

CIATEQ, A. C. Centro de Tecnología Avanzada  
Dirección de Posgrado



*Optimización de productividad en líneas de producción  
para sensores automotrices aplicando el Internet de las  
Cosas en sistemas de visión*

TESIS QUE PRESENTA

**Ing. Daniel Estrada Campos**  
**Asesor: Dr. José Martín Melchor Leal**

Para obtener el grado de

**Maestro en**  
**Manufactura Avanzada**

Aguascalientes, Aguascalientes  
octubre, 2021

## **CONFIDENCIALIDAD DE LA INFORMACIÓN**

Debido a derechos de privacidad de información proveniente de Sensata Technologies Aguascalientes, se omitieron las imágenes e información detalla de los elementos del sensor manufacturado.

## CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR

The World Depends on Sensors and Controls



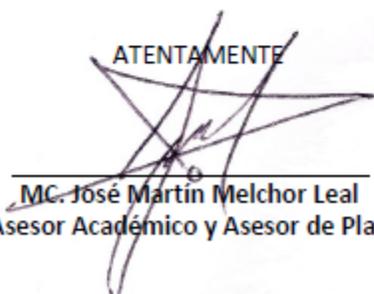
### SENSATA TECHNOLOGIES DE MEXICO

Aguascalientes, Ags., 7 de septiembre del 2020

Mtro. Geovany González Carlos  
Coordinador Académico de Posgrado  
CIATEQ, A.C.

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del Ing. Daniel Estrada Campos, una vez revisado su Proyecto Terminal de tesis, titulado "Optimización de productividad en líneas de producción para sensores automotrices aplicando el internet de las cosas en sistema de visión" **autorizo** que el citado trabajo sea presentado por el alumno para su revisión, con el fin de alcanzar el grado de **Maestro en Manufactura Avanzada**.

Sin otro particular por el momento, agradezco la atención prestada.

ATENTAMENTE  
  
MC. José Martín Melchor Leal  
Asesor Académico y Asesor de Planta

## CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR



**Administración General de Auditoría Fiscal Federal**  
Administración Central de Operación de la Fiscalización  
Nacional

Ciudad de México, 07 de septiembre de 2021.

Dr. Oscar Hernández Uribe  
Director de Posgrado  
CIATEQ, A.C.

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal del alumno **DANIEL ESTRADA CAMPOS**, cuyo título es:

**"OPTIMIZACIÓN DE PRODUCTIVIDAD EN LÍNEAS DE PRODUCCIÓN PARA SENSORES  
AUTOMOTRICES APLICANDO EL INTERNET DE LAS COSAS EN SISTEMAS DE VISIÓN"**

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con el alumno, y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

Atentamente,

Firma

M. en I. Víctor Vargas Baeza



## **DEDICATORIA**

Dedico mi tesis de todo corazón a Dios por el tiempo y las oportunidades presentes en mi vida, para continuar logrando las metas propuestas de manera exitosa.

A mis padres por las enseñanzas y los valores inculcados que han repercutido en mi educación personal, académica y laboral.

A mi esposa e hijas por el apoyo, pero sobre todo por la motivación que generan en mi para superarme día a día.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a toda mi familia por todo el apoyo y cariño brindados a lo largo de toda mi vida, ya que me han ayudado y motivado a desarrollarme personal y profesionalmente.

A mi esposa e hijas por el tiempo y espacio dedicados a terminar este gran proyecto de mi vida y desarrollo profesional.

A mi asesor el Doctor Martin Melchor por brindarme su tiempo, apoyo y experiencia para poder concluir este proyecto de manera satisfactoria, así como a mi revisor el Maestro Victor Vargas Baeza.

Al Gerente del área Luis Soria por ayudarme con sus ideas y a conseguir los recursos necesarios para desarrollar la maquina prototipo.

A la institución y docentes de CIATEQ por la oportunidad y apoyos otorgado para para continuar desarrollándome de manera profesional.

\* \* \*

## RESUMEN

La tendencia actual en la fabricación de sensores automotrices es la implementación de los principios de Industria 4.0 para la mejora de productividad y calidad en los procesos de manufactura. Aquí es donde esta investigación hace un vínculo entre el Internet de las cosas (IoT), el uso de herramientas como Lean Six Sigma fomentadas en Industria 4.0 con los sistemas de visión de soldadura por reflujo de circuitos electrónicos. El objetivo es mejorar la productividad y calidad del sensor mediante perfeccionamiento de los sistemas de visión especializados en soldadura por reflujo de circuitos electrónicos aplicados a los sensores automotrices mediante la implementación de las metodologías de Industria 4.0 como el IoT y Lean Six Sigma. El procedimiento empleado Integra un módulo IoT en el sistema de visión para la inspección automática de soldadura por reflujo. El módulo IoT se desarrolló con el software Vision Builder y Labview; se desarrolló un algoritmo que gestiona tanto el tiempo ciclo de la inspección y la cantidad de piezas defectuosas. El módulo IoT envía la información a una base de datos donde posteriormente una plataforma del IoT llamada ThingsBoard.io hace el análisis de los datos y siguiendo la metodología six sigma proporciona resultados en tiempo real para la optimización del proceso. Como resultado se obtiene una significativa mejora respecto a productividad y calidad. Se midió la productividad en partes por hora (PPH) antes de la implementación del módulo IoT, el resultado fue 500 PPH, con 0.5% en defectos de soldadura. Después de implementar el módulo IoT se mejoró la productividad a 682 PPH con una reducción en los defectos al 0.2%. Con lo que se concluye que el sistema implementado proporciona una mejora en la eficiencia del proceso. El nuevo sistema IoT es 30% más eficiente que los sistemas de visión tradicionales para la inspección de soldadura por reflujo. El sistema implementado permite medir el proceso de manera más eficiente y ayuda a tener una reacción más rápida a los eventos que afectan en el corto y largo plazo, ayudando a resolver problemas como tiempos de paro, bajas de tiempo ciclo, bajas de rendimiento, picos de defectos de calidad entre otros.

**Palabras clave:** Tecnología electrónica, Circuitos integrados, Industria 4.0, Internet de las cosas, Sistemas de visión, Lean Six Sigma.

## ABSTRACT

The current trend for the automotive sensors manufacturing is the implementation of the 4.0 Industry basis to improve the performance and quality of the manufacturing process, here is where this research does a link between the Internet of the Things (IoT), the usage of the Lean Six Sigma tools fomented in the Industry 4.0 with the reflow solder vision systems for electronic circuits. The goal is to improve the productivity and quality of the automotive sensors through the improvement of the specialized vision systems for electronic devices applied in the vehicles implementing the Industry 4.0 as the IoT and Lean Six Sigma methodologies. The procedure applied integrates an IoT module in the vision system to the automatic reflow solder inspection. The IoT module was developed with the Vision Builder and Labview software; An algorithm was developed that manages both cycle time and defective parts. The IoT module uploads the data to a data base where the IoT platform called ThingsBoard.io does the data analysis and applying the Six Sigma methodology provide real time information to the process optimization. The result shows a significant improvement of the productivity and quality. The productivity was measured before of the IoT module implementation where the information showed 500 pieces per hour (PPH) and 0.5% of defective parts for solder process, after the IoT module implementation the improvement was 682 PPH with a reduction of the defective parts to 0.2%. Based on this data the conclusion is that the implementation of the new system provides a better shape regards process efficiency. The IoT server allows easily to apply the Lean Six Sigma methodology. The new IoT system is 30% more efficient than the traditionally reflow solder vision systems. The implemented system allows to measure the process efficiently and helps to react faster to the events that affects in short and long term solving the issues as cycle time, downtime, low yield, defective parts, etc.

**Keywords:** Electronic technology, Integrated circuits, Industry 4.0, Internet of the things, Vision systems, Lean Six Sigma.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN .....	vi
ABSTRACT .....	vii
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS .....	xiv
GLOSARIO .....	xv
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. ANTECEDENTES .....	1
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN .....	2
1.4. OBJETIVOS.....	3
1.4.1. Objetivo general.....	3
1.4.2. Objetivos específicos .....	3
1.5. HIPÓTESIS.....	4
2. MARCO TEÓRICO .....	5
2.1. INSPECCIÓN VISUAL AUTOMÁTICA.....	5
2.2. SISTEMAS DE VISIÓN.....	6
2.2.1 Objetivos de los sistemas de visión.....	7
2.2.2 Elementos de un sistema de visión .....	7
2.3. INTERNET DE LAS COSAS ( <i>INTERNET OF THINGS</i> ) .....	19
2.3.1 Plataformas del Internet de las cosas.....	22
2.3.2. Industria 4.0 .....	24
2.3.3. Ventajas de Industria 4.0.....	26
2.3.4. Principales disciplinas de Industria 4.0 .....	28
2.4. LEAN SIX SIGMA .....	29
2.4.1 Introducción.....	29
2.4.2 ¿Qué es Lean Six Sigma? .....	30
2.4.3 Comparación entre Lean y Six Sigma .....	31
2.4.3 Elementos Six Sigma .....	31
2.4.4 Elementos Lean .....	33
2.5 INTEGRACIÓN DE INDUSTRIA 4.0 Y LEAN SIX SIGMA.....	35

2.5.1 Lean Six Sigma 4.0 .....	36
3. PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN .....	38
3.1. ANÁLISIS DEL FLUJO DE SOLDADURA PARA SENSORES P+T .....	38
3.2. MAPA DEL FLUJO DE VALOR .....	40
3.3. ANÁLISIS DEL PROBLEMA.....	41
3.4. SELECCIÓN DE EQUIPO PARA MEDIR DESEMPEÑO DE PRODUCTIVIDAD.....	42
3.5. DESARROLLO DE MÁQUINA PROTOTIPO APLICANDO LOS PRINCIPIOS DEL INTERNET DE LAS COSAS .....	43
3.5.1 Selección de las cámaras .....	43
3.5.2 Selección de ópticas .....	45
3.5.3 Selección de iluminación .....	46
3.5.4 Procesador del sistema de visión .....	46
3.5.5 Diseño de máquina prototipo .....	47
3.5.6 Configuración de máquina prototipo.....	48
3.5.7. Monitoreo de proceso con plataforma <i>ThingsBoard</i> .....	70
4. RESULTADOS .....	73
4.1 MÁQUINA PROTOTIPO .....	73
4.2 PRUEBAS CON MÁQUINA PROTOTIPO .....	73
4.2.1 Primera prueba para medir desempeño actual del proceso de soldadura .....	74
4.2.2 Segunda prueba con reacomodo de operaciones para balanceo de tiempos ciclo .....	77
4.2.3 Tercera prueba en diferente línea de producción y demostración a ingeniería de producto y gerencia .....	80
4.3 COMPARATIVO DE PPH ACTUAL Y CON MÁQUINA PROTOTIPO.....	82
4.4 PRUEBA DE HIPÓTESIS DE PPH ACTUAL CONTRA PPH MEJORADO CON MÁQUINA PROTOTIPO .....	83
4.5 RESULTADOS DE REDUCCIÓN DE DEFECTIVOS CON MÁQUINA PROTOTIPO ...	84
CONCLUSIONES .....	86
RECOMENDACIONES .....	87
APORTACIÓN DE LA TESIS.....	88
APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS.....	89
REFERENCIAS.....	90
ANEXOS .....	93



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Industrias a las que van dirigidos los productos de la compañía.....	2
Figura 2. Componentes de un sistema de visión.....	7
Figura 3. Distancia focal .....	8
Figura 4. Representación gráfica de distancia focal.....	9
Figura 5. Imágenes a diferentes distancias focales .....	9
Figura 6. Lente con anillo de enfoque .....	10
Figura 7. Profundidad de campo .....	10
Figura 8. Diferentes aperturas de diafragma.....	11
Figura 9. Imágenes con misma distancia focal y diferentes tubos de extensión....	12
Figura 10. Calculador de ópticas .....	14
Figura 11. Tamaños de elemento sensor.....	16
Figura 12. Representación gráfica del elemento sensor .....	17
Figura 13. Procesamiento de información de un sistema de visión artificial .....	18
Figura 14. Arquitectura del Internet de las cosas (IoT) .....	21
Figura 15. Esquema de plataforma ThingsBoard.io.....	23
Figura 16. Las 4 revoluciones industriales.....	25
Figura 17. Mapa de proceso.....	38
Figura 18. Mapa del flujo de valor .....	40
Figura 19. Diagrama de integración de módulo IoT.....	43
Figura 20. Cámara Genie Nano M1280.....	45
Figura 21. Calculador de óptica recomendado por proveedor.....	46
Figura 22. Óptica AZ 50mm HR.....	46
Figura 23. Concepto de máquina de inspección prototipo.....	48
Figura 24. Diagrama de integración del sistema de visión aplicando los principios del IoT .....	49
Figura 25. Secuencia para procesamiento de imágenes en Vision Builder .....	50
Figura 26. Captura y configuración de imagen en el software NI MAX .....	52
Figura 27. Confirmación de comunicación con cámaras.....	53
Figura 28. Mensaje notificado a través de función "custom overlay" .....	54
Figura 29. Patrón utilizado para detectar la presencia de pieza .....	55

Figura 30. Configuración de función "Calculator".....	55
Figura 31. Patrón para encontrar pines y región de interés (ROI) para encontrar patrón.....	56
Figura 32. Patrón para encontrar pistas en modulo electrónico y región de interés (ROI).....	57
Figura 33. Herramienta para encontrar bordes y medir distancia entre ellos .....	58
Figura 34. Confirmación de altura de clips respecto a patrón de módulo eléctrico .....	59
Figura 35. Calculadora lógica "Logic Calculator" .....	59
Figura 36. HMI de Sistema de visión .....	60
Figura 37. Secuencia de parte detectada como mala.....	61
Figura 38. Secuencia para apagado de lampara superior .....	62
Figura 39. Inspección en parte inferior de la pieza .....	63
Figura 40. Referencias de piezas aceptables y defectivos (ayudas visuales de instrucciones de trabajo de la estación) .....	64
Figura 41. Reporte de clasificación errónea.....	65
Figura 42. Reporte de precisión .....	65
Figura 43. Resumen del estudio MSA.....	66
Figura 44. HMI para el manejo y registro de información que se mandan a la base de datos.....	67
Figura 45. Control principal de LabVIEW .....	68
Figura 46. Bucle de comando FIFO .....	68
Figura 47. Bucle de comando de secuencia .....	69
Figura 48. Bucle de base de datos .....	69
Figura 49. Bucle de comunicación de PLC.....	69
Figura 50. Panel de monitoreo de tiempo ciclo en tiempo real.....	71
Figura 51. Panel de monitoreo de rendimiento (piezas buenas vs defectivos) en tiempo real.....	72
Figura 52. Máquina de inspección prototipo .....	73
Figura 53. Ubicación de maquina prototipo en primera corrida de prueba .....	75
Figura 54. Gráfica comparativa de tiempo ciclo (actual vs nuevo equipo) .....	76
Figura 55. Tiempos ciclo por operación de proceso de soldadura .....	77

Figura 56. Estación eliminada gracias a la nueva máquina prototipo (sistema de visión) .....	78
Figura 57. Mapa de nuevo proceso con balanceo de tiempos ciclo .....	79
Figura 58. Tiempos ciclo por operaciones de proceso de soldadura con reacomodo de operaciones .....	80
Figura 59. Tiempos ciclo por operaciones de proceso de soldadura con reacomodo de operaciones y en diferente línea de producción (diferente celda) .....	82
Figura 60. PPH demostrado actual (sin máquina prototipo) contra mejora (con máquina prototipo).....	83
Figura 61. Prueba de hipótesis de PPH actual contra PPH mejorado con máquina prototipo .....	84
Figura 62. Comparación de rendimiento (porcentaje de piezas buenas).....	85
Figura B1. Procesador GEVA 300.....	3

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Relación entre distancia focal y tubos de extensión .....	12
Tabla 2. Tablas para calcular ópticas .....	15
Tabla 3. Comparación entre Lean y Six Sigma.....	31
Tabla 4. Tabla comparativa de pasos que agregan y que no agregan valor .....	41
Tabla 5. Información descargada de la base de datos .....	70

## GLOSARIO

**APT:** Transductor de presión automotriz por sus siglas en inglés (Automotive Pressure Transducer).

**AVI:** Inspección visual automática por sus siglas en inglés (Automatic Visual Inspection).

**Bandolier:** Término utilizado para la tira a la cual vienen unidos los clips insertados en el dispositivo APT.

**Big data:** Conjuntos de datos extremadamente grandes que pueden analizarse computacionalmente para revelar patrones, tendencias y asociaciones.

**CPPS:** Sistemas Ciber Físicos de Producción por sus siglas en inglés (Cyber Physical Production Systems).

**CPS:** Sistemas ciber físicos por sus siglas en inglés (Cyber physical systems).

**CSE:** Elemento de detección capacitiva por sus siglas en inglés (Capacitive Sensing Element).

**DMAIC:** Término utilizado en la metodología Six Sigma. Definir, medir, analizar, mejorar y controlar por sus siglas en inglés (Define, Measure, Analyze, Improve and Control).

**FIFO:** Es un acrónimo que significa "primero en entrar, primero en salir".

**IEA:** Agencia Internacional de Energía por sus siglas en inglés (International Energy Agency).

**IIoT:** Internet Industrial de las cosas por sus siglas en inglés (Industrial Internet of Things).

**IoE:** Internet de todo por sus siglas en inglés (Internet of Everything).

**IoS:** Internet de servicios por sus siglas en inglés (Internet of Services).

**IoT:** Internet de las cosas por sus siglas en inglés (Internet of Things).

**MSA:** Análisis de sistema de medición por sus siglas en inglés (Measurement Systems Analysis).

**P+T:** Sensor de presión más temperatura por sus siglas en inglés (Pressure plus Temperature).

**PC:** Computadora personal por sus siglas en inglés (Personal Computer).

**TC:** Tiempo ciclo.

**TIC:** Tecnologías de la información y comunicación.

**Value Stream Mapping:** Mapa del flujo de valor.

# 1. INTRODUCCIÓN

El constante crecimiento industrial demanda el desarrollo de nuevas tecnologías, lo que ha dado como resultado las 4 revoluciones industriales conocidas actualmente. La primera revolución industrial está basada en las máquinas de vapor, la segunda en máquinas alimentadas con electricidad, la tercera en el uso de computadoras y la cuarta revolución industrial basada principalmente en el Internet de las cosas y sistemas intercomunicados a nivel global. Esta última revolución es mejor conocida como Industria 4.0 y actualmente está en pleno auge para el desarrollo de nuevos procesos industriales.

Por esta razón surge el interés de trabajar en este proyecto de investigación, el cual busca mejorar la productividad y calidad en los procesos de soldadura por reflujo utilizados para la manufactura de sensores automotrices a través de la implementación de los principios de Industria 4.0, en específico el Internet de las cosas. Este desarrollo es de gran importancia debido al impacto que este podría generar para la industria manufacturera y en este caso específico en la compañía Sensata Technologies como un representante importante de lo que es la industria manufacturera.

## 1.1. ANTECEDENTES

La compañía Sensata Technologies es un líder mundial y uno de los primeros innovadores en sensores y controles de misión crítica diseñados para hacer que el mundo sea más limpio, seguro y eficiente. Lo que se quiere decir con misión crítica es que son productos esenciales y difíciles de hacer. En los productos de la compañía se encuentran 47,000 productos únicos en muchas aplicaciones, desde sistemas de frenos automotrices hasta controles de vuelo de aeronaves. (Sensata Technologies, Inc., 2020)

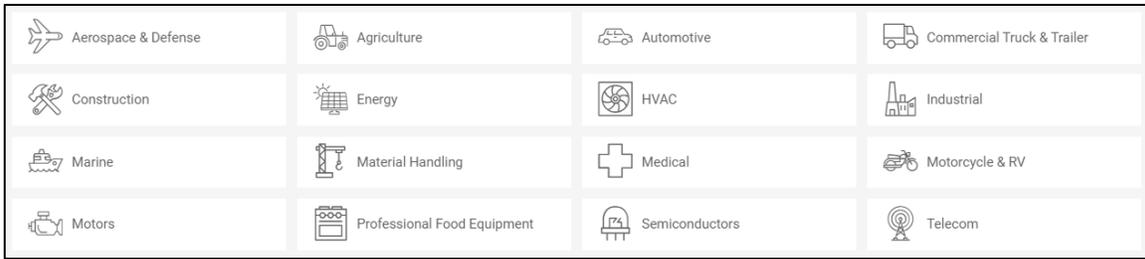


Figura 1. Industrias a las que van dirigidos los productos de la compañía

## 1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En la compañía Sensata Technologies de México en las líneas de ensamble de APT (*Automotive Pressure Transducer*) se tienen problemas de baja productividad en el proceso de soldadura por reflujo de circuitos electrónicos. Se ha identificado este proceso como el cuello de botella pero solo cuando se procesan ciertos modelos en específico conocidos como sensores P+T (*Pressure plus Temperature*) en el cual hay registros de un tiempo de ciclo bastante alto para estos sensores en comparación a los sensores que no son P+T. El PPH (*Piezas por hora*) para dispositivos P+T es de 500 y para dispositivos que no son P+T es de 700, lo que provoca una baja productividad de la línea de producción.

Como principales causas se tienen las siguientes: desbalanceo de carga de trabajo entre operaciones, exceso de operaciones que no agregan valor (inspecciones automáticas y visuales) y ajustes de equipo. Pero la más importante de todas es que no se tienen los medios adecuados para medir el desempeño real del proceso y que permitan al equipo de Ingeniería entender y resolver los problemas de manera efectiva.

## 1.3. JUSTIFICACIÓN

La industria manufacturera está en mejora continua debido al crecimiento de la demanda global y la exigencia de los clientes a un menor costo. Es por lo que, se

necesita trabajar e innovar continuamente para mejorar los procesos y tecnologías en la manufactura de productos. Este estudio busca expandir los conocimientos de la Industria 4.0 como lo es el Internet de las cosas (*IoT*) aplicado en los sistemas de visión para la inspección de soldadura por reflujo en circuitos electrónicos de sensores automotrices.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo general**

Implementar un sistema de visión para la inspección de la soldadura por reflujo en el cual se apliquen los principios del *IoT* y *Lean Six Sigma* para monitorear el desempeño del proceso de soldadura en tiempo real con el análisis de datos como el tiempo ciclo, piezas por hora y defectos de calidad, con la finalidad de mejorar la productividad en esta parte del proceso y la calidad del producto manufacturado.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

Implementar un módulo *IoT* en los sistemas visión para la inspección automática de soldadura por reflujo que permita obtener datos y analizarlos en tiempo real para:

- a) Detectar cuando el TC (Tiempo ciclo) incrementa de forma anormal y controlarlo.
- b) Mejorar la productividad de 500 a 680 piezas por hora mediante un balanceo adecuado del trabajo por operaciones (reduciendo inspecciones visuales por operador).
- c) Reducir los defectos del 0.5% al 0.2% debido a la temprana detección de estos.
- d) Aplicar las herramientas *Lean Six Sigma* para proyectos tanto de calidad como productividad.

## 1.5. HIPÓTESIS

La implementación de un módulo IoT en los sistemas de visión para la inspección automática de soldadura permite mejorar la productividad al menos en un 25% con una disminución de los defectos mediante el monitoreo del desempeño de este proceso en tiempo real.

El módulo IoT para los sistemas de visión puede ser desarrollado mediante el uso del software Labview y el módulo Vision Builder para monitoreo de datos en tiempo real, así como el preprocesamiento de la información en una base de datos mediante la metodología *Lean Six Sigma*.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. INSPECCIÓN VISUAL AUTOMÁTICA

La inspección visual automática (AVI) es considerada como un control de calidad en los procesos principalmente de manufactura que, mediante el reconocimiento de patrones y procesamiento digital de imágenes, determina si un producto no cumple con las especificaciones de producción (Newman & Jain, 1995). El objetivo es garantizar que los dispositivos que aprueben el control de calidad cumplan con las especificaciones establecidas para su fabricación, ya sea para el cliente o normas de regulación. Las especificaciones pueden ser definidas de acuerdo a criterios de estética, seguridad o funcionalidad.

Un sistema AVI diseñado para ser utilizado como control de calidad de un producto, debe considerar las siguientes características:

- Eficiencia. En base a las especificaciones de producción, debe detectar en lo posible todos los defectos de producción y a la vez, rechazar la menor cantidad de productos que si cumplen con las especificaciones "buenos" (Mery, 2002).
- Rapidez. La inspección automática debe tener una velocidad acorde al ritmo del proceso de producción, para que la inspección no sea un cuello de botella en el flujo del proceso (Mery, 2002).

La eficiencia se relaciona con la cantidad de *falsos positivos* y *falsos negativos*. Los falsos positivos hacen referencia a la cantidad de defectos que han sido detectados como malos sin tener fallas y los falsos negativos es la cantidad de piezas defectuosas que fueron detectadas como buenas por el sistema AVI. Lo ideal es que las cantidades sean 0% en ambos casos, pero en realidad esto es muy complicado de lograr (Mery, 2002).

Por lo general, la combinación de los parámetros definidos en los sistemas AVI conlleva una relación entre los falsos positivos y los falsos negativos. Al pretender detectar el 100% de defectos, se puede obtener una gran cantidad de falsos positivos a los que normalmente llamamos falsas alarmas; de igual forma si al tratar

de eliminar todas las falsas alarmas puede que no se detecten algunas fallas incrementando la cantidad de falsos negativos.

En situaciones en las cuales por cuestiones de seguridad el control de calidad debería asegurar que los productos clasificados como "buenos" estén libres de defectos, se ajusta el sistema de inspección para asegurar una baja cantidad de falsos negativos. Cabe mencionar, que el costo económico de esta opción es muy alto, ya que esta estrategia provoca que se eleve la cantidad de falsos positivos, esto podría implicar que se estén desechando algunos de los productos que estén en buen estado y que fueron detectados como "defectuosos".

El cumplimiento de estas dos características (velocidad y eficiencia) hace que mejore directamente el beneficio económico del proceso de manufactura. Hoy en día, cualquier error de detección en un sistema de inspección automática puede ser compensado a través de una inspección visual humana. Si bien se afirma, que la inspección visual de una persona es muy flexible y adaptable a nuevas condiciones rápidamente, también se sabe que, debido a la diferencia que puede existir en la experiencia y capacidad de personas que inspeccionan, así como la monotonía y la fatiga de este trabajo, causan que la inspección visual de una persona sea inconstante en cuanto a eficiencia y la mayoría de las veces poco confiable (Wilson, Greig, Gilby, & Smith, 1996).

## **2.2. SISTEMAS DE VISIÓN**

Un sistema de visión es un dispositivo avanzado con la capacidad de capturar energía electromagnética de cualquier escenario y transformarla en imágenes para que después un procesador pueda hacer la comparación con algunos criterios o características definidas bajo ciertos estándares (Nogué & Antiga, 2012).

También se puede denominar como un sistema para la detección de defectos en el proceso de fabricación, además de detectar defectos antes de agregar valor al dispositivo. Los sistemas de visión no deben denominarse como elementos para mejorar el producto ya que no intervienen para agregar valor en el proceso de manufactura solo sirven para detectar defectos ya producidos.

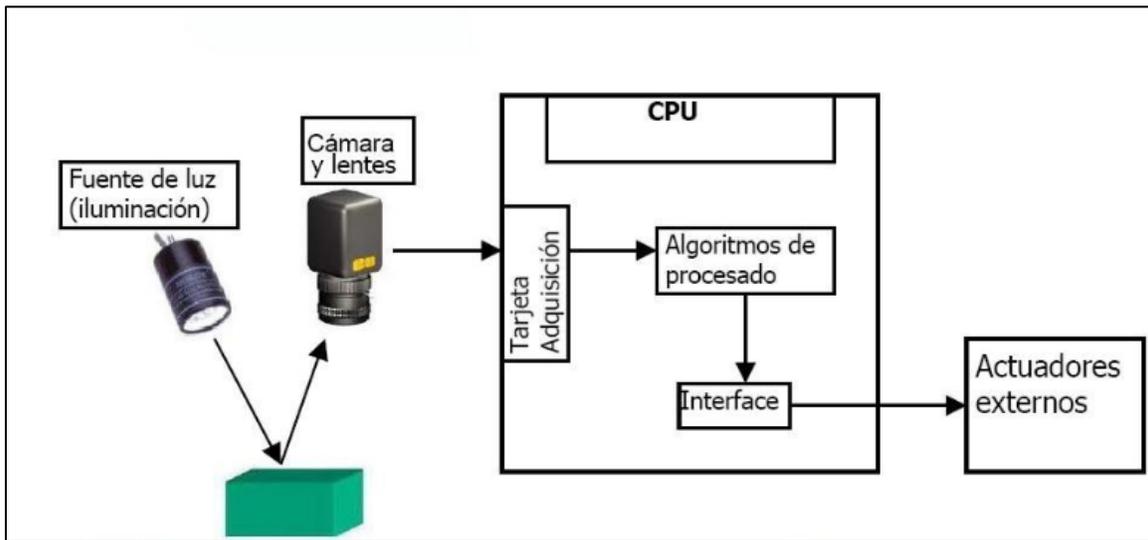
## 2.2.1 Objetivos de los sistemas de visión

Son esencialmente mejorar la calidad y productividad en los procesos de producción, disminuir la cantidad de defectos, cumplir los requerimientos específicos del cliente final, optimizar el rendimiento de los equipos de producción y visualizar, identificar y detectar piezas defectuosas antes de agregar valor a las mismas (Nogué & Antiga, 2012).

## 2.2.2 Elementos de un sistema de visión

Los principales elementos de un sistema de visión son:

- Iluminación
- Ópticas o lentes
- Sensor o cámara
- Sistemas de control o controladores



(Visión Artificial, 2012)

### 2.2.2.1 Iluminación

La iluminación de un sistema de visión es esencial en la resolución de los diferentes escenarios. Se debe considerar que las cámaras adquieren la luz reflejada de las piezas a inspeccionar para ser analizadas. El objetivo principal de la iluminación es

definir la manera en que el sensor de visión vea al dispositivo para definir si reúne las especificaciones definidas. Si se utiliza la iluminación correcta en un sistema de visión, este será fácil de ajustar. De forma contraria, al usar iluminación inadecuada, el sistema de visión puede ser de ajuste imposible.

Algunos de los propósitos de la iluminación son: optimización del contraste, neutralizar las variaciones de iluminación en el ambiente y facilitar el procesamiento de la imagen (Nogué & Antiga, 2012). Se puede incrementar el tiempo de procesado de la imagen con ayuda de filtros por software.

### 2.2.2.2 Ópticas o lentes

El propósito de las ópticas es transmitir la luz a la cámara de manera controlada para adquirir una imagen enfocada del dispositivo a inspeccionar.

Se debe considerar lo siguiente al determinar la lente apropiada para el sistema de visión que se utilizara, los parámetros más importantes son: tamaño del sensor de visión, distancia entre el objeto y la cámara y tamaño del dispositivo o área de visión. Con esta información y usando la fórmula para calcular la distancia focal se puede definir la óptica necesaria de cada aplicación, para esto se deben conocer algunos principios básicos de las ópticas (Nogué & Antiga, 2012).

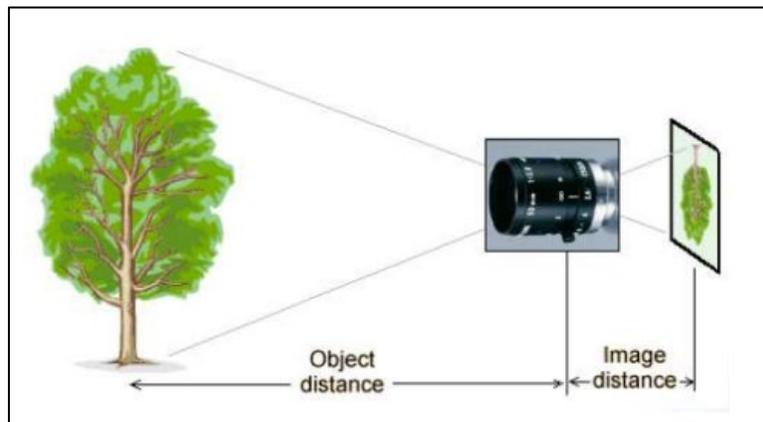


Figura 3. Distancia focal (Nogué & Antiga, 2012)

**Distancia Focal.** Es la distancia en mm relacionada con la distancia entre el sensor y la lente. La imagen debe salir invertida y esto es debido al lente, se invierte la imagen cuando recibe los rayos del sol. El objetivo de la cámara puede tener una distancia fija o variable, esto depende de los tipos de objetivos. Cuando varía la distancia focal podemos obtener un mayor o menor alejamiento del objetivo, conocido como zoom (Nogué & Antiga, 2012).

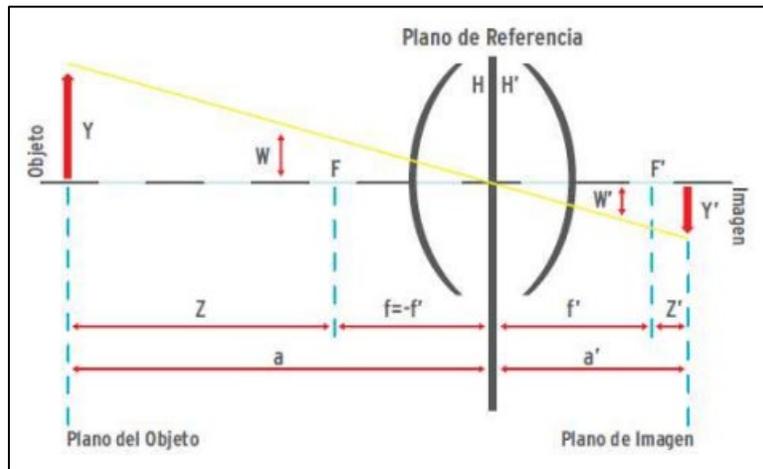


Figura 4. Representación gráfica de distancia focal

Al colocar los lentes a la misma distancia, pero con diferente distancia focal se puede obtener la misma imagen con diferentes tamaños.



Figura 5. Imágenes a diferentes distancias focales (Nogué & Antiga, 2012)

**Foco o enfoque.** Las ópticas que se utilizan en los sistemas de visión pueden tener una distancia focal variable, que es considerada como foco o enfoque. Es de vital importancia que el objetivo a analizar este enfocado correctamente para su análisis. Los rangos en los que una lente puede ofrecer nitidez esta entre una distancia mínima y el infinito, esto depende la distancia focal (Nogué & Antiga, 2012).

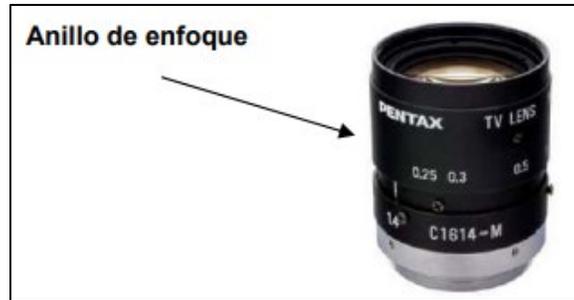


Figura 6. Lente con anillo de enfoque (Nogué & Antiga, 2012)

**Profundidad de campo.** Se define como la distancia en la que el objetivo se observa enfocado. Con una apertura menor del diafragma se observa una profundidad mayor de campo (Nogué & Antiga, 2012).

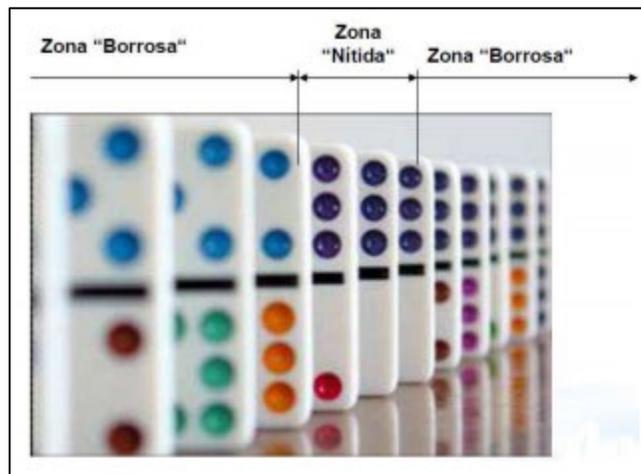


Figura 7. Profundidad de campo (Nogué & Antiga, 2012)

**Apertura de diafragma.** Es un dispositivo que sirve para disminuir la intensidad de luz que entra en la cámara y al CCD (*Charge Couple Device*). Su función es similar a la de un ojo humano que al abrirse o cerrarse permite entrar más o menos luz. La abertura o cierre del dispositivo se conoce como apertura del diafragma y se mide en unidades f (Nogué & Antiga, 2012).

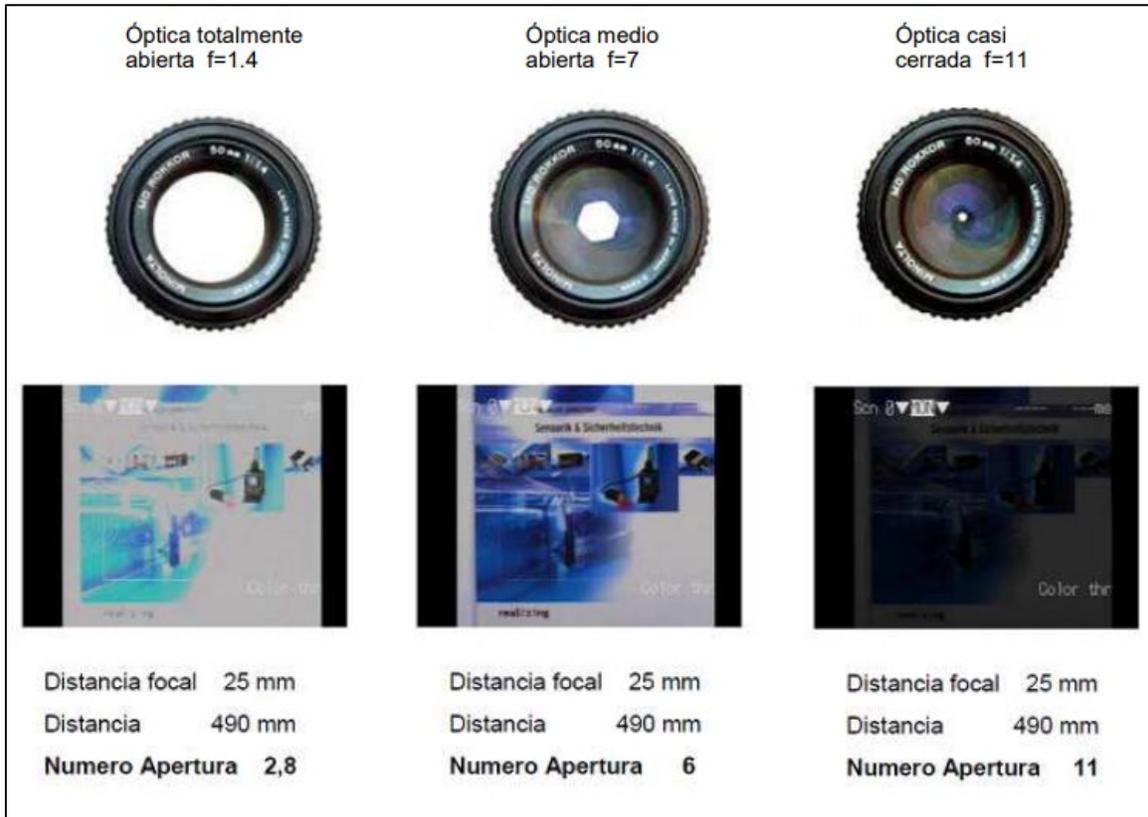


Figura 8. Diferentes aperturas de diafragma (Nogué & Antiga, 2012)

**Tubo de extensión.** Es un anillo ubicado entre la lente y la cámara, que sirve para incrementar la distancia entre ambos. Cuando se inspeccionan objetos pequeños, la mínima distancia de trabajo del objeto puede que no sea suficiente, es aquí cuando se puede utilizar el tubo de extensión para disminuir la distancia de trabajo.

El utilizar el tubo de extensión también tienen algunas dificultades, tales como que no se podrá enfocar al infinito o que el área central de la escena aparezca más

iluminada que en las orillas, por eso es recomendable utilizarlos cuando son realmente necesarios.

La siguiente tabla muestra la relación entre el uso del tubo de extensión y la distancia focal de la óptica. Por ejemplo, con un tubo de extensión de 5 mm y un objetivo de 12 mm se abarca una imagen de entre 20 y 30 mm (Nogué & Antiga, 2012).

Tabla 1. Relación entre distancia focal y tubos de extensión

<b>focal length</b>	<b>12 mm</b>	<b>16 mm</b>	<b>25 mm</b>	<b>50 mm</b>	<b>75 mm</b>
0,5	12 .. 31 cm	22 .. 54 cm	41 .. 129 cm		
1,0	8 .. 15 cm	17 .. 28 cm	32 .. 66 cm		
1,5	6 .. 10 cm	14 .. 20 cm	27 .. 45 cm	75 .. 175 cm	
5,0	2 .. 3 cm	7 .. 8 cm	14 .. 16 cm	43 .. 59 cm	69 .. 125 cm
10,0			9 .. 10 cm	29 .. 34 cm	50 .. 69 cm
15,0				23 .. 25 cm	41 .. 50 cm
20,0					35 .. 41 cm
25,0					30 .. 35 cm

(Nogué & Antiga, 2012)

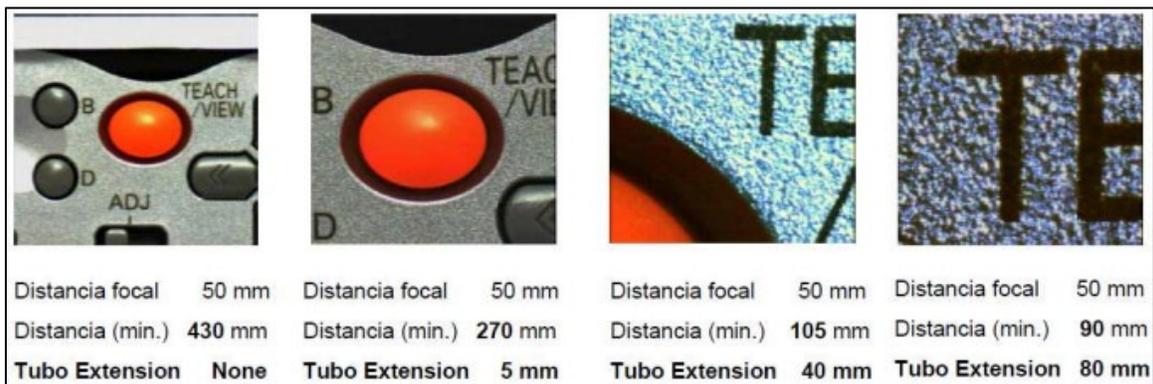


Figura 9. Imágenes con misma distancia focal y diferentes tubos de extensión (Nogué & Antiga, 2012)

### 2.2.2.3 Selección de ópticas

#### Opción 1: Por medio de fórmula

Características que se necesitan para la selección correcta de la distancia focal.

b = Tamaño del sensor CCD

B = Anchura del objeto

f = Distancia focal

D = Distancia de objetivo

c= Factor de conversión del tamaño del sensor

Ecuación 1. Fórmula para selección de distancia focal.

$$f = \frac{b * D}{B} * c$$

Ejemplo: el ancho de un sensor CCD de 1/3" es de 4,8 mm; distancia de trabajo = 300 mm; Campo de visión de la imagen 85mm.

Ecuación 2. Ejemplo de cálculo para selección de distancia focal

$$f = \frac{b * D}{B} * 0,72 = \frac{4,8mm * 300mm}{85mm} * 0,72 = 12,2mm \approx 12mm$$

## Opción 2: Los proveedores también facilitan programas para calcular el objetivo ideal

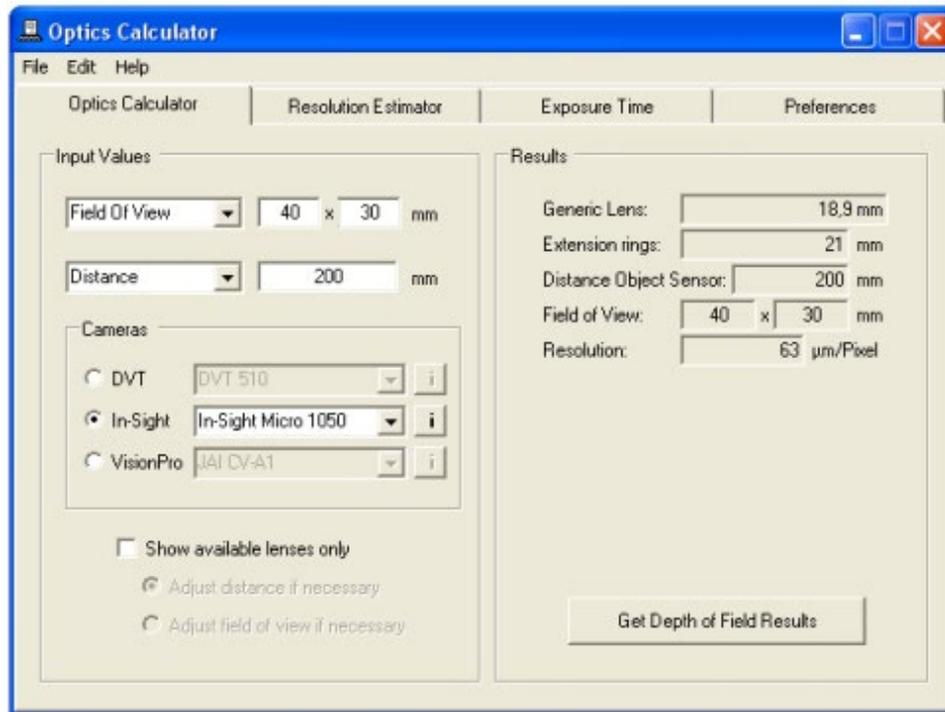
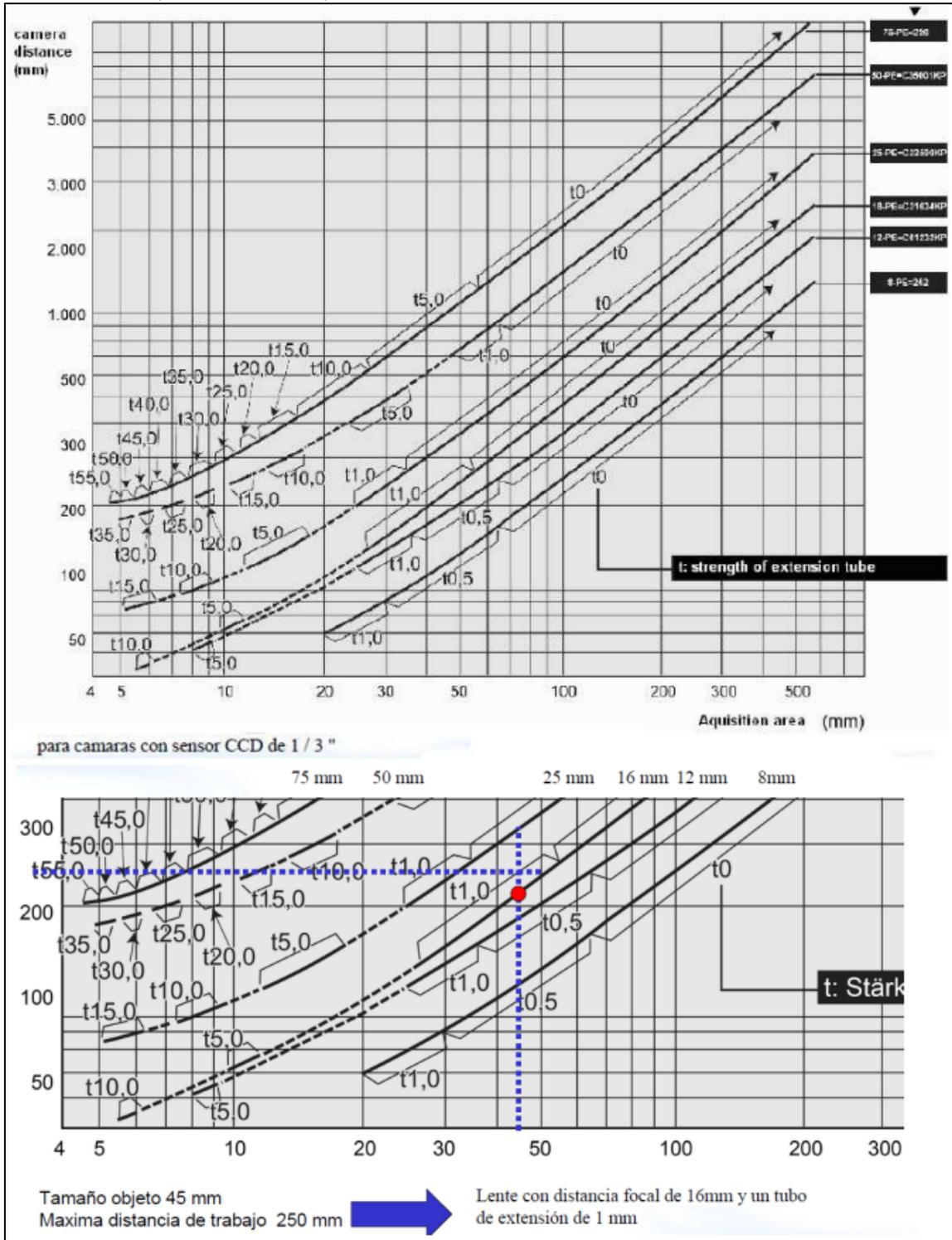


Figura 10. Calculador de ópticas  
(Nogué & Antiga, 2012)

### Opción 3: Utilización de tablas de cálculos

Tabla 2. Tablas para calcular ópticas



### 2.2.2.4 Cámara o sensor

El objetivo de los sistemas de visión artificial es capturar la escena en el sensor, a través de las ópticas, para ser transferida a un sistema eléctrico y pueda ser procesada, visualizada y almacenada. Estos sistemas han evolucionado rápidamente y parece no haber terminado todavía. Hoy en días están basados en tecnologías CCD o CMOS, pero sus funciones son las mismas: transformar los fotones en carga eléctrica y convertirla en imagen. A estos sistemas de visión también se les conoce como de área o matricial, porque el sensor del sistema de visión abarca una matriz de píxeles o área donde llegan los fotones. Las medidas más comunes de CCD y su nomenclatura están en pulgadas, las más comunes son de 1/3", 1/2" y 2/3" (Nogué & Antiga, 2012).

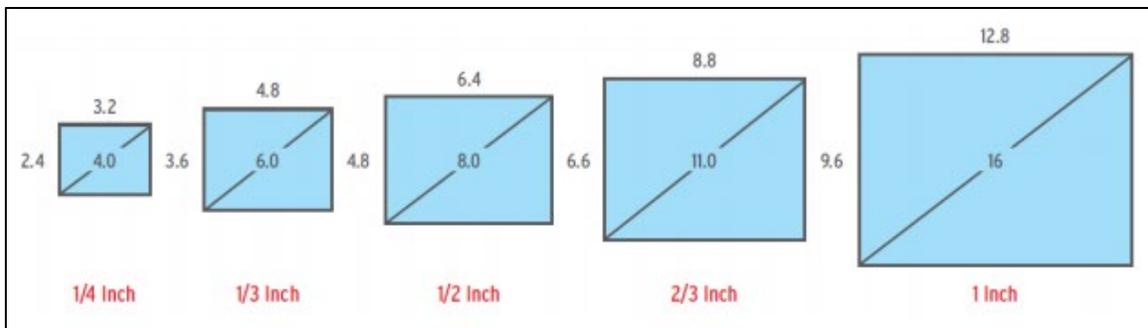


Figura 11. Tamaños de elemento sensor

Los sistemas de visión son muy similares a las cámaras digitales que se utilizan en la actualidad, pero con características más sofisticadas, en especial en el control de disparo o en el procesamiento de la imagen.

En la actualidad la mayoría de los sensores de visión son CCD, los cuales están compuestos por millones de semiconductores de silicio, que captan los fotones y los transforman en señales eléctricas. Entre mayor sea la intensidad de luz, tendrá una carga eléctrica mayor. La cantidad de megapíxeles se define por el número de semiconductores del sensor que procesa la información para convertirla en

valores digitales mediante un conversor analógico digital, para dar una salida digital en formato binario que viene a ser la imagen captada una vez digitalizada.

Hoy en día existen sistemas de visión artificial con una resolución de hasta 22 megapíxeles, de tal modo surge la necesidad de tener un sistema de comunicación más rápido y confiable. Los sistemas de comunicación estándar son en general Ethernet-IP, estos pueden ser en un equipo autónomo o a través de PC (Visión Artificial, 2012).

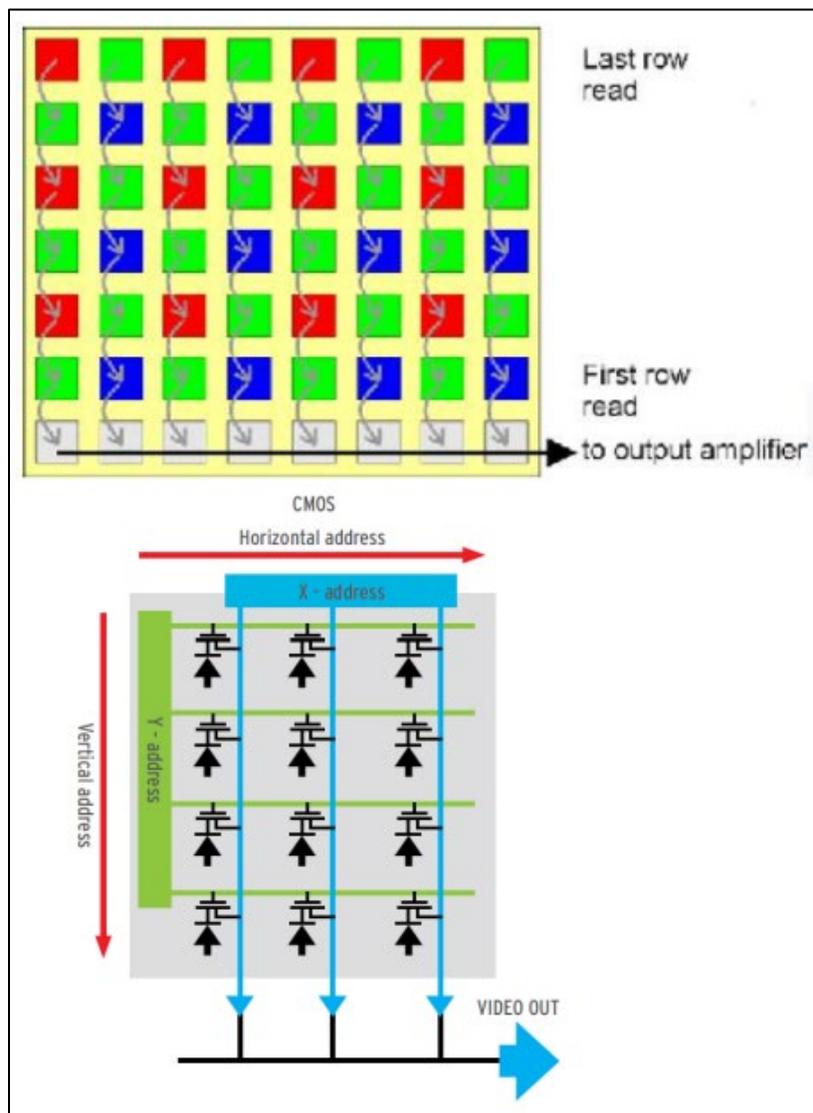
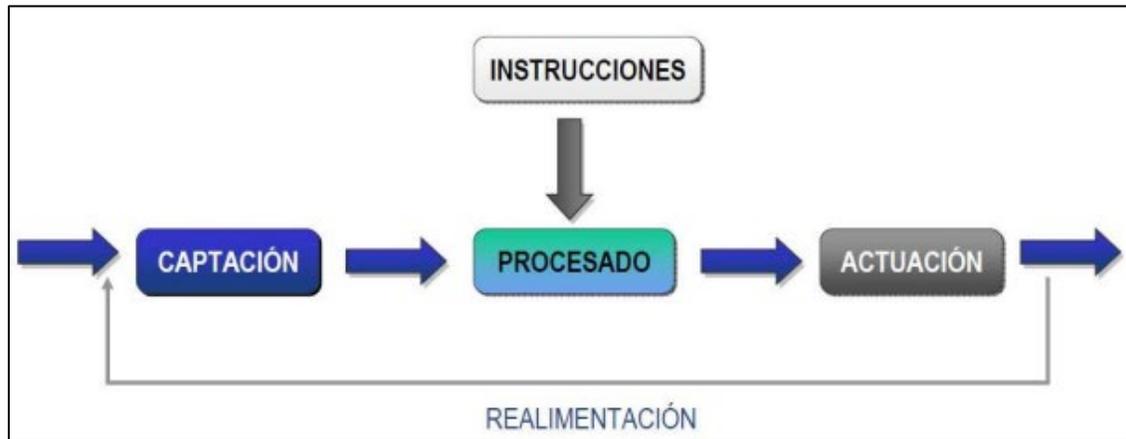


Figura 12. Representación gráfica del elemento sensor (Nogué & Antiga, 2012)

### 2.2.2.5 Sistemas de control

La jerarquía de los sistemas de control en los sistemas de visión está muy definida.



(Nogué & Antiga, 2012)

**Captación:** Es cuando el sistema obtiene una imagen visual del escenario a inspeccionar. La iluminación es muy importante para una correcta captura, así como el resto de los componentes ópticos del sistema de visión.

**Instrucciones:** Es el procesamiento de software que mejora la captura de la imagen. Cuando se programan estas instrucciones se tiene que considerar que esto generalmente puede alargar el tiempo de procesamiento.

**Procesamiento:** Se procesa la imagen adquirida y aplica las instrucciones definidas en el programa. Esto se refiere al tiempo en el que el equipo hace la medición o inspección correspondiente.

**Actuación:** El equipo procesa los resultados enviados una respuesta de piezas aceptada o rechazada o valores o resultados requeridos (Nogué & Antiga, 2012).

### **2.3. INTERNET DE LAS COSAS (*INTERNET OF THINGS*)**

El mundo cada vez más digitalizado está cada vez más interconectado. El Internet de las cosas (*IoT*) afectará casi todas las industrias, a medida que las máquinas comienzan a comunicarse y a tomar decisiones de forma autónoma, sin intervención humana. Las innovaciones van desde termostatos inteligentes que maximizan la eficiencia energética mediante el ajuste de temperatura de los hogares de los consumidores, dependiendo de si están en casa, hasta sensores en piezas de maquinaria que permiten la recopilación de datos, lo que ayuda a evitar fallas costosas al notificar de manera preventiva que pronto se necesitará mantenimiento (IRENA, 2019).

El análisis de datos en la información de manufactura masiva puede extraer enormes valores comerciales, mientras que también puede dar lugar a desafíos de investigación debido a los tipos de datos heterogéneos, el enorme volumen y la velocidad en tiempo real de la información de manufactura (Dai, Wang, Xu, Wan, & Imran, 2020).

El IoT es la interconexión de dispositivos físicos integrados con electrónica, software, sensores y datos de intercambio, también conocidos como “dispositivos conectados” y “dispositivos inteligentes”. En otras palabras, transforma objetos físicos en objetos capaces de recopilar comunicaciones, monitorear e interpretar información de su entorno en tiempo real (IRENA, 2019). También conecta dispositivos a través de Internet, donde cada dispositivo tiene una dirección IP única, lo que permite el monitoreo y control remoto a través de sistemas de control basados en la nube, con el objetivo de automatizar cada vez más aspectos en la vida de la humanidad al tiempo que aumenta la eficiencia de los procesos.

Internet de las cosas (*IoT*) también significa una red global de objetos interconectados y direccionados uniformemente que se comunican a través de protocolo estándar (Hozdić, 2015). También debería ser conocido como Internet de todo (*Internet of Everything, IoE*), el cual consiste en Internet de servicio (*IoS*).

Internet de las cosas (*IoT*) es un concepto relativamente nuevo para conectar cosas (cualquier cosa y todo en el mundo físico) que son inteligentes y

comunicables para recolectar y transportar información de un lugar a otro en el mundo a través del Internet. *IoT* ha dado una nueva dimensión para el uso de Internet y ha cambiado su panorama. De tal modo está siendo visto en el contexto de tecnología de automatización a pesar de que este término abarca otros dominios. La idea básica de *IoT* es conectar todos los dispositivos físicos para recopilar datos relevantes en tiempo real para administrar "cosas" mejor y hacer que "cosas" sean más confiables y predictivas (Sharma, 2016).

La evolución del *IoT* se resume así:

- Con una gran cantidad de dispositivos con un alto volumen de información, la recolección manual es una tarea tediosa.
- Al utilizar microprocesadores rentables, los dispositivos se están volviendo inteligentes y listos para comunicación a la red. Esto ha hecho que los dispositivos funcionen independientemente y con autodiagnóstico para enviar su condición funcional al sistema central y al propietario correcto sobre medios alámbricos o inalámbricos. Lo que ha permitido la gestión remota, proactiva / mantenimiento predictivo y análisis de información para toma de decisiones. De tal modo que también se llaman dispositivos inteligentes.
- Dispositivos inteligentes tienen una memoria y poder de procesamiento limitados para manejar datos para análisis y toma de decisiones. También, en ocasiones necesitan tomar decisiones basados en múltiples dispositivos. Por lo tanto, los dispositivos transfieren información a ubicaciones remotas (por ejemplo, el almacenamiento en la nube o *cloud storage*, que es una forma de almacenar datos a través de servidores donde los datos quedan alojados en espacios de almacenamiento virtuales en vez de físicos) donde las instalaciones están disponibles para procesamiento y con esto habilitar el mantenimiento predictivo, manejo de archivos, etc.

Para facilitar esto, todos los dispositivos inteligentes, ahora llamados dispositivos habilitados para *IoT*, son diseñados para soportar la conectividad a Internet y son:

- Inteligentes para recopilar información de su entorno y sobre su propio funcionamiento y salud.
- Comunicables a través del Internet para que los datos recopilados se transporten a los interesados para un mayor análisis y toma de decisiones.
- Gestionado remotamente a través de Internet en la otra dirección (Sharma, 2016).

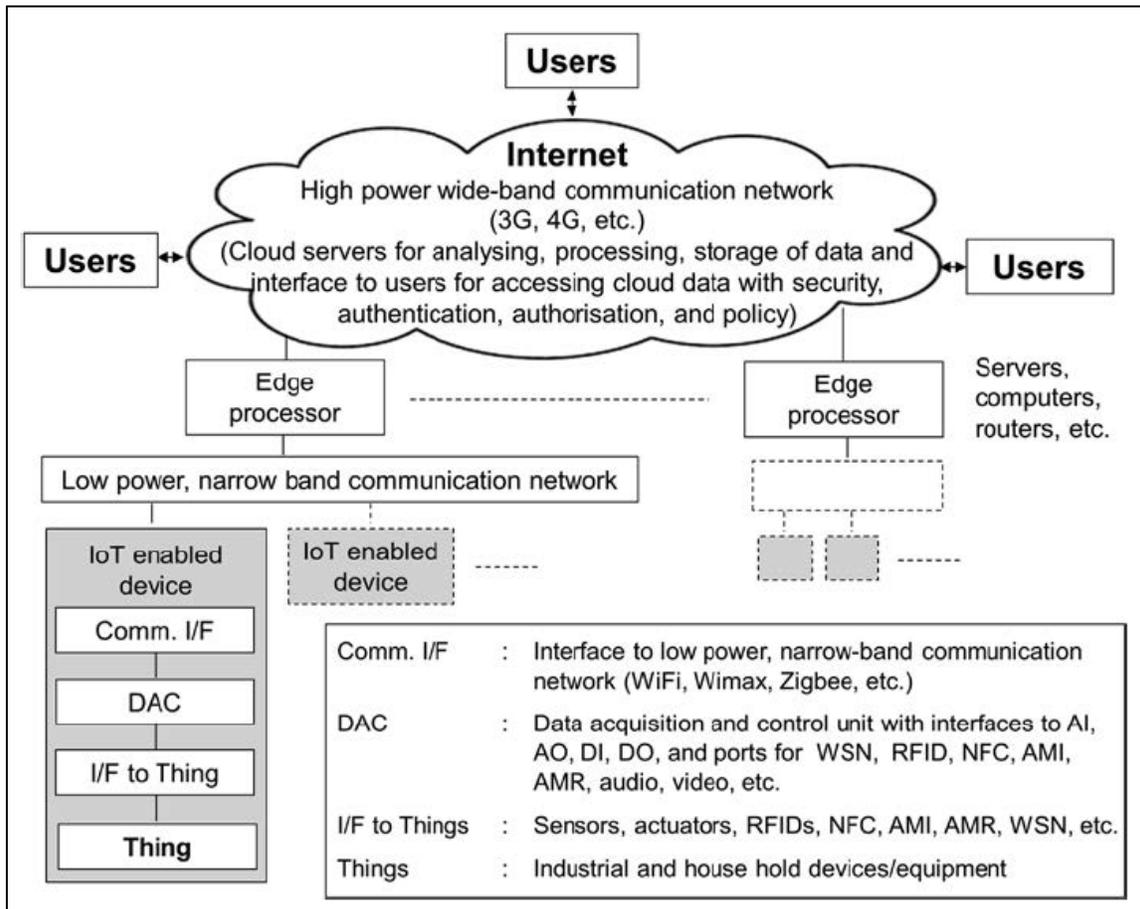


Figura 14. Arquitectura del Internet de las cosas (IoT)  
(Sharma, 2016)

En resumen, *IoT* es:

- Un entorno en el cual objetos, animales, personas, etc. Tengan identificadores únicos y la capacidad de transferir información a través de una red sin requerir la intervención humana.
- La convergencia de tecnologías de comunicación (cableadas e inalámbricas), sistemas microelectrónicos y el Internet.

### **2.3.1 Plataformas del Internet de las cosas**

Las plataformas IoT son la base para que diferentes dispositivos estén interconectados, lo que crea un ecosistema propio.

Las plataformas web incorporadas al *IoT* son el software que se comunica con el hardware, así como los puntos de accesibilidad y redes de datos que comúnmente es la aplicación que utiliza el usuario (Cárdenas, 2016).

#### **2.3.1.1 Propiedades de una plataforma IoT**

Las siguientes características son indispensables para una plataforma IoT.

1. **Conectividad:** A través de diferentes formatos de datos y protocolos en una interfaz de software asegura una correcta transmisión de información y una correcta interacción con el hardware.
2. **Manejo de dispositivos:** Confirma que todos los dispositivos conectados funcionen adecuadamente.
3. **Base de datos:** Almacena los datos de los dispositivos de manera escalable en la nube a un nivel más alto en términos de velocidad, variedad, veracidad y variedad.

4. **Procesamiento:** Contribuye con datos basados en reglas de actuación que permiten ejecutar las acciones inteligentes basándose en información obtenida del hardware.
5. **Analítica:** Realiza un análisis para la agrupación de datos básicos y aprendizaje automático.
6. **Visualización:** Muestra la información a través de gráficos, para fácil entendimiento y visualización del humano.
7. **Herramientas adicionales:** Las plataformas IoT por lo general cuentan con herramientas que permiten a los usuarios desarrollar prototipos, gestionar, visualizar, probar y controlar hardware conectado.
8. **Interfaces externas:** Son incorporados con los sistemas conocidos como de 3ª parte y el resto de los ecosistemas del ancho de TI a través de interfaces de programas de aplicación API, de kits de software SDK y puertas de enlace (Cárdenas, 2016).

### 2.3.1.2 Plataforma “ThingsBoard.io”

La plataforma “*ThingsBoard.io*” es una solución de código abierto que permite integrar dispositivos conectados a sistemas principales y de terceros. También se considera una plataforma de código abierto para recopilar datos, procesarlos, visualizarlos y gestionar dispositivos (ThingsBoard, 2020).

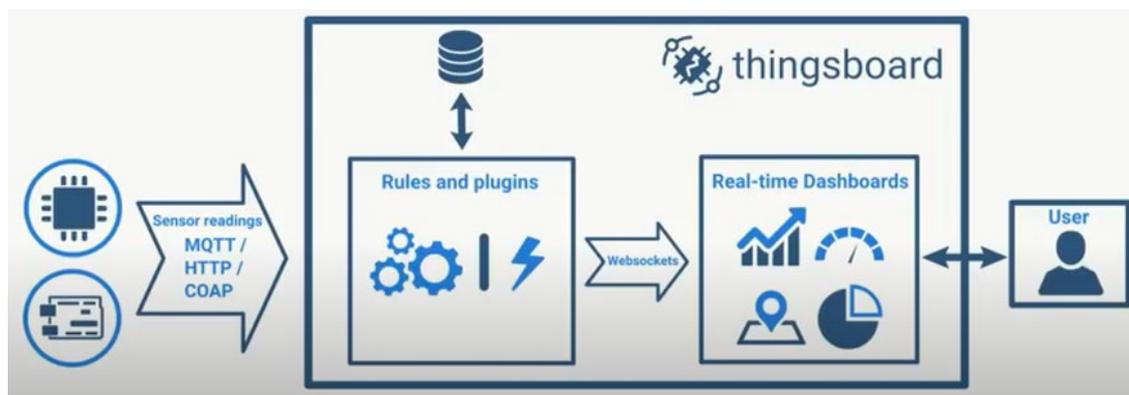


Figura 15. Esquema de plataforma ThingsBoard.io (ThingsBoard, 2020)

La plataforma “*ThingsBoard IoT*” ofrece las siguientes características:

- **Conector MQTT.** Para controlar, configurar y recopilación de datos del hardware IoT que están conectados a intermediarios MQTT externos utilizando los protocolos existentes.
- **Conector OPC-UA.** Recopila datos del hardware IoT conectados a servidores OPC-UA.
- **Conector Modbus.** Recopila datos de dispositivos IoT que están conectados a través del protocolo Modbus.
- **Conector BLE.** Recopila datos de dispositivos IoT que están conectados mediante Bluetooth Low Energy.
- **Conector Request.** Para recopilar datos de dispositivos IoT que tienen puntos finales de API HTTP (S).
- **Conector CAN.** Recopila datos de dispositivos IoT que están conectados a través del protocolo CAN.
  
- **Conector ODBC.** Recopila datos de bases de datos ODBC.
- **Conector Custom.** Para recopilar datos de dispositivos IoT que están conectados por diferentes protocolos. (Puede crear su propio conector para el protocolo requerido).
- Asegura los datos recolectados y garantiza la disponibilidad de estos en caso de que falle el hardware o la red.
- Reconexión automática al clúster de *ThingsBoard.io*.
- Mapeo potente de datos y de mensajes recibidos a formato unificado.

### 2.3.2. Industria 4.0

La primera revolución industrial se basó en mecanismos de producción de agua y vapor. La segunda revolución industrial fue basada en energía eléctrica y la tercera revolución industrial fue basada en la revolución digital. Ahora la cuarta revolución industrial (la cuarta ola de distintos avances industriales) ha aparecido. El termino Industria 4.0 fue presentado por primera vez en el 2012 en la feria Hannover de

Alemania, fue mostrado como uno de los 10 proyectos futuros que forman la estrategia de alta tecnología de Alemania 2020. La Industria 4.0 es una combinación de varios avances tecnológicos nuevos, algunos de los cuales son: Tecnologías de la información y comunicación (*TIC*) Sistemas ciber físicos (*CPS*) comunicaciones de red, *Big data* y computación de la nube, modelado, virtualización y simulación, herramientas mejoradas para la interacción y cooperación humano computadora (Senvar & Akkartal, 2018).

Hoy en día la transición a esta nueva realidad de digitalización es inevitable. Ahora la producción industrial, competencia global y el rápido cambio en las demandas de mercado son requeridas para adaptar la producción rápidamente. Esto solamente puede ser cubierto con un progreso radical en la tecnología actual. Respondiendo a las demandas de los clientes de productos a la medida, plantas habilitadas por tecnologías tales como Internet de las cosas (*IoT*), la nube, dispositivos móviles, *Big data*, entre otros crean un entorno totalmente nuevo (Rojko, 2017).

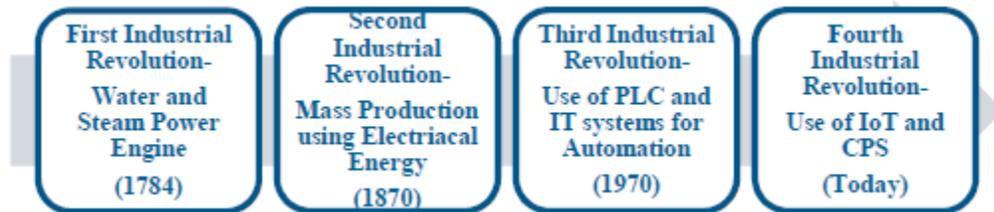


Figura 16. Las 4 revoluciones industriales (Vaidya, Ambad, & Bhosle, 2018)

La necesidad de la Industria 4.0 es convertir las máquinas normales en máquinas autoconscientes y de autoaprendizaje para mejorar su rendimiento general y gestión de mantenimiento con la interacción circundante. El objetivo de Industria 4.0 es la construcción de una plataforma abierta e inteligente de manufactura para aplicaciones de información en red industrial (Stancioiu, 2017). Monitoreo de datos en tiempo real, seguimiento de estatus y posiciones de producto, así como

para mantener las instrucciones para controlar los procesos de producción son las principales necesidades de Industria 4.0.

Hoy en día el rendimiento de las líneas de producción industrial depende fuertemente no solo de componentes técnicos individuales sino también de sus procesos de ingeniería requeridos, monitoreo y mantenimiento (Ehrlich, Wisniewski, & Jasperneite, 2018). Todos estos factores están basados en la disponibilidad y procesamiento de datos obtenidos de la línea de producción la cual requiere el uso de algoritmos que se ejecutan en segundo plano para dar soporte al operador o al controlador de proceso por ejemplo a un PLC. Por lo tanto, información adicional con respecto a posibles problemas futuros como defectos mecánicos, errores de dispositivo, parámetros, monitoreo y configuración pueden ser calculados. Esto ejecuta un paso más hacia la implementación deseada de un extenso plan predictivo y sistemas de mantenimiento basados en condiciones para las líneas de producción resultantes en una mejor disponibilidad y datos adicionales para la gestión de ciclo de vida. Por consiguiente, existe un enorme potencial de mejoras, como un aumento de la competitividad, mayor atracción de cliente, generando mayores ingresos y reduciendo el consumo de energía. Especialmente el consumo de energía es un tema importante. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA) 46% de la energía global es usada en sistemas de motores eléctricos en líneas de producción industrial (Ehrlich, Wisniewski, & Jasperneite, 2018). El uso de conceptos mejorados para comunicación, diagnóstico y monitoreo pueden resultar en una alta eficiencia de energía al mejorar las configuraciones. Esto podría reducir el consumo de estos motores un 30% lo cual resulta en una reducción del 10% de la energía global requerida (Ehrlich, Wisniewski, & Jasperneite, 2018).

### **2.3.3. Ventajas de Industria 4.0**

La Industria 4.0 tiene un impacto positivo reuniendo los requerimientos individuales de los clientes, la flexibilidad de producción, optimización, productividad, eficiencia y eficacia. También existen otras ventajas y razones para la adopción de este concepto. Incluyendo tiempo de comercialización más corto para los nuevos

productos, agilidad, un trabajo más flexible y amigable con el medio ambiente y un uso más eficiente de los recursos naturales y la energía (Senvar & Akkartal, 2018).

### **2.3.3.1. Producción flexible**

El establecimiento de fábricas inteligentes y el uso de máquinas inteligentes configurables revelan una producción más flexible. Con mayor variedad de productos producidos en una fábrica de manufactura determinada, se puede lograr más agilidad en procesos de manufactura para responder a los rápidos cambios.

### **2.3.3.2. Mayor velocidad de producción**

Las compañías que utilizan la validación digital reducen considerablemente las interrupciones en la producción. Utilizando las técnicas de Industria 4.0 es posible detectar cambios y proveer evidencia para el cliente. También la velocidad de producción se incrementa mientras se eliminan los defectos por diseño.

### **2.3.3.3. Mayor calidad del producto y menor rango de error**

Aunque se cree que a mayor velocidad de producción se reduce la calidad, en el caso de manufactura manejada en base a datos, la calidad aumentará y la tasa de error disminuirá (Rojko, 2017). La información incorrecta y la producción defectuosa reducen las ganancias de la compañía y aumentan los costos adicionales. Las máquinas harán la calidad del producto para que la producción garantice que los errores en el proceso se detectan más rápido. La producción en fábricas inteligentes donde se gestionan todos los procesos será más eficaz con análisis de gran cantidad de información.

#### **2.3.3.4. Eficiencia**

Las tecnologías digitales y los procesos de automatización mejoran las operaciones de manufactura al identificar debilidades y obstáculos en las cadenas de producción. Esta tecnología también utiliza métodos de pruebas previas antes de iniciar producción de tal modo que las compañías ahorran energía y dinero (Rojko, 2017). Además, algunas empresas construyen fabricas inteligentes que podrían continuar la producción sin empleados. Por lo tanto, utilizaran robots para ahorrar tiempo y dinero. También se harán cargo de tareas más repetitivas, lo que permite a los trabajadores enfocarse en retos más importantes.

#### **2.3.4. Principales disciplinas de Industria 4.0**

El gobierno Federal de Alemania presenta la Industria 4.0 como una estructura emergente en la cual la manufactura y los sistemas de logística conforman Sistemas Ciber Físicos de Producción (CPPS) que utilizan de manera intensiva la información disponible globalmente y las redes de comunicación para un extensivo intercambio de información automatizado en el cual los procesos de producción y de negocios coinciden (Ehrlich, Wisniewski, & Jasperneite, 2018). Los cuatro principales motores de Industria 4.0 son: Internet de las cosas (IoT), Internet Industrial de las cosas (IIoT), manufactura basada en la nube y manufactura inteligente, la cual ayuda transformando los procesos de manufactura en un sistema inteligente totalmente digitalizado (Erol, 2016). Los nueve pilares de Industria 4.0 convertirán celdas de producción aisladas y optimizadas en flujos de producción totalmente integrado, automatizado y optimizado. Esto conduce a una mayor eficiencia y un cambio en las relaciones tradicionales de producción entre proveedores, productores y clientes, así como entre humanos y maquinas (Rüßmann, et al., 2015).

##### **2.3.4.1 Big data y analítica**

La recolección y evaluación integral de información de muchas fuentes diferentes de equipos de producción y sistemas, así como los sistemas empresariales de gestión de clientes se convertirán en estándar para dar soporte a la toma de

decisiones en tiempo real (Rüßmann, et al., 2015). De acuerdo a la definición de Forrester, *Big data* consta de cuatro dimensiones: Volumen, variedad, análisis y velocidad de generación de nuevos datos (Witkowski, 2017). El análisis de datos previamente registrados es utilizado para encontrar las amenazas ocurridas en diferentes procesos de producción anteriormente en la industria y también pronosticar los nuevos problemas que ocurren, así como las posibles soluciones para evitar que eso ocurra una u otra vez en la industria.

#### **2.3.4.2 Simulación**

Las simulaciones podrán ser utilizadas con mayor frecuencia en las operaciones de las plantas para aprovechar los datos en tiempo real para reflejar el mundo físico en un modelo virtual, el cual puede incluir maquinas, productos y humanos, reduciendo la configuración de maquina e incrementando la calidad (Rüßmann, et al., 2015). Se pueden crear simulaciones 2D y 3D para la puesta en marcha virtual y para a simulación de tiempos ciclo, consumo de energía o aspectos ergonómicos de una instalación de producción. El uso de simulaciones de procesos de producción no solo puede acortar los tiempos de inactividad y cambiarlos, si no también reducir las fallas de producción durante la fase de inicio. La calidad de la toma de decisiones puede mejorarse de manera fácil y rápida con la ayuda de simulaciones (Schuh, Potente, Wesch-Potente, & Ruth, 2014).

### **2.4. LEAN SIX SIGMA**

#### **2.4.1 Introducción**

El crecimiento de los negocios está determinado por la satisfacción del cliente, que está regida por la calidad, el precio y el resultado, que son controlados por la capacidad de proceso. La capacidad de proceso está muy limitada por la variación. La variación de proceso conduce a un incremento de los defectos, costo y tiempo ciclo. Para eliminar la variación se debe aplicar el conocimiento correcto. Para poder aplicar el conocimiento correcto, primero debemos adquirirlo. Adquirir el conocimiento significa que debemos tener la voluntad de sobrevivir (AEC, 2020).

### **2.4.2 ¿Qué es Lean Six Sigma?**

Es la combinación de dos metodologías científicas llamadas *Lean* y *Six Sigma* que, de forma separada, buscan maximizar la productividad y calidad de los productos y servicios ofrecidos por las empresas. Sin embargo, unidas bajo una misma metodología, no solo se orientan a reducir costos, sino también maximizar la eficiencia en los procesos y a que las empresas que las aplican sean más competitivas en sus respectivos mercados. (AEC, 2020).

*Six Sigma* es una metodología sistemática y rigurosa para la mejora de procesos. Plantea que enfocarse en reducir la variación resolverá los problemas del proceso y del negocio. Al usar un grupo de herramientas estadísticas para entender las fluctuaciones de un proceso, la gerencia puede comenzar a predecir los resultados esperados de esos procesos. Si no se obtiene un resultado satisfactorio, las herramientas involucradas se pueden utilizar para entender mejor los componentes que influyen en el proceso. A través de una metodología de investigación rígida y estructurada, los elementos del proceso se entienden más completamente. La suposición es que el resultado del proceso será mejorado al disminuir la variación de múltiples elementos (Nave, 2002).

La filosofía Lean logra eliminar los desperdicios y optimizar la cadena de valor. Se enfoca en eliminar los residuos, que pueden ser definidos como todo lo que no es necesario para producir el producto o servicio. Un factor común es el tiempo de contacto: el tiempo que el trabajador realmente trabaja o toca el producto. Con frecuencia, el enfoque de Lean hace énfasis en el flujo (Nave, 2002).

### 2.4.3 Comparación entre Lean y Six Sigma

Tabla 3. Comparación entre Lean y Six Sigma

Lean	Six Sigma
Nos permite trabajar sobre la cadena de valor del producto: analizando el flujo de los procesos e identificando y eliminando desperdicios (esperas, procesos innecesarios, subutilización de personal, etc.).	Busca eliminar las fallas en los procesos. Proporcionar productos y servicios de alta calidad.
Sistematiza la búsqueda de actividades y valores que el cliente reconoce que le aportan valor.	Se centra en reducir el número de errores o defectos por cada millón de oportunidades. Por lo tanto, se centra en identificar y controlar la variación de los procesos.
Pretende maximizar la velocidad de los procesos reduciendo los ciclos y costos de producción innecesarios	Ayuda a que la toma de decisiones se fundamente en datos y evaluar

(AEC, 2020)

### 2.4.3 Elementos Six Sigma

*Six Sigma* considera los siguientes cinco elementos: definir, medir, analizar, mejorar y controlar (comúnmente conocidas DMAIC por sus siglas en inglés) (Nave, 2002).

- **Definir.** Los participantes comienzan definiendo el proceso. preguntan quiénes son los clientes y a que problemas se están enfrentando. Detectan las características clave importantes para el cliente, así como los procesos que respaldan esas características clave. Luego identifican las condiciones de salida que existen junto con los componentes del proceso.
- **Medir.** Luego, el enfoque está en medir el proceso. Se clasifican las características clave, se verifican los sistemas de medición y se recopilan los datos.
- **Analizar.** Cuando ya se tienen datos disponibles se analizan. La idea es transformar la información sin procesar en resultados que proporcionen

información relevante sobre el proceso. Esto incluye la identificación de las causas específicas e importantes de los problemas.

- **Mejorar.** El siguiente punto es mejorar el proceso. Se desarrollan soluciones a los problemas y se realizan las mejoras en el proceso y se vuelven a evaluar los resultados de las mejoras del proceso en las mediciones. En este punto la compañía puede evaluar si las mejoras son beneficiosas o si es necesario otro conjunto de mejoras.
- **Control.** Si los resultados de las mejoras en el proceso están al nivel deseado o esperado, entonces el siguiente punto es ponerlo bajo control. Este último punto es la parte que sostiene la metodología *Six Sigma*. Se deben monitorear los cambios o mejoras para que no ocurran consecuencias inesperadas.

Centrarse en el área primaria de reducir la variación puede producir también otras consecuencias. Se mejora la calidad, la investigación de procesos produce la reevaluación del valor agregado de muchos componentes del proceso. Algunos de estos componentes se cambian y otros se suspenden. Los componentes deben ser refinados y mejorados. Se debe reducir el error y la oportunidad de cometer errores. Algunos de los componentes del proceso descubiertos en la investigación *Six Sigma* limitan el flujo del producto o servicio a través del proceso. El flujo es definido como el tiempo desde donde entran las materias primas hasta la salida del artículo vendible. La mejora de un proceso que restringía el flujo da como resultado una variación menor, una mejora en calidad y un mejor volumen en la salida del proceso. Por lo tanto, la compañía tiene una menor cantidad de dinero invertido en inventarios en el proceso. El tiempo que transcurre desde el pago de la materia prima hasta la obtención de beneficios por el producto vendido es reducido y la compañía es capaz de responder a los requerimientos del cliente con una respuesta más rápida. *Six Sigma* se basa en dos supuestos principales. Primero, las personas en la compañía entienden y aprecian el hecho de que los números representan las condiciones de un proceso. Entienden que se puede utilizar una mejor comprensión de los datos y al analizarlos se pueden producir cambios para mejorar, y la representación gráfica de estos puede proveer perspectivas nuevas y

distintas del proceso. Las personas analíticas como ingenieros y científicos generalmente respetan este objetivo. Otro supuesto es que, al reducir la variación del proceso, se mejora el desempeño general de la compañía. Pero si puede ser difícil argumentar en contra de las mejoras, una realidad económica en los negocios es que se busca la mayor mejora por una inversión mínima. El tratar de mejorar todos los procesos individualmente de una compañía podría tener un efecto negativo en la capacidad de la empresa para cumplir los requerimientos del cliente y proporcionar productos y servicios en el tiempo indicado con un costo mínimo. El beneficio económico obtenido por el sistema podría ser menor que el costo de las mejoras implementadas. Es por esto por lo que una compañía no debe mejorar cosas solo porque puede estar mejorando las cosas incorrectas, que no aportan un beneficio significativo para el cliente ni para la compañía (Nave, 2002).

#### 2.4.4 Elementos Lean

Hay cinco puntos indispensables en Lean:

- Identifique que características crean valor.
- Identifique la secuencia de actividades llamada flujo de valor.
- Haga que las actividades fluyan.
- Permita que el cliente extraiga el producto o servicio a través del proceso.
- Perfeccione el proceso.

**Identificar el valor.** El determinar qué características crean valor en el producto se realiza desde los puntos de vista del cliente interno y externo. El valor se expresa en términos de como el producto específico satisface los requerimientos del cliente, a un costo específico, en un momento específico. Se evalúan determinados productos o servicios en los que las características agregan valor. El valor puede ser determinado desde el punto de vista del cliente final o proceso posterior.

**Identificar el flujo del valor.** Una vez que se identifica el valor, se identifican los pasos del proceso que agregan valor. A todo el conjunto de actividades se les denomina flujo de valor. Después se determina si las actividades que no aportan valor agregado al producto o servicio son realmente necesarias. Las operaciones que

son necesarias se determinan como un requisito previo para otras actividades de valor agregado como una parte esencial del proceso. Un ejemplo de un proceso sin valor agregado pero muy necesario es la nómina, indiscutiblemente las personas necesitan que se les pague. Al final, las actividades necesarias que no agregan valor en el producto o servicio son reducidas al mínimo. Todas las demás actividades que no agregan valor y no son necesarias se eliminan del proceso.

**Mejora del flujo.** Después de que se identifican las actividades de valor agregado y las actividades necesarias que no agregan valor, los esfuerzos se enfocan a hacer que las actividades fluyan. El flujo es el movimiento ininterrumpido de producto o servicio a través del sistema hacia el cliente. Los principales inhibidores del flujo son los de filas, procesamiento por lotes y transporte. Estos almacenajes intermedios retrasan el tiempo desde el inicio del producto o servicio hasta la entrega. Estos estancamientos en el proceso también atan el dinero que puede utilizarse en cualquier otro lugar de la organización y cubren los efectos de las restricciones del sistema y otras actividades desperdiciadas.

**Dejar que el cliente extraiga el producto o servicio a través del proceso.** Una vez que se eliminan los desechos y se establece el flujo, los esfuerzos se centran en permitir que el cliente lleve el producto o servicio por medio del proceso. La compañía debe hacer que el proceso fluya para proporcionar el producto o servicio solo cuando el cliente lo necesite, no antes ni después.

**Enfoque de trabajo a la perfección.** Este es un esfuerzo repetido y constante de eliminar actividad que no agrega valor, trabajando en la mejora del flujo y satisfacer los requerimientos de entrega del cliente. Si bien *Lean* se enfoca en eliminar los desechos y la mejora del flujo, también puede tener algunas consecuencias favorables. Se mejora la calidad, el tiempo del producto en el proceso es menor, lo que reduce las posibilidades de daños u obsolescencia.

La mejora y simplicidad de los procesos da como resultado una reducción de la variación. A medida que la empresa realiza todas las mejoras en el flujo de valor, se elimina la restricción del sistema y se mejora el rendimiento.

Algunas suposiciones de la metodología *Lean* son las siguientes:

- Los colaboradores observan y valoran el efecto visual del flujo.
- Los desperdicios son la principal restricción a la rentabilidad.
- Muchas pequeñas mejoras en la sucesión rápida son más beneficiosas que el estudio analítico.
- Los efectos de interacción del proceso se resolverán mediante el refinamiento de la cadena de valor.

Los colaboradores en operaciones aprecian este enfoque, *Lean* considera a muchas personas en el flujo de valor. La transformación del pensamiento fluido provoca grandes cambios en la forma en que las personas perciben sus roles en la organización y sus relaciones con el producto (Nave, 2002).

## **2.5 INTEGRACIÓN DE INDUSTRIA 4.0 Y LEAN SIX SIGMA**

En estudios recientes algunos investigadores han descubierto que un enfoque *Lean Six Sigma* en la cadena de suministro global que utiliza Industria 4.0 e IoT crea un flujo de proceso ideal que está altamente optimizado y es perfecto y libre de defectos y desperdicios. Si bien es solo una teoría, estos estudios proporcionan un plan para aquellos que desean combinar el control de calidad *Lean Six Sigma* y la mejora continua del proceso con el potencial de IoT y la Industria 4.0 (Sodhi, 2020).

El IoT y la Industria 4.0 ofrecen ventajas a las empresas en la recopilación de datos y la potencial inteligencia empresarial. Sin embargo, la necesidad de contar con un proceso de calidad no ha disminuido. Los gerentes y empleados con conocimiento en la mejora continua de procesos *Lean Six Sigma* están mejor posicionados para asumir un papel activo y garantizar que las nuevas tecnologías se incorporen en una operación de manera significativa. También comprenderán que ningún avance tecnológico le dará una ventaja a una organización sin tener un proceso sólido en su lugar, como el marco proporcionado por *Lean Six Sigma* (Sodhi, 2020).

### 2.5.1 Lean Six Sigma 4.0

Hay investigaciones recientes donde se ha comenzado a utilizar el término *Lean Six Sigma 4.0* como una integración entre *Six Sigma* (metodología centrada en la reducción y estandarización de la variabilidad de procesos), *Lean thinking* (enfoque que tiene como objetivo la reducción de residuos) e *Industria 4.0* basada en Tecnologías de la información y comunicación (*TIC*), *Internet de las cosas (IoT)*, *Sistemas ciber físicos (CPS)*, comunicaciones de red, *Big data* y computación de la nube, modelado, virtualización y simulación (Arcidiacono & Pieroni, 2018).

También se han realizado otras investigaciones individuales para explorar cómo se podría aplicar *Lean Six Sigma* para acelerar el proceso de extracción de conocimientos clave de *Big data* y también cómo podría aportar nueva luz a los proyectos que requieren el uso de esta metodología, pero el potencial para ejecutarla no estaba completamente desarrollado. En *Toyota Production System Ohno* (1988) ya se introdujo entre los pilares importantes también la automatización con *Just in Time*: de ahí que la automatización en la producción haya jugado un papel importante y la *Industria 4.0* permite avanzar en este campo. Sin ningún tipo de duda, hoy la integración de *Lean Six Sigma* e *Industria 4.0* es un campo de investigación importante que debe explorarse ampliamente (Arcidiacono & Pieroni, 2018).

Su difusión disruptiva se debe a varias tecnologías habilitadoras, como *Internet de las Cosas* (o *Internet de Todo* o *Internet de las Cosas Industrial*), esto es una visión más que un avance tecnológico. La *Industria 4.0* es capaz de crear valor durante todo el ciclo de vida del producto, proceso o servicio. Por estas razones, el resultado de esta revolución puede ser un objeto, pero también un servicio diseñado para un usuario final, cuyo desarrollo está impulsado por la innovación en varias áreas: TI, ingeniería mecánica, sistemas embebidos, producción, técnica de automatización y todos combinados con el fin de ofrecer sistemas más complejos como los conocemos hoy (Sodhi, 2020).

La digitalización a través de *Industria 4.0* mejora la mejora continua, ya que incluye adquisición de datos, análisis y colaboración que permiten una construcción de consenso más rápida entre los miembros de un equipo de Ingeniería (*Kaizen*) y una

mayor velocidad de ejecución. Los equipos Kaizen a menudo se ven frustrados por la falta de datos para el análisis que impide la colaboración y bloquea el progreso, particularmente con Six Sigma. Industria 4.0 involucra tecnologías para superar cada uno de estos impedimentos utilizando:

- Recopilación de datos automatizada con *IoT*.
- Gestión de datos en plataformas en la nube Industrial.
- Análisis avanzado para la identificación de problemas.
- Procesos comerciales automatizados que garantizan el cumplimiento del cambio.

El mapa de flujo de valor (*VSM*) puede ayudar a identificar aplicaciones de la industria 4.0, se puede utilizar para identificar aplicaciones prácticas de tecnologías avanzadas. Después de crear la versión del mapa de flujo de valor (*VSM*), el equipo busca identificar el desperdicio y eliminarlo. La adopción de la Industria 4.0 permite examinar el mapa de flujo de valor para la automatización de procesos con las tecnologías más nuevas. En este enfoque *VSM* proporciona una metodología repetible para evaluar y adoptar tecnología con un claro beneficio comercial y soporte al usuario (Sodhi, 2020).

Es por lo que esta investigación busca aplicar los conocimientos de Lean Six Sigma 4.0 en el área de manufactura, específicamente en los sistemas de visión para soldadura por reflujo de circuitos electrónicos para la industria automotriz.

### 3. PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN

#### 3.1. ANÁLISIS DEL FLUJO DE SOLDADURA PARA SENSORES P+T

En la planta de Aguascalientes se cuenta con una línea de producción para sensores P+T con un flujo en el proceso de soldadura más complejo, más largo y con bajo desempeño de productividad en comparación con sensores similares que son producidos en líneas de producción similares.

A continuación, la figura 17, muestra el flujo de soldadura para dispositivos P+T.

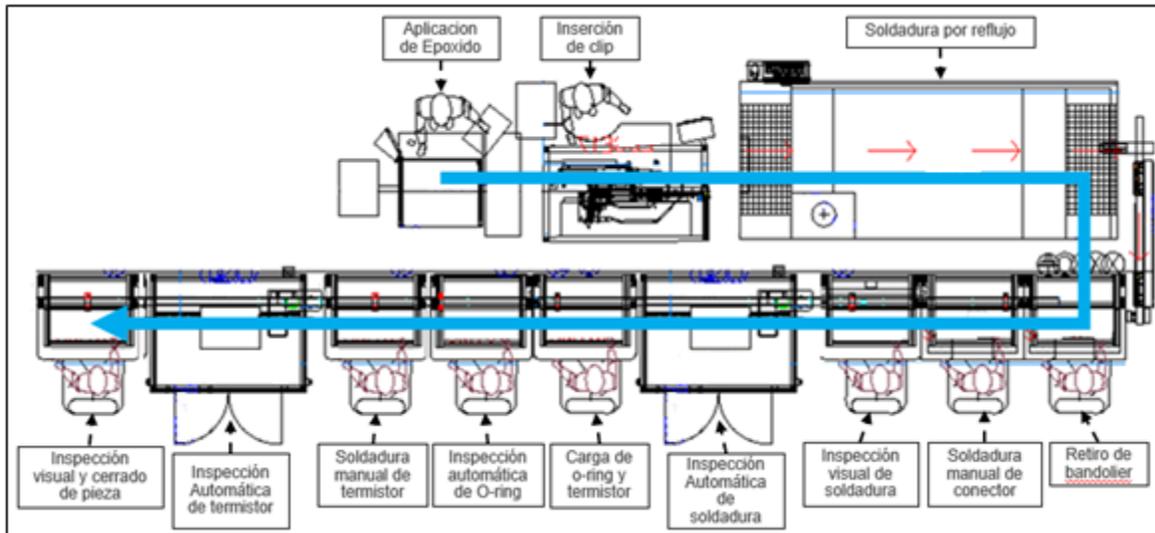


Figura 17. Mapa de proceso  
Elaboración propia

El proceso de soldadura está compuesto de 12 operaciones, el cual necesita de 9 operadores que trabajan en conjunto con los equipos semiautomáticos y manuales.

Los pasos del proceso son los siguientes:

1. **Aplicación de epóxido.** Se coloca resina epoxica en el elemento sensante para adherir un circuito electrónico flexible.

2. **Inserción de clip.** Tres clips metálicos con soldadura adherida son insertados en el ensamble del módulo electrónico y el elemento sensante. Estos elementos son soldados en un horno mediante el proceso conocido como soldadura por reflujo.
3. **Horno de soldadura por reflujo.** El clip se suelda por reflujo al ensamble mientras el ensamble es transportado a través del horno de reflujo debido a las altas temperaturas.
4. **Retiro de bandolier.** Después que el clip es soldado en el ensamble, se retira el material excedente del clip llamado (bandolier), este ensamble es transferido en otro pallet donde también se carga el siguiente componente que es el conector.
5. **Soldadura manual del conector.** Las terminales (pines) del conector son soldados manualmente al ensamble del circuito electrónico flexible.
6. **Inspección visual de soldadura.** Un operador inspecciona visualmente la condición de los puntos de soldadura en el conector. Además, apoyado por unas cámaras que magnifican la imagen se revisa la condición de la soldadura por reflujo en los clips, así como la correcta alineación de estos.
7. **Inspección automática de soldadura de conector (pines).** Con un sistema de visión automático se revisa que todas las terminales del conector estén soldadas correctamente. Esta inspección solo involucra la inspección de la soldadura de terminales del conector (manual) y no la soldadura de los clips (por reflujo).
8. **Carga de O-ring y termistor a pallet de termistor.** El pallet de termistor es cargado con los componentes (O-ring, termistor y ensamble proveniente de operación anterior).
9. **Inspección automática de O-ring.** Aquí se inspecciona la presencia de O-ring en cada pieza, así como su correcta posición y color que varía entre los diferentes modelos de sensores.
10. **Soldadura manual de termistor.** En esta operación se suelda manualmente las terminales (pines) del termistor al circuito electrónico flexible.
11. **Inspección automática de soldadura de termistor.** Este sistema de visión automático solamente revisa que terminales del termistor estén soldadas.

12. **Inspección visual final y cerrado de pieza.** Un operador inspecciona visualmente la condición de los puntos de soldadura solamente del termistor y cierra el ensamble para ser procesado en operaciones posteriores.

### 3.2. MAPA DEL FLUJO DE VALOR

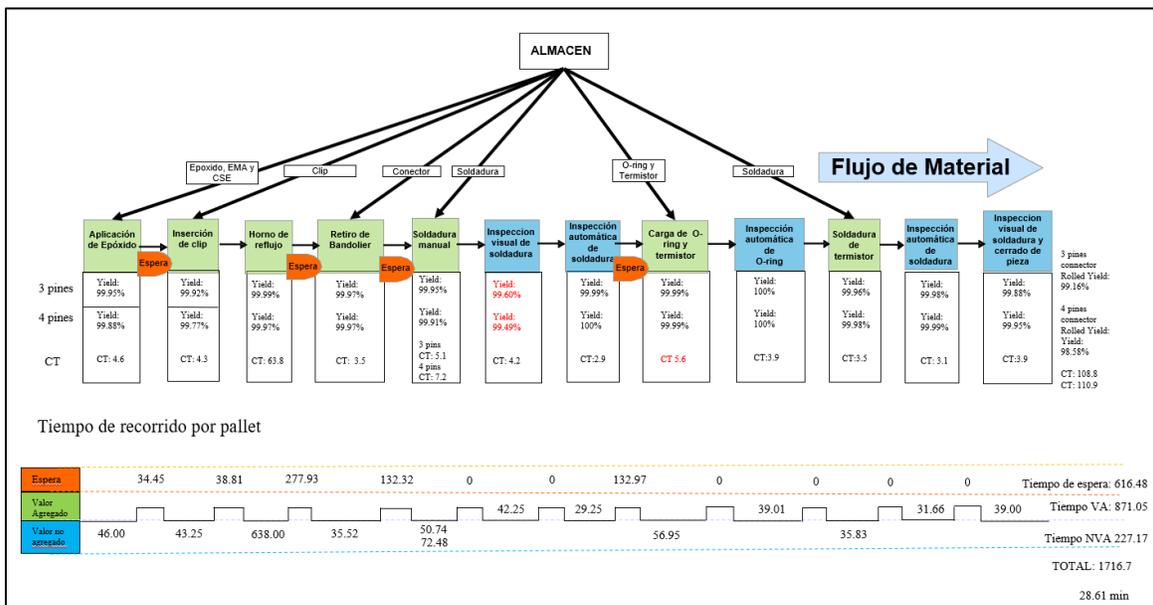


Figura 18. Mapa del flujo de valor  
Elaboración propia

Tabla 4. Tabla comparativa de pasos que agregan y que no agregan valor

Descripcion	Tiempo (segundos)	Porcentaje %
Tiempo de espera	616.48	35.95%
Pasos que agregan valor	871.05	50.80%
Pasos que NO agregan valor	227.17	13.25%

Elaboración propia

Con este análisis se detectó que se tienen demasiadas operaciones que no agregan valor, las que a la vez en su mayoría son inspecciones tanto visuales como automáticas lo que centro el desarrollo del proyecto en estas operaciones. También se observó que las inspecciones visuales son en las que se reportan mayor variación en cuanto a tiempos ciclos al ser una operación dependiente del operador.

### 3.3. ANÁLISIS DEL PROBLEMA

Históricamente se tienen registros de una baja productividad en el proceso de soldadura para los modelos P+T (*Pressure plus Temperature*), estos registros están basados en informes (bitácoras) compartidos por el área de manufactura considerando la producción de los últimos 6 meses a la fecha en los que se registra una producción por día de 9000 piezas diarias en promedio al procesar modelos P+T contra 13000 piezas diarias en promedio de los modelos que no son P+T. Cabe señalar que los datos registrados en bitácora solamente no son suficientes para analizar el problema a fondo, por lo que se continuo en busca de las opciones disponibles al momento para medir de manera eficaz el desempeño del proceso, lo cual fue muy complicado, ya que en las bitácoras mencionadas solo se hacía un registro manual de la producción por día y turnos, pero este registro no proporciona el detalle de los modelos en proceso, ni del tipo de fallas en los procesos al reportar paros de equipo, aunque se cuenta con un software llamado SEE para el registro de lotes en producción y reportar fallas de equipos, este

software no proporciona datos precisos respecto a productividad, lo que si deja ver es la cantidad de defectos por cada operación, cabe señalar que los datos son ingresados por los operadores de cada operación de manera manual al software SEE, lo que deja cierta posibilidad de error humano al capturarlos. Con esto se demostró que ninguno de los métodos actuales era eficiente y confiable para medir el desempeño real de productividad del proceso. Con el fin de poder avanzar en este proyecto se decidió asignar persona adicional por turno en el área, específicamente para hacer los registros de 1 mes producción considerando el PPH, modelo a procesar, los tipos de falla reportados hora con hora, cantidades de piezas buenas y malas, los tipos de defectos y tiempo ciclo de las operaciones. Esto a fin de entender mejor el problema, sin embargo, este método no era sostenible a través del tiempo, las razones principales son el costo que genera una personal adicional para esta tarea y la confiabilidad de la captura de datos al seguir dependiendo de una persona, aunque esto proporcione información importante para entender el problema, se optó por implementar un sistema automático que hiciera el registro de información que permitiera medir los parámetros necesarios de productividad.

### **3.4. SELECCIÓN DE EQUIPO PARA MEDIR DESEMPEÑO DE PRODUCTIVIDAD**

Basándose en el análisis antes mencionado se decidió implementar este sistema de monitoreo automático en un equipo existente utilizado para la inspección de soldadura visual por operador, con el objetivo de mejorar el equipo con un sistema de visión para tener una inspección automática en lugar de solo visual por operador. Cabe mencionar que a pesar de que ya se contaba con sistemas de visión automáticos estos no fueron considerados para implementar las mejoras mencionadas debido a su complejidad de software al cual el equipo de ingeniería de Sensata no tiene acceso por ser de un fabricante de China, lo cual representa un alto riesgo de fallas provocados al modificarlo. Como parte de un análisis del diagrama de flujo de valor (VSM) se observó que con la implementación de este nuevo sistema se podía reducir la cantidad de inspecciones a través del proceso consideradas como operaciones que no agregan valor al producto.

### 3.5. DESARROLLO DE MÁQUINA PROTOTIPO APLICANDO LOS PRINCIPIOS DEL INTERNET DE LAS COSAS

A modo de poder medir un desempeño real del proceso de soldadura en tiempo real se rediseño el sistema de cámaras que se utilizan para la inspección visual del reflujo, es aquí donde se aplican los principios de Industria 4.0, específicamente el Internet de las cosas (*IoT*) para el monitoreo del proceso en tiempo real. Ya que la principal intención en el desarrollo de este equipo es incluir un sistema de visión el cual ayude a medir el desempeño de piezas buenas y defectivos, así como el monitoreo de tiempo ciclo y productividad por turnos.

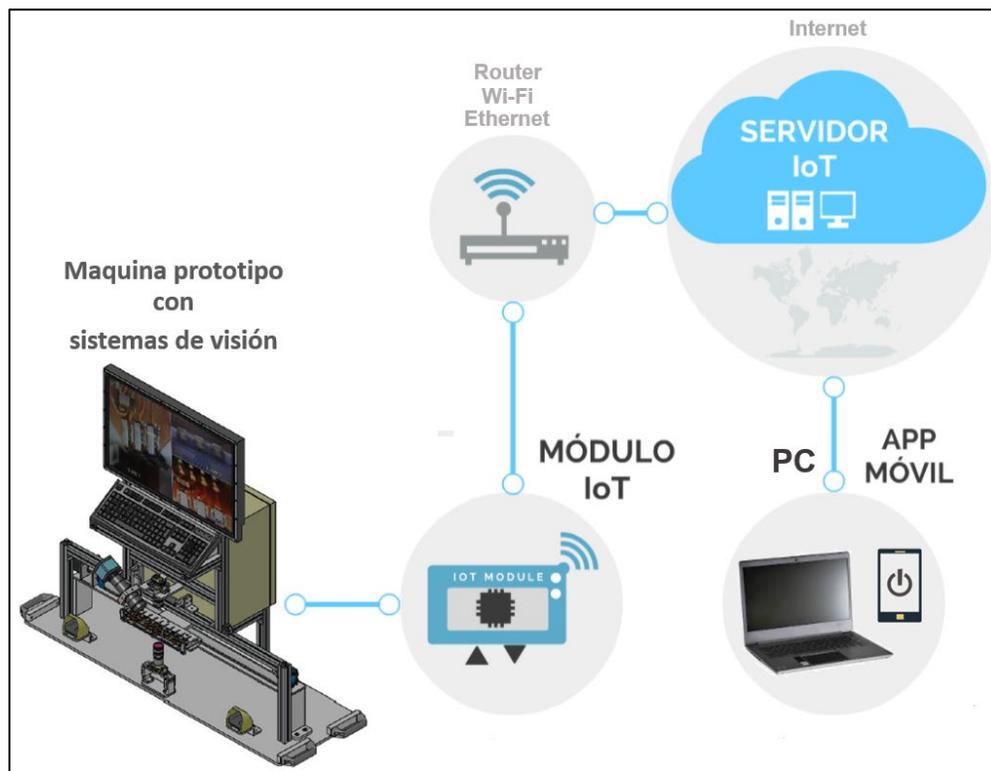


Figura 19. Diagrama de integración de módulo IoT  
Elaboración propia

#### 3.5.1 Selección de las cámaras

Para desarrollar la maquina prototipo se seleccionaron las cámaras Genie Nano M1280 de la marca *Teledyne Dalsa* por la resolución necesaria para esta inspección

y por su accesible costo. Cabe mencionar que al ser una maquina prototipo se contaba con un presupuesto limitado, aprobado por el gerente del área.

### **3.5.1.1 Descripción de la cámara**

Como ya se mencionó la cámara *Genie Nano* es un modelo de la marca *Teledyne Dalsa*. Estas cámaras cuentan con aplicaciones que facilitan el uso para el usuario y tienen un diseño específico para aplicaciones industriales que necesitan una mejor integración en red. El estándar utilizado en esta cámara es Gigabit Ethernet asociado a los sistemas de *Teledyne Dalsa* para transferir las imágenes al procesador de forma fiable y rápida (INFAIMON S.L, 2018).

### **3.5.1.2 Características de la cámara**

- Resolución: 1280×1024
- Tipo de sensor: CMOS
- Tamaño de píxel: 4.8 micras
- Tamaño de sensor: 1/2"
- Velocidad de trabajo: 93 img/s (213 img/s con Turbodrive)
- Rango Dinámico: 62,1dB
- Modos Monocromo: Mono8, Mono12
- Montura: C (Opcional CS)
- Interface Digital: GigE Vision
- Dimensiones: 29 x 44 x 21mm
- Peso: 46gr



Figura 20. Cámara Genie Nano M1280  
(INFAIMON S.L, 2018)

### 3.5.2 Selección de ópticas

Para la selección de ópticas se realizó el cálculo mencionado en el marco teórico y para confirmar también se utilizó un calculador de ópticas el cual fue proporcionado por el proveedor de las cámaras arrojando como resultado una óptica de 50mm y un anillo extensor de 5 mm para ópticas rosca C.

Ecuación 3. Cálculo para selección de distancia focal

$$f = \frac{b * D}{B} * 0,72 = \frac{6,4mm * 140mm}{10mm} * 0,61 = 54.6mm \approx 55mm$$

b = Tamaño del sensor CCD = 1/2" = 6.4 mm

B = Anchura del objeto = 10 mm

f = Distancia focal = 55 mm

D = Distancia de objetivo = 140 mm

c= Factor de conversión del tamaño del sensor = 0,61

>
Calculating the focal length using sensor size, working distance and object size

**Note:** Even when using the drop-down lists own values can be entered. Please use the first entry "user def.!"

Sensor size :	1/2" 6.4 mm
Length of inspected part in mm (field of view FOV):	10mm
Working distance in millimeters:	140mm

---

Calculated focal length of lens:	54.6 mm
----------------------------------	---------

Figura 21. Calculador de óptica recomendado por proveedor  
Elaboración propia



Figura 22. Óptica AZ 50mm HR  
(INFAIMON S.L, 2018)

### 3.5.3 Selección de iluminación

La iluminación seleccionada fue una barra de led de luz roja de acuerdo a las recomendaciones del proveedor y a las diferentes pruebas que se realizaron en la maquina prototipo. De acuerdo a la recomendación del proveedor la luz roja es de las mejores opciones en aplicaciones donde se inspeccionan componentes metálicos con un acabado cromado, esto con la finalidad de mitigar un poco el reflejo de luz de este tipo de acabado en los componentes, en este caso los clips y la soldadura por reflujo. De igual modo como en el caso de los componentes anteriores otro factor importante fue el costo accesible de esta opción.

### 3.5.4 Procesador del sistema de visión

Esta cámara viene acompañada de un procesador GEVA 300 + iNspec Vision System Windows7 64GB. El procesador puede incluir una licencia activa del

software iNspect en caso de requerirlo, cabe mencionar que se decidió no utilizarlo. Para este proyecto se decidió trabajar con el módulo *Vision Builder* de *National Instruments* para procesamiento de imágenes y el software Labview para poder integrar el algoritmo que gestiona tiempo ciclo, productividad y rendimiento (piezas buenas y malas) en la operación.

### **3.5.5 Diseño de máquina prototipo**

Para el diseño de la maquina prototipo se consideran 2 cámaras para el sistema de visión, una para inspeccionar la parte superior del ensamble y otra para inspeccionar la parte inferior, debido a que la soldadura por reflujo necesita ser inspeccionada por ambas partes del ensamble. También se hace uso de una cámara adicional solo para magnificar la imagen a un ángulo de 45 grados, esto con la finalidad de que el operador pueda confirmar la condición de la soldadura visualmente en el monitor en aquellas piezas detectadas como malas por el sistema de visión. Estos fueron los requerimientos indispensables para poder realizar las pruebas en la línea de producción, ya que son los controles actuales en el proceso. Ver figura 23.

Cabe señalar que en el diseño se contempló que las cámaras quedarán fijas y que fuera el pallet con las piezas el que se moviera mediante una mesa lineal y un servomotor.

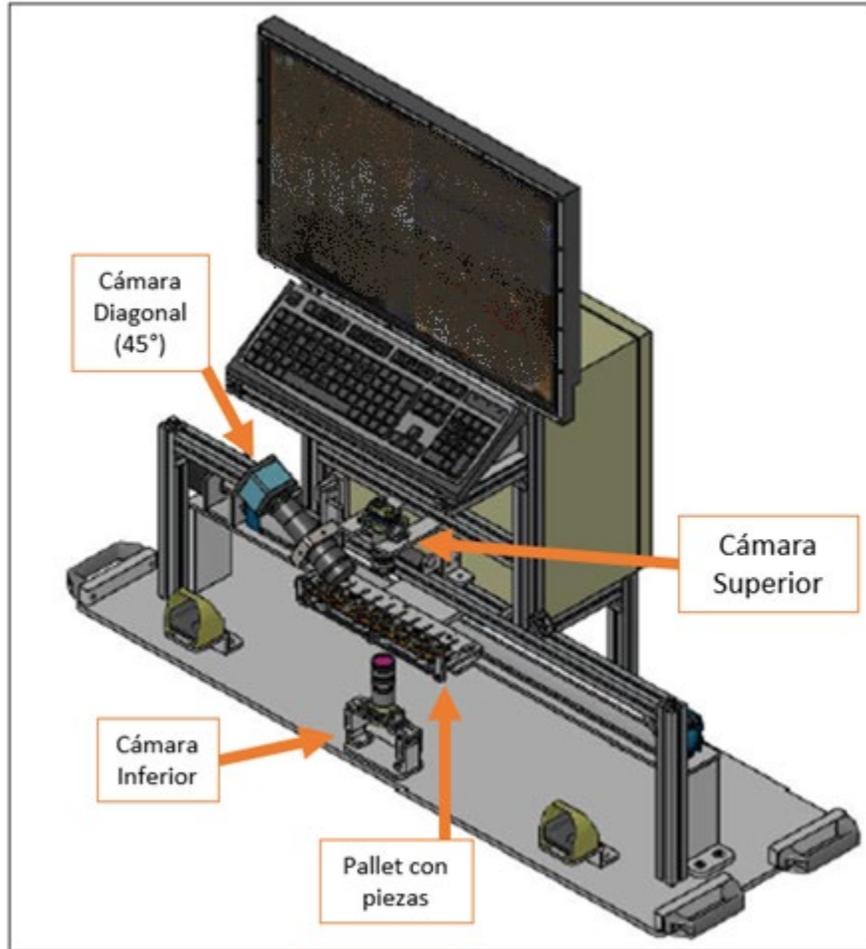


Figura 23. Concepto de máquina de inspección prototipo  
Elaboración propia

Para el procesamiento de las imágenes se utilizó el módulo Vision Builder, con la finalidad de hacer la inspección de soldadura por reflujo, una de las características más importantes a revisar para determinar que la soldadura por reflujo es la adecuada es la correcta alineación de los clips después de ser soldados, como ya se mencionó anteriormente la inspección se realiza por la parte superior e inferior de la pieza, ya que la soldadura refluye por los 2 lados. Para la configuración del equipo se consideró utilizar *Vision Builder* para el procesamiento de la imagen y *LabVIEW* para el programa de gestión de datos.

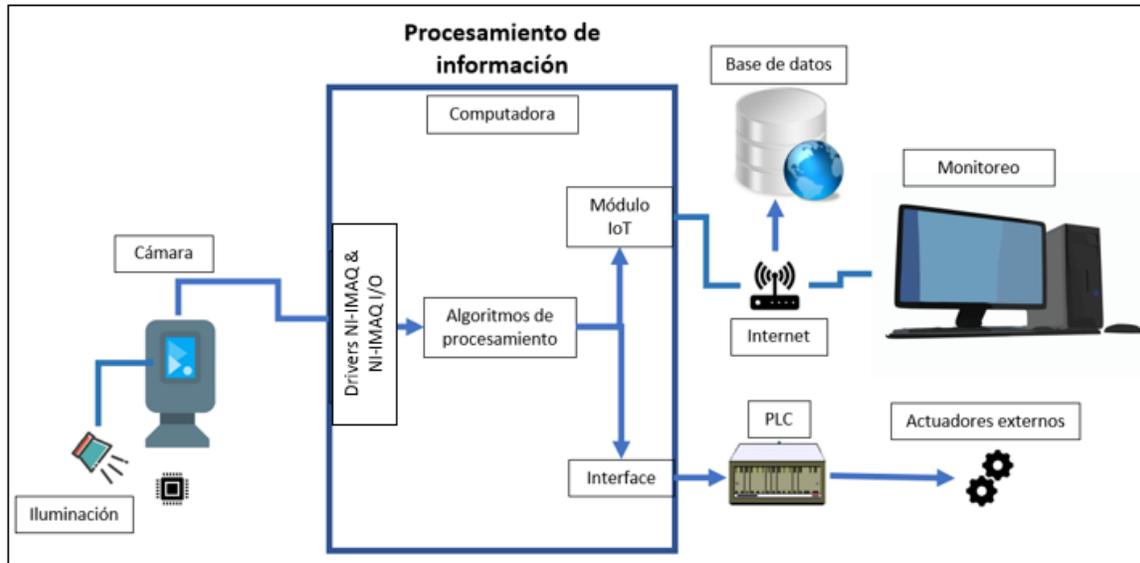


Figura 24. Diagrama de integración del sistema de visión aplicando los principios del IoT  
Elaboración propia

### 3.5.6.1 Configuración para inspección de piezas

El siguiente diagrama de Vision Builder muestra la secuencia de inspección definida en la maquina prototipo, para la inspección de las piezas por la parte superior e inferior como ya se explicó anteriormente. Las cámaras fueron conectadas al software Vision Builder a través de comunicación ethernet. El estándar utilizado en esta cámara es Gigabit Ethernet para transferir las imágenes al procesador de forma fiable y rápida

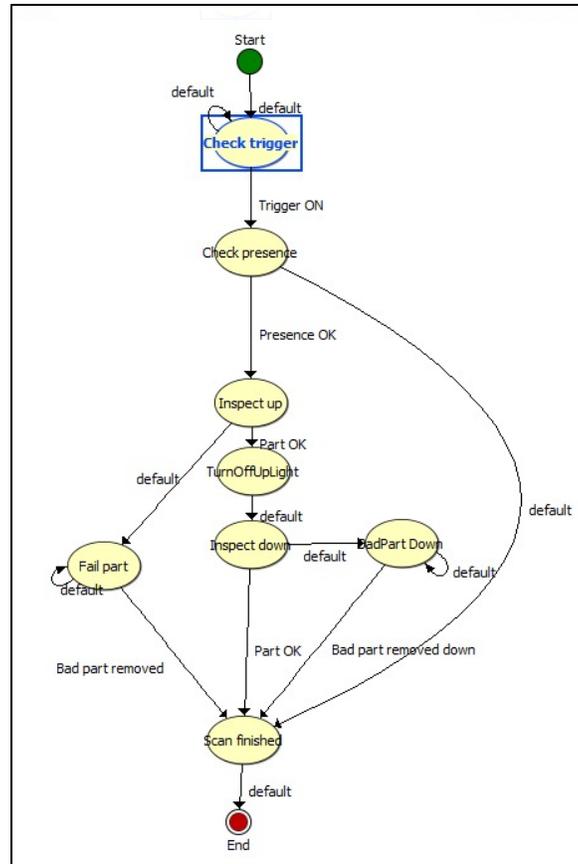


Figura 25. Secuencia para procesamiento de imágenes en Vision Builder  
Elaboración propia

La secuencia del ciclo es la siguiente:

- El operador coloca el pallet con las piezas en la máquina.
- El operador activa el inicio de ciclo mediante sensores bimanuales los cuales activan el *trigger* para la secuencia de inspección.
- La primera pieza (de 10) es inspeccionada por ambas partes (superior e inferior), el resultado de la inspección de la pieza es mostrado en la pantalla (HMI), si una pieza mala es detectada el pallet no avanza hasta que la pieza mala es removida del pallet.
- El pallet avanza a la siguiente posición para que la segunda pieza pueda ser inspeccionada.
- Al completarse la inspección de las 10 piezas (pallet completo) el operador retira el pallet de la máquina.

- La máquina queda lista para iniciar la inspección del siguiente pallet.

### **3.5.6.2 Integración de sistema de visión**

La conexión de las cámaras fue vía ethernet y para la comunicación se configuro en el software *NI MAX (Measurement & Automation Explorer)* de *National Instrument* para que pudiera identificarla mediante el protocolo *Gige*, ya que como se mencionó anteriormente las cámaras que se utilizaron para esta máquina prototipo no pertenecen a la marca *National Instrument*. El softaware *NI MAX* permite la conexión de cámaras de cualquier marca a través de diferentes tipos de comunicación como puede ser *Ethernet*, *USB* y hasta configurar la cámara web integrada en laptops.

El sistema de visión fue programado para la inspección de circuitos electrónicos aplicados a los sensores automotrices. El cual tiene como propósito inspeccionar que la soldadura por reflujo sea la correcta, una de las características más importantes para determinar que la soldadura por reflujo es la adecuada es verificando la alineación de los clips después de que estos son soldados mediante el proceso de soldadura por reflujo. Cabe señalar que la automatización de esta inspección se realizó como parte de las mejoras en el desarrollo de este proyecto el cual tiene como objetivo principal desarrollar un equipo con el que se pueda medir el desempeño real del proceso (productividad y calidad) en tiempo real aplicando las metodologías del *IoT* y *Lean Six Sigma*, y por consiguiente poder mejorar la productividad y calidad con los datos obtenidos por la nueva máquina prototipo.

El operador tiene que revisar la alineación de los clips además de la condición de la soldadura por reflujo para determinar si la soldadura por reflujo es la correcta. Con el desarrollo de este equipo se busca automatizar la inspección de la alineación de los clips agregando el sistema de visión para la inspección



El procesamiento de la imagen se configuro con el software *Vision Builder* el cual es capaz de crear una interfaz y una conexión sencilla a la cámara, como se puede observar en el diagrama de bloques anterior, para el procesamiento e inspección automática de la imagen se consideraron diferentes pasos los cuales son los siguientes:

- Comprobación de accionamiento “*Check trigge*” (figura 27). El cual tiene como propósito confirmar la comunicación con las cámaras, encender las lámparas y reiniciar el contador que determina el número de pieza en el pallet (del 1 al 10). Las herramientas utilizadas para este paso fueron adquirir imagen “*acquire Image*” la cual tiene como propósito tomar la captura de imagen, la siguiente herramienta fue la de superposición personalizada “*Custom Overlay*” la cual permite mandar un mensaje sobre la imagen para notificar al operador el estatus de la inspección (figura 28), después la función leer/escribir atributos de cámara “*Read/Write Camera Attributes*” que permite escribir y leer atributos de la cámara a través del controlador IMAQ.dx, el cual se utiliza para adquirir, visualizar, registrar y monitorear imágenes desde varios tipos de cámaras desde Gige Vision, cámaras IEEE 1394 compatibles con IIDC, IP (Ethernet) y dispositivos USB.

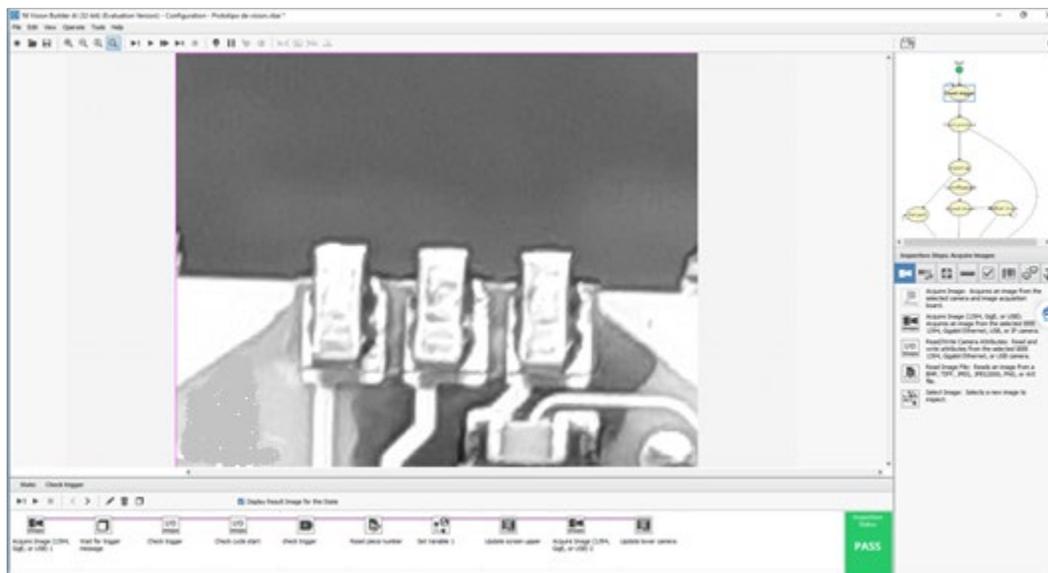


Figura 27. Confirmación de comunicación con cámaras  
Elaboración propia



Figura 28. Mensaje notificado a través de función "custom overlay"  
Elaboración propia

- Verificación de presencia de pieza "Check presence" (Figura 29). Este paso de la inspección confirma la presencia de la pieza en el pallet ya que es muy común que el pallet no tenga las 10 piezas, esto debido a que la pieza puede ser desechada por daños o fallas en operaciones anteriores. Para este paso del proceso se utilizan las funciones adquisición de imagen "Acquire Image" para adquirir la imagen superior, la función de retraso "Delay" esta función permite programar cierto tiempo de espera en milisegundos, en este caso se definieron 1000 ms para después adquirir la imagen inferior con la función "Acquire Image 2", la siguiente función es patrón de coincidencia "Match Pattern" la cual permite localizar patrones en la imagen completa o una región de interés (ROI, Region of Interest), en esta inspección se consideró utilizar el círculo mostrado en la figura 29 como patrón, el recuadro rojo representa el área de interés para encontrar dicho patrón. Después se utiliza la función establecer estatus de inspección "Set inspection status" con el propósito de actualizar el estatus de la inspección (pasa, no pasa), luego se utiliza la función de cálculo "Calculator" para determinar el número de pieza en el pallet (figura 30), la siguiente función utilizada es definir variable "Set Variable" en la cual se determina el tipo de variable a utilizar y cuál es la variable inicial en cada ciclo y por último la función

actualizar interfaz de usuario "Update Inspection UI", la cual permite actualizar el estatus (pasa, no pasa) en el HMI "Human Machine Interface" (figura 36).

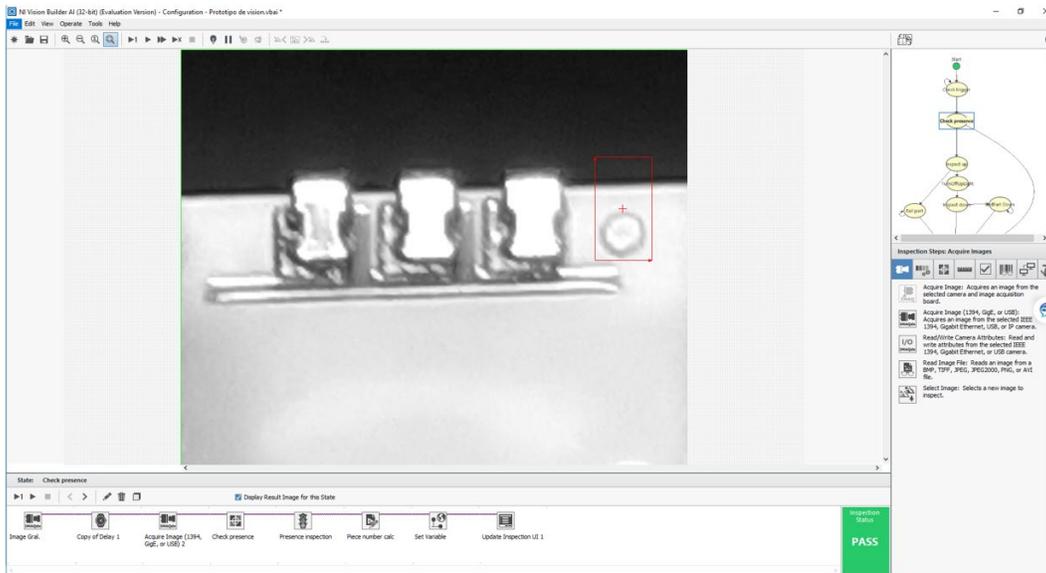


Figura 29. Patrón utilizado para detectar la presencia de pieza  
Elaboración propia

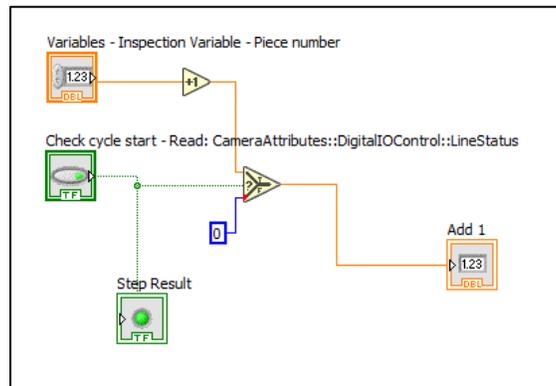


Figura 30. Configuración de función "Calculator"  
Elaboración propia

- Inspección en parte superior de pieza "Inspect up" (Figura 31). El propósito de este paso del procesamiento de la imagen es inspeccionar la alineación de los clips soldados mediante el proceso de soldadura de reflujo, para el cual se utilizaron las herramientas mencionadas a continuación. Adquisición de imagen "Acquire image" para adquirir la imagen con la cámara superior. Patrón de coincidencia "Match Pattern" para detectar los pines, por lo que el recuadro de línea roja en la figura 31 representa el patrón y el recuadro de línea verde es

la región de interés (ROI) donde necesitamos que encuentre este patrón. Definir sistema de coordenadas "Set Coordinate System" esta herramienta permite establecer un sistema de coordenadas en base al patrón detectado, esto como referencia para poder medir la distancia entre los pines en pasos posteriores.

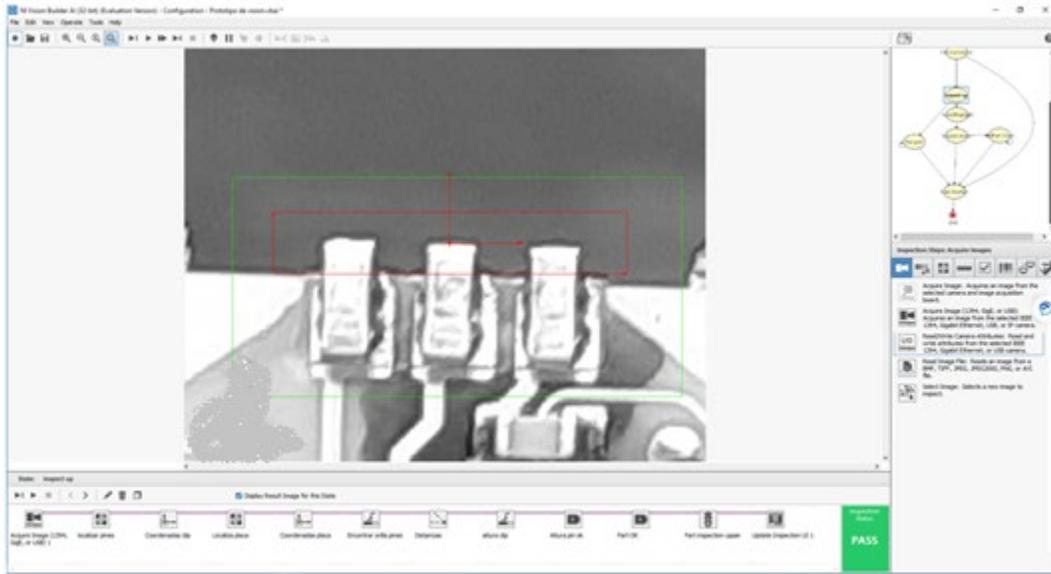


Figura 31. Patrón para encontrar pines y región de interés (ROI) para encontrar patrón  
Elaboración propia

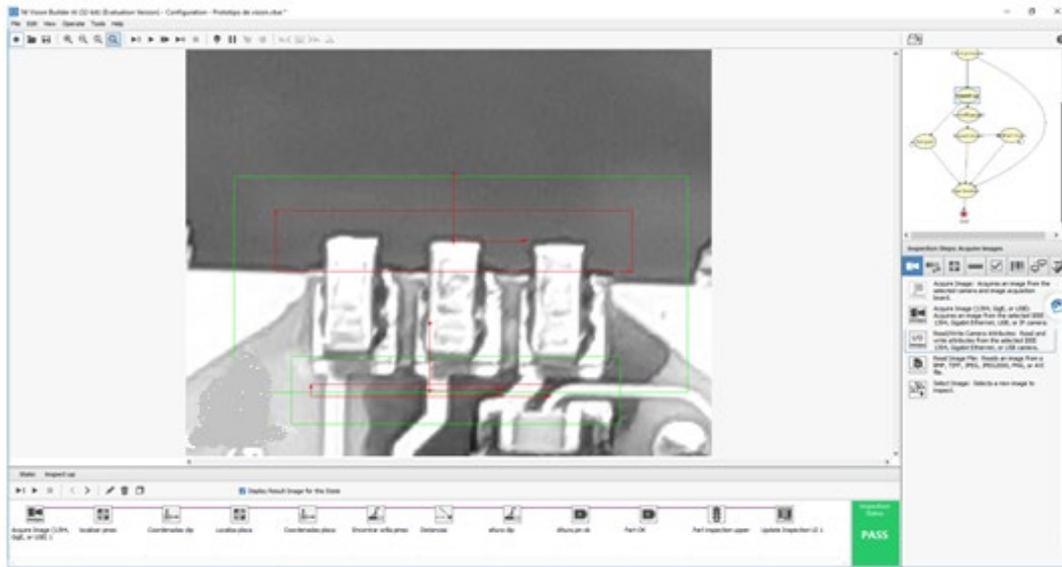


Figura 32. Patrón para encontrar pistas en modulo electrónico y región de interés (ROI)  
Elaboración propia

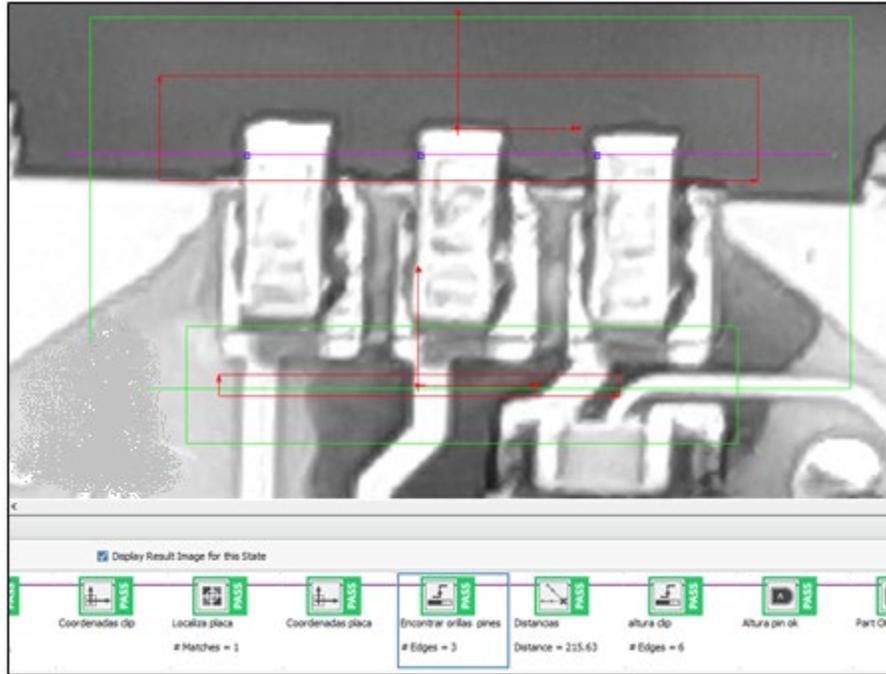


Figura 33. Herramienta para encontrar bordes y medir distancia entre ellos  
Elaboración propia

Para detectar la correcta distancia de los pines de manera vertical se utiliza nuevamente la función encontrar bordes u orillas "Find Edges" para encontrar los bordes de los clips nuevamente, pero con respecto al patrón número 2 con la finalidad de medir la distancia en pixeles, en el cual también se definieron límites de tolerancia para determinar si la pieza pasa o no pasa (figura 34).

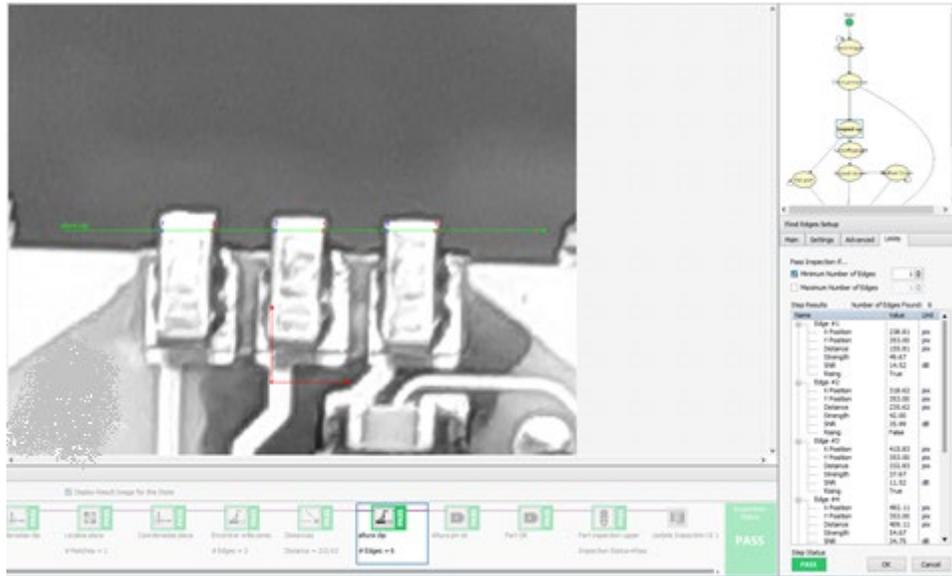


Figura 34. Confirmación de altura de clips respecto a patrón de módulo eléctrico  
Elaboración propia

La herramienta de calculadora lógica "Logic Calculator" es utilizada para calcular una expresión lógica, en este caso para evaluar el resultado en cada una de las herramientas utilizadas y determinar el estatus final de la pieza (figura 35).

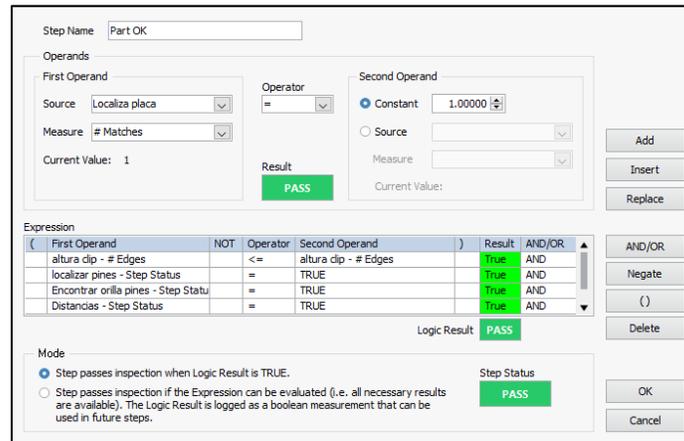


Figura 35. Calculadora lógica "Logic Calculator"  
Elaboración propia

Después se utiliza la función establecer estatus de inspección "Set inspection status" con el propósito de actualizar el estatus final de la inspección (pasa, no pasa), por

Último, como en los pasos anteriores la función actualizar interfaz de usuario “*Update Inspection UI*”, la cual permite actualizar el estatus (pasa, no pasa) en el HMI.



Figura 36. HMI de Sistema de visión  
Elaboración propia

Parte detectada como mala “*Fail part*” (figura 37). Si la parte es detectada como mala en el paso anterior, entonces la secuencia avanza al paso de “*Fail part*” donde se detiene la inspección y el operador tiene que remover la pieza mala, una vez removida activa el ciclo y el sistema de visión confirma que efectivamente la pieza haya sido removida para poder continuar la secuencia. En este paso de la secuencia se consideran las herramientas de adquirir imagen “*Acquire image*” para tomar la primera imagen de referencia (antes de remover pieza), superposición personalizada “*Custom Overlay*” para mostrar el mensaje de remover pieza, para alertar al operador de que la maquina no puede continuar con la inspección hasta que la pieza sea removida, adquirir imagen 2 “*Acquire image 2*” para tomar la segunda imagen después de haber removido la pieza mala, medición de intensidad “*Measure intensity*” la cual permite medir la



Figura 37. Secuencia de parte detectada como mala  
Elaboración propia

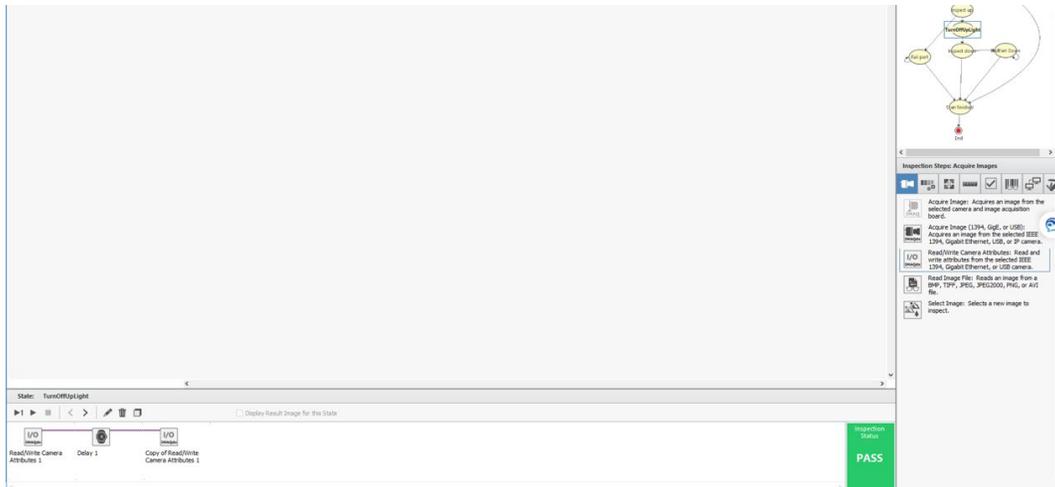


Figura 38. Secuencia para apagado de lampara superior  
Elaboración propia

- Inspección parte inferior de pieza “*Inspect down*” (figura 39). Para la inspección en la parte inferior de la pieza se utilizaron las mismas herramientas que en el paso de la secuencia para la inspección superior solo que en este caso se decidió utilizar la detección y medición de los bordes de los clips de manera separadas debido a la forma irregular de los clips en la parte inferior, pero al igual que en la inspección superior se utilizó la función “*Match Pattern*” para referenciar el resto de las herramientas a un patrón específico. Al detectar la pieza como mala el siguiente paso en la secuencia es confirmar que se remueva la pieza detectada como mala para continuar la inspección de las piezas faltantes, esta secuencia se repite en cada una de las piezas y con esto se concluye el procesamiento de las imágenes.

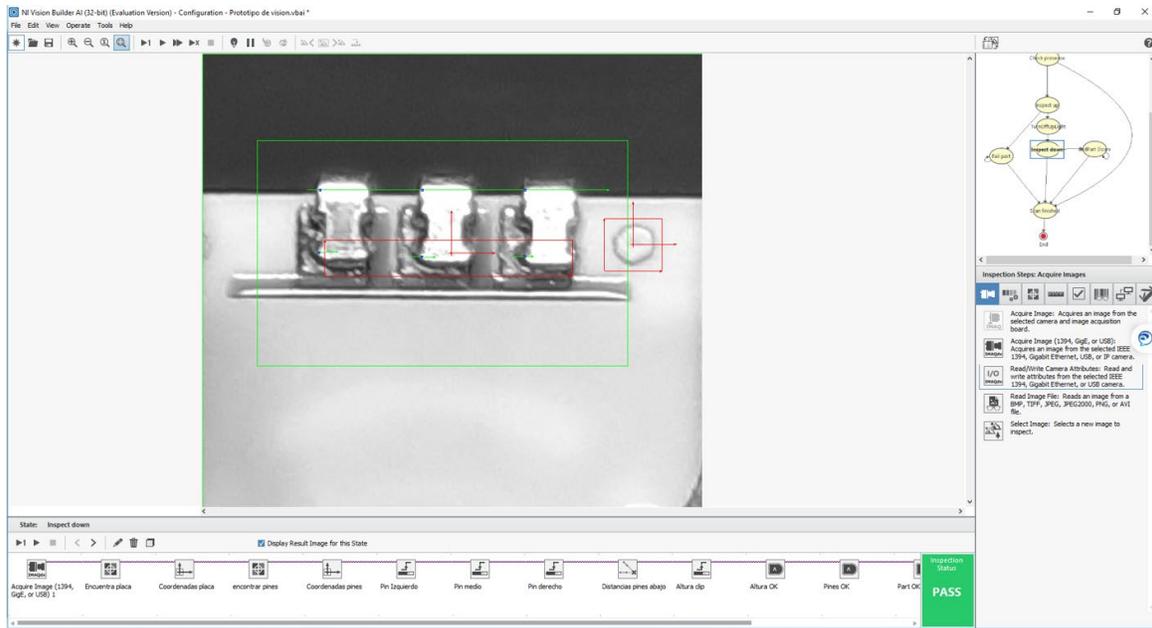


Figura 39. Inspección en parte inferior de la pieza  
Elaboración propia

### 3.5.6.5 Validación del sistema de visión

Para la validación del equipo se realizó un MSA por atributos, en los cuales se consideraron 50 piezas diferentes que fueron divididas en 5 grupos (pallets) cada uno de 10 piezas, cada pallet constaba de 6 piezas buenas (con tolerancias de alineación aceptables) y 4 piezas malas con los principales modos de falla (1 pieza desalineada hacia arriba de lado del circuito electrónico, 1 pieza con la misma condición pero del lado del elemento sensante, 1 pieza desalineada a la izquierda y 1 pieza desalineada a la derecha).

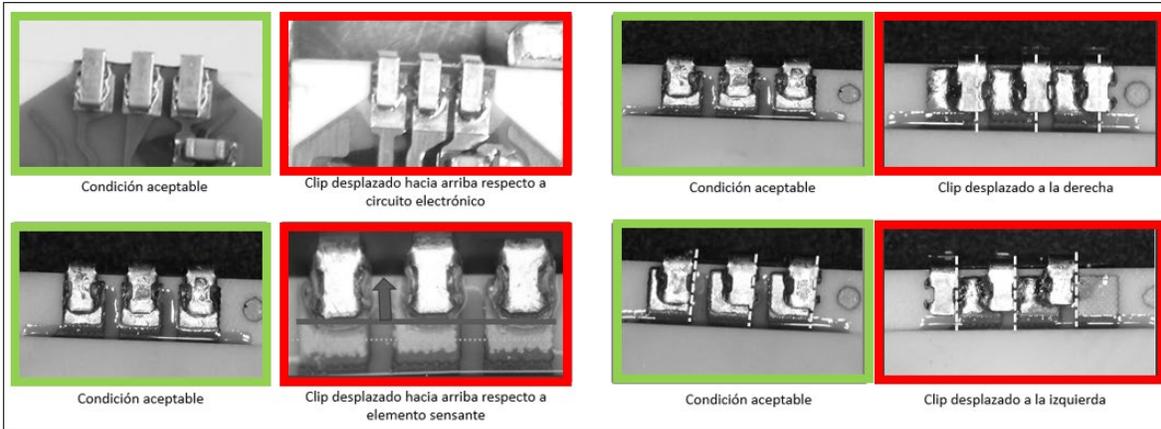


Figura 40. Referencias de piezas aceptables y defectivos (ayudas visuales de instrucciones de trabajo de la estación)  
Elaboración propia

Para las corridas del MSA se definieron los siguientes criterios: 3 operadores, 3 corridas de cada uno de los 5 grupos de piezas. Los resultados obtenidos fueron procesados con el software de minitab obtenido los siguientes resultados.



Figura 41. Reporte de clasificación errónea  
Elaboración propia

En la figura 42 se observan los porcentajes de precisión con el que el equipo fue capaz de detectar las piezas buenas y malas dependiendo del operador manejando el equipo, que en este caso con los operadores 2 y 3 el porcentaje fue de 99.3% y con el operador 1 del 100% para la detección de piezas buenas. En el caso de la detección de piezas malas fue del 100% con los 3 operadores.

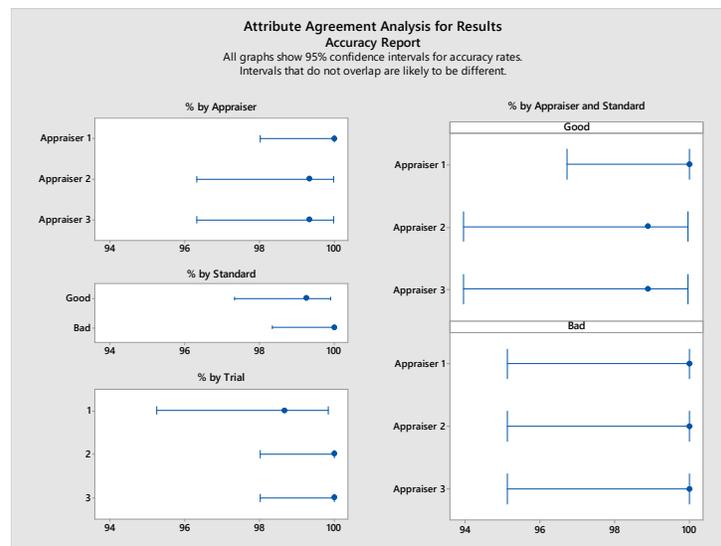


Figura 42. Reporte de precisión  
Elaboración propia

En la figura 43 se muestra el resumen del estudio de MSA por atributos con el cual se puede concluir que el estudio es aceptable. Para la industria automotriz un estudio por atributos con una efectividad arriba del 90% se considera aceptable, como se observa este estudio da como resultado 99.6%. Aunque el equipo fallo en 2 piezas se considera que el riesgo de mandar una pieza defectuosa al cliente es nulo, ya que todas las piezas malas fueron detectadas correctamente en todos los casos, como ya se mencionó las piezas que fallaron eran piezas buenas detectadas como malas, lo que podría causar sobre segregación de material en un bajo porcentaje en el caso de este estudio, lo que se considera más viable con el objetivo de proteger al cliente.

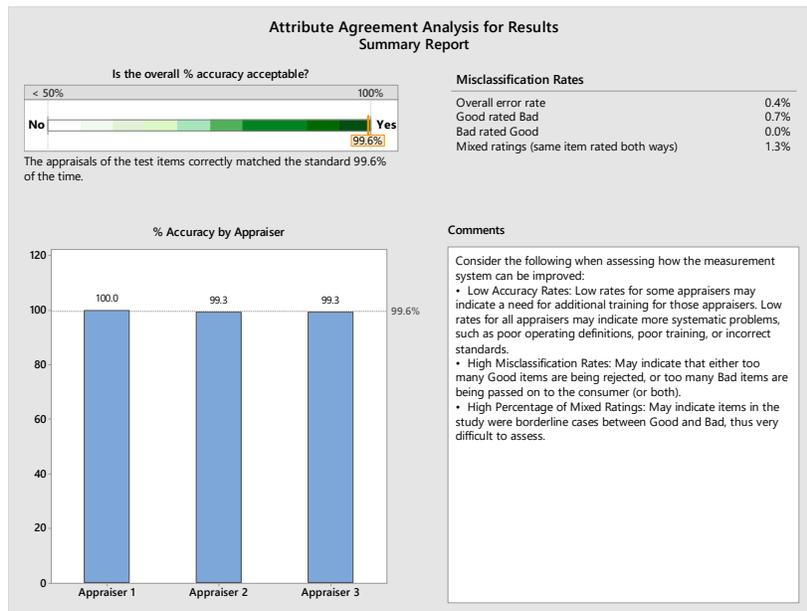


Figura 43. Resumen del estudio MSA  
Elaboración propia

### 3.5.6.6 Programa para gestión de datos en Labview

En este programa se consideró un algoritmo que realiza la gestión de los datos de tiempo ciclo y rendimiento de piezas buenas y defectos. El programa registra esta información pieza por pieza y con ella genera los registros correspondientes para cargarlos a una base de datos, con el propósito de tener rastreabilidad de los defectivos detectados, así como de tiempo ciclo y desempeño general de esta

parte del proceso, esta información puede ser monitoreada y analizada en tiempo real.

La información obtenida muestra el desempeño en esta parte del proceso en cuanto a productividad, ya que se puede saber el comportamiento que tiene el proceso de acuerdo al historial por turnos, por modelos y operadores. También se registra el desempeño de calidad por defectivos registrados, lo que a su vez también permite detectar si hay problemas en el proceso y si estos están relacionados a baja productividad, exceso de defectos o fallas en el equipo.

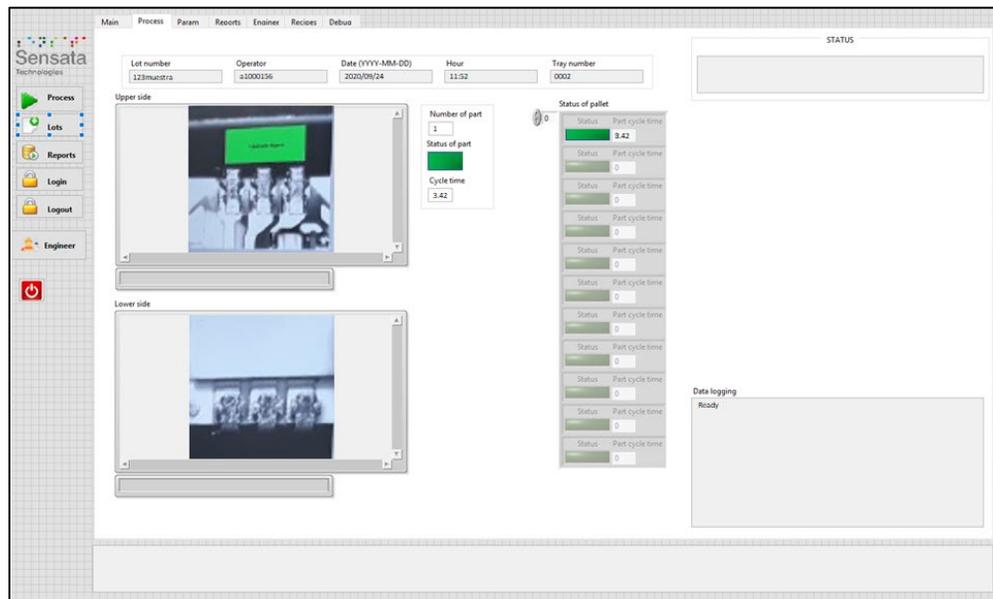
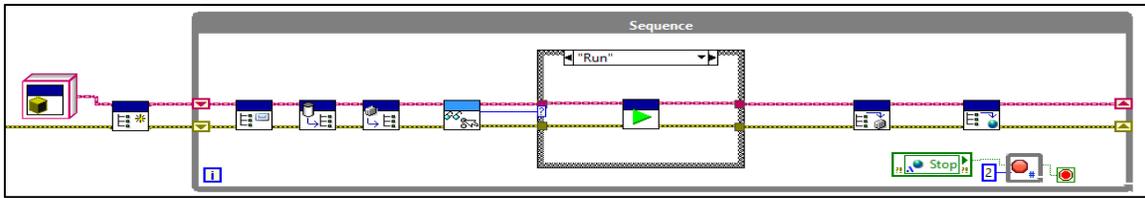


Figura 44. HMI para el manejo y registro de información que se mandan a la base de datos  
Elaboración propia





Elaboración propia

**Bucle de base de datos.** Este bucle controla la base de datos desde la máquina, toda la información se guarda y administra en este bucle. Los modos de operación también se gestionan aquí (leer registro, leer informe, escribir registro, editar registro, eliminar registro, consulta especial).

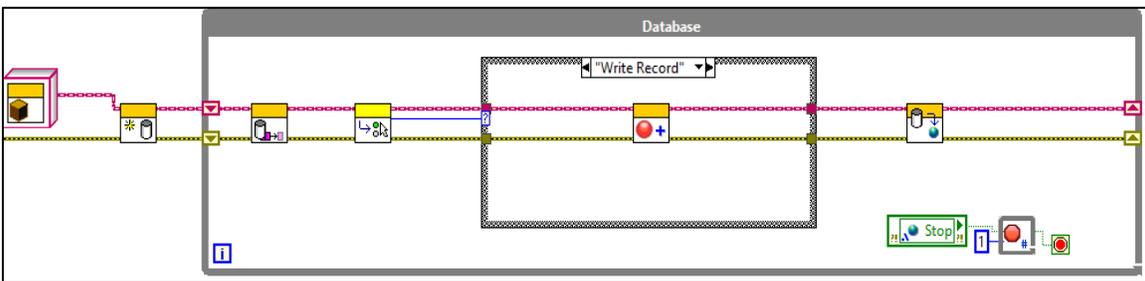


Figura 48. Bucle de base de datos  
Elaboración propia

**Bucle de comunicación con PLC.** Este bucle de comunicación interactúa con la información del sistema de visión y métricos del programa, este es la interfaz entre estos dos.

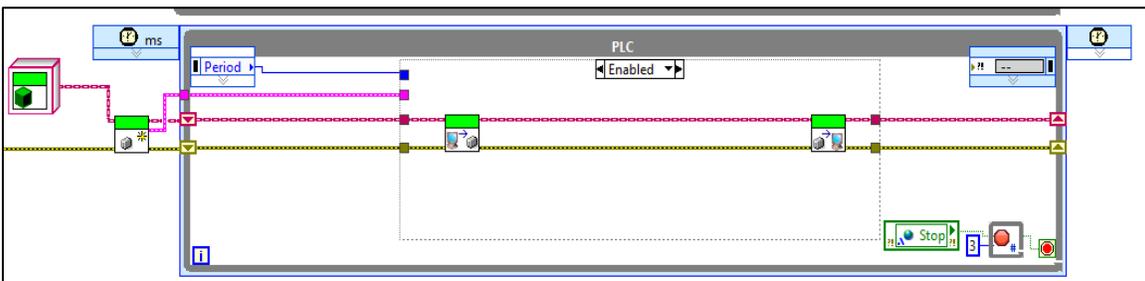


Figura 49. Bucle de comunicación de PLC  
Elaboración propia

**Información descargada de la base de datos en tiempo real.** La base de datos manejada en la planta es una base de datos SQL donde pueden ser descargados a través de un controlador ODBC. Esta es compatible con la plataforma “Thingsbord.io” por el tipo de comunicación, como se describió en el marco teórico. Como ya se mencionó la información necesaria para monitorear por el momento es TC, producción de piezas buenas y malas y registro de defectivos detectados en la operación.

Tabla 5. Información descargada de la base de datos

Test_Date	Part_number	Job_number	Operator	Fixture	Part_Status	Cycle_Time	Failure_mode	Cycle_counter
10/19/2019 11:06	17CP1-2	123muestra	1000156	1	Good	3.423	Good	41
10/19/2019 11:06	17CP1-2	123muestra	1000156	2	Good	3.393	Good	42
10/19/2019 11:06	17CP1-2	123muestra	1000156	3	Good	3.446	Good	43
10/19/2019 11:06	17CP1-2	123muestra	1000156	4	Good	3.408	Good	44
10/19/2019 11:06	17CP1-2	123muestra	1000156	5	Good	3.329	Good	45
10/19/2019 11:06	17CP1-2	123muestra	1000156	6	Bad	3.465	RefnotFound	46
10/19/2019 11:06	17CP1-2	123muestra	1000156	7	Good	3.300	Good	47
10/19/2019 11:06	17CP1-2	123muestra	1000156	8	Good	3.413	Good	48
10/19/2019 11:07	17CP1-2	123muestra	1000156	9	Good	3.420	Good	49
10/19/2019 11:07	17CP1-2	123muestra	1000156	10	Good	3.404	Good	50
10/19/2019 11:07	17CP1-2	123muestra	1000156	1	Good	3.308	Good	51
10/19/2019 11:07	17CP1-2	123muestra	1000156	2	Good	3.435	Good	52
10/19/2019 11:07	17CP1-2	123muestra	1000156	3	Good	3.417	Good	53
10/19/2019 11:07	17CP1-2	123muestra	1000156	4	Good	3.334	Good	54
10/19/2019 11:07	17CP1-2	123muestra	1000156	5	Good	3.381	Good	55
10/19/2019 11:07	17CP1-2	123muestra	1000156	6	Good	3.343	Good	56
10/19/2019 11:08	17CP1-2	123muestra	1000156	7	Good	3.367	Good	57
10/19/2019 11:08	17CP1-2	123muestra	1000156	8	Good	3.401	Good	58
10/19/2019 11:08	17CP1-2	123muestra	1000156	9	Good	3.448	Good	59
10/19/2019 11:08	17CP1-2	123muestra	1000156	10	Good	3.402	Good	60

Elaboración propia

### 3.5.7. Monitoreo de proceso con plataforma ThingsBoard

La plataforma *ThingsBoard* permite monitorear los datos reales de producción desde cualquier PC con acceso a Internet, sin importar el lugar en el que se requiera consultar esta información.

#### 3.5.7.1. Monitoreo de tiempo ciclo

Utilizando la plataforma de *ThingsBoard* fue creada una simulación para el monitoreo de tiempo ciclo en tiempo real. En el panel de monitoreo se consideró agregar un indicador digital del tiempo ciclo por pallet, así como un histórico de

tiempo ciclos a través del tiempo utilizando la gráfica de barras, en este caso considerando los últimos 30 minutos de producción, así como un panel de alertas por tiempo ciclo fuera del estándar definido que en este caso se alerta con ciclos mayores a 45 segundos por pallet.

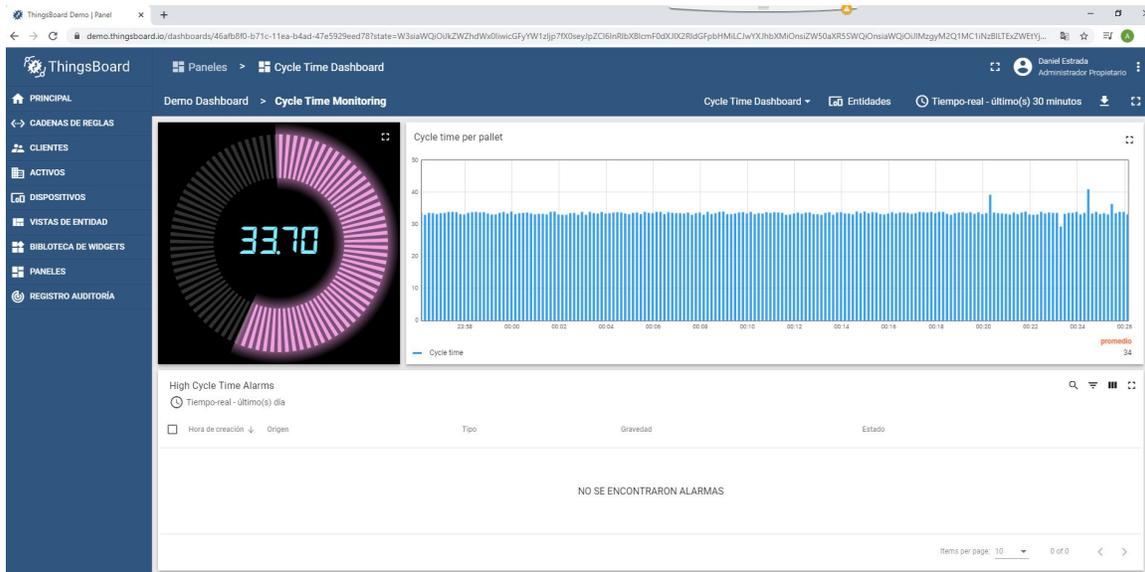


Figura 50. Panel de monitoreo de tiempo ciclo en tiempo real  
Elaboración propia

También utilizando la plataforma *ThingsBoard* fue creada la simulación para el monitoreo de defectivos en tiempo real. En el panel de monitoreo de desempeño se consideró el indicador digital para mostrar el desempeño promedio de los lotes producidos y una gráfica de *time series plot* para un historial de desempeño que se va actualizando cada ciclo, en este caso su muestra el histórico de desempeño de los últimos 15 minutos.

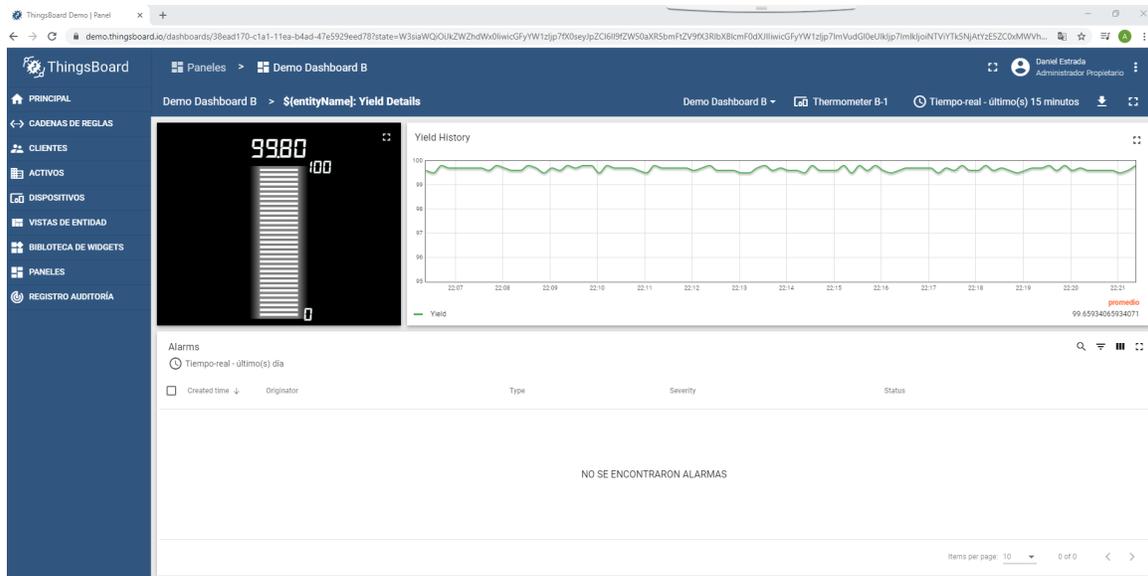


Figura 51. Panel de monitoreo de rendimiento (piezas buenas vs defectivos) en tiempo real  
Elaboración propia

## 4. RESULTADOS

### 4.1 MÁQUINA PROTOTIPO

La máquina prototipo fue terminada y probada con las características ya mencionadas, con la capacidad de guardar información en la base de datos de la empresa, para poder consultarse en cualquier momento.

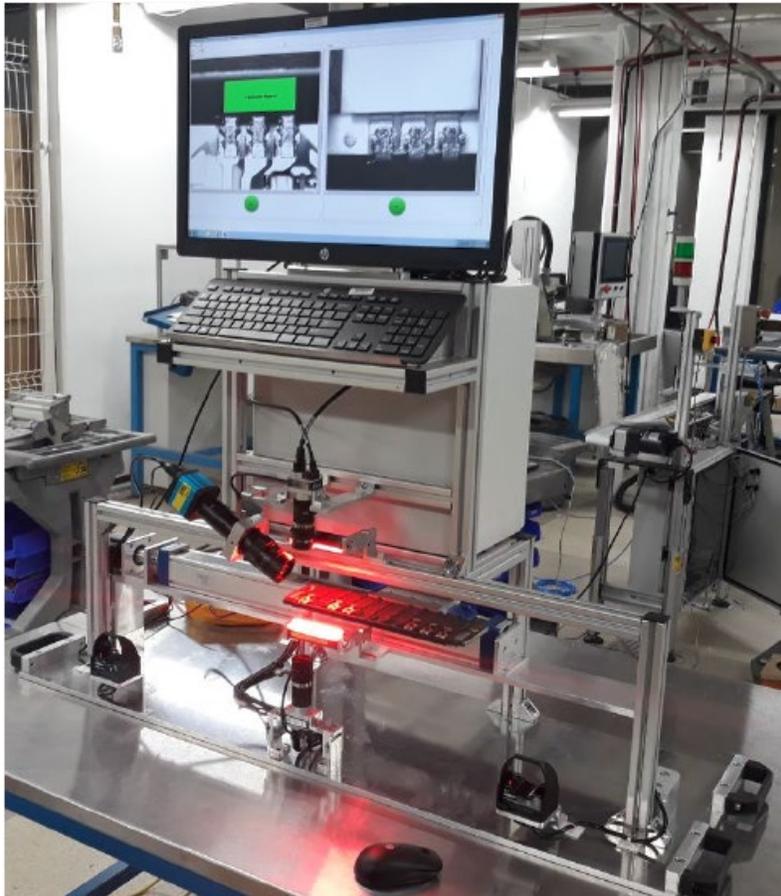


Figura 52. Máquina de inspección prototipo  
Elaboración propia

### 4.2 PRUEBAS CON MÁQUINA PROTOTIPO

Diferentes corridas de prueba fueron realizadas con la máquina prototipo para evaluar su funcionamiento y eficiencia. Como ya se mencionó anteriormente el

propósito de este equipo es poder medir y/o monitorear el desempeño de producción del proceso de soldadura por reflujo con un sistema confiable y automatizado además de poder consultar esta información en tiempo real utilizando algunos de los principios del *IoT*. Con este equipo se realizaron 3 corridas de pruebas en la línea de producción simulando un escenario de producción real en la línea, las cuales se explicarán a continuación.

#### **4.2.1 Primera prueba para medir desempeño actual del proceso de soldadura**

La primera prueba fue una corrida con la nueva máquina de inspección prototipo realizada con un lote de producción de 2500 piezas y consistió en colocar el equipo en el lugar designado para la inspección visual de soldadura con el objetivo de reemplazar esta operación con el nuevo sistema de visión, como ya se mencionó la idea en esta operación es aligerar la carga de trabajo del operador que hace la inspección de soldadura por reflujo, la cual considera inspeccionar la alineación de clips y condición de reflujo, el operador ya solo tendrá que inspeccionar condición de reflujo, porque la alineación de clips es inspeccionada por el sistema de visión de la máquina. Además, se comprobó que si fue posible realizar el monitoreo de tiempo ciclo y defectivos del proceso y descargar esta información de la base de datos desde la PC personal.

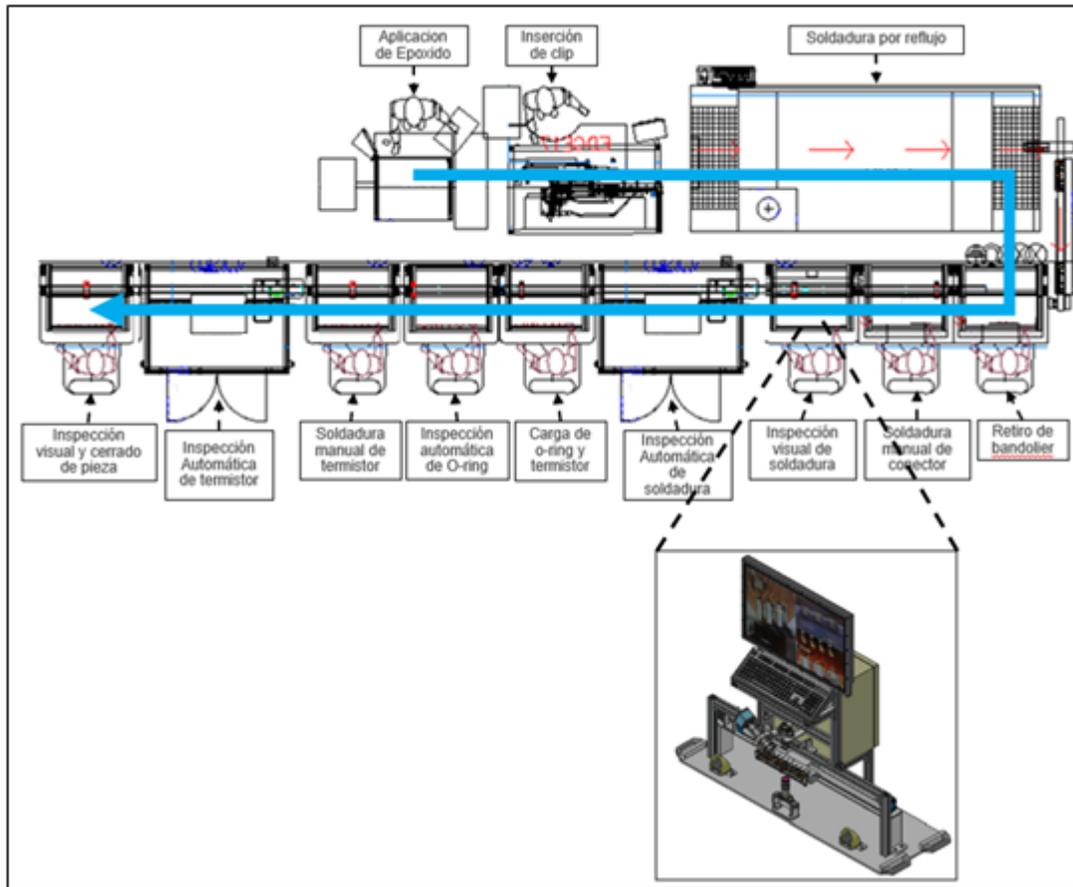


Figura 53. Ubicación de maquina prototipo en primera corrida de prueba  
Elaboración propia

Como resultado de esta corrida de prueba se obtuvo una reducción considerable de tiempo ciclo en esta operación de 45.25 a 37.58 segundos por pallet (10 piezas) como muestra la fig. 54. El rango de tiempo ciclo definido por la Dirección para poder lograr el objetivo de producción está entre los 35 a 45 segundos por pallet.

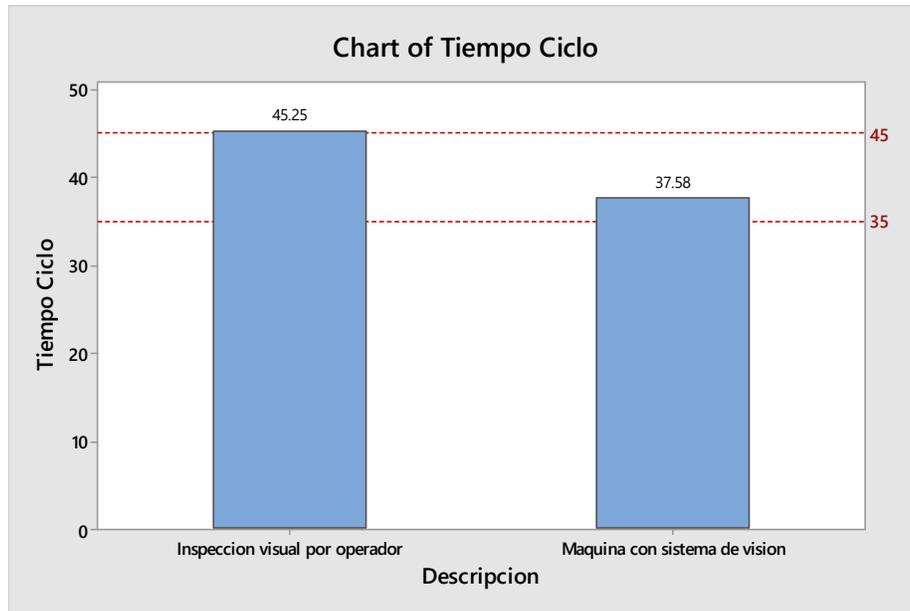


Figura 54. Gráfica comparativa de tiempo ciclo (actual vs nuevo equipo)  
Elaboración propia

También con esta corrida se pudo detectar que, aunque la mejora en tiempo ciclo en esta operación fue muy buena, no fue suficiente para obtener una mejora considerable en cuanto a la productividad, pero la información obtenida de esta corrida y del nuevo equipo permitieron hacer un análisis más detallado del PPH de todo el proceso de soldadura. Con esto se detectó un gran desbalance de tiempos ciclos por operaciones, lo cual permitió al equipo involucrado centrarse en mejorar este punto para la siguiente prueba.

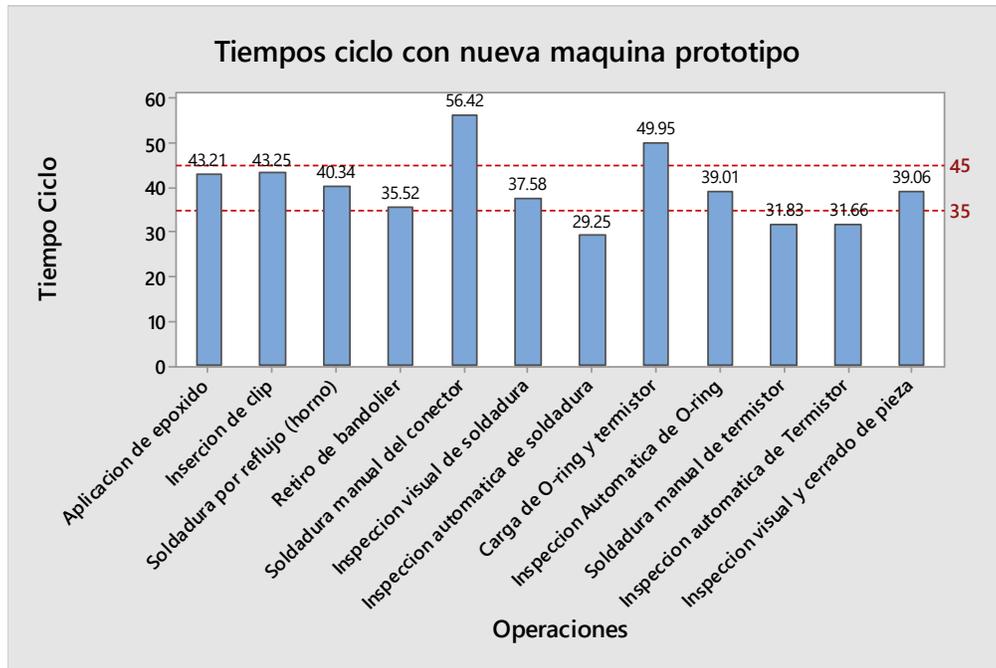


Figura 55. Tiempos ciclo por operaciones de proceso de soldadura  
Elaboración propia

#### 4.2.2 Segunda prueba con reacomodo de operaciones para balanceo de tiempos ciclo

Gracias a las características del nuevo equipo se pudo hacer un reacomodo de las operaciones enfocados en las inspecciones tanto visuales como automáticas, haciendo una fusión de estas en las operaciones disponibles sin bajar el nivel de detección con el que ya se contaba, además el reacomodo permitió balancear la carga de trabajo y tiempo ciclo por operador. Esto permitió eliminar 1 estación (sistema de visión con menos capacidad que la nueva máquina prototipo) y las inspecciones realizadas en este sistema fueron distribuidas en el resto de las estaciones disponibles. Esto a su vez permitió también cambiar el orden de los pasos para hacer más fluido el proceso de soldadura.

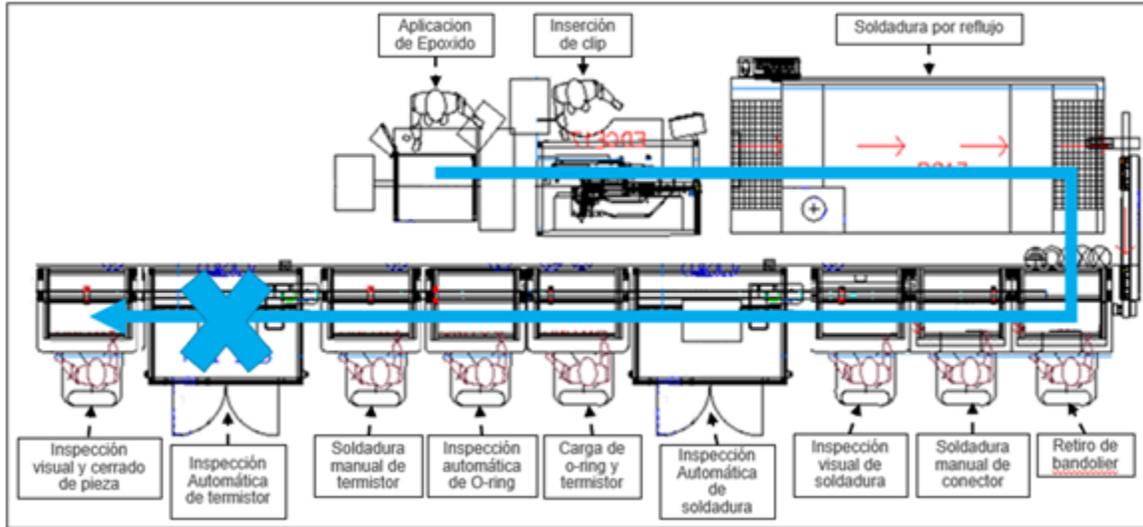


Figura 56. Estación eliminada gracias a la nueva máquina prototipo (sistema de visión)  
Elaboración propia

La segunda prueba fue realizada en la celda de producción con el reacomodo de las operaciones y la nueva máquina prototipo, esta vez con una cantidad más limitada de piezas (1000 piezas) debido a que este material fue procesado solo como pruebas y no como producción para cliente debido a las modificaciones realizadas a través del proceso. Cabe mencionar que se simuló un escenario lo más real posible con un plan de control prototipo y operadores debidamente certificados para realizar la corrida de prueba. Las primeras 100 piezas fueron utilizadas para dar el entrenamiento debido a los operadores en cuanto al nuevo orden de pasos a realizar por cada una de las operaciones, después de esto se realizó la corrida de prueba para evaluar cómo se vería esto en producción masiva.

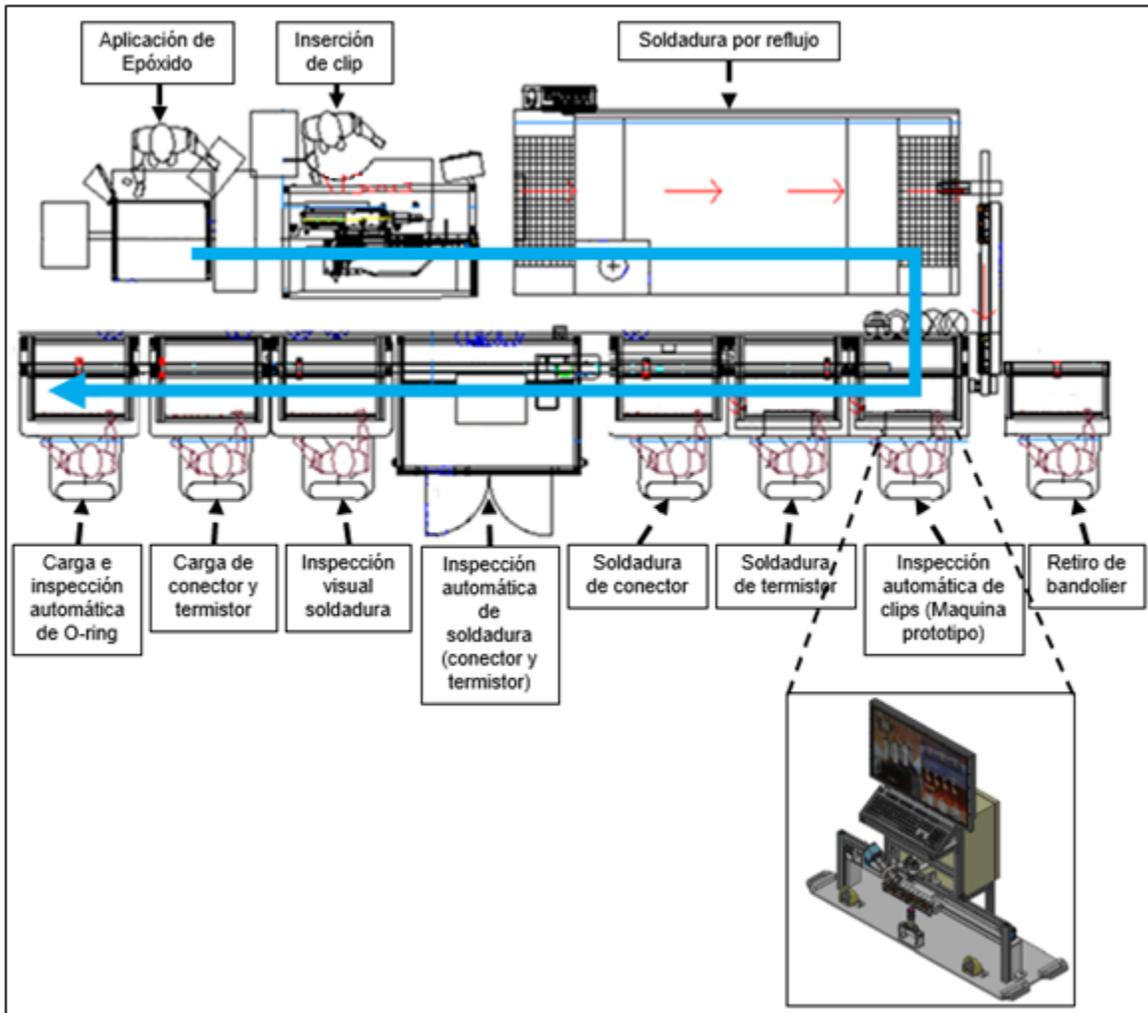


Figura 57. Mapa de nuevo proceso con balanceo de tiempos ciclo  
Elaboración propia

El resultado fue el esperado en esta prueba, incluso se puede decir que fue mejor de lo esperado, ya que en primera instancia se observó un movimiento más fluido a través de todo el proceso de soldadura y una vez que se analizaron los tiempos ciclos de la nueva máquina prototipo, así como los de cada una de las operaciones se observó un buen balanceo entre las operaciones. En la prueba anterior se observó una mejora en tiempo ciclo en la maquina prototipo respecto a la condición original (antes de implementar maquina prototipo), pero no una mejora en el flujo del material a través de todas las operaciones que involucran el proceso de soldadura, lo que genera tiempos de espera debido al desbalanceo entre las operaciones. Con esta segunda prueba se observó la mejora de tiempo

ciclo en la operación y tiempos de espera prácticamente nulos por la mejora de flujo de material en todas las operaciones, como se muestra en la figura 58.

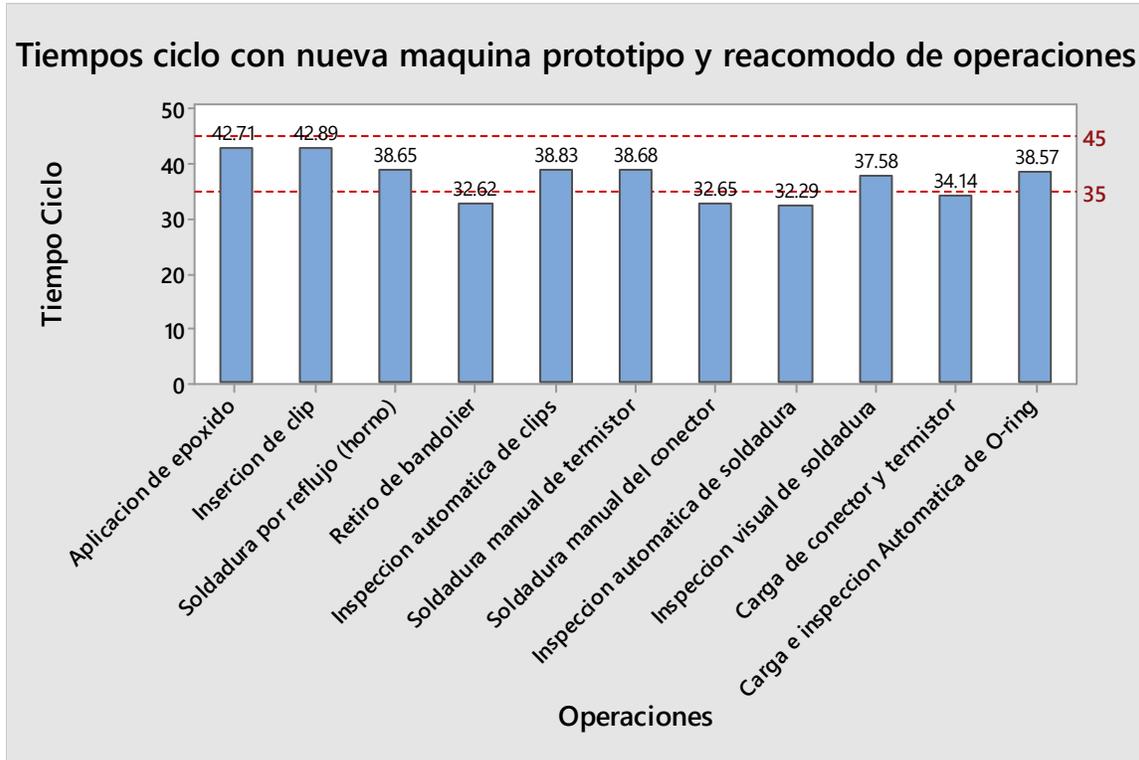


Figura 58. Tiempos ciclo por operaciones de proceso de soldadura con reacomodo de operaciones  
Elaboración propia

El PPH demostrado en esta corrida fue de 705 piezas aproximadamente considerando las pequeñas incidencias de paro como el llenado de registros y ajustes menores en los equipos.

Una tercera corrida de prueba fue solicitada por la gerencia y el equipo de Ingeniería del centro de negocios a modo de confirmación de los resultados demostrados y para evaluar viabilidad de modificaciones en el reacomodo de las

operaciones, para posteriormente pedir las aprobaciones de cliente para el cambio en el proceso.

La tercera corrida fue solicitada en una línea diferente de producción (celda 14) donde corren dispositivos similares al P+T pero no los mismos. Esta prueba fue solicitada por gerencia de este modo, ya que se está contemplando validar más líneas de producción (celdas) para los dispositivos P+T porque se pronostica que para los próximos años se incrementara la demanda de estos modelos de 3.2 millones de piezas a 7 u 8 millones de piezas anuales aproximadamente, lo que convierte este proyecto de investigación en una opción más viable a implementar en producción masiva, ya que el beneficio justifica la inversión de los cambios necesarios, así como el desarrollo de un equipo para producción masiva basado en la maquina prototipo realizada para este proyecto.

Para esta prueba fueron construidas 1500 piezas considerando las mismas condiciones que en la prueba anterior, pero en una diferente línea de producción (diferente celda), y al igual que la prueba anterior los resultados fueron los esperados, se confirmaron tiempos ciclos y PPH muy similares a la segunda corrida, así como la viabilidad de hacer la flexibilidad en otras celdas para producir estos dispositivos bajo este concepto.

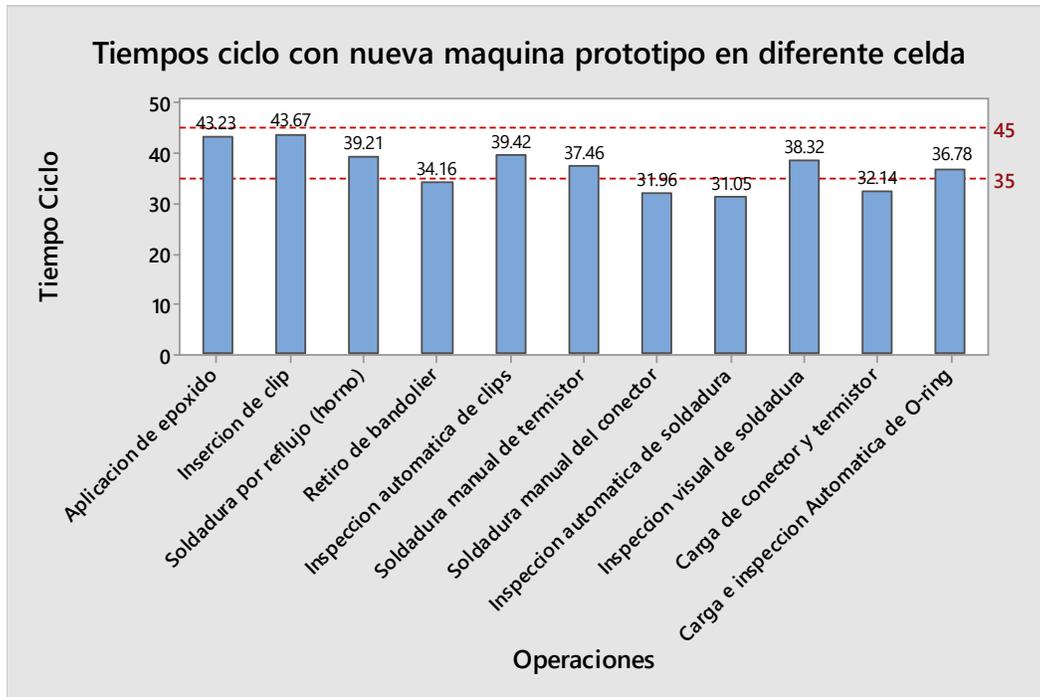


Figura 59. Tiempos ciclo por operaciones de proceso de soldadura con reacomodo de operaciones y en diferente línea de producción (diferente celda)  
Elaboración propia

El PPH demostrado en esta corrida fue de 690 piezas aproximadamente considerando las pequeñas incidencias de paro como el llenado de registros y ajustes menores en los equipos.

Basándose en el historial de productividad que tenemos de los dispositivos P+T en celda 17 se realizó un comparativo de estos mismos contra la información obtenida en las diferentes pruebas realizadas con la maquina prototipo. Básicamente lo que se está considerando es el PPH tomado del historial reportado de producción sin la maquina prototipo contra el PPH tomado de las corridas de prueba que se realizaron, este PPH está considerando los eventos normales dentro del proceso como son ajustes de arranque de operación y llenado de documentos, en ambos casos se descartan los eventos mayores como: paros de maquina por falla, falta

de material, etc. La figura 60 muestra el comparativo de productividad respecto a PPH.

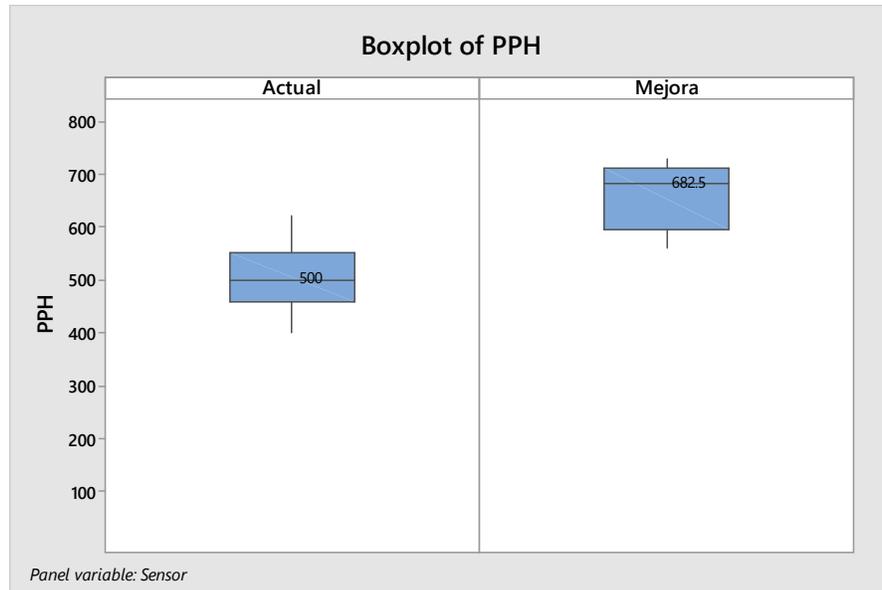


Figura 60. PPH demostrado actual (sin máquina prototipo) contra mejora (con máquina prototipo)  
Elaboración propia

#### 4.4 PRUEBA DE HIPÓTESIS DE PPH ACTUAL CONTRA PPH MEJORADO CON MÁQUINA PROTOTIPO

Para confirmar si la mejora es significativa se realizó una prueba de hipótesis con los datos obtenidos, considerando que de la condición actual se contaba con información de 2 meses de monitoreo aproximadamente, contra una cantidad menor de información obtenida en las 3 corridas de prueba, pero suficientes para realizar nuestra prueba hipótesis.

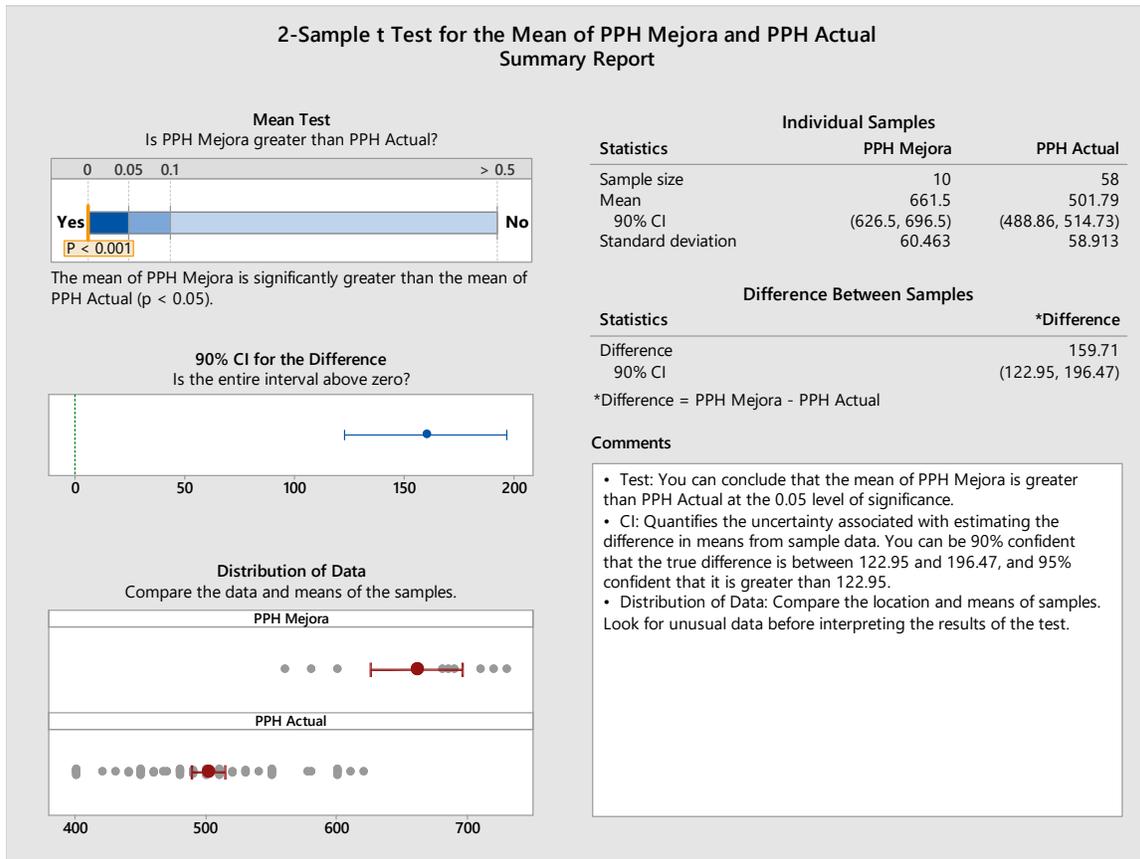


Figura 61. Prueba de hipótesis de PPH actual contra PPH mejorado con máquina prototipo  
Elaboración propia

Como se puede observar en la figura 61, la prueba de hipótesis muestra que el PPH con la maquina prototipo es mayor que el PPH tomado de producción (antes de las pruebas con la máquina prototipo), con una confiabilidad del 95%. También muestra que si hay diferencia significativa entre las muestras de los datos tomados de producción y de las corridas de prueba con una confiabilidad del 90%.

#### 4.5 RESULTADOS DE REDUCCIÓN DE DEFECTIVOS CON MÁQUINA PROTOTIPO

Para analizar la mejora respecto a los defectivos producidos se tomó como base la información de todo un mes de producción contra los datos de las corridas de prueba. Como se puede observar en la figura 62, la cantidad de defectivos producidos con la condición actual no es muy alta, ya que es del 0.48%, sin embargo, con la maquina prototipo los defectivos producidos se redujeron al 0.18%

lo que nos da una mejora de 0.30%. Esto se atribuye a la temprana detección de los defectivos por dos razones:

1. El nuevo equipo puede proporcionar información de los defectivos en tiempo real, lo que permite alertar a los operadores de estaciones anteriores donde estos defectivos son generados para prevenir que se sigan produciendo.

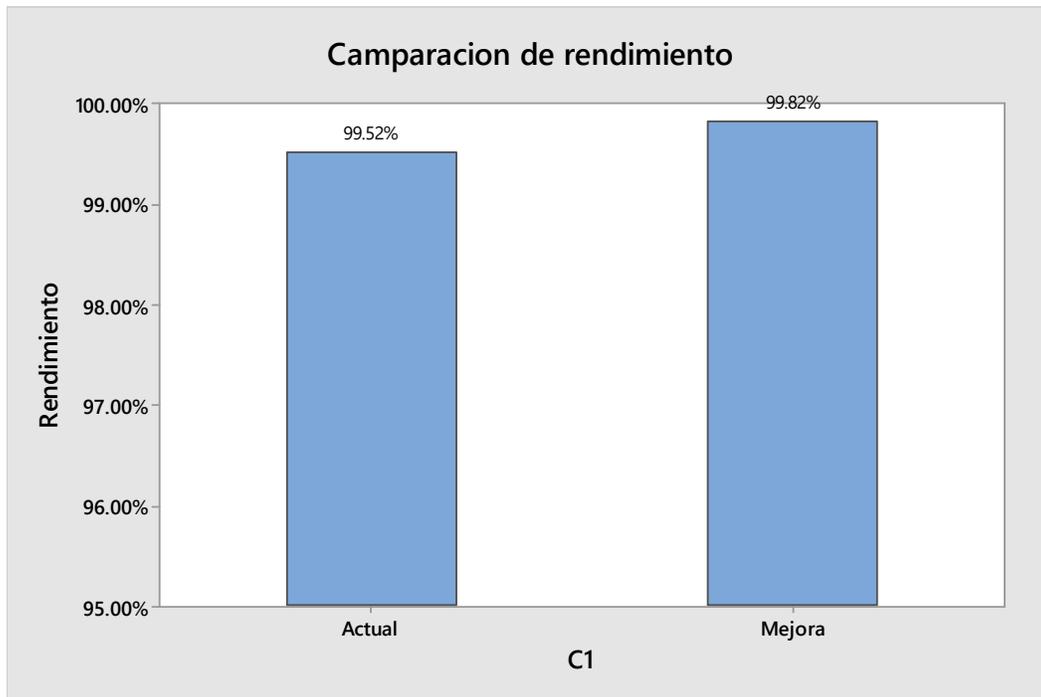


Figura 62. Comparación de rendimiento (porcentaje de piezas buenas)  
Elaboración propia

## CONCLUSIONES

Hoy en día los sistemas de visión son una parte esencial en los procesos de manufactura, ya que sus principales funciones son detectar partes defectuosas o medir características especiales de las piezas manufacturadas, entre otras. Estas operaciones de los procesos se convierten en puntos clave, ya que es aquí donde se puede monitorear como se realizó el trabajo en las operaciones anteriores a través de todo el proceso. Con esta investigación se utilizan estas características para tomar ventaja de ello y agregarle otra que es muy importante, el monitoreo la productividad en tiempo real, aplicando los principios del Internet de las cosas.

El nuevo sistema visión de soldadura con la aplicación de IoT, proporciona una nueva forma de mejorar este proceso y el servidor de IoT permite aplicar con facilidad la metodología *Six Sigma* gracias a la información que ofrece dicho servidor. El módulo IoT sube la información a una base de datos lo que permite un monitoreo en tiempo real para el análisis, y siguiendo los principios básicos de la metodología *Six Sigma* proporciona información en tiempo real para la optimización del proceso.

Con el nuevo sistema IoT (máquina prototipo) se pudo mejorar la productividad en un 30% respecto a los sistemas tradicionales de inspección de soldadura. Este nuevo sistema permite medir el proceso y ayuda al personal de procesos y mantenimiento a reaccionar basándose en datos y sugerencias de *Lean Six Sigma* a los eventos que afectan en el corto y largo plazo, ayudando a resolver problemas como tiempo de paro, bajas de tiempo ciclo, bajas de rendimiento, picos de defectos de calidad, entre otros.

La Industria 4.0 en general debe de ser una nueva manera de pensar para el desarrollo de nuevos productos, procesos y servicios, ya está aquí, ya se cuenta con las herramientas necesarias solo se debe adaptar el pensamiento a esta nueva revolución tecnológica.

## RECOMENDACIONES

Como ya se mencionó en este documento, la maquina con la que se realizaron las pruebas es un prototipo lo suficientemente funcional para cumplir y demostrar el objetivo, ya que se pudo mejorar la productividad y reducir los defectivos producidos gracias a esta. Pero la recomendación para la empresa es realizar un nuevo equipo lo suficientemente robusto para implementarlo en producción, basado en las características de la maquina prototipo, para obtener las mejoras demostradas.

En la compañía se cuenta con un sistema llamado SEE (*System Efficiency Equipment*) en el que se puede tener un monitoreo de información del producto y los equipos a través de una base de datos para monitoreo en tiempo real, el único detalle es que este sistema aun depende 100% de los operadores para la captura de estos, lo que deja un margen de error en la captura. La diferencia con esta nueva máquina prototipo es que utilizando la plataforma *ThingsBoard* se genere el registro de la información de manera automática directamente desde el equipo, así que la recomendación sería llevar este sistema al siguiente nivel aplicando este principio en las operaciones que así lo requieran.

Para el desarrollo de nuevos productos y equipo se recomienda tomar como referencia este trabajo, con la finalidad de que las personas descubran una forma (de las muchas que existen) de cómo se pueden aplicar uno de los principios de Industria 4.0, específicamente el principio de Internet de las cosas en la planta de Sensata Aguascalientes que es manufacturera en su mayoría.

## **APORTACIÓN DE LA TESIS**

El aporte de esta tesis de maestría está enfocado a la implementación del internet de las cosas (*IoT*) a los sistemas de visión dedicados a la inspección de soldadura por reflujo de circuitos electrónicos automotrices, ya que a través del Internet de las cosas se puede monitorear este proceso en tiempo real, lo que también hace posible obtener una mayor cantidad de datos del proceso, el manejo de esta información y datos permite optimizar la productividad y calidad en el proceso de manufactura de sensores automotrices, aplicando las metodologías Lean, Six Sigma e Industria 4.0. también se muestra un ejemplo de cómo aplica el término que está siendo utilizado en investigaciones recientes de Lean Six Sigma 4.0, que básicamente es la integración de los términos ya mencionados.

## **APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS**

La aportación social de la tesis está enfocada a mejorar de manera competitiva la industria manufacturera, como se sabe en la actualidad esta es una de las industrias en constante crecimiento y avances tecnológicos a nivel global, por lo que requiere de la innovación constante de las personas dedicadas a este tipo de industria, pero sobre todo a innovar y mejorar este tipo de conocimientos y a la vez las industrias en México para que el país pueda seguir compitiendo de manera global en el ramo automotriz. Parte del aporte social de esta tesis es el motivar e incentivar a las personas en México para poder direccionar el crecimiento del país hacia el desarrollo e innovación tecnológica.

## REFERENCIAS

- AEC. (2020). *Asociación Española para la Calidad (AEC)*. Obtenido de Lean Seis Sigma Introducción: [https://www.aec.es/c/document\\_library/get\\_file?uuid=0c51f4b2-9a18-46e1-8294-f2f6d1d3b9c7&groupId=10128](https://www.aec.es/c/document_library/get_file?uuid=0c51f4b2-9a18-46e1-8294-f2f6d1d3b9c7&groupId=10128)
- Arcidiacono, G., & Pieroni, A. (2018). The revolution Lean Six Sigma 4.0. *International Journal on Advanced Science. Engineering and Information Technology*, vol. 8, no 1, p. 141-149.
- Cárdenas, Á. (2016). *¿Qué es una plataforma IoT?* Obtenido de Secmotic: <https://secmotic.com/plataforma-iot/>
- Dai, H. N., Wang, H., Xu, G., Wan, J., & Imran, M. (2020). Big data analytics for manufacturing internet of things: opportunities, challenges and enabling technologies. En *Enterprise Information Systems* (págs. 1279-1303).
- Ehrlich, M., Wisniewski, L., & Jasperneite, J. (2018). State of the art and future applications of industrial wireless sensor networks. *n Kommunikation und Bildverarbeitung in der Automation* (págs. p. 28-39). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Erol, S. (2016). Tangible Industry 4.0: a scenario-based approach to learning for the future of production. *Procedia Cirp*, vol. 54, no 1, p. 13-18.
- Hozdić, E. (2015). Smart factory for industry 4.0: A review. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 28-35.
- INFAIMON S.L. (2018). *INFAIMON*. Obtenido de Descripción Genie Nano 1280: <https://www.infaimon.com/producto/genie-nano-1280/>
- INFAIMON S.L. (2018). *INFAIMON*. Obtenido de Descripción Xenon Topaz XN2.0/50 - 0901: <https://www.infaimon.com/producto/xenon-topaz-xn2-0-50-0901/>
- INFAIMON S.L. (2018). *INFAIMON*. Obtenido de Descripción procesador GEVA 300: <https://www.infaimon.com/producto/geva-300/>
- IRENA. (2019). *Internet of things*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- Mery, D. (2002). Inspección visual automática. *Primer Congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica* (págs. 1-2). Lima, Perú: Universidad de Santiago de Chile.
- Nave, D. (2002). How to compare Six Sigma, lean and the theory of constraints. *Quality progress*, 35(3), 73-80.

- Newman, T. S., & Jain, A. K. (1995). A survey of automated visual inspection. *Computer vision and image understanding*, 61(2), 231-262. doi:<https://doi.org/10.1006/cviu.1995.1017>
- Nogué, A., & Antiga, J. (2012). *Aplicación práctica de la visión artificial en el control de procesos industriales*. Gobierno de España (Ministerio de Educación).
- Rojko, A. (2017). Industry 4.0 concept: background and overview. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 11(5), 77-90. Obtenido de <https://online-journals.org/index.php/i-jim/article/view/7072/0>
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015). Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. *Boston Consulting Group*, 54-89.
- Schuh, G., Potente, T., Wesch-Potente, C., & Ruth, A. (2014). Collaboration mechanisms to increase productivity in the context of industrie 4.0. *Procedia CIRP*, 19, 51-56. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827114006453>
- Sensata Technologies, Inc. (25 de March de 2020). *About: Sensata Technologies*. Obtenido de <https://www.sensata.com/about>
- Senvar, O., & Akkartal, E. (2018). An overview to industry 4.0. *International Journal of Information, Business and Management*, 10(4), 50-57.
- Sharma, K. L. (2016). *Overview of industrial process automation*. Bengaluru, India: Elsevier.
- Sodhi, H. S. (2020). When industry 4.0 meets Lean Six Sigma: a review. *Industrial Engineering Journal*, 13(1).
- Stancioiu, A. (2017). The fourth industrial revolution "Industry 4.0". *Fiability & Durability/Fiabilitate si Durabilitate*, 1(19), 74-78.
- ThingsBoard. (2020). *What is ThingsBoard IoT Gateway?* Obtenido de <https://thingsboard.io/docs/iot-gateway/what-is-iot-gateway/>
- Vaidya, S., Ambad, P., & Bhosle, S. (2018). Industry 4.0—a glimpse. *Procedia Manufacturing*, 20, 233-238. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918300672>
- Visión Artificial. (2012). *Aplicación práctica de la visión artificial en el control de procesos industriales*. Ministerio de Educación y Formación Profesional, Gobierno de España, Pag. 7.
- Wilson, D., Greig, A., Gilby, J., & Smith, R. (1996). Uncertainty in Automated Inspection, the problems in the real world. In Workshop on Uncertainty in Information Systems. *12th European Conference on Artificial Intelligence*. Budapest, Hungary: 12th European Conf. on Artificial Intelligence (ECAI).

Witkowski, K. (2017). Internet of things, big data, industry 4.0 - innovative solutions in logistics and supply chains management. *Procedia engineering*, 182, 763-769. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817313346>

World Customs Organization. (2019). *Study report on disruptive technologies*. Brussels. Obtenido de <http://www.wcoomd.org/en/topics/facilitation/instrument-and-tools/tools/disruptive-technologies.aspx>

## **ANEXOS**

## **ANEXO A. Descripción del procesador**

El procesador GEVA-300 es un sistema compacto de visión y está diseñado para funciones multicámara, este cuenta con interfaz Gigabit Ethernet expansible, con una capacidad de alto rendimiento a precio accesible, además por su tamaño pequeño ayuda a ahorrar espacio, sin ventiladores y con una carcasa resistente para trabajar en ambientes agresivos.

Su procesador está basado en Inter® dual-core ATOM™, con un diseño robusto para una gran variedad de aplicaciones de visión artificial, además de un bajo consumo eléctrico. Tiene 6 puertos de entrada dedicados a la conexión de cámaras o uno adicional para su conexión en red, además de 2GB de memoria DDR2 de alta velocidad. Este procesador es capaz de soportar una gran cantidad de cámaras GigE de área y lineales, incluida toda la serie de cámaras GENIE de Teledyne Dalsa, este incluye el software iNspec Express o Sherlock con el sistema operativo integrado Microsoft® Windows® 7.

Este es un excelente sistema a precio accesible para aplicaciones multicámara, por ejemplo, para la inspección de ensamblajes de grandes dimensiones. Los 6 puertos de entrada (Gigabit Ethernet) de alto ancho de banda pueden ser compatibles con una gran variedad de cámara GigE, las cuales pueden ser utilizadas o combinadas dependiendo de las necesidades de la aplicación, además por su diseño sin ventiladores podemos decir que es lo suficientemente robusta y fiable para aplicaciones dentro de la industria. Las cámaras pueden expandirse fácilmente usando tecnologías de red existentes y comunes en el mercado, con esto se puede tener la capacidad de efectuar grandes y complejas configuraciones con un costo accesible del sistema.

El procesador GEVA-300 está basado en la arquitectura Intel(R) Dual-Core ATOM(TM), que cuenta con un bajo consumo de electricidad y un extraordinario desempeño para una amplia variedad de aplicaciones de los sistemas de visión. Este también puede ser ampliado con un módulo opcional PL-USB el cual ofrece una expansión de E/S y una integración amigable de hasta 4 cámaras. Este procesador cuenta con una variedad de interfaces externas para integrar el sistema, ya que incluye pantalla dedicada y puertos USB que pueden ser utilizados

para configurarlo, además del control del tiempo de ejecución y un puerto en serie utilizado para la comunicación de fábrica (INFAIMON S.L, 2018).

## ANEXO B. Características del procesador

- Procesador Dual Core Atom @ 1.8 GHz.
- 2 GB de memoria de programa, 40 GB de almacenamiento SSD.
- 6 puertos GigE con lanes PCIe independientes para cámaras y redes.
- Pantalla VGA de conexión directa con alta resolución, 3 puertos USB, 1 RS-232.
- Diseño sin ventilador de 0-45 grados C en plataforma robusta y confiable para fábricas.
- Diseño de montaje DIN, 42x145x198mm, facilita el montaje del GEVA-300 y ocupa menos espacio de panel.
- Soporte E/S a través de PL-USB externo, facilita la integración con cámaras Genie.
- E/S de 64 bits embebida Win7 con filtro de escritura para protección de la imagen de la unidad durante cortes de electricidad.
- Software iNspect Express y Sherlock de 64 bits para un mayor rendimiento y eficiencia (INFAIMON S.L, 2018).



Figura B163. Procesador GEVA 300.  
(INFAIMON S.L, 2018).