la desviación estándar presentadas en la Tabla I, y la variable **Error** se definió como la diferencia entre el comportamiento medido y el comportamiento normal o sin falla del sistema. Por otro lado, en las extensivas pruebas realizadas para este proyecto, no se detectó ningún comportamiento diferenciador en la señal de velocidad angular obtenidas por el sensor, por lo que se descartó su uso para caracterizar las fallas.

Finalmente, se realizaron diversos experimentos para validar el funcionamiento del sistema embebido con el algoritmo implementado.

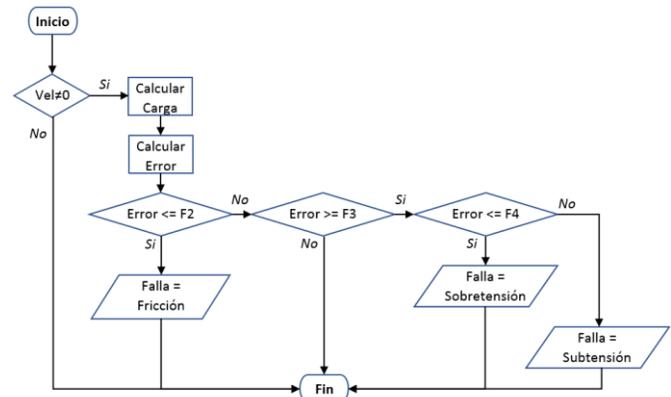


Fig. 7. Diagrama de flujo del esquema de detección propuesto.

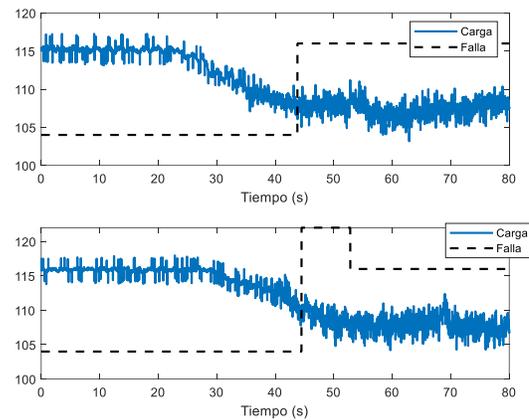


Fig. 8. Detección individual de falla por Fricción (línea discontinua) contra la carga calculada (línea continua). Se muestran experimentos con 0,8 cm (superior) y 1 cm (inferior) de la banda montada sobre piezas A y B.

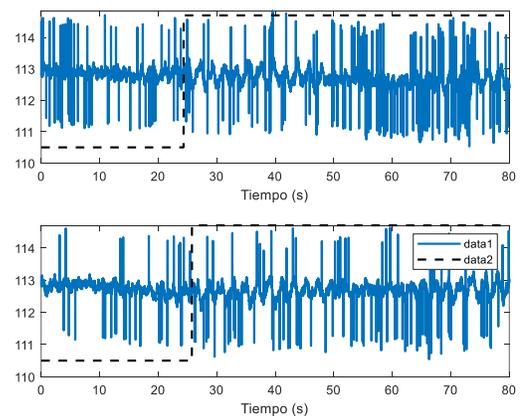


Fig. 9. Detección individual de falla por Sobretensión (línea discontinua) contra la carga calculada (línea continua). Se muestran experimentos con 4,5 cm (superior) y 4,7 cm (inferior) de tensión.

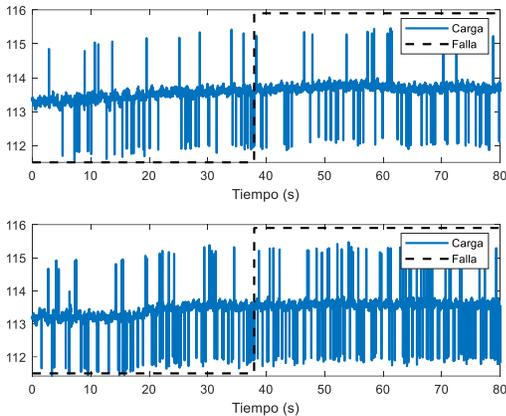


Fig. 10. Detección individual de falla por Subtensión (línea discontinua) contra la carga calculada (línea continua). Se muestran experimentos con 3,3 cm (superior) y 3,5 cm (inferior) de tensión.

Los primeros experimentos se enfocaron en la detección individual de las fallas. Para este fin, se realizaron dos experimentos por falla con características diferentes a las que se utilizaron durante la etapa de caracterización mostradas en la Fig. 5. Los resultados de detección para las fallas de **Fricción**, **Sobretensión** y **Subtensión** se muestran en las Fig. 8, 9 y 10, respectivamente.

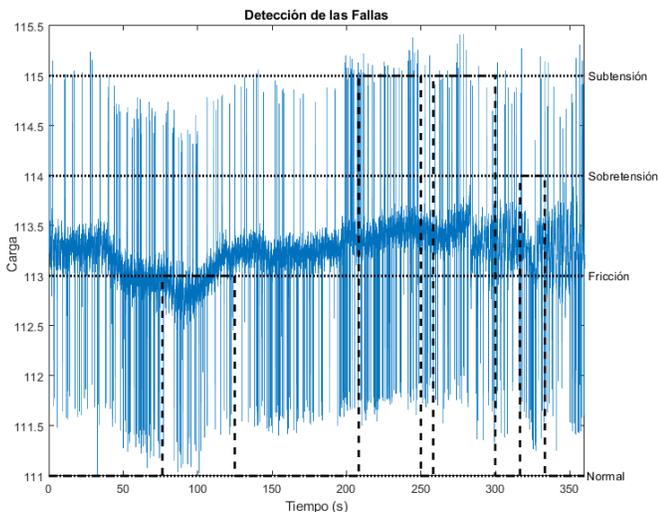


Fig. 11. Detección de las fallas utilizando la caracterización propuesta. Se presentan las gráficas de la carga (línea continua) y falla detectada (línea discontinua) respecto al tiempo.

La falla se generó a los 45 s después de iniciar el experimento en el caso de la **Fricción**, a los 25 s en el caso de la **Sobretensión**, y a los 38 s para la **Subtensión**.

En dichas figuras, la línea continua representa la carga calculada con las mediciones del experimento en tiempo real, y la línea discontinua representa la señal de detección de la falla correspondiente. El nivel bajo de esta señal significa que se detecta un comportamiento normal, y el nivel alto corresponde al comportamiento con falla. Se aprecia que la detección es correcta para las 3 fallas cuando estas se reproducen en experimentos separados.

Por otro lado, se realizó un último experimento donde se generaron las 3 fallas en diferentes instantes. Los resultados de

la detección se muestran en la Fig. 11 donde la línea continua representa la carga calculada en tiempo real durante el experimento y la línea discontinua representa la falla detectada. En la parte derecha de la gráfica se puede apreciar la escala de valores para la carga calculada y en la parte izquierda de la figura la escala de valores para las fallas detectadas. Las fallas se reprodujeron usando los espárragos de ajuste de tensión y objetos externos a la banda transportadora. Estas se generaron durante los siguientes periodos: **Fricción Externa** entre 75 y 125 s, **Desalineada** entre 150 y 200 s, **Subtensión** entre 200 y 300 s, y **Sobretensión** entre 315 y 330 s. Durante el resto del período del experimento se generó un estado **Normal**. En esta figura, también se aprecia una detección satisfactoria de las fallas.

## V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se presentó la implementación de un sistema embebido para la detección de fallas en una banda transportadora actuada por motores de inducción utilizando sensores de corriente, voltaje y encoder.

Las fallas más comunes en la banda transportadora fueron analizadas y caracterizadas de acuerdo con el comportamiento de la señal de carga del motor que mueve la banda. Esta carga se definió como una relación entre el voltaje y la corriente medidas en la línea de alimentación del motor de inducción. Con el sistema aquí descrito se logró realizar la detección de 3 de las 4 fallas analizadas. Esta se realizó mediante un algoritmo basado en índices estadísticos del comportamiento de las variables de voltaje y corriente del motor durante las fallas. De esto se puede concluir que detectar fallas o comportamientos en específico de un transportador es posible analizando las señales de corriente y voltaje que alimenta al motor, y que un sistema como el que se describe en este documento puede funcionar como un primer prototipo para un sistema de detección más preciso. A pesar de que también se adquirió la velocidad y aceleración del eje del motor, no fue posible caracterizar fallas analizando estas señales. Los autores consideramos que es debido a la baja velocidad del eje de salida del motorreductor de la banda que se utilizó en este trabajo. Pero creemos que para bandas de mayor velocidad puede ser de gran utilidad.

Cabe notar que los resultados obtenidos, aunque no son concluyentes, representan una etapa temprana de la problemática abordada. Por otro lado, las subsecuentes etapas de este proyecto de investigación consistirán en mejorar el algoritmo de detección usando criterios más complejos basados en inteligencia artificial, explorar el efecto de la carga de la banda en las variables monitoreadas, e incluir diferentes tipos de sensores.

## APÉNDICE: DESCRIPCIÓN DE PLATAFORMA EXPERIMENTAL

Los experimentos del proyecto se realizaron en el sistema mostrado en la Fig. 3. Este se compone por una banda transportadora accionada por un motor eléctrico de CA monofásico, una interfaz para las señales eléctricas en toda la plataforma, un acoplamiento mecánico para fijar el encoder y el CDD en su gabinete.

Las dimensiones del sistema completo son 90,8 cm de altura, 80,65 cm de largo y 30,48 cm de ancho. La base de la estructura

está compuesta por perfiles tubulares cuadrangulares rectangulares de 2,54 cm de ancho y 0,635 cm de grueso. La plataforma superior del transportador está conformada por una lámina de aluminio de 80,65 cm de largo, 30,48 cm de ancho y 0,06 cm de grosor. Esta lámina se dobla en los extremos para abrazar la base de la estructura. En los extremos del largo de la base estructural se atornilla un rodillo en cada extremo, en paralelo a los bordes, con espárragos de 15,24 cm de largo y 0,635 cm de diámetro. El rodillo motriz, por un lado, se adhiere a la base estructural con un espárrago, y por el otro se acopla al eje de salida del motorreductor con dos opresores. Al mismo tiempo, el rodillo terminal se adhiere por sus dos extremos con espárragos. Todos los espárragos cuentan con 2 tuercas cada uno, que sirven para fijarlos a la base, y ajustar la tensión de la banda. La banda transportadora es de 2 metros de largo de junta a junta y 11,5 cm de ancho, está hecha de PVC blanco de grado alimenticio y se monta al resto del transportador abrazando los dos rodillos.

El acoplamiento mecánico para fijar el encoder se compone de una solera de aluminio doblada en forma de L. El extremo opuesto al doblez de la parte larga de la solera se adhiere a la placa que sostiene al motor con dos tornillos. La parte corta de la solera tiene un barreno en el centro por el que entra el eje del encoder, quedando así éste en dirección al motor y el cuerpo del motor hacia afuera. El eje del encoder se acopla al eje del motor por medio de un acople flexible de acero inoxidable y otro acople de aluminio que va directo al eje del motor. Ambos acoples se adhieren a sus respectivos ejes por medio de opresores. El gabinete del CDD se adhiere a la estructura base del transportador por medio de 2 segmentos de velcro.

## REFERENCIAS

- [1] G. Lodewijks, "Strategies for Automated Maintenance of Belt Conveyor Systems", *Bulk Solids Handling*, vol. 24, no. 1, pp. 16-22, 2004.
- [2] Y. Pang and G. Lodewijks, "A Novel Embedded Conductive Detection System for Intelligent Conveyor Belt Monitoring", *2006 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics*, Shanghai, pp. 803-808, 2006.
- [3] Y. Yang, C. Miao, X. Li, and X. Mei, "On-line conveyor belts inspection based on machine vision", *Optik*, vol. 125, no. 19, pp. 5803-5807, 2014.
- [4] T. Nicolay, A. Treib and A. Blum, "RF identification in the use of belt rip detection [mining product belt haulage]", *2004 IEEE SENSORS*, Vienna, pp. 333-336, 2004.
- [5] P. Kruczek, J. Sokołowski, J. Obuchowski, M. Sawicki, A. Wylomańska, and R. Zimroz, "Fault Detection in Belt Conveyor Drive Unit via Multiple Source Data", In: Chaari F., Leskow J., Napolitano A., Zimroz R., Wylomanska A. (eds) *Cyclostationarity: Theory and Methods III. Applied Condition Monitoring*, vol 6. Springer, Cham, 2017.
- [6] J. Phad, K. Nagare, S. Kalokhe, A. Khandare, and D. Thorat, "Conveyor Belt Fault Detection Using IOT", *International Journal for Research Trends and Innovation*, vol. 4, no. 3, pp. 63-65, 2019.
- [7] L. Hou and N. Bergmann, "Novel Industrial Wireless Sensor Networks for Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 61, no. 10, pp. 2787-2798, 2012.
- [8] K. Kim and A. Parlos, "Induction motor fault diagnosis based on neuropredictors and wavelet signal processing", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 7, no. 2, pp. 201-219, 2002.
- [9] J. Voldán, "Use encoder speed sensors for the calculation of torque moment", *13th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, High Tatras, Slovakia, pp. 768-771, 2012.
- [10] R. Cipin, M. Mach, M. Toman and J. Knobloch, "Measurement and evaluation of DC motor starting torque," *2017 IEEE International*

*Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Milan, 2017, pp. 1-5.

- [11] Y. Yuan, W. Meng, and X. Sun, "Research of Fault Diagnosis of Belt Conveyor Based on Fuzzy Neural Network", *The Open Mechanical Engineering Journal*, vol. 8, pp. 916-921, 2014.
- [12] W. Li, Z. Wang, Z. Zhu, G. Zhou, and G. Chen, "Design of Online Monitoring and Fault Diagnosis System for Belt Conveyors Based on Wavelet Packet Decomposition and Support Vector Machine", *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 2013, pp. 1-10, 2013.
- [13] L. Zhao, "Typical Failure Analysis and Processing of Belt Conveyor", *Procedia Engineering*, vol. 26, pp. 942-946, 2011.
- [14] R. Zimroz and R. Król, "Failure analysis of belt conveyor systems for condition monitoring purposes", *Mining Science*, vol. 128, pp. 255-270, 2009.
- [15] <https://www.autosar.org/>



**Francisco Arriaga Méndez** Ingeniero Electrónico (2016) en CETI Plantel Colomos y Especialidad en Sistemas Embebidos (2019) en Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente. Labora en Sistemas y Controles Mined desde 2016 como Ingeniero Junior en Desarrollo de Firmware.



**Omar Felipe Mendiola Meza** Ingeniero Mecatrónico (2015) en CETI Plantel Colomos y Especialidad en Sistemas Embebidos (2019) en Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente. Labora en Sistemas y Controles Mined desde 2014 como Ingeniero Senior en Desarrollo de Firmware.



**Eliseo Vargas Mascorro** Ingeniero en Mecatrónica (2015) del Centro de Enseñanza Técnica Industrial (CETI) Plantel Colomos. Especialista en Sistemas Embebidos (2019) en ITESO. Labora en Continental Automotive, Guadalajara como Ingeniero de Software Embebido desde el 2015.



**Luis Enrique González Jiménez** Maestro (2007) y Doctor (2011) en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, unidad Guadalajara. Desde el 2012, labora en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente como profesor investigador en el Departamento de Electrónica, Sistemas e Informática. Sus líneas de investigación incluyen el control no lineal robusto, los sistemas robóticos guiados por visión y los sistemas embebidos de control.