

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente

Reconocimiento de validez oficial de estudios de nivel superior según acuerdo secretarial 15018, publicado en el Diario Oficial de la Federación del 29 de noviembre de 1976.

Departamento de Electrónica, Sistemas e Informática
Especialidad en Sistemas Embebidos



EMBEDDED DIAGNOSTIC OF CONVEYOR BELTS ACTUATED BY INDUCTION MOTORS

TRABAJO RECEPCIONAL que para obtener el **GRADO** de
ESPECIALISTA EN SISTEMAS EMBEBIDOS

Presentan:

Francisco Javier Arriaga Méndez, Omar Felipe Mendiola Meza,

Eliseo Vargas Mascorro

Director: Luis Enrique González Jiménez

Tlaquepaque, Jalisco. 18 de julio de 2019.

Agradecimientos

La redacción del presente trabajo de investigación fue realizado bajo la supervisión de la Dra. Michele Brennan, a quien nos gustaría agradecer por su tiempo y dedicación.

Al Dr. Luis Rizo por facilitarnos eficientemente los recursos necesarios para la realización del prototipo, siempre estuvo atento en lo que se nos presentó en el camino para la redacción de este documento de obtención de grado.

A nuestros profesores Luis Garabito, Francisco Martínez Chávez, Héctor Rivas, Sergio Santana y Fernanda Ortega, quienes con sus conocimientos aportaron al desarrollo del prototipo.

A las empresas Continental Automotive, Sistemas y Controles Mined y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología quienes confiaron en nosotros y nos apoyaron con becas para tomar este posgrado.

A nuestros padres quienes siempre nos han apoyado, y han estado con nosotros a lo largo de toda nuestra carrera.

A nuestro asesor Luis Enrique González Jiménez, quien siempre nos apoyó y nos aconsejó durante la etapa de desarrollo del proyecto.

A Dios por brindarnos la vida, también porque nos bendice con poder continuar con nuestra formación profesional.

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 main features of the solution include the embedded system implementation, the use of a simple and effective algorithm, and a low cost instrumentation. The system retrieves information from a current sensor located in the voltage line of the motor. A series of experiments with different states of the conveyor belt, were performed. Using this data, an algorithm based on statistical indices that detects irregular behaviors, was designed and developed. This proposal is the starting point for a future solution that detects irregularities in the conveyor belt behavior more accurately considering other variables of the system. Also, voltage, speed, and acceleration signals from the induction motor were acquired to characterize the behavior of the conveyor belt. Unfortunately, speed and acceleration signals were not accurate enough to detect any relevant change, this could be due to the low operation speed of the conveyor belt. Perhaps, in a faster conveyor this data can be helpful. Voltage analysis will be considered in future work for environments where supply voltage is not constant.

1. 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, sub-tensión, 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 transponder 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 ésta 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 acelerómetros y sensores 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 embebido conectado al motor, y sólo los resultados son enviados inalámbricamente con un error menor al 2% [7]. El inconveniente de esta propuesta es que en ambientes industriales es común que exista mucha interferencia electromagnética lo que provoca pérdida de datos y empobrece el desempeño del sistema. 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 caso, los datos obtenidos por el encoder se compararon con los obtenidos en una simulación. Los resultados fueron parecidos a pesar de que en este caso se utilizó un encoder de un solo canal y la solución que se presenta en este documento utiliza dos canales. 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.

2. Caracterización 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. 2-1.

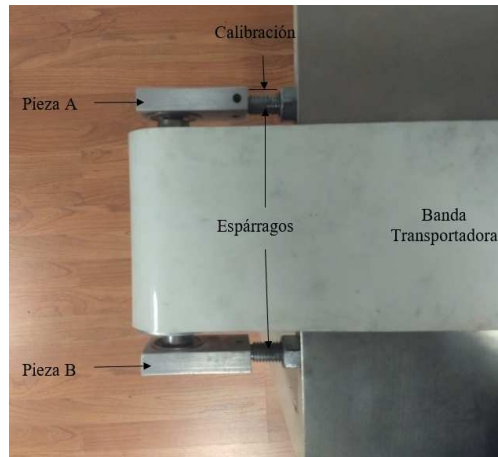


Figura 2-1 Sistema de ajuste de tensión de la banda transportadora.

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). Cabe destacar que los experimentos se realizaron sin peso en la banda, sin embargo, los experimentos mostraron que, para una carga similar, los patrones generados por las fallas son iguales.

De estos experimentos, se definieron los siguientes estados a detectar:

- NF. Estado normal: La banda permanece alineada, sin fricción externa y con una tensión de 2.75 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 es de 2.75 cm.
- 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 es de 2.75 cm.
- F3. Sobretensión: La banda permanece alineada, sin fricción y con una tensión de 3.3 cm.
- F4. Sub-tensión: La banda permanece alineada, sin fricción y con una tensión de 2.2 cm.

El sensor que mejor reflejó un cambio de comportamiento al reproducirse las fallas fue de corriente. Como ejemplo, se muestran los resultados de un experimento para cada falla en la Fig. 2-2. En la figura se presentan las mediciones de corriente eficaz o RMS (Root Mean Square) para todos los estados de operación definidos para la banda. Se aprecia que existe un pequeño margen

diferencial en la corriente detectada en las 4 fallas con respecto a la corriente en el 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). Los experimentos se capturaron por 2 segundos y se implementó una etapa de filtrado que descartó datos espurios y será explicada en la siguiente sección.

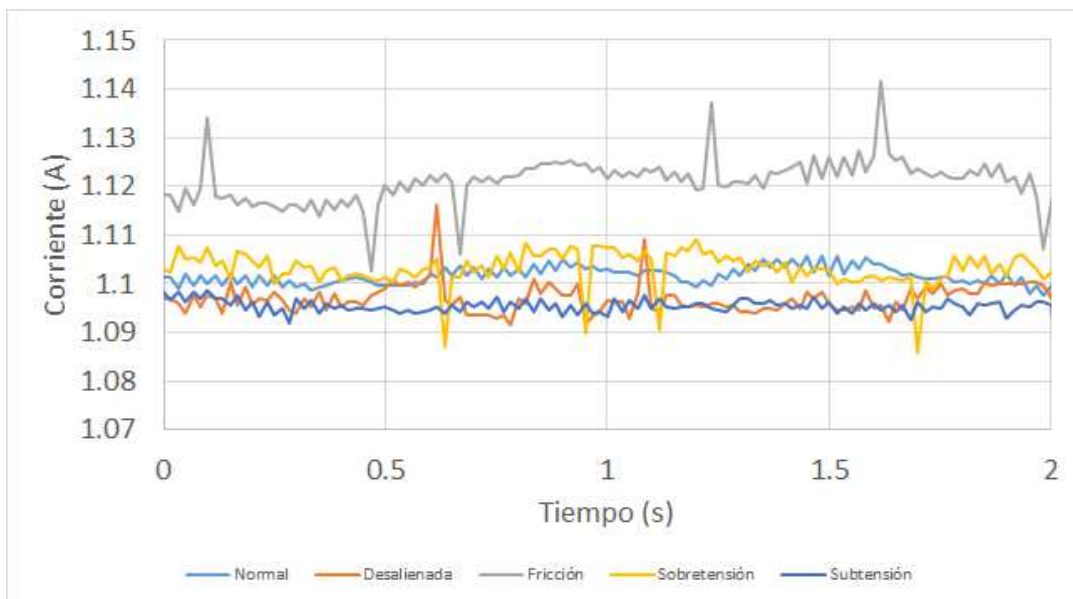


Figura 2-2. Caracterización de las fallas por corriente RMS.

Se obtuvieron la media, la desviación estándar y el error porcentual respecto al comportamiento sin falla, cuyos resultados se muestran en la Tabla I.

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 0.0883% por lo que las variaciones de corriente que estén dentro de este porcentaje no pueden ser detectados por el sistema ya que son consideradas como ruido de la señal. Sin embargo, en las fallas propuestas el mínimo error con respecto de la media normal es de 0.4819%, el cual es un valor de casi 5 veces el valor de error que catalogamos como ruido. Entonces, si la corriente se dispara por más de 2 segundos arriba de 0.4819%, el fenómeno se cataloga como una falla. Los demás valores se utilizan para determinar que tipo de falla se está detectando.

Por otro lado, en las extensivas pruebas realizadas para este proyecto, no se detectó ningún comportamiento diferenciador en la señal de voltaje obtenida por el sensor, por lo que se descartó su uso para caracterizar las fallas.

TABLA I
CLASIFICACIÓN DE LAS FALLAS

Estado	Promedio (A)	Desviación Estándar (mA)	Error (%)
NF. Normal	1.106225	0.9767 (0.0883 %)	--
F1. Desalineada	1.113313	0.61503 (0.0552 %)	-0.6407
F2. Fricción Externa	1.086929	0.29902 (0.0275 %)	1.7443
F3. Sobretensión	1.099495	1.15826 (0.1053 %)	0.6084
F4. Subtensión	1.100895	0.14948 (0.0136 %)	0.4819

3. SOLUCIÓN PROPUESTA

3.1. 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. 3-1 se muestra un diagrama de límites con los módulos que conforman el sistema y sus interfaces. El área naranja indica los elementos que están dentro del gabinete del prototipo y el resto de los módulos que son parte del sistema están contenidos en el área azul.

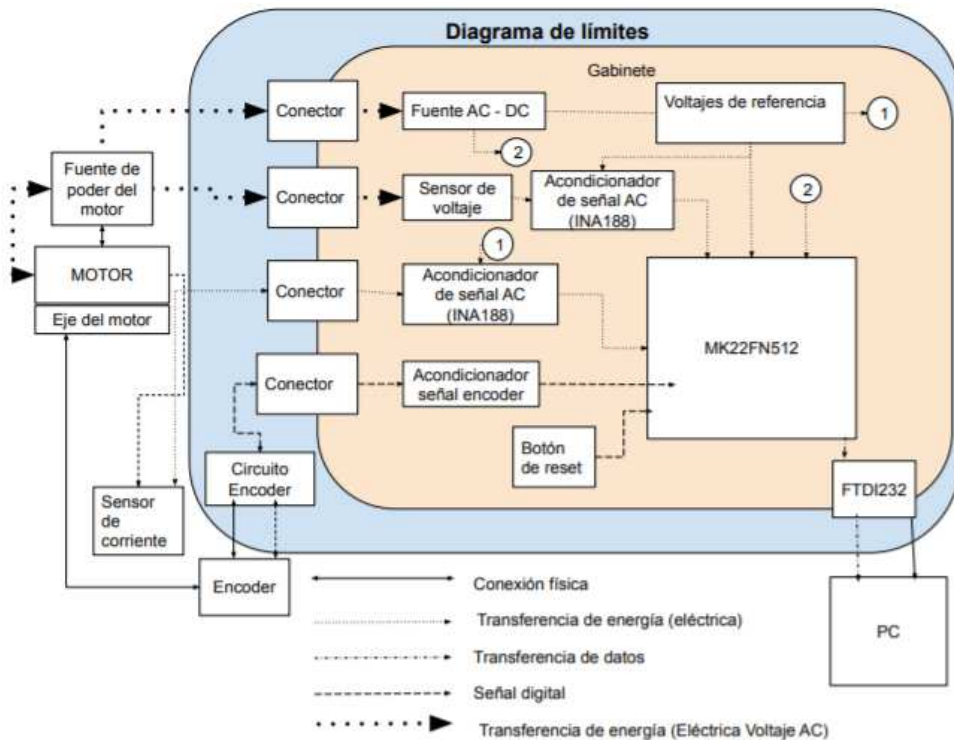


Figura 3-1. Diagrama de límites del sistema de diagnóstico propuesto.

3.2. Plataforma experimental

Los experimentos del proyecto se realizaron en el sistema mostrado en la Fig. 3-2. 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 35.75 pulgadas de altura, 31.75 pulgadas de largo y 12 pulgadas de ancho. La base de la estructura está compuesta por perfiles tubulares cuadrangulares rectangulares de 1 pulgada de ancho y 0.25 pulgadas de grueso. La plataforma superior del transportador está conformada por una lámina de aluminio de 31.75 pulgadas de largo, 12 pulgadas de ancho y 0.025 pulgadas 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 6 pulgadas de largo y 0.25

pulgadas 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.

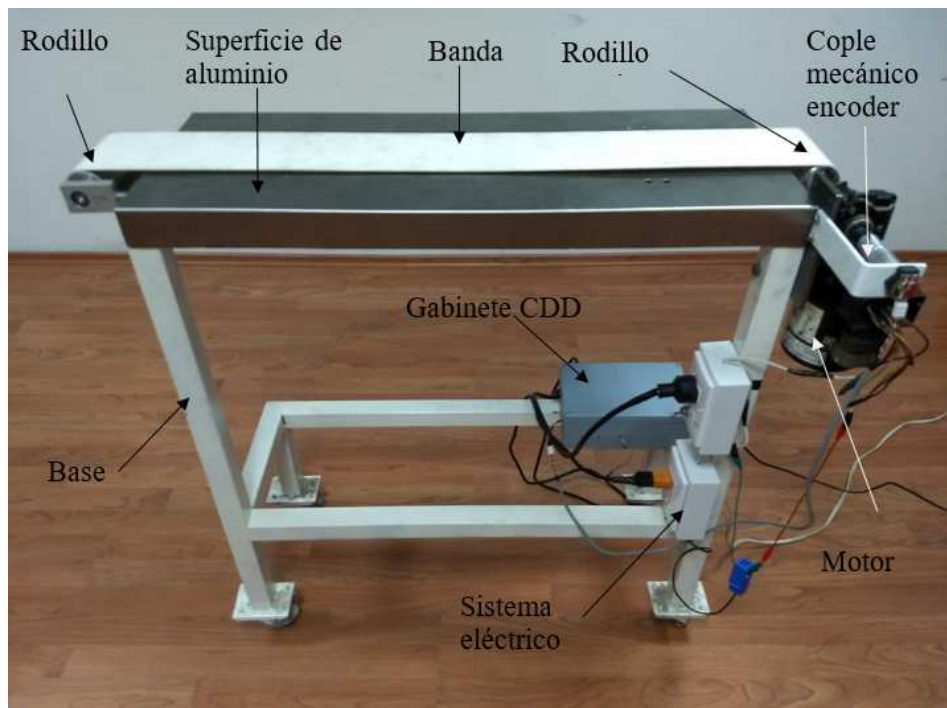


Figura 3-2. Plataforma experimental.

El acoplamiento mecánico para fijar el encoder se compone de una solera de aluminio doblada en forma de L. El extremo opuesto al doblado 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.

3.3. Hardware Electrónico

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 (Analog to Digital Converter) del microcontrolador. 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°C a 70°C y frecuencia de trabajo de 50-1K Hz. 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 incremental, óptico con serie 600-128-C24. Tiene 2 canales de salida en cuadratura desfasadas 45° , 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 5V para la alimentación, su voltaje de entrada son 12 V que provienen de la fuente AC-DC, se agregaron 2 leds con una resistencia pull-up a 5V conectado a la señal A y B respectivamente. Esto funciona como indicador visual de un 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 ADCs de 16-

bit y dos comparadores analógicos con DACs de 6-bit. Como interfaces, cuenta con 2 módulos SPI, uno de I2S y 3 de UART.

3.4. Firmware

La solución de firmware propuesta está estructurada en un modelo de capas basado en el estándar de arquitectura de software de AUTOSAR [15]. Este consta de las siguientes 4 capas, el diagrama de estas capas y sus librerías se muestran en la Fig. 3-3.

3.4.1 Capa MCAL (Micro-Controller Abstraction Layer) es la capa más baja.

- Flex timer module (FTM): se usa para la generación de una base de tiempo de 500 μ 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): Librería para controlar la emisión y transmisión de bytes, por un puerto del microcontrolador.
- General-Purpose Input/Output (GPIO): Sirve para configurar el propósito de los pines del microcontrolador, ponerlos como entrada o salida y conectarlos a módulos internos del integrado. Así como para poder establecer niveles lógicos de voltaje 3.3 V - 0 V.
- Analog-to-Digital Converter (ADC): Controlador que se encarga de la configuración, y coordinación de las lecturas de los diferentes canales de ADC, con los 2 módulos que tiene incluidos este microcontrolador.
- Input Capture Unit (ICU): Librería que usan las interfaces de GPIO y FTM para poder detectar cambios de flanco en señales digitales y con esto generar interrupciones al microcontrolador.
- WatchDog (WDog): Librería que 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.

3.4.2 Capa EcuAL (Electronic Control Unit Abstraction Layer)

- Control serial: Se encarga de la transmisión y recepción de tramas de comandos AT.
- LED (del inglés Light Emission Diode): Controla el encendido o apagado de LEDs, además de poder programar secuencias de prendido y apagado definiendo el tiempo de estos.
- Analizador de señales AC: Obtiene las muestras de los módulos AC y los convierte a un valor de la magnitud correspondiente (voltaje o corriente), guarda los datos en buffer, identifica los cruces por cero, hace el cálculo del valor eficaz de señal, y la frecuencia de la señal.
- Encoder VA: Se encarga de decodificar la señal de cuadratura del encoder incremental, interpreta la señal A y B del encoder y con una base de tiempo obtiene los pulsos por segundo y con esto calcula la velocidad angular y la aceleración angular del eje del motor.

3.4.3 Capa de Servicios

- Schm: Se encarga del agendamiento de tareas, así como la ejecución de estas, considerando la prioridad asignada. También se encarga del agendamiento de tareas con una base de tiempo periódica, cuidando distribuir el procesamiento del CPU de manera uniforme para cada tarea.
- AT Comm: Se encarga de validar los comandos que son admitidos por la librería de control serial, contra su banco de comandos aceptados, y ejecuta una tarea en específico, también provee las interfaces para poder enviar datos por comunicación serial.

3.4.4 Capa de Sistema

Se encarga de analizar la información recolectada por las librerías de Encoder y Analizador de señales y ejecutar el algoritmo de detección de fallas.

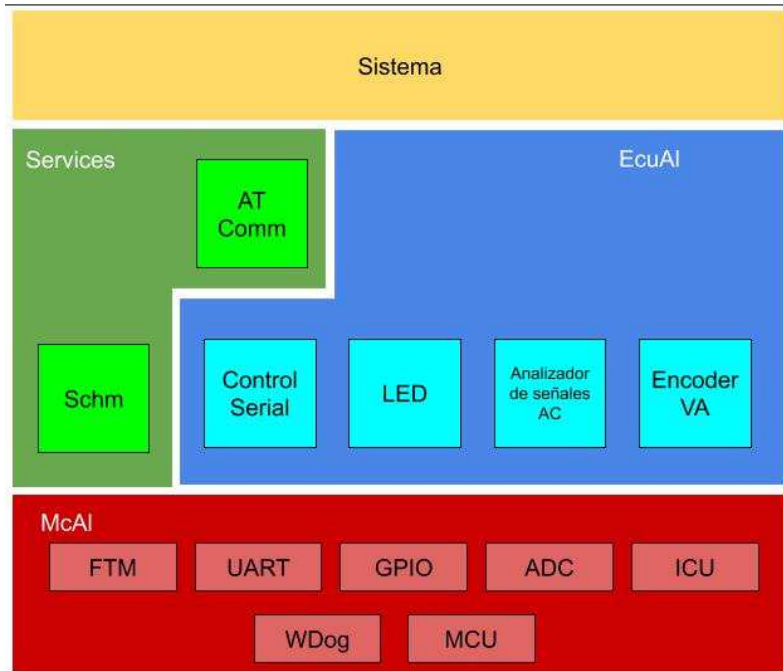


Figura 3-3. Arquitectura del firmware de la solución propuesta.

3.5. Cálculo y procesamiento de las señales de CA

La implementación para la obtención de datos de voltaje y corriente es la misma, con excepción de la unidad y 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. A partir de aquí “señal CA” será utilizada para hacer referencia a ambas señales (voltaje y corriente). El módulo de ADC del microcontrolador, utilizado para muestrear la señal CA, está configurado con un periodo 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 CA y lo guarda en un registro o buffer circular, para después ejecutar un algoritmo que detecta cruces por 0 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 como 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, alrededor de cada 10 ciclos hay una muestra extra lo que provoca ruido en el cálculo RMS y de frecuencia (señal a 60 hz). 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 ω en grados por segundo resulta como

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

Donde Δ_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 de la siguiente manera

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

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Resultados obtenidos

Para los casos de pruebas, en primer lugar, se estableció el sistema en el estado normal, se obtuvieron las muestras de RMS por 6 seg, y después se activó el algoritmo de detección de fallas por corriente. En ese momento se desajusto la banda para recrear cada una de las fallas, cuando el algoritmo detecta una falla entonces se enviaba 6 segundos de muestras donde viene el momento en que se generó la falla. En las gráficas Fig.4-1, Fig. 4-2, Fig. 4-3 se observan las muestras de corriente RMS del sistema cuando detecto la falla contra el estado normal de la banda justo antes de la falla. El único caso que no pudo ser detectado fue la falla de desalineamiento. En las gráficas se pueden apreciar algunos picos, estos son debido a que el filtro para eliminar las muestras extras (mencionado en la sección Obtención y análisis de señales AC mediante firmware) no es 100% efectivo.

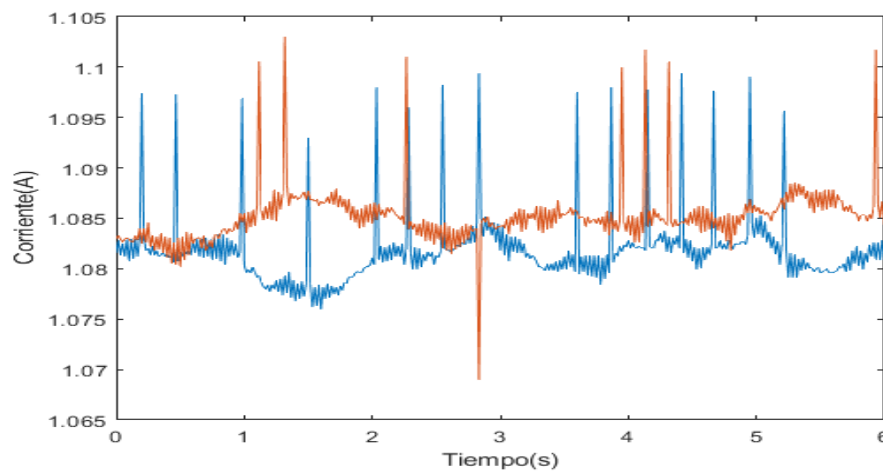


Figura 4-1. Gráfica de la corriente RMS estado normal vs falla de fricción externa.

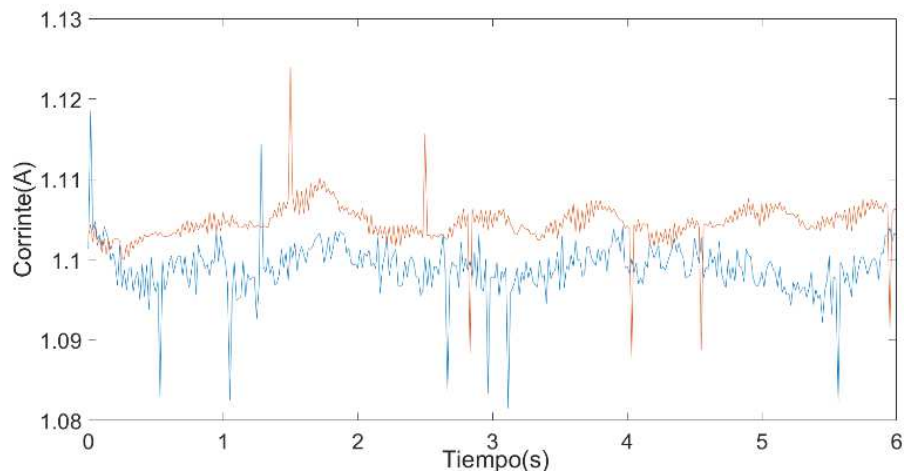


Figura 4-2. Gráfica corriente RMS estado normal vs Corriente RMS con falla de sobretensión.

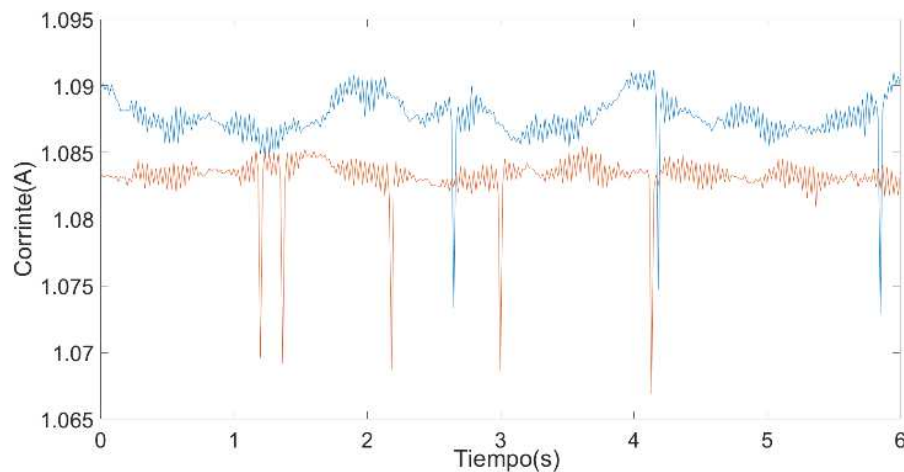


Figura 4-3. Gráfica corriente RMS estado normal vs Corriente RMS con falla de subtensión.

Los resultados que se obtuvieron para la velocidad angular reflejada en el encoder, se obtuvieron las muestras mostradas en la Fig.4-4, donde se observa los valores obtenidos durante 20 segundos. Para la prueba de “Normal” se puede apreciar que la velocidad se mantiene durante todo el tiempo en 3.06 rad/seg. Durante la prueba de “Desalineada” se tuvieron pequeños cambios en la velocidad al igual que en las pruebas de “Sobretensión” y “Subtensión”. Mientras tanto en la prueba de “Fricción externa” se puede notar un cambio considerable en la velocidad ya que está oscilando entre los 3.09 rad/seg y los 3.04 rad/seg.

En la Tabla II se puede apreciar el promedio y la desviación estándar de cada una de las pruebas donde se puede examinar que la mayor desviación se tiene en la prueba de “Fricción externa”. Los promedios de las muestras no tienen una gran diferencia.

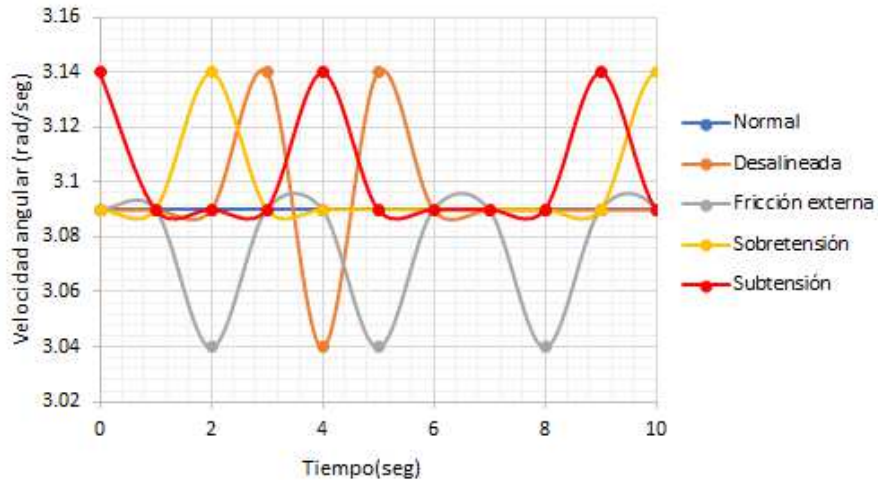


Figura 4-4. Gráfica velocidad angular con respecto del tiempo.

TABLA II
PROMEDIO Y DESVIACIÓN DE LA VELOCIDAD ANGULAR

Estado	Promedio (A)	Desviación Estándar (mA)
NF. Normal	3.09	3.54987e-29
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

TABLA III
PROMEDIO Y DESVIACIÓN DE LA ACELERACIÓN ANGULAR

Estado	Promedio (A)	Desviación Estándar (mA)
NF. Normal	0	0
F1. Desalineada	0.002455	0.03121999
F2. Fricción Externa	0	0.03375134
F3. Sobretensión	0.002455	0.01193351
F4. Subtensión	0	0.0241081

Al revisar los resultados de la aceleración angular mostradas en la Fig. 4-5, podemos apreciar que la prueba de “Desalineada” es la que presenta los cambios más drásticos en la aceleración, ya que los rangos van de 0.1 rad/seg² a -0.1rad/seg². Al revisar los resultados de la prueba de “Fricción externa” se aprecia un cierto patrón en la medición. El resto de las pruebas presentan cambios en su aceleración, pero se pueden tomar como normales ya que la velocidad angular no es constante.

En la Tabla III se muestran los cálculos del promedio y la desviación estándar de cada una de las pruebas, al igual que en Tabla II la mayor desviación fue en “Fricción externa”.

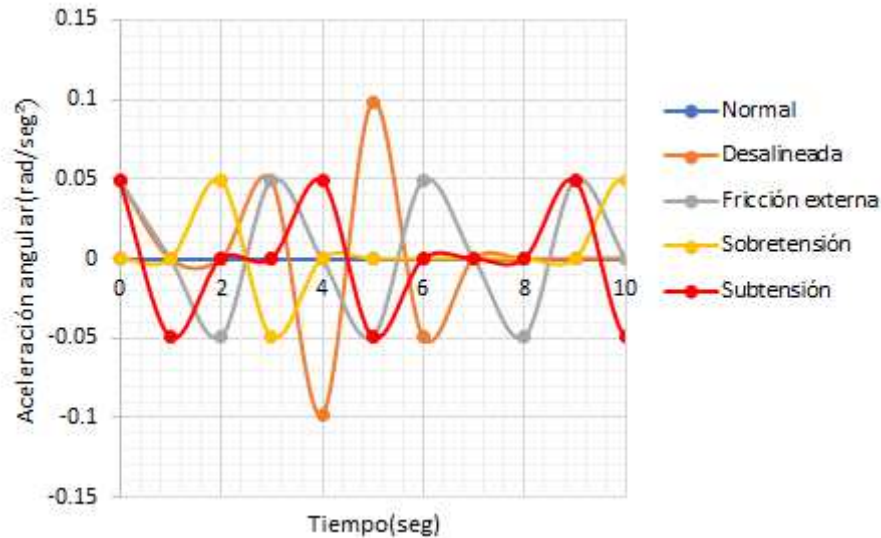


Figura 4-5. Gráfica aceleración angular con respecto del tiempo

4.2. Análisis de resultados

En la gráfica Fig.4-1 se puede apreciar que el valor RMS de la corriente con la falla de fricción externa es mayor que en estado normal, esto es esperado ya que, al presentarse un rozamiento externo en un lado de la banda, la fricción provoca que el par del motor aumente y en consecuencia la corriente. El algoritmo de detección de fallas detecta que el valor de esta diferencia sobrepasa el 0.4% de la señal en estado normal y dispara el comando de falla presente.

Al igual que el caso anterior en la Fig. 4-2 el valor RMS durante la falla de sobretensión es mayor que la corriente en estado normal, de esto se puede deducir que la sobretensión provoca que los rodillos giren con menos libertad aumentando el par en el motor y en consecuencia la corriente. Así, como en el caso anterior, el algoritmo para detectar fallas detecta una diferencia mayor al 0.4% y envía el comando de falla presente.

En la última prueba Fig. 4-3, la corriente durante la falla de subtensión es menor a la corriente en estado normal, esto es contrario al caso anterior y se puede inferir que es debido a que al haber menos tensión en la banda los rodillos giran con mayor libertad provocando que el motor

disminuya su par y por lo tanto su consumo de corriente. Al igual que en los casos anteriores, el algoritmo de detección de fallas detecta una diferencia mayor al 0.4% con respecto a la corriente en estado normal y levanta el comando de falla presente.

Como se mencionó anteriormente la falla de desalineamiento no se pudo detectar, esto es debido a que la diferencia, en la corriente en los dos estados, nunca superó el 0.4% del valor de la señal en estado normal.

5. Conclusiones y trabajo futuro

Diferentes fallas en una banda transportadora fueron analizadas y caracterizadas de acuerdo con el comportamiento de la señal de corriente del motor que mueve la banda. Con el sistema aquí descrito se lograron detectar 3 de las 4 fallas analizadas. La detección de las fallas se realizó mediante un método estadístico tomando sólo a la corriente como entrada. De esto se puede concluir que detectar fallas o comportamientos en específico de un transportador es posible analizando la señal de corriente 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 señal de voltaje, la velocidad y aceleración del eje del motor, no fue posible caracterizar fallas analizando estas señales. En la velocidad y aceleración no se notó un patrón específico por falla o algo que pudiera caracterizar el comportamiento del transportador. Tal vez esto es debido a la baja velocidad del eje de salida del motorreductor, probablemente el uso del encoder sea más preciso en un transportador que opere a una velocidad más alta.

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] A. development cooperation, "AUTOSAR". [En línea]. Disponible en: <https://www.autosar.org/>. [Consultado: 17-jul-2019].