Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Desarrollo de una propuesta para pruebas de inspección de calidad con un sistema de visión en una línea de ensamble didáctica

Development of a proposal for quality inspection tests with a vision system in a didactic assembly line

Hernández-González, J., Castellanos-Ruiz, M., Rodríguez-Alvarado, L.W., Loyo-Quijada, J.

Departamento de Sistemas; Universidad Autónoma Metropolitana, UAM-Azcapotzalco; C.P. 02200, CDMX, México.
al2162002899@azc.uam.mx; al2173037184@azc.uam.mx; lwra@azc.uam.mx; lqj@azc.uam.mx

Innovación tecnológica: Mejoramiento de procesos de manufactura por medio de un sistema de inspección de calidad automatizado.

Área de aplicación industrial: Área de producción, tecnología avanzada y desarrollo de nuevos procesos.

Recibido: 16 junio 2021
Aceptado: 29 marzo 2022

Abstract

The quality assurance of the finished product is a determining factor for competitiveness in production systems. Establishing that all the quality requirements established by the client are met, without affecting the delivery time of the product, can become a great challenge. This paper details a proposal to perform automated quality inspection tests on the assembly process of a Lego® structure. The Lego® structure represents the finished product of a manual assembly line as part of a didactic activity and must meet quality requirements in terms of shape, position and color. The automatic inspection proposal consists of determining the control points based on the quality requirements of the assembled structure and translating these control points as the judgment conditions that will be incorporated into the CV-X simulation software, version 5.3, which uses the Keyence® brand CV-X vision system kit.

The program developed in the simulation software includes the steps from establishing the selection of the inspection tool that best suits the quality control points, selection of the work area, adjustments, to establishment of judgment and execution. In this last step, simulation runs are carried out with a series of images of the structure with Lego® to verify the operation of the programs carried out and guarantee the acceptance or rejection of the pieces. The objective

of the present work is to establish a methodological proposal to carry out automatic inspection tests with the CV-X vision equipment in which the parameters to be considered to establish the limits of acceptable quality are specified. By carrying out the application of this inspection proposal, it can be shown that the technological tools allow improving the performance of the processes reflected in the behavior of key indicators, in this case, the quality of the product under analysis.

The programs developed focus on the inspection of the Lego® structure to guarantee an assembled product with 99.9% quality and that this inspection process does not affect the assembly process time. With the development of this work, the benefit of using technological tools to increase the added value in the processes is demonstrated and, on the other hand, that the participants understand and are empowered with the use of new technologies to carry out product quality control and the stable behavior of the process. Finally, the methodology proposed in this work can be replicated in industries that require inspection tests to monitor control points as defined in the lay structure.

Keywords: automation, quality, improvement, control point.

Resumen

El aseguramiento de la calidad del producto terminado es un factor determinante para la competitividad en los sistemas productivos. Establecer que se cumplan todos los requerimientos de calidad establecidos por el cliente, sin afectar el tiempo de entrega del producto puede llegar a significar un gran reto. En este trabajo se detalla una propuesta para realizar pruebas de inspección de calidad automatizada al proceso de ensamble de una estructura de Lego®.

La estructura de Lego® representa el producto terminado de una línea de ensamble manual como parte de una actividad didáctica y debe cumplir requerimientos de calidad en cuanto a forma, posición y color. La propuesta de inspección automática consiste en determinar los puntos de control a partir de los requerimientos de calidad de la estructura ensamblada y traducir estos puntos de control como las condiciones de juicio que se incorporarán al software de simulación CV-X, versión 5.3, que utiliza el equipo de sistema de visión CV-X de la marca Keyence®.

El programa desarrollado en el software de simulación incluye los pasos desde establecer la selección de herramienta de inspección que mejor se adecúe a los puntos de control de calidad, selección de área de trabajo, ajustes, hasta establecimiento de juicio y ejecución. En este último paso se realizan corridas de simulación con una serie de imágenes de la estructura con Lego® para verificar el funcionamiento de los programas realizados y garantizar la aceptación o rechazo de las piezas. El objetivo del presente trabajo es en establecer una propuesta metodológica para realizar pruebas de inspección automática con el equipo de visión CV-X® en el que se especifiquen los parámetros a tomar en cuenta para establecer los límites de calidad aceptable. Al llevar a cabo la aplicación de esta propuesta de inspección, se puede demostrar que las herramientas tecnológicas permiten mejorar el desempeño de los procesos reflejados en el comportamiento de indicadores claves, en este caso, la calidad del producto bajo análisis.

Los programas desarrollados se enfocan en la inspección de la estructura de Lego® para garantizar un producto ensamblado con 99.9% de calidad debido a que es el porcentaje de coincidencia máximo que maneja el equipo utilizado, además que este proceso de inspección no afecte el tiempo de proceso de ensamble. Con el desarrollo de este trabajo se demuestra el beneficio de utilizar herramientas tecnológicas para incrementar el valor agregado en los procesos y, por otro lado, que los participantes comprendan y se faculten con el uso de nuevas tecnologías para realizar el control de calidad de producto y el comportamiento estable del proceso. Finalmente, la metodología propuesta en este trabajo puede ser replicada en las industrias que requieran realizar pruebas de inspección para monitorear los puntos de control como los definidos en la estructura Lego®.

Palabras claves: automatización, calidad, mejora, puntos de control.

I. Introducción

Hoy en día la competitividad es un factor clave para el desarrollo de cualquier empresa, pero además es necesario estar actualizado con respecto a la tecnología e innovación con el objetivo de no solo cumplir las expectativas del cliente, sino que además adelantarse a ellas. Desde los años 80`s y 90`s muchos países le apostaron a una economía basada en la calidad de sus productos, pero se ha demostrado que la única forma de ser competitivo es agregando calidad a sus productos. A partir de los años 90`s la mayoría de los países establecieron una forma generalizada de garantizar la calidad de sus productos y facilitar la comercialización internacional de los mismos, con un costo y un servicio diferenciado (Miranda, 2006). De esta manera surgen nuevas reglas, normas y metodologías para la producción y calidad de productos como son: ISO-9000, Seis Sigma, Sistema de Producción Toyota, Administración Total de la Calidad y Manufactura Esbelta, entre otras.

Es importe señalar que las decisiones de cambio para mejorar la calidad en los procesos y los productos, se inicia con los datos que se obtienen al ir y medir el proceso, estos datos indican cómo se está comportando el proceso, de aquí la importancia de saber cómo se genera esa información y asegurarse que sea lo más realista posible con los avances tecnológicos, computacionales y digitales, también se han actualizado los sistemas de medición, son más exactos, precisos y de fácil lectura, pasan de instrumentos analógicos a digitales, también cada día aparecen más sistemas computacionales (software) que ayudan a registrar, graficar e interpretar la información, y los trabajadores tienen más canales o plataformas para capacitarse y tener entrenamientos virtuales y presenciales lo que hace que estén mejor capacitados a un menor costo y tiempo.

Es indudable que, los cambios tecnológicos tanto de información como de comunicación son un portal potencial para la innovación (Krüger, et al., 2017). Tal y como lo comentan González, et al. (2013), en su propuesta de visión artificial para inspeccionar ausencia y presencia de ciertos elementos en un subensamble automotriz, su sistema de visión no solo permitió automatizar tareas repetitivas de inspección, sino también obtener análisis en tiempo real, pero lo más notable fue que, al establecer los adecuados coeficientes de correlación en su sistema, se aseguraron que solo se puedan presentar falsos negativos y no falsos positivos como en la inspección humana. Otro gran beneficio de este tipo de sistemas es el que mencionan Balodis y Grasbuts (2017) ya que ellos establecen que, al incorporar estos sistemas a una

estación de trabajo, se aumenta la velocidad y precisión del proceso.

Dentro de las aplicaciones industriales y en dependencia del tipo de producto bajo análisis, la calidad juega un papel fundamental, ya que un daño o desviación en los requerimientos establecidos, puede impactar directamente en riesgos humanos, o representar daños económicos o ambientales. Muhammad, et al. (2018), proponen el diseño de un marco de inspección que integra a nivel proceso y sistema las etapas de ciclo de vida de la inspección para un proceso de producción automatizado. Rishi, et al. (2021) establecen una propuesta de un Sistema de visión que puede ser implementado en cualquier industria para un monitoreo en tiempo real de piezas para identificar defectos geométricos e irregularidades. Los investigadores hacen énfasis en que, este tipo de sistemas son utilizados para capacitar la fuerza laboral y lograr desarrollar competencias que permitan afrontar los nuevos retos de tecnologías emergentes.

Ng, et al. (2011) proponen un sistema de inspección de iluminación que utiliza herramientas de procesamiento de imágenes y visión por computadora, los resultados experimentales realizados con este sistema, demuestran que la tasa de error es más baja comparada con el proceso realizado por operadores. Świłło y Perzyk (2013) proponen un sistema de inspección por visión, algoritmo de procesamiento de imágenes y sistema de aprendizaje basado en redes neuronales, la implementación del sistema fue un éxito para la inspección de los defectos de fundición a presión de aluminio.

El sistema de visión de la marca Keyence ha sido ampliamente utilizado, por ejemplo, en el caso para la inspección de calidad de pilas de baterías térmicas presentado por Bachicha y Barlett (2016), demostraron que el sistema de visión de Keyence y el sistema de procesamiento de imágenes de Matlab son herramientas poderosas cuando el objeto a inspeccionar tiene detalles muy finos o una discriminación de sombreado difícil. Arróniz, et al. (2019) describen el uso de visión estadística por computadora para detectar presencia y ausencia de roscas de aluminio en piezas de automóviles, el sistema utilizado se basa en una cámara Keyence IV 500 y su software estadístico. Con el sistema de inspección propuesto por Arellano et al (2007) logran impactar en el proceso de llenado de tubos antisépticos logrando una disminución del 86% las actividades realizadas por el operador, lo que disminuye la fatiga y garantiza un mejor rendimiento en sus actividades, adicional a esto, se logra una reducción del 4% del tiempo del procesamiento. Reséndiz et al (2011) proponen un sistema para detección de fallas en placas de metal, el cual también puede servir para verificar la rugosidad o acabado superficial. Este tipo de sistema de Keyence ha sido ampliamente usado herramienta no invasiva y confiable para segregar piezas conformes y no conformes, Arroniz et al (2019) concluyen que, este tipo de sistemas automáticos de detección de fallas son más rápidas y efectivas para aislar piezas buenas. Demčák et al (2021) comentan que el sistema de inspección visual agiliza, mejora y automatiza el proceso de inspección del producto, mediante las pruebas experimentales mostró la posibilidad de identificación de caracteres y selección de iluminación adecuada.

Lo que se ha logrado con la implantación de las nuevas tecnologías a los sistemas de medición, es la disminución de los errores humanos, los cuales son; errores visuales al leer el instrumento, errores al escribir o registrar la medida, errores al agrupar, graficar y analizar los datos, errores de uso de los instrumentos, manipulación y cálculo de variables. Partiendo de indagaciones presentadas, es evidente que un sistema de visión automatizado ofrece grandes ventajas para disminuir el error humano en

un proceso de inspección e incrementar el tiempo de ciclo del proceso. Uno de los aspectos principales a tomar en cuenta en este tipo de sistemas es establecer una adecuada selección de las herramientas de inspección de manera que responda a las necesidades de los puntos de control a monitorear, es importante establecer un esquema general para saber las consideraciones y parámetros a establecer en el sistema de monitoreo.

En este artículo se presenta una propuesta de inspección automática para detectar inconformidades con relación a: forma, posición y color de una estructura ensamblada con Lego®. La propuesta se basa en el sistema Keyence, cámara CA-035C y el software de simulación CV-X. Se documenta la secuencia metodológica a seguir para poder estructurar las pruebas de inspección, la cual inicia a partir de los puntos de control y la asociación de las herramientas de análisis para examinar estos puntos de control, posteriormente se ejecuta la herramienta y se evalúan los resultados obtenidos de acuerdo con los parámetros establecidos.

El artículo está estructurado en cuatro secciones, primero se explica el caso de estudio y las herramientas utilizadas, en segundo lugar, el uso del software y sistema de visión, posteriormente se explican los resultados de las corridas de simulación, finalmente en conclusiones se explica el impacto de adopción de estas tecnologías en los procesos.

II. Materiales y equipos

2.1. Bloques de Lego®

El producto considerado para este análisis, corresponde a una estructura de bloques de Lego® compuesto de cinco piezas (ver Figura 1).

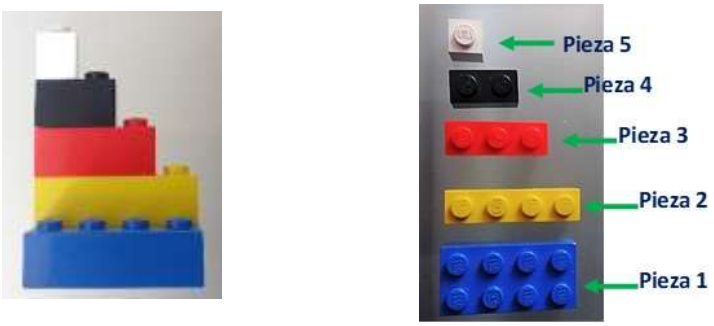


Figura 1. Producto terminado y piezas que conforman el ensamble.

2.2.Simulador

El software de simulación de la serie CV-X es parte del equipo del sistema visión de la empresa Keyence, el cual está conformado principalmente por el Controlador Serie CV-X 300 y la cámara CA-035C. Este sistema de visión puede detectar: áreas (cantidad de pixeles), posiciones (punto de cambio de intensidad) y defectos (cambio en el nivel de intensidad), con 256 niveles diferentes de intensidad para cada pixel de un sensor de imagen CCD (dispositivo de carga acoplada para convertir la imagen a formato digital).

Para iniciar a trabajar con el simulador es necesario crear un espacio de trabajo (ver Figura 2 (a)), de esta manera se puede trabajar desde la computadora, realizar los ajustes necesarios para simular un entorno operativo y evaluar los resultados del programa antes de ejecutarlos en una actividad vivencial. Una vez que se ha creado el espacio de trabajo, se habilita la pantalla del simulador, el cual corresponde al espacio de trabajo (ver Figura 2 (b)).

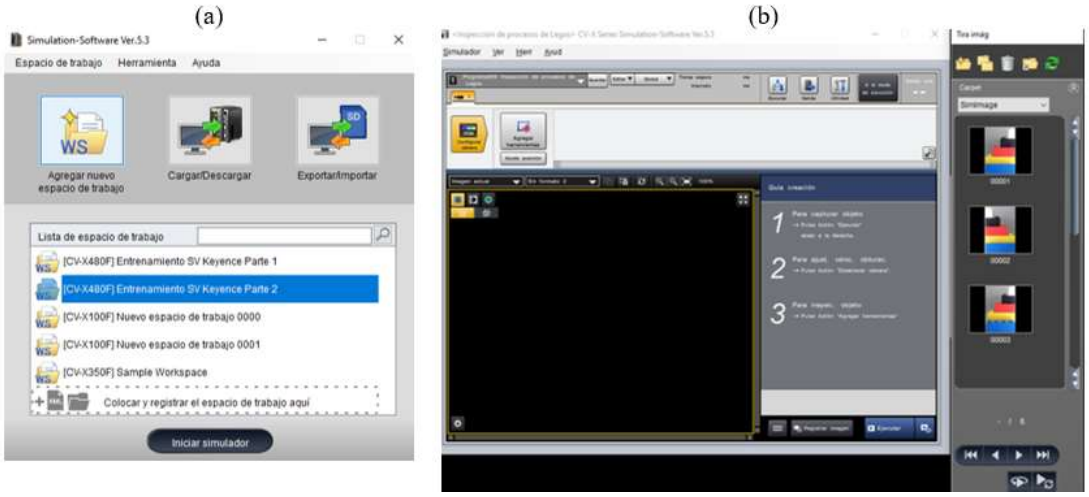


Figura 2. (a) Creación de espacio de trabajo y (b) pantalla de entorno de simulación.

La pantalla de simulación es el entorno de trabajo en donde se visualizan e incorporan las características de las herramientas utilizadas, asignación de parámetros y la ejecución de los programas realizados, también se cuenta con una barra exclusiva para el registro de imágenes.

Las herramientas se pueden seleccionar desde la opción de catálogo de herramientas, donde incluye una breve explicación de su uso, esto permite analizar y determinar la mejor adaptación de las herramientas disponibles al cumplimiento de los requerimientos de calidad.

III. Metodología

La metodología utilizada para desarrollar la propuesta del proceso de inspección automatizado consta de cuatro etapas, las cuales se detallan a continuación (ver Figura 3).

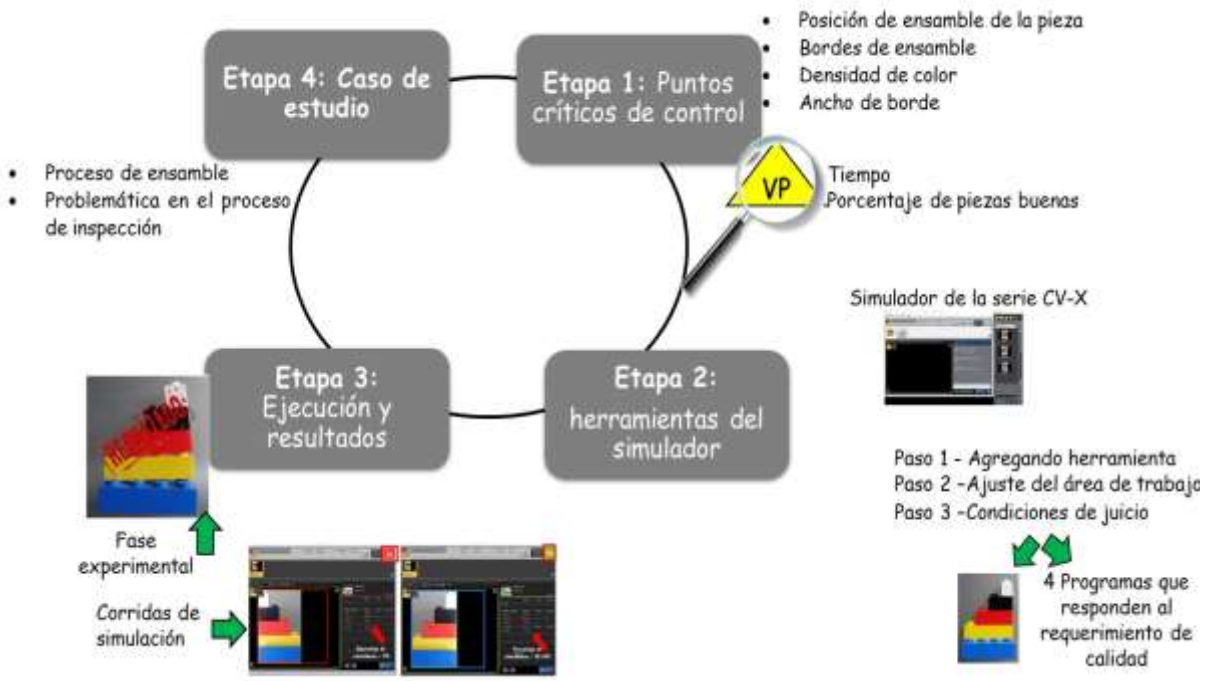


Figura 3. Etapas para el desarrollo de la propuesta del proceso automatizado de inspección.

3.1. Definición de puntos críticos de control

A partir del análisis de la secuencia del proceso de ensamble manual se determinan los puntos críticos de control para asegurar un producto terminado con 99.9% de calidad, así como las variables de interés para monitorear el desempeño del proceso. Estas consideraciones quedaron establecidas en las estaciones de trabajo encargadas de realizar el proceso de ensamble (ver Figura 4) y en la estación de inspección de calidad (ver Figura 5).

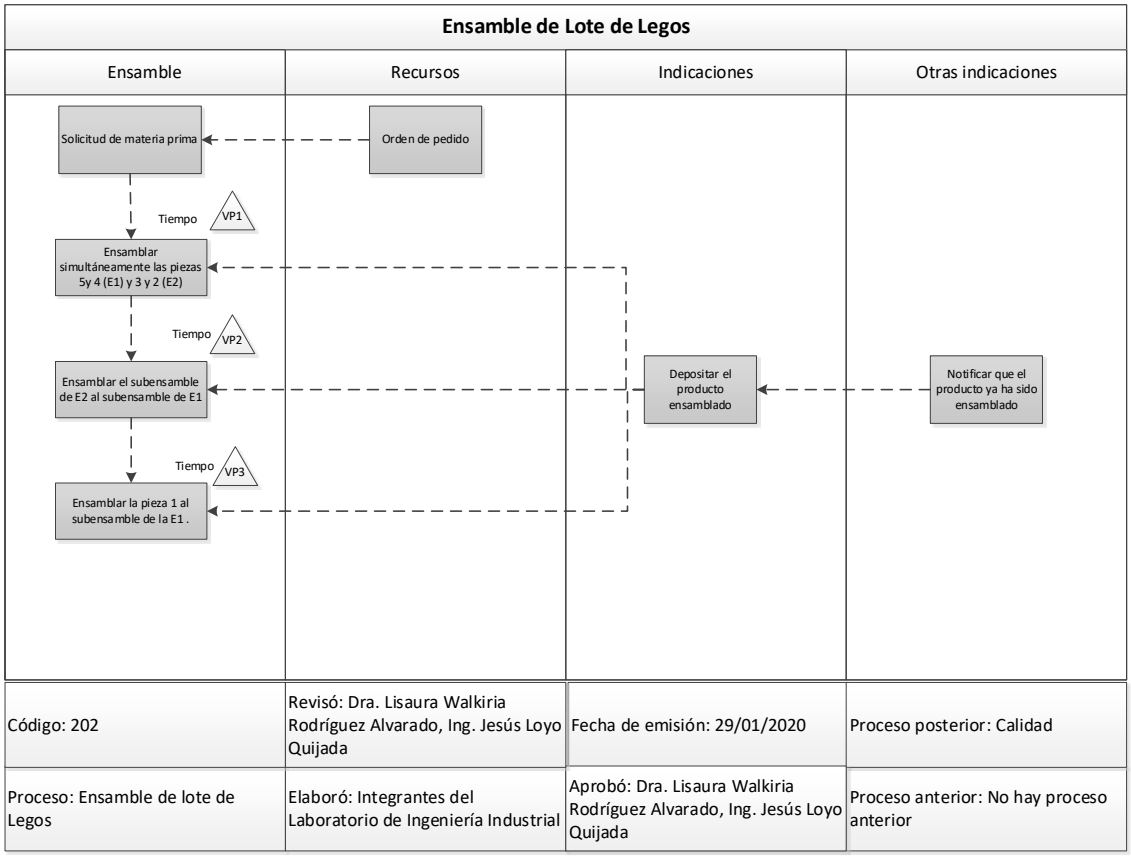


Figura 4. Mapa del proceso de ensamble de la estructura de Lego®.

En la Figura 4 se presenta el proceso de ensamble el cual inicia con el ingreso de materia prima y pasa a las estaciones de trabajo para realizar el ensamble. Cada vez que se realiza el subensamble en las diferentes estaciones hay una notificación por parte del operador de que el subensamble está terminado, aquí se presenta el primer punto crítico del proceso, ya que cada estación es responsable de verificar el color, posición y holgura entre bordes de las piezas a su cargo.

La simbología “VP” establecida en cada subensamble, indica que, hay una variable de proceso de interés, en este caso es necesario monitorear el tiempo de ensamble, esto debido a que se debe hacer la entrega del lote de 50 piezas en el menor tiempo posible.

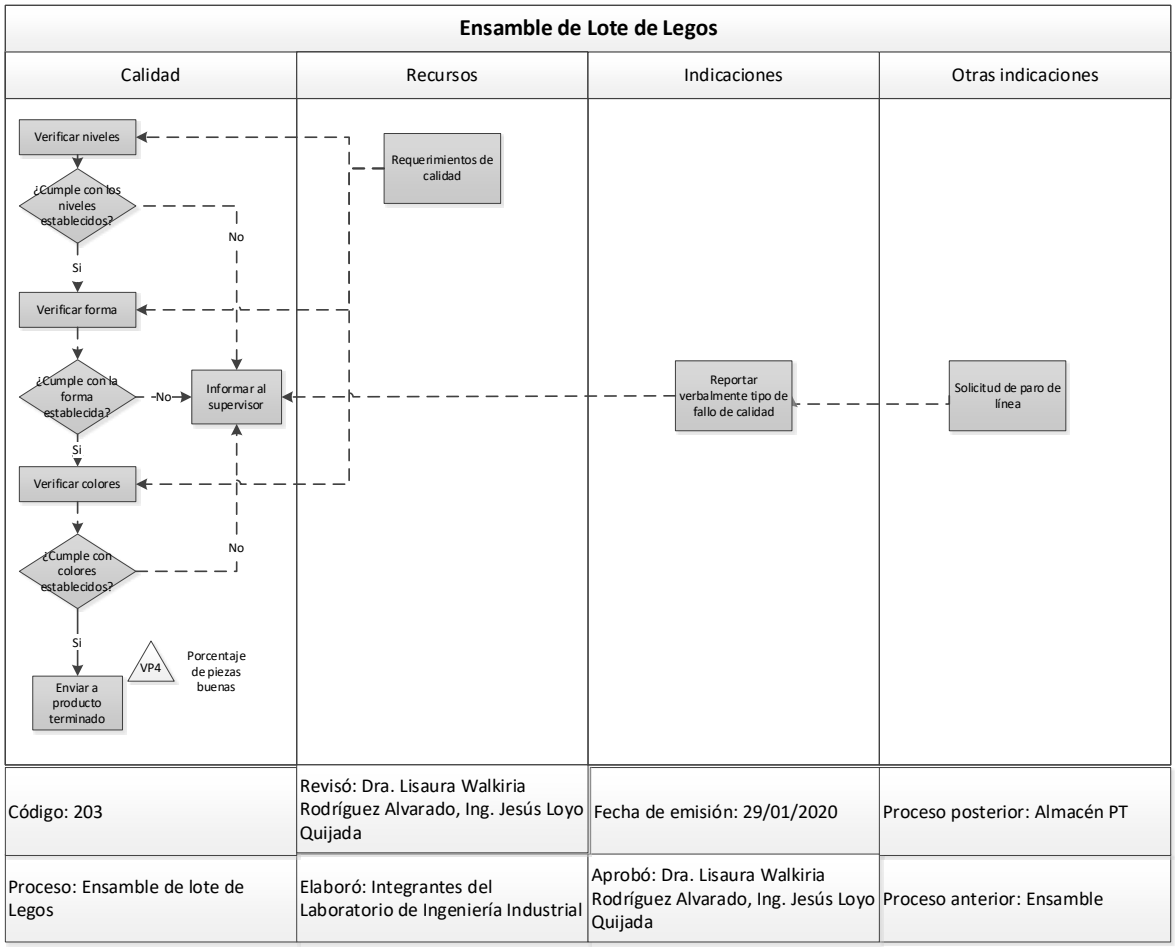


Figura 5. Mapa del proceso de inspección de calidad de la estructura de Lego®.

En la Figura 5 se establece que lo primero a revisar en la pieza terminada son los niveles establecidos, es decir que cuente con 5 piezas y que la holgura entre piezas sea mínima (se considera mínima cuando el ensamble entre piezas se mantiene a pesar de la manipulación); el tercer parámetro es determinar si cumple con la forma establecida y, por último, que el ensamble cumpla con el código de colores (sin repetición de color). Para esta parte del proceso, la variable de interés es el porcentaje de piezas buenas, el cual es determinado una vez que ha sido completado el lote de entrega al cliente.

Se puede establecer que los puntos de control para el proceso de inspección de calidad corresponden a cada una de las características de los requerimientos de calidad, los cuales se pueden resumir en:

- Posición de ensamble de la pieza
- Bordes de ensamble
- Densidad de color
- Ancho de borde

3.2. Herramientas del simulador

Una vez que los puntos de control están definidos, se pueden establecer los parámetros de control con ayuda del software del sistema de visión CV-X 300, haciendo uso de las herramientas con las que éste cuenta. Para esto, es necesario evaluar la funcionalidad de las herramientas y establecer los parámetros que permitan analizar los requerimientos de calidad. El sistema de programación del software del sistema de visión es intuitivo y didáctico donde a partir del conocimiento experto adquirido en el proceso de ensamble manual y con conocimiento técnico del funcionamiento del equipo es posible establecer los criterios para cumplir con las pruebas de calidad.

3.2.1. Programas

Para dar respuesta a los requerimientos de calidad, se desarrollaron un total de cuatro programas en el software del sistema de visión CV-X 300, los cuales permiten inspeccionar cambios de tono de color, dimensiones y posición. Las herramientas desarrolladas en el simulador procesan automáticamente las imágenes de acuerdo con los parámetros establecidos, la secuencia de pasos para desarrollar los programas, incluye las siguientes etapas (ver Figura 6).

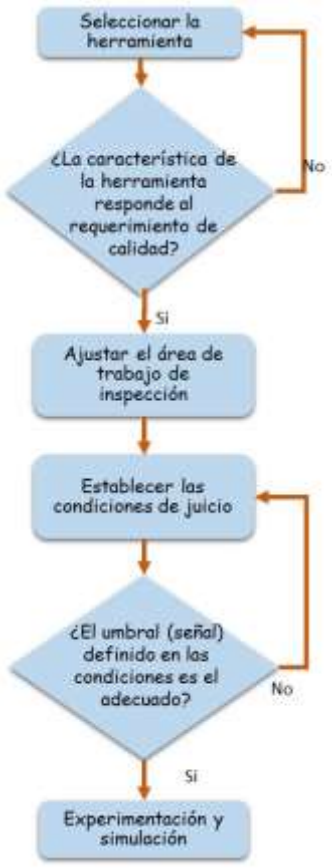


Figura 6. Etapas para el desarrollo de programas.

Paso 1 - Agregando herramienta: Se explica la herramienta utilizada a partir de la determinación que sus características dan respuesta al requerimiento de calidad.
Paso 2 –Ajuste del área de trabajo: Se muestra como seleccionar el área de trabajo, por ejemplo, si es necesario seleccionar los bordes de la pieza, o un color en específico.
Paso 3 –Condiciones de juicio: En esta sección se presentan las condiciones bajo las cuales se evaluará la característica de color, puede ser, por ejemplo, cantidad de piezas que conforman la estructura o cantidad de colores que se pueden repetir.
Paso 4 –Modo ejecución: Es la fase de experimentación y simulación, aquí se realizan pequeñas corridas de simulación para evaluar los resultados.

3.3.Ejecución y resultados

Las pruebas experimentales del sistema de visión se realizan con ayuda del software de simulación CV-X, versión 5.3, en el cual se han elaborado y ejecutado los programas de cada punto de control proveniente del análisis del ensamble manual. Las pruebas de simulación corresponden a la fase experimental, en donde se realizan diferentes corridas de simulación con imágenes de las estructuras de Lego® ensambladas que cumplen (sigla OK en la parte superior derecha del recuadro de simulación) y que no cumplen los requerimientos de calidad (sigla NG en la parte superior derecha del recuadro de simulación). Se ejecuta cada programa y se verifica que las condiciones de juicios y parámetros respondan a los puntos de control definidos anteriormente. Finalmente se hace la validación de la ejecución de cada programa con la aceptación y rechazo de las imágenes. Esta función simula como si el sistema de Visión CV-X estuviese en marcha y la línea de producción funcionando de manera continua.

3.4.Caso de estudio

Este estudio se desarrolla a partir de una actividad didáctica que se lleva a cabo con la participación de alumnos de ingeniería industrial, en donde se simula una línea de producción de ensamble con Lego® conformada por tres estaciones de trabajo con un operador por estación, de esta manera, el primer operador se encarga de ensamblar la pieza 1 y 2, el segundo operador se encarga de realizar el ensamble de la pieza 3 y 4 con el subensamble proveniente del operador 1 y finalmente en la estación 3 se une la pieza 5 al subensamble proveniente de la segunda

estación. Al final del proceso de ensamble se encuentra una estación de inspección de calidad (Figura 7).



Figura 7. línea de ensamble conformada por los integrantes.

La persona encargada de la estación de control de calidad estipula la aceptación o rechazo del producto terminado en función a las siguientes consideraciones:

1. Las piezas deben estar ensambladas en la posición correcta, formando una estructura de “escalera”, sin separación entre bordes.
2. El producto terminado debe de tener colores diferentes en cada una de sus piezas.

Una vez que los operadores terminan el ensamble y completan un lote de 50 piezas, el cual corresponde a una muestra representativa de trabajo, aproximadamente un 13% de una jornada laboral completa, se procede a evaluar el proceso considerando dos indicadores, tiempo de producción por pieza y porcentaje de calidad.

Bajo este escenario, y al realizar un estudio de tiempos con cronómetro con el método continuo, se determinó que, el ritmo de producción del proceso de ensamble manual es de 0.163 minutos por pieza, es decir que, el lote completo de 50 piezas se obtiene en 8.15 minutos aproximadamente, es importante recordar que este tiempo incluye el proceso de ensamble e inspección.

En cuanto a la calidad de las piezas, el porcentaje de defectos osciló entre un 2% y un 6%, lo que significa que, del lote completo de 50 unidades de producto terminado únicamente se logran entregar entre 47 y 49 piezas que cumplen con los requerimientos de calidad establecidos. El defecto más significativo es el correspondiente a la posición y forma, ya que a pesar de que, si se cumple la secuencia de ensamble, el espacio entre bordes es significativo, esto quiere decir que, al realizar el ensamble manual entre piezas, las piezas no son colocadas adecuadamente lo que genera holguras entre ellas, en otras ocasiones, por distracción, los operadores colocan las piezas en sentido contrario, lo que ocasiona que la estructura de Lego® quede ensamblada en forma invertida.

La problemática que se presenta para este caso es que, no siempre se logran detectar estos defectos en la estación de calidad o durante el proceso de ensamble, sino que se identifican hasta que se ha hecho la entrega del lote completo de piezas. Estas deficiencias de detección son ocasionadas principalmente por la necesidad de mantener un ritmo de producción y cumplir la entrega del lote en el menor tiempo posible. El considerar un tiempo adicional en las estaciones de ensamble o en la estación de calidad para realizar una inspección más minuciosa implicaría un retraso significado en la entrega del producto terminado.

A partir de esta situación se determina que se necesita contar un sistema confiable que garantice la entrega del lote de productos con 99.9% de calidad y que no involucre un tiempo adicional en el proceso actual. En este trabajo se presenta una propuesta de un sistema de visión automático con ayuda de un sistema de visión CV-X 300, donde a partir de la determinación de los puntos de control del proceso se establecerán las condiciones de juicio que estarán integradas en los diferentes programas desarrollados en el software de simulación CV-X. Es importante mencionar que estos programas pueden ser ejecutados para evaluar el

proceso semiensamblado o el producto terminado. Para ello se considera la colocación fija del sistema de visión CV-X 300, procurando que factores externos no desenfoquen o manipulen la cámara CA-035C y así asegurar que se cumpla con la calidad deseada.

IV. Resultados

En este apartado se presenta el desarrollo de los programas realizados y la ejecución de los mismos en donde se determina la aceptación o rechazo de la estructura de Lego® en función a los requerimientos establecidos, para esto, se cargaron un total de 32 imágenes de piezas Lego® con diferentes escenarios en cuanto a los requerimientos de calidad. También fue necesario registrar la pieza "maestra" la cual es la pieza base que cumple todas las condiciones de calidad.

4.1.Posición de la pieza ensamblada

En este primer programa se evalúa que el ensamble realizado corresponda a una estructura en forma de "escalera", es decir que las alineaciones de las piezas ensambladas estén acomodadas por el lado izquierdo (ver Figura 1). Para detectar esta característica se utilizó la Herramienta ShapeTrax3, la cual permite detectar la porción más similar a la información de perfil registrada. El resultado de aplicar esta herramienta es el valor de correlación del objeto, es decir, el porcentaje de coincidencia. En la Tabla 1, se presenta la selección del área de trabajo de la pieza Lego® y los parámetros considerados para evaluar la característica de posición.

Tabla 1. Ajuste de área de trabajo y condiciones de juicio.

Ajuste de área de trabajo	Condiciones de juicio
	[Límite máximo] y [Límite mínimo] de Recuento = 1. Apartado de porcentaje de coincidencia máximo = 99.99% y un valor mínimo de 80% 
El área verde delimita el área de análisis y ésta debe abarcar toda la estructura de Lego®.	Los límites fijan la posición única entre patrones existentes, en este caso el valor de "1" indica que la imagen registrada como "imagen maestra" es el patrón correcto. El porcentaje de coincidencia indica la similitud al comparar las imágenes de las estructuras de Lego®. Se consideró un 80% como límite inferior, considerando que puede haber una ligera variación en la posición fija de la imagen de la pieza y aun y así cumplir el requerimiento de estructura de escalera.

En la Figura 8 se presentan los resultados de la evaluación de la característica de posición de la estructura con Lego®.



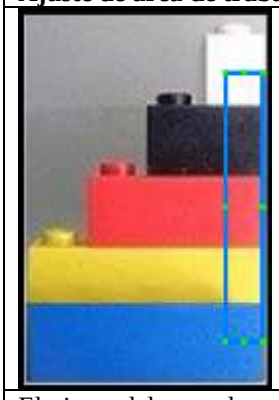
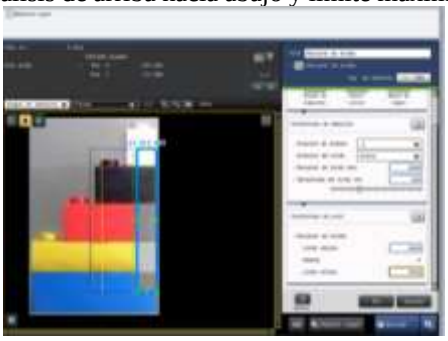
Figura 8. (a) Estructura de Lego® que cumple con la característica de posición y con un 98.64% de coincidencia, (b) y (c) estructura de Lego® que no cumple con la característica de posición y cuentan con un 70.27% y 0% de coincidencia respectivamente

La estructura de Lego® de la Figura 8 (a), presenta un porcentaje de coincidencia del 98.64% por lo tanto es aceptado. A pesar de que la estructura de Lego® de la Figura 8 (b) cumple con la posición de ensamble en forma de escalera, se observa el borde de salida de la pieza 1 (color azul). Por último, con la programación de esta característica también es notable identificar problemas serios del ensamble, tal y como se muestra en la Figura 8 (c), ya que prácticamente el ensamble está mal realizado y no cuenta con la estructura de escalera solicitada, en ese caso el porcentaje de coincidencia es del 0%.

4.2. Cantidad de piezas que conforman la estructura

En este segundo programa se evalúa que la estructura de Lego® esté conformada por 5 piezas. Para lograr configurar la característica de los márgenes entre piezas en el programa de inspección, se utilizó la Herramienta Borde. Esta herramienta permite detectar los múltiples bordes en la región de inspección para expresar cuantos son. En este caso la estructura de Lego® está conformada por 4 bordes, delimitados por la unión de las 5 piezas que conforman el ensamble. En la Tabla 2, se presenta la selección del área de trabajo de la pieza Lego® y los parámetros considerados para evaluar esta característica.

Tabla 2. Ajuste de área de trabajo y condiciones de juicio.

Ajuste de área de trabajo	Condiciones de juicio
	Dirección de análisis de arriba hacia abajo y límite máximo y mínimo = 4 
El ajuste del recuadro azul abarca los 4 bordes que conforman el producto ensamblado, conformado por la unión de las cinco piezas.	La flecha en dirección de análisis, la cual puede ser: arriba hacia abajo, de abajo hacia arriba, de izquierda a derecha o de derecha a izquierda; especifica que el programa verificará en la dirección indicada, para este caso se analizarán el sentido de los bordes en dirección de arriba hacia abajo, para especificar que los bordes se forman en una unión vertical, adicional a esto, hay que establecer el límite mínimo y máximo de bordes, para esto caso se ha considerado de 4.

En la Figura 9 se presentan los resultados obtenidos de la evaluación de la característica de bordes.



Figura 9. (a) Estructura de Lego® que cumple con la característica de bordes, (b) y (c) estructura de Lego® que no cumple con la cantidad de bordes.

En la Figura 9 (a) se observa que, la pieza es aceptada y en el recuento de bordes marca el número 4, eso significa que ha detectado cuatro bordes, mientras que, en la Figura 9 (b) se observa que la pieza es rechazada y en el recuento de bordes marca 3, eso es porque detecta el borde de la pieza 1 (color azul), de la pieza 2 (color amarillo) y el borde de ensamble de la pieza 2. Es importante mencionar que la efectividad de esta herramienta depende de la ubicación de la pieza a evaluar, esa es la razón por la cual en la pieza maestra no se observan los bordes de salida de la pieza 1 (color azul). En la Figura 9 (c) es evidente que el problema de detección de bordes se debe al ensamble de la pieza, a pesar de que el programa detecta 3 bordes, estos no corresponden a los bordes de las 5 piezas ensambladas. Es posible que se detecten cuatro bordes de la pieza y que ésta se encuentre mal ensamblada, en el tercer programa se especifica el ancho de borde para complementar esta característica.

4.3.Ancho de borde

El tercer programa desarrollado está enfocado a medir el ancho de los bordes entre dos bordes, es decir, dos piezas ensambladas, esta evaluación es realmente muy práctica si se quiere establecer una holgura aceptable entre las piezas ensambladas, evitando que ocurra un desensamble por la manipulación de la estructura. Para evaluar esta característica se utilizó la herramienta Medir Ancho y la subselección Ancho del borde. En la Tabla 3, se presenta la selección del área de trabajo de la pieza Lego® y los parámetros considerados para evaluar la característica de ancho de borde.

Tabla 3. Ajuste de área de trabajo y condiciones de juicio.

Ajuste de área de trabajo	Condiciones de juicio
	La dirección de análisis del borde se considera de arriba hacia abajo y el límite máximo del ancho de borde de 10 pixeles más al medido y un límite mínimo de 10 pixeles por debajo del medido. 
El ajuste del área delimitado por el recuadro azul debe abarcar el espacio establecido por dos bordes para realizar la medición del ancho de las piezas que conforman ese borde.	La dirección colocada del análisis de borde se considera de arriba hacia abajo, ya que se evaluará el borde entre una pieza y otra, es decir, se analizará la unión entre piezas. Cuando se registra la pieza maestra, se establece el borde de ancho aceptable, los límites máximos y mínimos corresponden a la holgura aceptable entre piezas.

En la Figura 10 se presentan los resultados de la evaluación de la característica de ancho de borde de la estructura con Lego®.

(a) (b)



Figura 10. (a) Estructura de Lego® que no cumple con la característica de ancho de bordes y (b) estructura de Lego® que cumple con el rango establecido para ancho de borde.

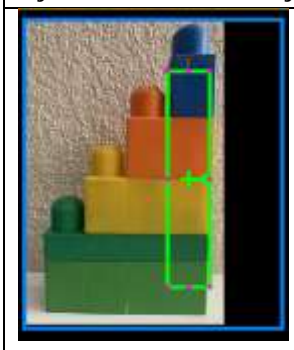
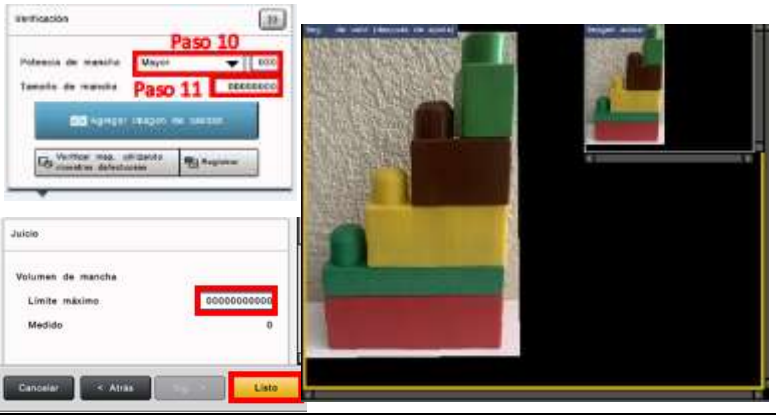
En la Figura 10 (a) la pieza está rechazada porque el programa detecta un borde extra entre la pieza 3 y 2 ya que el ensamble está mal realizado, eso ocasiona que el rango medido no esté dentro de los límites establecidos (5.56%), por otro lado, en la Figura 10 (b) si cumple el requerimiento de calidad especificado de acuerdo con el valor medio de la pieza maestra.

4.4.Patrón de colores repetidos

El cuarto programa se enfoca en la selección de piezas buenas y malas de acuerdo con el cambio de tono, para esto se usó la

herramienta de Inspección de enseñanza automática (PatternTrax) la cual permite detectar imágenes diferentes a las de calidad como defectuosas, esto funciona mediante la detección porciones similares utilizando el cambio de tono, lo cual se conoce como volumen de mancha, y detectará aquellas imágenes que estén dentro del rango establecido de variación del tono. En esta herramienta se deben de tener al menos 30 imágenes para poder crear el patrón de enseñanza de calidad, para poder establecer la tolerancia de la imagen, no es necesario agregar todas las combinaciones de colores existentes. En la Tabla 4, se presenta la selección del área de trabajo de la pieza Lego® y los parámetros considerados para evaluar las tonalidades.

Tabla 4. Ajuste de área de trabajo y condiciones de juicio.

Ajuste de área de trabajo	**Condiciones de juicio**
	[Potencia de mancha]>30, [Tamaño de macha] =0, [Límite máximo] para el volumen de mancha = 0 
El recuadro verde corresponde al área donde se quieren buscar las características en este caso, es suficiente con seleccionar el área donde se ve la unión de cada pieza que conforma la estructura.	El parámetro de potencia de mancha indica la porción de densidad a evaluar entre menor sea el valor es menor la porción de detección, por otro lado, el tamaño de la mancha indica el área de la mancha que se considera como defectuosa; al considerar un valor igual a cero significa que cualquier porción de densidad superior a cero, indica que hay tonalidades similares, por lo tanto, la pieza se descarta. El volumen de mancha juzga cuántas porciones diferentes a la imagen de calidad existen dentro de la imagen a analizar, al tener un valor de cero indica que debe haber cero porciones similares de acuerdo a su tonalidad. El valor en volumen de mancha nos indicará la densidad de coincidencia entre tonalidades.

En la Figura 11 se presentan los resultados de la evaluación de la característica de tonalidades de la estructura con Lego®.



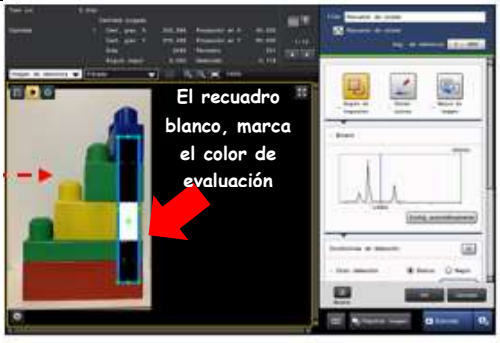
Figura 11. (a) Estructura de Lego® que cumple con la característica de densidad y (b) estructura de Lego® que no cumple con el volumen de ancho establecido en la densidad.

En la Figura 11 (a), se observa que la estructura cumple los parámetros de calidad, a pesar de que la pieza 1 y 2 tienen patrones similares en sus colores, el valor de volumen de mancha es cero. En la Figura 11 (b) la estructura no cumple con el patrón de colores establecidos, ya que hay repetición en los colores verdes (pieza 2 y 4). El valor correspondiente a volumen de mancha, marca un valor de densidad de coincidencia superior a cero, lo que indica que hay similitud en los colores de las piezas 2 y 4.

4.5. Cantidad de patrones de colores repetidos

En el programa anterior se determinó la aceptación o rechazo de piezas por tonalidades de colores repetidas, pero, a veces es necesario determinar cuántas piezas del mismo color se han repetido en una misma estructura. Para evaluar esta característica se usó la herramienta Recuento y Clúster. Esta herramienta permite extraer los colores de las piezas y con ello hacer un recuento de cuántas veces se presenta este color dentro de la escena. En la Tabla 5, se presenta la selección del área de trabajo de la pieza Lego® y los parámetros considerados para evaluar la cantidad de colores repetidos.

Tabla 5. Ajuste de área de trabajo y condiciones de juicio.

Ajuste de área de trabajo	Condiciones de juicio
	Extracción de color, se selecciona el color que se quiere evaluar, en este caso azul. Límite máximo = 1 y límite mínimo = 0. 
El recuadro azul hace el ajuste del espacio de inspección abarcando las 5 piezas, de esta manera se delimita el área para realizar la extracción de los colores.	Al realizar la extracción de color y seleccionarla se van ajustando los parámetros de tono, saturación y brillo, esto ayuda para ser aún más específicos en la selección de tonalidad deseada. El valor de límite máximo igual a 1 (ya que la restricción a cumplir es que en el ensamble no existan colores repetidos en las piezas), el límite mínimo será igual a 0 (ya que existe la posibilidad que ese color no esté presente dentro del ensamble).

Es necesario repetir este procedimiento para cada posible color a encontrarse dentro de la estructura.

En la Figura 12 se presentan los resultados de la evaluación de la característica de tonalidades de la estructura con Lego®.

(a) (b)



Figura 12. (a) Estructura de Lego® que si cumple con el patrón de colores establecidos y (b) estructura de Lego® que no cumple con el patrón de colores establecidos.

Se observa que la estructura en la Figura 12 (a) es aceptada y en ese caso, en la leyenda de cantidad detecta una pieza color azul (esto depende del tipo de selección de color que se haya realizado). Mientras que, la Figura 12 (a) la pieza es rechazada y esto debido a que hay dos piezas de color verde, en el apartado de cantidad, y en la leyenda medido, establece la cantidad de piezas encontradas.

4.6.Evaluación de la adaptación del sistema de control visual a la línea

La propuesta del sistema de control visual viene acompañada con una propuesta de redistribución de línea en U, en la que se pretende adaptar la cámara para la captura de imágenes en las estaciones de trabajo, asegurando que no haya traslados adicionales para realizar las pruebas de inspección. El laboratorio en el cual se están desarrollando estas pruebas experimentales e incorporando nuevas tecnologías se encuentra en una fase inicial, por lo que a trabajos a futuro se pretende integrar el sistema de visión con un mecanismo de accionamiento por pistones para la selección de piezas malas y buenas a partir de la señal emitida por el sistema de visión. La disposición final del equipo debe garantizar que no hay fallas por error humano al manipular el equipo, esto se puede lograr mediante un adecuado sistema de sujeción de la cámara a la altura adecuada para el registro de las imágenes de las piezas a evaluar.

Por otro lado, el tiempo de transferencia es de 16.5 milisegundos (ms), es decir aproximadamente puede tomar 50 fotos por segundo y realizar su ejecución, por lo que, mientras la velocidad de ensamble no supere ese tiempo, el proceso de inspección no involucra un tiempo adicional. Por último, es importante resaltar que, acompañado de la incorporación de nuevas tecnologías bien la reasignación de funciones, una vez que el proceso se ha automatizado, se sugiere que el operador encargado de la estación de calidad funja como inspector general del proceso y sea el encargado de supervisar el funcionamiento del sistema.

4.7.Análisis de resultados

Con este sistema de control de calidad se evalúan cuatro criterios de aceptación, es importante mencionar que éstos fueron los criterios establecidos para la estructura de Lego® y la complejidad de los programas desarrollados dependen precisamente de la definición éstos y que pueden ser tomados como referentes para criterios de calidad en un sistema real a nivel industrial ya que la inspección básica de detección, ausencia, forma y color son parámetros básicos en la geometría de piezas.

El primer criterio considerado es cantidad de colores (variedad de colores) y repetición de patrones: existe una variedad de colores y tonalidades en referencia a la materia prima, de esta manera uno de los errores más comunes que se presentan al momento de ensamblar corresponde a que el producto terminado contiene piezas del mismo color, lo que da origen al incumplimiento de uno de los criterios de calidad (no repetición de colores), al utilizar este sistema, permite detectar el producto que contenga ensamble con piezas de colores iguales y eliminar dicho error.

El siguiente criterio considerado es el ancho del borde, con el cual se busca verificar que las piezas sean ensambladas adecuadamente y no se desensamblen durante el proceso de fabricación, como efecto de la manipulación de las piezas, permitiendo de esta manera, reducir la cantidad de piezas defectuosas que podrían llegar al área de producto terminado.

Otro criterio tomado en cuenta es la estructura, con el que se busca verificar que las piezas cumplan con la forma solicitada, es decir que todas las piezas presentan la estructura en forma de escalera alineada a la izquierda, este es un error muy común en el proceso manual ya que a simple vista es muy fácil confundir el ensamble alineado a la izquierda o derecha si la estructura cumple los dos criterios mencionados anteriormente.

El último criterio considerado corresponde a la posición de la pieza, un error difícil de detectar en la producción ya que es muy notorio hasta que la pieza está terminada. La pieza 1 (pieza base) es más ancha que las demás piezas y tiene dos lugares para el ensamble, al controlar este criterio es posible asegurar que las piezas lleven la posición adecuada en la base de la pieza y que el ensamble del producto terminado sea el correcto.

Con la aplicación de este sistema de control de calidad se busca asegurar el 99.9% de las piezas producidas, por medio de los 4 criterios de aceptación que finalmente se pueden agrupar en los siguientes aspectos:

- Niveles, estructura y posición del ensamble, el cual permite verificar que las piezas sean correctamente ensambladas, cumpliendo con la estructura de 5 piezas, forma de escalera y holgura mínima entre ellas, los cuales son inspeccionados por medio de los programas de posición, bordes y ancho de borde las piezas que constituyen el ensamble, a través de sistema de visión.
- Código de colores, el cual permite verificar que las piezas no presenten una repetición de colores en un producto terminado derivado de la variedad de colores existentes, el cual es analizado por medio de los programas de cantidad de patrones de colores repetidos y patrones.

De esta forma se puede determinar que el sistema de control permite verificar que se cumplan con los criterios no solo de posición, forma y estructura de las piezas sino también referencia a los patrones derivado del código de colores, siendo un factor importante que muchas veces la realización del mismo por un operario puede ser no verificado en su totalidad, dando oportunidad al sistema de visión de entrar como un elemento importante durante el proceso de análisis de calidad. La

incorporación de este sistema al proceso de ensamble no solo permite mejorar la calidad del producto sino también reforzar el conocimiento del mismo y desarrollar nuevas habilidades entre operadores, esto, de acuerdo con García (2017) permite duplicar la confiabilidad y disminuir en menos de una cuarta parte la probabilidad de cometer un error.

Los operadores y supervisores presentan un factor de fatiga física y mental que se hace más notorio cuando se tienen jornadas de trabajo largas lo que ocasiona el incremento de errores (Salas et al. 2017), lo que se puede traducir finalmente a que existan piezas defectuosas, posición o color, que provoca que los niveles de calidad disminuyan; por lo cual este sistema de control permite asegurar que no susciten defectos durante el proceso de ensamble y con ello permitir la reducción de fatiga en los supervisores (inspectores) derivado de la inspección de las piezas.

Por último, se puede afirmar que se estableció una secuencia metodológica a partir de la definición de los puntos de control y la asociación de las herramientas del equipo de visión CV-X® para dar respuesta a los requerimientos de control. Al llevar a cabo la experimentación se puede verificar el cumplimiento de los límites establecidos de acuerdo con las características establecidas de: posición, color y forma.

V. Conclusiones

Las pruebas experimentales permitieron obtener resultados satisfactorios, ya que al incorporar los puntos críticos de control a las condiciones de juicio del software de simulación CV-X, versión 5.3 se pudieron hacer corridas para evaluar las características de las piezas ensambladas y establecer la situación de aceptación o rechazo.

El sistema permite recopilar y detectar información relevante del proceso como es el ancho de borde, un defecto de calidad cuando la pieza no está debidamente ensamblada y es de difícil detección al ojo humano, sobre todo cuando se está realizando el proceso de ensamble con factores externos como presión y tensión. La holgura del borde entre piezas sea significativa porque es posible que se presente un desensamble por la manipulación del producto.

Una de las ventajas más notorias del sistema propuesto es que permite contar con información relevante en tiempo real y ayuda a la toma de decisiones para la mejora del proceso sin que esto implique incremento en el tiempo de ensamble. Esta situación se presenta principalmente en la recopilación del conjunto de código de colores, ya que, el sistema permite identificar la cantidad de colores por pieza ensamblada, esa información puede ser utilizada como retroalimentación a la estación de materia prima y determinar secuencias óptimas de piezas a ingresar para realizar el ensamble y evitar el desabastecimiento de piezas y repetición de colores.

El resultado de las pruebas experimentales demostró que el sistema puede ser utilizado no únicamente para realizar pruebas de inspección de acuerdo con los requerimientos establecidos, sino que además con adecuaciones en el sistema de captura de información y una interfaz de usuario intuitiva, puede ser empleado para crear condiciones que permitan mejorar el proceso significativamente.

Por último, no se puede dejar de lado, el enfoque de adopción de estas nuevas tecnologías por parte del personal encargado del proceso, en donde esto involucra, mayor capacitación y desarrollo de nuevas habilidades para pasar de ser un operador que realiza actividades repetitivas a un encargado de supervisar el funcionamiento de la línea de ensamble y gestor de toma de decisiones.

En esta investigación se considera necesario incluir mecanismos de definición de umbral, con el objetivo de poder establecer las características de los valores para rechazo o aceptación de piezas en función a un análisis estadístico.

Referencias

Arellano, H., Mata, R., Zelada, R. (2007). "Separador de Tubos para Máquina KATAKEN". *Conciencia Tecnológica*, 34, pp. 68-72.

Arróniz, L., Juárez, C., Martínez, I., (2019). "Automated Fault Detection and Diagnostics for Aluminum Threads Using Statistical Computer Vision". *Research in Computing Science.* 148(4), pp. 29-38.

Bachicha, M., & Bartlett, G. (2016). "A Theoretical Approach for using an Integrated Vision System to do Quality Checks during the Production of Thermal Batteries". *Conference Proposed for presentation at the 47th Power Sources Conference held* June 13-16, 2016 in Orlando, Florida.

Balodis, A., & Grabusts, P. (2017). "Object recognition methods in computer vision using image processing library EMGU CV. Human. Environment. Technologies". *Proceedings of the Students International Scientific and Practical Conference, 0*(21), 41-46. doi:https://doi.org/10.17770/het2017.21.3582.

Demčák, J., Husár, J., and Hladký, V. (2021). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1199, *The 26th International Slovak-Polish Scientific Conference on Machine Modelling and Simulations (MMS 2021)* 13th-15th September 2021, Bardejovské Kúpele, Slovak Republic.

García, O. (2017). "Análisis de confiabilidad humana del personal de una planta de generación eléctrica". *VII Congreso mundial de mantenimiento y gestión de Activos.* Centro de Convenciones Cartagena de Indias - Cartagena (CO). [en línea].

González, A., Ramírez, A., Padilla, J. y Morales, R. (2013). "Sistema basado en visión para inspección del tipo ausencia/presencia de subensambles automotrices". *Científica*. 1 (17), pp. 29-37. Disponible en https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61428315004

Krüger, J., Wang, L., Bauernhansl, T., Carpanzano, E., Makris, S., Fleischer, J., Reinhart, G., Franke, J., Pellegrine, S. (2017). "Innovative control of assembly systems and lines". *CIRP Annals.* 2 (66), pp. 707-730. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.010

Ng, C.K., Wu, CH., Ip, W.H., Chan, C.Y. y Ho, G.T.S (2011). "A Real Time Quality Monitoring System for the Lighting Industry: A Practical and Rapid Approach Using Computer Vision and Image Processing (CVIP) Tools". *International Journal of Engineering Business Management*. 3 (4), pp. 14-21.doi:10.5772/45670

Miranda Rivera Luis (2006), *SEIS SIGMA: Guía para principiantes*, Primera Edición, Editorial Panorama, CDMX, México.

Muhammad, A., Muhammad, S., Asad, R. y Haider, A. (2018). "A unified framework for automated inspection of handheld safety critical devices in production assemblies". *Future Generation Computer Systems*. 88, pp. 342-356. https://doi.org/10.1016/j.future.2018.05.072

Rishi, K., Omkar, P., Karthik, N., Kuldip, S. y Rajneesh, K. (2021). "A Machine Vision-based Cyber-Physical Production System for Energy Efficiency and Enhanced Teaching-Learning Using a Learning Factory". *Procedia CIRP*. 98, pp. 424.429. https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.128.

Reséndiz, J., Zavala, J., Castillo, E. (2011). "Técnica para medir el desgaste de una herramienta de corte utilizando un sensor láser de desplazamiento". *10º Congreso Nacional de Mecatrónica*. Noviembre 3 y 4, 2011. Puerto Vallarta, Jalisco.

Salas K., Madriz C., Sánchez O., Sánchez B., Hernández J. (2017). "Factores que influyen en errores humanos en procesos de manufactura moderna". *Tecnología en Marcha.* 31(1), pp. 22-34. Disponible en: http://dx.doi.org/10.18845/tm.v31i1.3494

Świłło, S. J., Perzyk, M.(2013). "Surface casting defects inspection using vision system and neural network techniques". *Archives of Foundry Engineering*. 13 (4), pp. 103-106.