

Sistema de visión para detección de fallas de calidad en la identificación de etiquetas en una línea de producción del giro automotriz

Vision system for the detection of quality failures in the identification of labels in an automotive production line

J. R. Hernández-Laguna ^{a,*}, J. A. Romero-Guerrero ^b, C. Reta ^c

^a Posgrado CIATEQ A. C. Circuito de la Industria Poniente Lote 11, Parque Industrial Exhacienda Doña Rosa, 52004 Lerma, Estado de México, México.

^b Departamento Manufactura Virtual y Lean y Cad Cae, CIATEQ A. C. Centro de Tecnología Avanzada, 42163 San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, México.

^c Departamento de Tecnologías de la Información, Electrónica y Control, CONAHCYT-CIATEQ A. C., 42163 San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, México.

Resumen

Este artículo presenta la implementación de un sistema de visión para la detección de fallas en la identificación de etiquetas en una línea de producción de motores eléctricos de confort para vehículos. Anteriormente, la línea de producción dependía completamente de la inspección visual realizada por un operador. La solución propuesta considera tanto los aspectos técnicos del sistema de visión como otros factores clave para asegurar la calidad del proceso, como: las políticas de aseguramiento de calidad de las normas automotrices vigentes en México (IATF 6949:2016 e ISO9000), la mejora continua, la estadística, la ergonomía y la estandarización de procesos. Los resultados demuestran el éxito de la implementación. El sistema demostró ser efectivo al identificar las fallas de manera precisa; se logró una reducción significativa en el número prioritario de riesgo en el análisis y modo de efectos de falla; y se logró una reducción en la estadística de fallas internas y con el cliente, de 2021 a 2022.

Palabras Clave: Sistema de visión, análisis y modo de efectos de falla, inspección de defectos, industria automotriz.

Abstract

This article presents the implementation of a vision system for the detection of label identification failures in a production line of comfort electric motors for vehicles. Previously, the production line was completely dependent on visual inspection by an operator. The proposed solution considers both the technical aspects of the vision system and other key factors to ensure the quality of the process, such as: the quality assurance policies of the automotive standards in force in Mexico (IATF 6949:2016 and ISO9000), continuous improvement, statistics, ergonomics and standardization of processes. The results demonstrate the success of the implementation. The system proved effective in accurately identifying failures; a significant reduction in the risk priority number was achieved in the failure effects analysis and mode; and a reduction in the statistics of internal failures and with the client was achieved, from 2021 to 2022.

Keywords: Vision system, analysis and failure effects mode, defect inspection, automotive industry.

1. Introducción

1.1. Antecedentes

El presente proyecto se llevó a cabo en la empresa de giro automotriz Robert Bosch, dentro de la planta Toluca, específicamente en el área de motores eléctricos, con uno de los productos estrella: motores levanta cristales. En esta área existen 3 líneas de producción, las cuales producen al día un

promedio de 12,000 piezas cada línea, con un tiempo ciclo de 5 segundos por pieza, lo que equivale a 720 piezas por hora.

La investigación se centró en examinar el proceso de inspección de las etiquetas individuales, las cuales están comprometidas con los clientes en el dibujo de oferta y tienen información clave para poder garantizar la trazabilidad del motor en caso de un defecto de calidad, como se presenta en la Figura 1.

La información impresa en cada etiqueta incluye la familia, el número de parte del cliente y el número de parte Bosch; la

*Autor para la correspondencia: rodrigohezlag@gmail.com

Correo electrónico: rodrigohezlag@gmail.com (José Rodrigo Hernández-Laguna), adan.romero@ciateq.mx (Jorge Adan Romero-Guerrero), carolina.reta@ciateq.mx (Carolina Reta).

fecha, línea y turno en la que se fabricó el motor; también, en algunos motores, se puede rastrear el software cargado en la electrónica, el cual define el modo de trabajo del motor. Además, se incluyen códigos matrix, leyendas informativas y otros datos relevantes para la identificación del producto.

Durante la inspección visual, el operador debe evaluar y decidir en 5 segundos si la información está impresa en la etiqueta y si es correcta. Además, por medio de una ayuda visual basada en el dibujo de oferta, el operador debe identificar la posición de ensamble de la etiqueta, la cual puede estar colocada de un lado de la coraza o del contrario, dependiendo si el motor es para el lado del pasajero o para el lado del conductor. También, debe verificar que la orientación de la información de la etiqueta sea de 0° o 180°. Para realizar este tipo de inspección, el operador debe de estar capacitado y conocer el producto.

A través de este proyecto, se mejorarán dos indicadores clave del proceso: fallas de calidad reportadas por el cliente y fallas de calidad internas. El interés en investigar la mejora del proceso de inspección visual se debe a la alta calificación de RPN (*Risk Priority Number*) con la que fue identificada la estación de inspección final; lo cual es consistente con uno de los principios básicos de la gestión de la calidad: la mejora continua (Plinta et al., 2021).

1.2. Sistema de gestión de la calidad

Las normas automotrices ISO9000 y IATF 16949 presentan un enfoque basado en el riesgo, lo que permite a las organizaciones identificar los factores que podrían desviar sus procesos y su sistema de gestión de la calidad de los resultados planificados. Estas normas destacan la implementación de controles preventivos para minimizar los impactos adversos y maximizar las oportunidades, y establecen estándares para especificar el uso de métodos de prueba de errores, dentro de un proceso documentado. Los detalles sobre el método utilizado deben especificarse y documentarse en el análisis de riesgos relacionados con el proceso. Además, las organizaciones deben determinar el uso apropiado de métodos estadísticos adecuados en la planificación avanzada de la calidad del producto (APQP), niveles de madurez de aseguramiento, análisis de modo y efectos de falla (AMEF) de diseño y el plan de control de producción (Mode, 2011).

La norma IATF 16949 también aborda la trazabilidad de los productos que al menos deben de estar identificados por lote de producción. Sin embargo, dependiendo de los acuerdos comerciales se puede solicitar una rastreabilidad unitaria. En el caso particular de este proyecto, la rastreabilidad la otorga la etiqueta individual del motor eléctrico, por lo tanto, es fundamental asegurar que la información de la etiqueta llegue en las condiciones requeridas para su consulta.

La norma IATF 16949 establece que la organización debe tener un proceso de mejora continua documentado que incluya la implementación de métodos de prevención de errores en la medida en que sea proporcional a la magnitud de los problemas y riesgos identificados. En este contexto, también es relevante promover la mejora y la implementación de medidas para prevenir el error humano (Mode, 2011).

A continuación, en la Sección 2, se detallan las dificultades del estado inicial del proyecto, donde la dependencia exclusiva del factor humano presenta problemas constantes debido a factores como la fatiga visual o la distracción del operador. Se presenta un cálculo teórico de los micro movimientos del operador en el proceso de inspección visual y se destaca cómo esta estación por diseño tiene una gran oportunidad de mejora para poder automatizarse.

2. Planteamiento del problema

2.1. Cálculo del tiempo teórico de la inspección visual.

MTM (*Methods-Time Measurement*) es un sistema de medición de tiempos y métodos utilizado para analizar y establecer estándares de tiempo en las operaciones de trabajo. Se basa en el estudio y descomposición de las tareas en elementos más pequeños y medibles, con el objetivo de determinar el tiempo teórico requerido para realizar cada uno de esos elementos. MTM se utilizan en la ergonomía y en el trabajo estandarizado para medir los pasos en la secuencia de trabajo de una operación, e indica cuál es el tiempo teórico que le lleva al operador realizar los movimientos de manos, caminado o incluso, en este caso, los movimientos oculares que se realizan (Karger & Bayha, 1987).

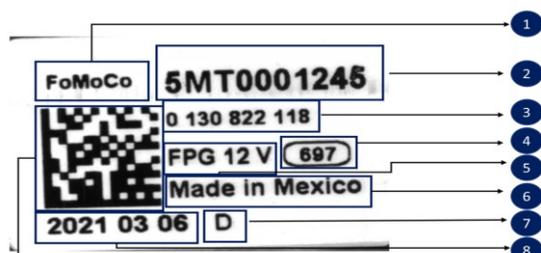
Se puede calcular de manera teórica con la suma de los micro movimientos del enfoque ocular que tiene que hacer el operador al momento de inspeccionar las 9 características diferentes de la etiqueta, además de la posición y el sentido de la etiqueta, ver Figura 1. El tiempo de ejecución del enfoque ocular es de 7.3 TMU (1 TMU = 0.036seg).

La lectura ocurre como una serie de recorridos y enfoques oculares. El valor de tiempo satisfactorio para la mayoría de las lecturas que se encuentran en la industria es de 5.05 TMU por palabra (Peralta et al., 2014).

La ecuación (1) representa el cálculo del tiempo de recorrido ocular.

$$\text{Tiempo de recorrido} = 15.2 \times \frac{T}{D}, \tag{1}$$

donde T es la distancia en centímetros entre los puntos límite de recorrido del ojo y D es la distancia en centímetros perpendicular desde el ojo hasta la línea de recorrido, quedando como se muestra en (2):



1. Familia
2. Número de parte Cliente
3. Número de parte Bosch
4. Número de planta
5. Leyenda “FPG 12V”
6. Leyenda “Made in Mexico”
7. Turno de producción
8. Fecha de producción

Figura 1: Ayuda visual basada en el dibujo de oferta.

$$Tiempo\ de\ recorrido = 15.2 \times \frac{0.5}{25} = 0.304\ TMU, \quad (2)$$

Al sumar el tiempo de recorrido y el tiempo de lectura por elemento (3):

$$Tiempo\ de\ recorrido + tiempo\ de\ lectura = (0.304 + 5.05) = 5.354\ TMU, \quad (3)$$

Considerando el tiempo del enfoque ocular de cada elemento en 7.3 TMU se tiene (4):

$$T.Recorrido + T.Lectura + Enfoque\ ocular = (0.304 + 5.05 + 7.3) = 12.654\ TMU, \quad (4)$$

Considerando los 9 elementos a inspeccionar tendríamos: $(12.654 \times 9) = 113.886\ TMU,$ (5)

La Tabla 1 describe las actividades que realiza el operador en cada tarea específica. La inspección visual requiere 4.09 segundos para verificar toda la información de la etiqueta, lo cual representa el 51% del tiempo ciclo teórico calculado. Esto implica que la inspección no puede realizarse dentro del tiempo ciclo requerido, ya que los 224.589 TMU totales de todas las operaciones de la estación suman 8.08 segundos, excediendo el estándar del tiempo ciclo de 5 segundos por pieza en la línea.

Considerando este cálculo teórico, se puede reconocer por qué la automatización de esta operación toma relevancia ya que no solo se debería de considerar los micro movimientos, si no también factores como la fatiga visual ya que los turnos de producción son de 6 horas en los cuales el operador realiza la inspección de manera repetitiva 720 veces por hora, ocasionando un riesgo al no inspeccionar las características de manera correcta o incluso al dejar pasar fallas de calidad por la misma causa de fatiga. En esta sección se ha demostrado ergonómicamente el riesgo de continuar con una operación diseñada de manera deficiente.

A continuación, se muestra el AMEF de la estación el cual lo realiza un equipo multidisciplinario experto en el producto y en el proceso.

Tabla 1: Micro movimientos de la operación de inspección visual calculados con MTM

No.	Descripción de los Elementos de la Operación	TMU
1	Alcanzar motor de la banda transportadora	25.8
2	Llevar motor a distancia de inspección visual	24.3
3	Inspección visual	113.889
4	Colocación de marca testigo de certificación	30.7
5	Llevar motor a empaque	24.3
6	Posicionar en empaque de motor	5.6
Total TMU		224.589

2.2. Calificación del AMEF de la estación

La calificación de AMEF de la estación de inspección visual se calificó conforme a la norma: ISO9000 y IATF 16949 citadas en el manual (Mode, 2011) y se encuentra descrita en la Tabla 2.

3. Selección del sistema de visión.

Un sistema de visión consta de elementos esenciales que trabajan en conjunto. El controlador, que actúa como el cerebro de la estación, toma decisiones y realiza comparaciones utilizando la información de la cámara, que equivale a los ojos del sistema. La cámara está compuesta por la lente, la cual concentra los rayos de luz y que serán capturados por los fotosensores en el sensor de imagen (Montalvo, 2010).

La iluminación proporciona el brillo adecuado para resaltar las características del producto que se desean detectar y comparar. Determinar las características técnicas del sistema

Tabla 2: Calificación de AMEF del sistema de inspección antes de la implementación del sistema de visión

Tipo	Criterio	Número de Prioridad de Riesgo (NPR)
Severidad	Se deben de considerar dos modos de falla: 1. La falta de trazabilidad en los motores eléctricos ocasionada por la falta de información en la etiqueta es considerada una falla poco significativa para el cliente, siendo calificado por AMEF como ligeramente molesta, lo que significa que el modo de falla no tendría un impacto significativo en la seguridad, el rendimiento o la funcionalidad del producto o proceso. 2. La mezcla de material (etiqueta incorrecta) es considerada una falla moderadamente seria ya que el producto tendría que ser sorteado y retrabajado para su correcto uso por el cliente.	4
Ocurrencia	Los controles de prevención son algo efectivos en la causa de la falla ya que son 100% conductuales y dependen de un operador capacitado para imprimir las etiquetas a producir, adicional se considera el historial de fallas presentadas con cliente y de manera interna dando un total de 6 fallas durante el 2021.	6
Detección	El método actual de inspección no ha sido probado (no tiene evaluaciones de repetibilidad) y no ha sido efectivo ni confiable, depende de una inspección visual por parte de un operador entrenado que tiene que detectar los 11 modos de falla de la etiqueta en menos de 5 segundos (tiempo ciclo de la línea de producción).	8
Total NPR's:		192

de visión es primordial para la correcta elección de la cámara (Keyence México S.A de C.V., 2010).

3.1. Cámara

Para poder determinar cuál será la resolución de la cámara se requiere medir y reconocer cual será el tamaño mínimo de detección, es decir de que tamaño será la característica más pequeña que el sistema de visión va a poder detectar con estabilidad.

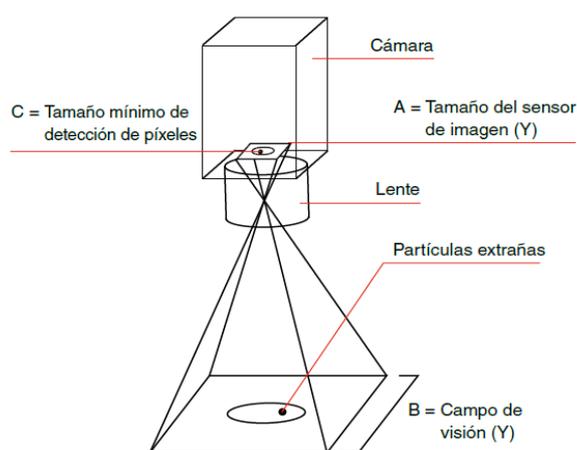


Figura 2: Posición de los factores en el sistema para determinar el tamaño mínimo de detección.

El tamaño mínimo de detección se determina con la siguiente fórmula. Las características están descritas en la Figura 2 para su mejor entendimiento

$$\text{Tamaño mínimo de detección} = B \div A \times C, \quad (6)$$

donde:

- A= Número de píxeles en el rango de captura de la cámara (eje Y) (píxeles),
- B= Campo de visión (eje Y) (mm o pulgadas),
- C=Tamaño mínimo de detección de píxeles para elementos del sensor de imagen (píxeles).

Para definir en este proyecto en particular la resolución de la cámara adecuada para solucionar el problema de la detección de etiquetas se determinó comparar una cámara de 2 megapíxeles (Y = 1200 píxeles) y una cámara de 5 megapíxeles (Y= 2050 píxeles), “Y” es el tamaño de sensor de imagen (A).

El tamaño mínimo detectable de píxeles se determinó en 4x4 píxeles (tamaño de la ausencia de una parte del modo de falla código matrix incorrecto), considerando un campo de visión de 120 mm se realizan los cálculos correspondientes.

Cámara de 2 megapíxeles:

- *Tamaño mínimo de detección:*
 $120 \div 1200 \times 4 = 0.4 \text{ mm.}$

Cámara de 5 megapíxeles:

- *Tamaño mínimo de detección:*
 $120 \div 2050 \times 4 = 0.2341 \text{ mm.}$

Como se puede observar en el cálculo y también de manera gráfica en la Figura 3, una mayor resolución en la cámara

implica incrementar la capacidad de detección de defectos más pequeños en la imagen tomada. Considerando que puede haber errores de impresión en las etiquetas menores a 0.3 mm que pueden afectar la información de la etiqueta se considera la elección de una cámara de 5 megapíxeles.

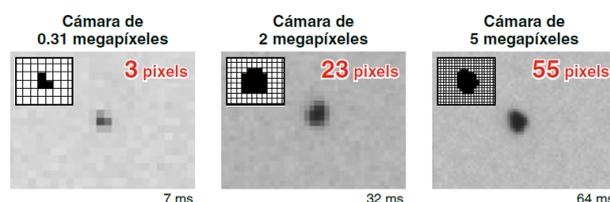


Figura 3: Ejemplo del tiempo de procesamiento relacionado al número de píxeles inspeccionados.

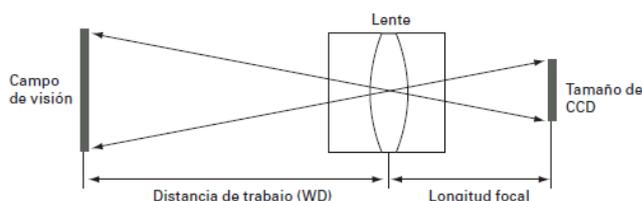


Figura 4: Elementos que determinan el tamaño y capacidad de un lente.

Es importante mencionar que mientras más alta sea la capacidad de resolución, el tiempo de procesamiento aumenta. En la Figura 3 se muestra un ejemplo representativo del tiempo de procesamiento y el número de píxeles inspeccionados (Keyence México S.A de C.V., 2019).

3.2. Lente

Para la elección de lente intervienen características principales que se requieren determinar para saber la capacidad óptima del lente a utilizar, entre ellas:

- **Distancia de trabajo.** Es la distancia a la que la cámara se va a encontrar del objeto a inspeccionar. Es importante determinar la distancia de trabajo porque de ésta dependerá la capacidad del lente a elegir.
- **Campo de visión.** Está determinado por la longitud focal. Cuando el campo de visión aumenta, la longitud focal del lente se acorta; esto aumenta el campo de visión. De modo contrario, se pueden ampliar los objetos distantes si la longitud focal se alarga.
- **Longitud focal.** Entre los modelos más representativos de lentes utilizados en la automatización automotriz se encuentran: 8 mm 0.32", 16 mm 0.63", 25 mm 0.98" y 50 mm 1.97". El tamaño de la distancia de trabajo y del campo de visión están determinados por la longitud focal del lente junto con el tamaño del CCD (elemento receptor de imágenes que convierte las señales electrónicas a datos) (Huang et al., 2022).

A continuación, en la Figura 4 se muestra gráficamente la composición de estos elementos para formar el lente.

En el caso específico de este estudio, el campo visual que se inspecciona es de 10 cm (campo visual que abarca la etiqueta y parte de la caja de engranaje del motor) y la distancia de trabajo esta acotada a 15 cm (distancia entre la cámara y el

nido de inspección). Esto se compara con la gráfica de los tipos de lentes compatibles con la cámara de 5 megapíxeles que muestra que cualquier lente compatible puede funcionar (12 mm, 16 mm, 25 mm, 35 mm y 50 mm) en esta aplicación, ver

3.3. Iluminación

La iluminación es esencial en la inspección de imágenes y ayuda a optimizar su captura. El rendimiento del sistema de iluminación influye en gran medida de la calidad de imagen. Para proporcionar una muestra de iluminación apropiada se debe de cumplir con tres criterios de aceptación consistentemente (Shirvaikar, 2006):

- Maximizar el contraste en aquellas características de interés.
- Minimizar el contraste en otros lugares.
- Proporcionar una medida de robustez.

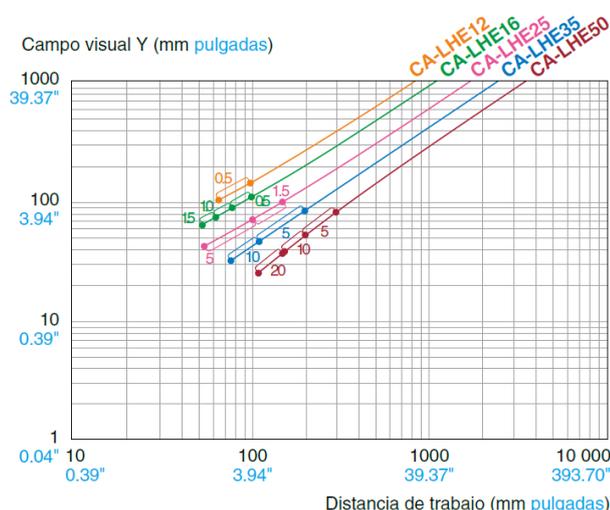


Figura 5: Distancia de trabajo vs campo visual para elección de lentes para una cámara de 5 megapíxeles.



Figura 6: Funcionamiento del sistema multispectral para eliminar reflejos.

En específico para este proyecto se eligió una iluminación de tipo multispectral con modo LumiTrax™ patentado por Keyence, el cual da una diferencia de color muy definida. Una de sus características principales es la eliminación de reflejos, que por la naturaleza misma de la etiqueta (material reflejante) está presente en el proyecto. El funcionamiento de la iluminación se puede observar en la Figura 6, donde se activa en distintos ángulos para suprimir el deslumbramiento y la luz

ambiental, permitiendo la extracción de las texturas (patrones) deseados; por lo tanto, cualquier condición de iluminación externa no afecta al sistema de visión (Keyence México S.A de C.V., 2019).

El sistema de visión de la marca Keyence elegido tiene las siguientes características:

- Controlador digital del sistema de visión: CV-X350F.
- Cámara del sistema de visión de 5 Mpx: CA-H500M.
- Lente para cámara de 5 Mpx de 25 mm: CA-LHE25.

4. Implementación del sistema de visión

4.1. Funcionamiento estándar del sistema

Además de definir los componentes utilizados en el proyecto, como el tipo de cámara, lente y sistema de iluminación, se estableció la secuencia estándar en la que el sistema de visión va a operar, como se muestra en la Figura 7 y se describe a continuación:

1. Colocación de la pieza a inspeccionar. Se emplea un nido con diseño especial para recibir al motor eléctrico, el cual tiene hendiduras para reducir el movimiento ocasionado por el operador al colocarlo de manera consecutiva, lo que contribuye a la repetibilidad de la inspección (Hawryluk et al., 2023).
 2. Activación del sistema de visión. Se utiliza un sensor colocado en el nido de inspección para activar el sistema.
 3. Inspección del contenido de la etiqueta. Una vez que se activa el *trigger*, el sistema procede a inspeccionar las 9 características de información de la etiqueta:
 - a. Código de barras o código de matriz.
 - b. Familia del producto.
 - c. Número de parte Cliente.
 - d. Número de parte Bosch.
 - e. Número de planta.
 - f. Leyenda “FPG 12V”.
 - g. Leyenda “Made in Mexico”.
 - h. Turno de producción.
 - i. Fecha de producción.
- y dos características adicionales de posición:
- j. Posición de caja de engrane.
 - k. Ángulo de etiqueta.

Las cuales son revisadas en un tiempo ciclo de 1550 milisegundos por el controlador del sistema de visión.

En esta etapa también se determina si la pieza inspeccionada es una pieza OK o NOK (las 11 características tienen que ser OK para considerarse una

pieza buena) En el caso de una pieza NOK, se envía una señal analógica al PLC (Controlador Lógico Programable) para indicar la existencia de un funcionamiento en falla y se continua la secuencia estándar de operación del sistema de visión.

4. Marcado de la pieza. Se marca el motor por medio de un plumón colocado en un sistema neumático que se activa exclusivamente si la señal analógica del controlador indica una pieza OK. Este punto colocado en el motor sirve como una marca testigo de que el motor pasó por el sistema de visión para su revisión.

4.2. Funcionamiento del sistema con falla (piezas NOK)

La secuencia a seguir en el momento que el controlador detecta un tipo de falla (NOK) en el funcionamiento estándar del sistema se muestra en la Figura 8 y se describe a continuación:

1. Detección de una falla en el sistema. Al detectarse una falla en el sistema se detiene la línea de producción, se detiene la banda transportadora y también se detiene el sistema de marcado con plumón para que se tenga la trazabilidad de la pieza rechazada por el sistema de visión. Al mismo tiempo, se activa la señal en rojo en la baliza del sistema de alerta para dar aviso de que una falla fue detectada en el sistema.
2. Reinicio del sistema. Para reiniciar el sistema, el auditor de calidad debe de desplazarse a la estación de trabajo donde previamente fueron cargadas sus huellas dactilares en el sistema biométrico para colocar su dedo, dando la instrucción al sistema que se puede resetear la estación.
3. Reanudación de la producción. El auditor de calidad debe colocar la pieza con falla en el nido de rechazo y

cerrar el biométrico para llevar al sistema al estado de reinicio y poder reanudar la producción.

Es importante mencionar que no solo el sistema instalado debe tener mejoras, también el sistema de respuesta a fallas, ya que al encontrar una pieza con falla se debe analizar cuál es la causa de su aparición y, mediante el ciclo PDCA, acordar las acciones necesarias para su mitigación y eliminación (Johnson, 2002).

4.3. Configuración de las herramientas de detección

En la Figura 9 se muestran ejemplos de la implementación del sistema de visión utilizando herramientas del software CV-X420F de Keyence. El cuadro azul representa el área de inspección donde se busca la característica específica a revisar. El cuadro verde representa el área donde se realiza la comparación del porcentaje de coincidencia para determinar si la información, característica o posición coinciden con los límites establecidos y, por lo tanto, se considera aceptable.

Para configurar las once herramientas de detección de este sistema de visión se realizó la siguiente serie de pasos para determinar los límites de aceptación de la herramienta.

4.3.1. Diferencia entre piezas OK y NOK

Para cada característica, se deben crear o mostrar piezas con fallas o piezas no aceptables. Esto depende de la experiencia de los auditores de calidad y de la severidad que se marca en el dibujo de oferta para asegurar que las piezas sean buenas o malas. Asimismo, es importante que la parte OK sea utilizada como patrón de referencia (Luckow et al., 2016).

Para establecer los límites de aceptación o rechazo se deben tomar al menos 30 capturas de las piezas NOK y 30 capturas de la pieza patrón OK con el fin de determinar estadísticamente que existe un contraste entre la característica que se considera OK y la que no

La Figura 10 muestra el porcentaje de coincidencia entre las piezas NOK y OK para la característica *Made in Mexico*

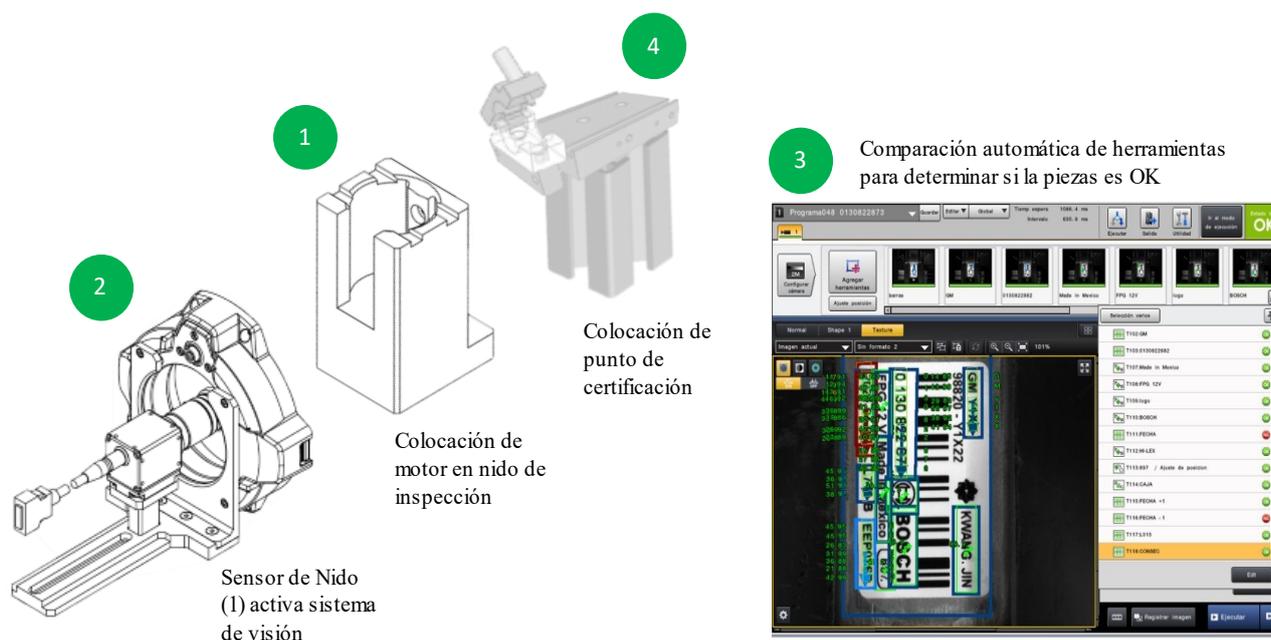


Figura 7: Secuencia estándar de operación para el sistema de visión.

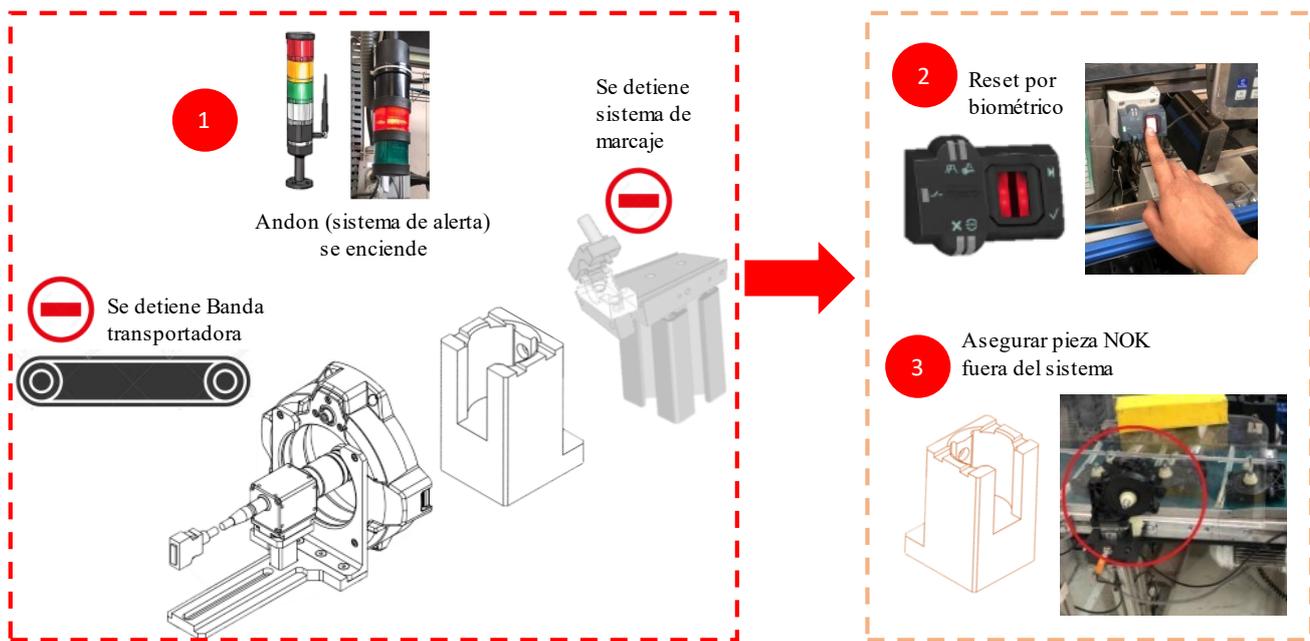


Figura 8: Diagrama de arquitectura del sistema en funcionamiento con falla.

El límite superior de control se establece tomando como referencia el promedio y desviación estándar de cada conjunto de capturas NOK y OK. En la Figura 10(a) se muestra las mediciones de la herramienta de inspección con un ejemplo de cálculo de límite de control. En la Figura 10(b) se muestra un ejemplo de cálculo erróneo del límite de control.

Para el caso de la Figura 10(a), la media de las piezas NOK es del 63.6% de coincidencia con una desviación estándar de 7.1867%.

La ecuación (7) muestra el cálculo del límite de control unilateral (Bailey, 2007):

$$\begin{aligned} \text{Limite de Control} &= \bar{X} + 3\sigma, & (7) \\ \text{Limite de Control} &= 63.6\% + 3(7.1867\%) = 85.06\%. \end{aligned}$$

Este límite de control debe ser asignado al programa para asegurar la efectividad de la herramienta. En el caso de que el límite de control calculado se parezca a lo mostrado en la Figura 10(b), en la cual se mezclan varios puntos de piezas NOK con piezas OK, se hace la observación que dicho límite teórico no funcionará para distinguir piezas OK y NOK en la característica analizada. En este caso, es necesario optimizar el contraste de la característica que se está examinando, mediante la aplicación de un filtro a la imagen capturada o con una mejora en la iluminación (Luckow et al., 2016).

En específico para la característica *Made in Mexico* se utilizó el filtro expandir contraste, como se muestra en la Figura 11. Este filtro expande los píxeles brillantes para quitar el brillo obscuro, como se muestra en la Figura 12.

Finalmente, se debe de realizar nuevamente el estudio para determinar el límite de control que discrimine las piezas OK de las NOK conforme a (7).

4.4. Validación del sistema de visión

Una vez definidos los límites de control para cada herramienta de detección, se debe de validar el sistema de visión. Para esto se realiza un estudio de repetibilidad para

cada herramienta y para cada número de parte que se libere en la cámara. Esto con el objetivo de asegurar con una confianza del 95% que las herramientas detectarán las fallas identificadas y se pueda liberar el sistema de visión como un mecanismo para prevenir el error humano.

Para el estudio de repetibilidad se deben de pasar en 50 ocasiones piezas OK y piezas NOK de manera aleatoria, anotando el resultado como pasa o no pasa si el resultado de la inspección coincide con la pieza medida.

En el Apéndice A se muestra un ejemplo de este estudio para un solo número de parte.

Se debe de extender una liberación oficial por parte del departamento de calidad que las herramientas del sistema de visión funcionan y son confiables para usarse como un mecanismo para prevenir el error humano (Dudek-Burlikowska & Szewieczek, 2009).

5. Resultados

La reducción de fallas reportadas en 2022 con respecto a 2021 fue del 33% eliminando el top 1 de fallas de etiqueta. Se tuvo una reducción de 7 fallas en total, como se muestra en las Figuras 13 y 14.

El sistema de visión implementado se muestra en la Figura 15 donde se observa la estación de trabajo, la cámara instalada y el sistema de marcaje del motor.

El número de prioridad de riesgo de acuerdo con las normas ISO9000 y IATF 16949 citadas en el manual (Mode, 2011) se redujo de 192 a solo 48 NPR's, debido a la implementación del sistema de visión que mejoró la calificación de detección de 8 a 2 NPR's (como se muestra en la Tabla 3); esto por la misma definición del método de inspección al cual se le realizaron pruebas de repetibilidad y éste no depende más de la capacitación o habilidad de un operador.

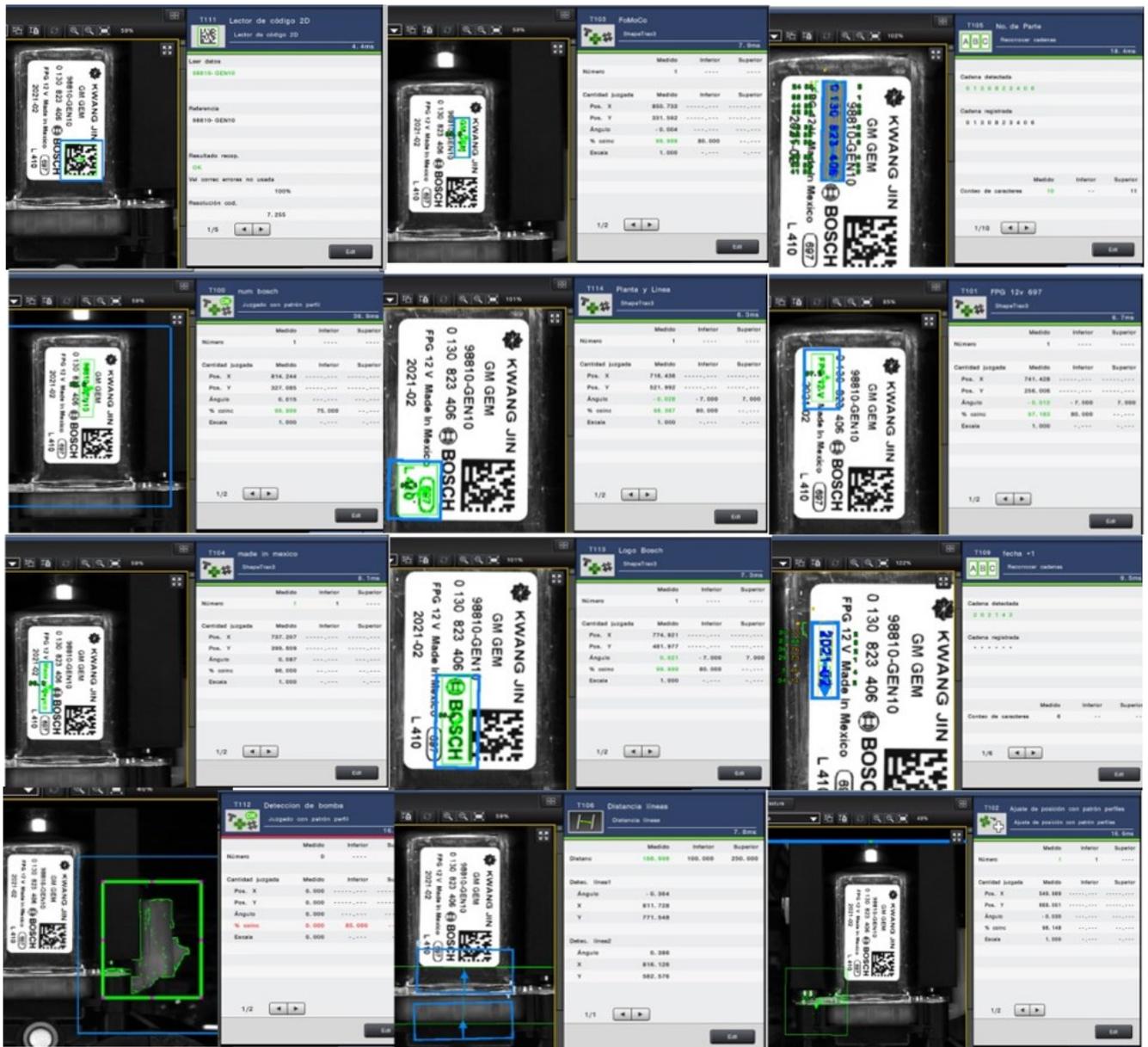
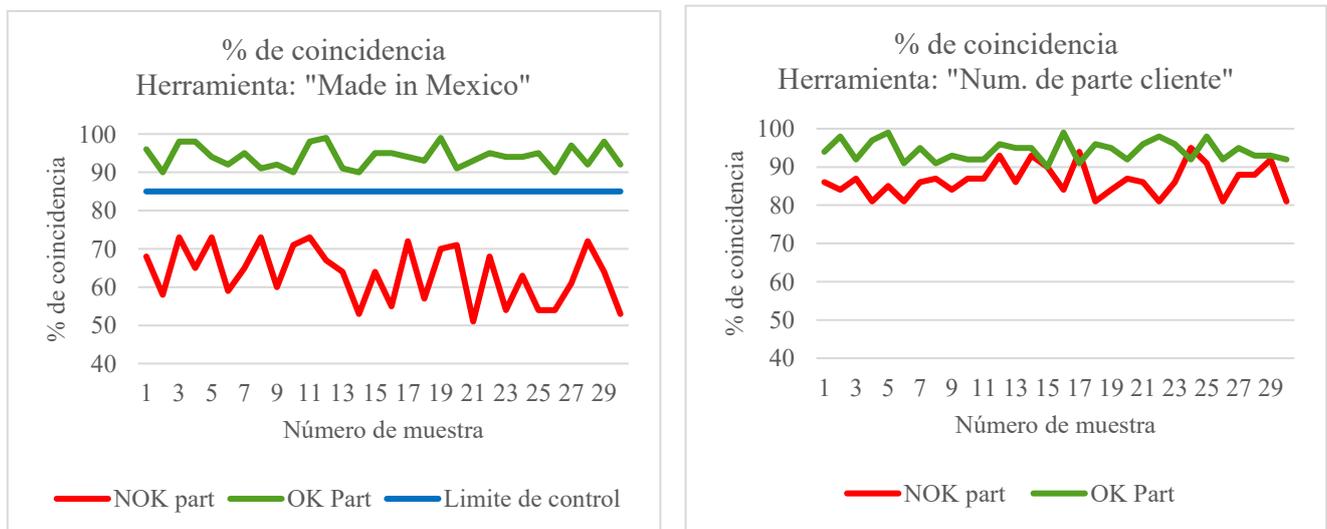


Figura 9: Herramientas instaladas en el sistema de visión donde se comparan las características de las etiquetas para su revisión.



(a) Cálculo de límite de control de herramienta de inspección

(b) Cálculo erróneo del límite de control

Figura 10: Ejemplo de datos estadísticos del porcentaje de coincidencia en diferentes características para determinar el límite de control.

Tabla 3: Actualización de la detección en el AMEF de proceso

Tipo	Criterio	Número de Prioridad de Riesgo (NPR)
Severidad	Se deben de considerar dos modos de falla: 1. La falta de trazabilidad en los motores eléctricos ocasionada por la falta de información en la etiqueta es considerada una falla poco significativa para el cliente, siendo calificado por AMEF como ligeramente molesta, lo que significa que el modo de falla no tendría un impacto significativo en la seguridad, el rendimiento o la funcionalidad del producto o proceso. 2. La mezcla de material (etiqueta incorrecta) es considerada una falla moderadamente seria ya que el producto tendría que ser sorteado y retrabajado para su correcto uso por el cliente.	4
Ocurrencia	Los controles de prevención son algo efectivos en la causa de la falla ya que son 100% conductuales y dependen de un operador capacitado para imprimir las etiquetas a producir, adicional se considera el historial de fallas presentadas con cliente y de manera interna dando un total de 6 fallas durante el 2021.	6
Detección	El nuevo método de inspección sido probado (prueba de repetibilidad) y ha sido efectivo y confiable, depende de un control técnico ligado al PLC con una rutina para sacar fuera del flujo del proceso las piezas defectuosas detectando los 11 modos de falla de la etiqueta en menos de 5 segundos (tiempo ciclo de la línea de producción).	2
Total NPR's:		48

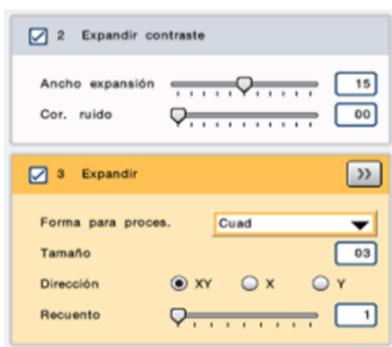


Figura 11: Ejemplo de ajuste de filtro expandir con valores empleados en la implementación.



Figura 12: Ejemplo de la aplicación del filtro expandir.

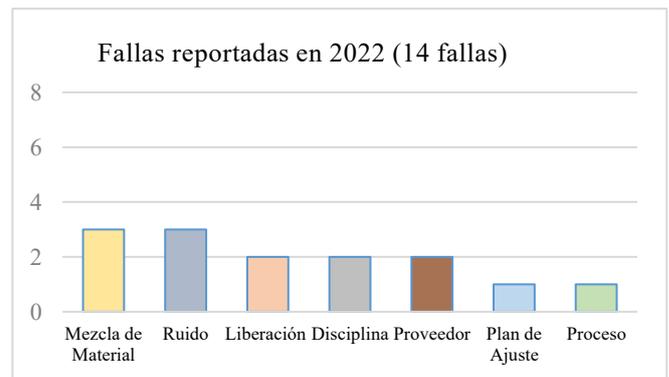


Figura 14: Número de fallas reportadas en 2022 Top1: mezcla de material y ruido. Se reportan 14 fallas en total de todos los modos de falla.



Figura 15: Estación de trabajo con sistema de visión implementado.

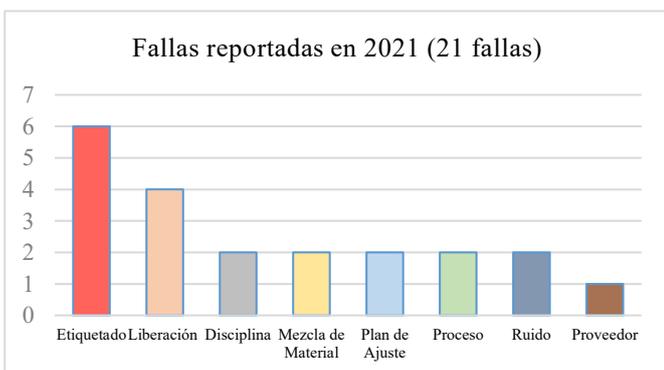


Figura 13: Número de fallas reportadas en 2021 Top 1: fallas referentes a etiquetado de los motores eléctricos (6 fallas en total).

6. Conclusiones

La aplicación de los sistemas de visión en la industria automotriz para la detección de fallas ha demostrado resultados muy prósperos. La aplicación en la inspección de etiquetas para este caso en particular probó su eficiencia con la reducción de los modos de falla en etiquetas, comparando las fallas de calidad del año 2021 contra el año 2022 en las líneas de producción de motores eléctricos. Además, el método de la validación de las herramientas que detectan las características de falla en las etiquetas fue efectivo. El estudio de repetibilidad del sistema de visión, así como el método de disposición de piezas NOK a través de la rutina de modo de falla, demostraron

