

# UNIVERSIDAD DE SONORA DIVISIÓN DE INGENIERÍA



## POSGRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS Y TECNOLOGÍA

PROPUESTA PARA LA SELECCIÓN DEL NIVEL DE  
AUTOMATIZACIÓN PARA INCREMENTO DE PRODUCTIVIDAD  
EN LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE ENCINTADO DE ARNESES

### T E S I S

PRESENTADA POR

**ALEJANDRO CHAN AMAYA**

Desarrollada para cumplir con uno de los  
requerimientos parciales para obtener  
el grado de Maestro en Ingeniería

DIRECTORA DE TESIS  
DRA. MARÍA ELENA ANAYA PÉREZ

CODIRECTOR  
DR. VÍCTOR HUGO BENÍTEZ BALTAZAR

HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO.

NOVIEMBRE 2017

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess



Hermosillo, Sonora a 11 de octubre de 2017

## ALEJANDRO CHAN AMAYA

Con fundamento en el artículo 66, fracción III, del Reglamento de Estudios de Posgrado vigente, otorgamos a usted nuestra aprobación de la fase escrita del examen de grado, como requisito parcial para la obtención del Grado de Maestro en Ingeniería.

Por tal motivo este jurado extiende su autorización para que se proceda a la impresión final del documento de tesis: **PROPUESTA PARA LA SELECCIÓN DEL NIVEL DE AUTOMATIZACIÓN PARA INCREMENTO DE PRODUCTIVIDAD EN LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE ENCINTADO DE ARNESES** y posteriormente efectuar la fase oral del examen de grado.

ATENTAMENTE

Dra. María Elena Anaya Pérez  
Directora de tesis y Presidente del jurado

Dr. Victor Hugo Benítez Baltazar  
Codirector y Vocal del Jurado

Dr. Jesús Horacio Pacheco Ramírez  
Secretario del Jurado

Dr. Luis Felipe Romero Dessens  
Vocal del Jurado

Fisciano, Salerno, Italia, a 25 de septiembre de 2017

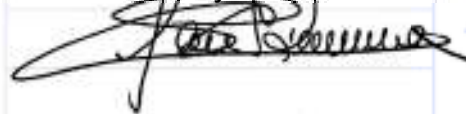
**ALEJANDRO CHAN AMAYA**

Con fundamento en el artículo 66, fracción III, del Reglamento de Estudios de Posgrado de la Universidad de Sonora, otorgo a usted mi aprobación de la fase escrita del examen profesional, como requisito parcial para la obtención del Grado de Maestro en Ingeniería.

Por tal motivo, como sinodal externo y vocal del jurado, extiendo mi autorización para que se proceda a la impresión final del documento de tesis: **PROPUESTA PARA LA SELECCIÓN DEL NIVEL DE AUTOMATIZACIÓN PARA INCREMENTO DE PRODUCTIVIDAD EN LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE ENCINTADO DE ARNESES** y posteriormente efectuar la fase oral del examen de grado.

ATENTAMENTE

DR. STEFANO RIEMMA  
UNIVERSIDAD DE SALERNO  
Sinodal Externo y Vocal del Jurado



## **RESUMEN**

Las organizaciones manufactureras están experimentando un fenómeno en común como cambios frecuentes, incertidumbre e imprevisibilidad en los entornos empresariales. Con el fin de sobrevivir, las organizaciones están empleando diversas técnicas, tales como la manufactura celular, justo a tiempo, manufactura flexible o manufactura asistida por computadora.

Las empresas están en constante búsqueda de mejoras en la productividad para aumentar su competitividad. El uso de la tecnología de la automatización es una herramienta que ha sido probada para lograr esto. Pero no asegura resultados ventajosos. Una de las claves para una inversión e implementación de equipos automatizados exitosa, es la elección de la tecnología adecuada, el tipo y nivel de automatización que mejor se adapte a la empresa, sus necesidades, objetivos y requisitos previos.

El proyecto se desarrolla en la empresa TE Connectivity Automotriz localizada en Hermosillo, Sonora. Comprende la propuesta para la selección del nivel de automatización para incremento de productividad, enfocado en las estaciones con procesos de encintado de arnés.

En este documento se presenta una metodología que permite realizar el análisis y la evaluación de diferentes niveles de automatización. De esta manera, llevar a cabo la selección del nivel que mejor se cumple con las necesidades y objetivos de la empresa. Se realizó una investigación bibliográfica acerca de sistemas automáticos, de donde se obtuvo la metodología presentada el cual consta de cuatro fases: Pre estudio, medición, análisis e implementación.

Como resultados de la investigación se obtuvo una simulación del sistema propuesto, el cual arroja que es posible hacer la disminución de los operadores en el proceso bajo estudio y de esta forma aumentar la productividad, como parte de los resultados se tienen los diseños de los diagramas de programación y control eléctrico.

# **ABSTRACT**

Manufacturing organizations are experiencing a common phenomenon such as frequent changes, uncertainty and unpredictability in business environments. In order to survive, organizations are employing several techniques, such as cell manufacturing, just in time, flexible manufacturing, or computer-aided manufacturing.

Companies are constantly seeking improvements in productivity to increase their competitiveness. The use of automation technology is a tool that has been proven to accomplish this objective. But it does not ensure advantageous results. One of the keys to a successful investment and implementation of automated equipment is the choice of the right technology, the type and level of automation that best suits the company, its needs, objectives and prerequisites.

The project is developed in TE Connectivity Automotive Company located in Hermosillo, Sonora. It includes the proposal for the selection of the level of automation for productivity increase, focused on the stations with processes of harness taping.

This document presents a methodology that allows the analysis and evaluation of different levels of automation. In this way, carry out the selection of the level that best meets the needs and objectives of the company. A bibliographical research on automatic systems was conducted, deriving in the methodology presented in this work, which consists of four phases: Pre study, measurement, analysis and implementation.

As a result of the research, a simulation of the proposed system was obtained, which shows that it is possible to reduce the number of human operators in the process under study and thus increase productivity, as part of the results are the designs of the diagrams programming and electrical control.

# DEDICATORIAS

“Sólo una cosa convierte en imposible un sueño: el miedo a fracasar.”

A mis padres José de Jesús  
Chan Gonzales, María Eugenia  
Amaya Valenzuela, Mi hermano  
Carlos Alberto Chan Amaya y a  
mis amigos que siempre me  
estuvieron apoyando a lo largo  
de esta fase de mi vida

# AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la fortaleza para culminar esta etapa de mi vida, por la salud que ha brindado a mi familia y a mí y las fuerzas de seguir siempre adelante.

A mis padres José de Jesús Chan Gonzales y María Eugenia Amaya Valenzuela quienes han sido el impulso toda mi vida y por todo el amor que me han entregado y por siempre estar al cuidado de mí.

A mi hermano Carlos Alberto Chan Amaya por ser siempre un ejemplo a seguir y brindarme siempre su apoyo.

A mis niños Héctor Rene López Vucovich y Sandra Luz Amaya Valenzuela por todo el cariño y apoyo que me han dado a lo largo de mi vida.

A la Dra. María Elena Anaya Pérez por todos los consejos y orientación que me otorgó, por la confianza que me dio y siempre brindarme de su tiempo y paciencia a lo largo del proyecto de tesis.

Al Dr. Stefano Riemma por recibirme y darme la oportunidad de trabajar en la Universidad de Salerno.

A mis amigos que siempre estuvieron en esta etapa de mi vida y por todo el cariño y apoyo que me han dado

A Ladan Shahcheraghi por ser una de las personas que me inspiró en realizar mi maestría y por todo el cariño que me ha dado a pesar de la distancia.

A mis compañeros de la maestría por dejarme compartir esta experiencia junto con ellos, por ese compañerismo y el apoyo que me dieron.

A la empresa TE Connectivity por brindarme la oportunidad de realizar mi proyecto dentro de sus instalaciones.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y Programa de fortalecimiento de la calidad Educativa (PFCE) por su apoyo económico.



# INDICE

<b>RESUMEN</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIAS</b> .....	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>x</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Presentación .....	1
1.2 Planteamiento del problema .....	2
1.3 Objetivo General .....	2
1.4 Objetivos Específicos .....	2
1.5 Hipótesis .....	3
1.6 Alcances y delimitaciones .....	3
1.7 Justificación.....	3
<b>2 MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>4</b>
2.1 Introducción.....	4
2.2 Manufactura Flexible .....	4
2.2.1 Manufactura Flexible Automatizada.....	6
2.3 Redes de Petri.....	7
2.4 Sistemas de Manufactura Integrada por Computadora.....	9
2.5 Controladores Lógicos Programables.....	12
2.6 Niveles de Automatización en la Manufactura .....	14
2.7 Metodología para el Análisis del Nivel de Automatización .....	22
2.8 Productividad .....	23
2.9 Estudios Previos.....	24
2.9.1 Primer Estudio Previo .....	24
2.9.2 Segundo Estudio Previo .....	26
2.9.3 Tercer Estudio previo .....	29
<b>3 METODOLOGÍA</b> .....	<b>33</b>
3.1 Pre-estudio.....	34
3.2 Medición.....	35

3.3 Análisis.....	36
3.4 Implementación.....	37
<b>4 IMPLEMENTACIÓN .....</b>	<b>39</b>
4.1 Fase 1: Pre-Estudio.....	39
4.1.1 Seleccionar proceso a estudiar .....	39
4.1.2 Recorrer el proceso bajo estudio .....	39
4.2 Fase 2: Medición .....	41
4.2.1 Análisis de tareas jerárquicas.....	41
4.2.2 Medición del nivel de automatización .....	44
4.3 Fase 3: Análisis.....	45
4.3.1 Determinar niveles mínimos y máximos de automatización.....	46
4.3.2 Propuestas de diferentes mejoras .....	46
4.3.3 Análisis de Propuestas de mejoras.....	47
4.4 Fase 4: Implementación .....	50
4.4.1 Selección de propuesta .....	50
4.4.2 Simulación de sistema.....	51
<b>5 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....</b>	<b>48</b>
5.1 Conclusiones.....	48
5.2 Trabajo Futuro.....	49
<b>6 REFERENCIAS .....</b>	<b>59</b>
<b>7. ANEXOS.....</b>	<b>53</b>
Anexo I. Diagramas de programación PLC.....	53
Anexo I. Diagramas de control.....	57

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Gráfico de una red de Petri (Murata 1989).....	8
Figura 2.2. a) Bloques de funciones b), Diagrama escalera, c) Estructura de texto, d) lista de instrucciones (Manuales Allen Bradley).....	133
Figura 2.3. Separación de funciones en mecanización e informatización(Frohman et al. 2005).	15
Figura 2.4. Vista del modelo de cuatro etapas del proceso de información humana (Parasuraman et al.2000).....	17
Figura 2.5. Diagrama de flujo que muestra la aplicación del modelo del tipo y niveles de automatización (Parasuraman et al.2000).....	18
Figura 2.6. Fases en la metodología de medición (Fasth et al. 2008).....	222
Figura 2.7. Etapas de cada fase de la metodología (Fasth et al. 2008).....	22
Figura 2.8. Sistema de producción A-F con diferentes grados de automatización y la manera de cómo se maneja (Windmark, et. al 2012) .....	24
Figura 2.9. Configuración de la nueva celda (Morioka y Sakakibara 2010).....	276
Figura 2.10. Diferencias entre el tiempo de ensambles de operadores expertos y novatos (Morioka y Sakakibara 2010).....	287
Figura 3.1. Metodología basada de Fasth et al. (2008) con modificaciones .....	34
Figura 3.2. Tareas de fase uno (elaboración propia).....	35
Figura 3.3. Tareas de fase dos (elaboración propia).....	36
Figura 3.4. Sub tareas de Fase de Análisis (elaboración propia).....	37
Figura 3.5. Sub tareas de la fase de implementación (elaboración propia).....	38
Figura 4.1. Plano del centro de trabajo bajo estudio (diseño propio utilizando formato de empresa).....	40
Figura 4.2. Diagrama de análisis de tareas jerárquicas (elaboración propia) .....	42
Figura 4.3. Grafico de los tiempos de cada movimiento (elaboración propia con formato de compañía).....	43

Figura 4.4. Operación de encintado (elaboración propia).....	44
Figura 4.5. Instrucciones de trabajo (elaboración propia).....	45
Figura 4.6. a) Encintadora de mano automática, b) encintadora montable de mesa automática (elaboración propia).....	42
Figura 4.7. Simulación de la línea de producción de encintado de arnés (elaboración propia) .....	46
Figura 4.8. Trabajo en proceso contra tiempo (elaboración propia) .....	47
Figura 4.9. Porcentaje de tiempo de procesamiento y tiempo de espera del operador (elaboración propia) .....	47
Figura 4.10. Simulación con redes de Petri (elaboración propia).....	47
Figura 5.1. Tiempo de ciclo de cada proceso en el proceso de encintado.....	50

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Definición formal de la red de Petri.....	9
Tabla 2.2. Perspectiva de ambos casos (Groover 2001 y Wickens et al. 2004).....	11
Tabla 2.3. Niveles de automatización de decisión y selección de acción (Parasuraman et al.2000) .....	176
Tabla 2.4. Escala de referencia del LOA (Frohman 2008).....	219
Tabla 2.5. Dato de cada sistema de producción A-F (Windmark, et. al 2012) .. <b>¡Error! Marcador no definido.5</b>	
Tabla 2.6. Los valores nominales para los parámetros de producción para cada sistema de producción (Windmark, et. al 2012).....	265
Tabla 2.7. Metodología DYNAMO en ocho pasos (Lindström y Winroth 2010) .....	309
Tabla 4.1. Registro de tiempos de ciclo de cada operación (formato por parte de la empresa) .....	415
Tabla 4.2. Tiempos de cada movimiento realizado (elaboración propia con formato de compañía).....	36
Tabla 4.3. Nivel de automatización en proceso de encintado de arnés.....	39
Tabla 4.4. Nivel relevante mínimo y máximo de automatización.....	470
Tabla 4.5. Cuadro de posibles propuestas(elaboración propia) .....	47
Tabla 4.6. Análisis de propuestas y precios(elaboración propia) .....	492

# 1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo hace referencia a los antecedentes de la empresa en estudio, así como la problemática presente, de igual forma se establecen los objetivos del trabajo realizado, el alcance y justificación del proyecto, haciendo hincapié en la importancia de que este se lleve a cabo.

El proyecto se desarrolla en la empresa TE Connectivity Automotriz localizada en Hermosillo, Sonora. Comprende de una propuesta para la selección del nivel de automatización para incremento de productividad, enfocado en las estaciones con procesos de encintado de arnés.

## 1.1. Presentación

La planta se divide en tres áreas: SAM, que se encarga de estampado y ensamble de conectores; Luces, responsable de ensamble y soldadura de circuitos, así como de dar forma a las luces de las vistas del automóvil; Coaxiales, la cual se hace cargo del corte y ensamble del cable coaxial. Dentro de la planta hay procesos que están automatizados, pero muchos otros no los están. Generalmente estos últimos requieren de herramientas o accesorios como apoyo en la manufactura y para reducir los errores al momento de estar efectuando cualquier operación.

En las áreas de operaciones manuales los trabajadores comúnmente cometen errores en sus actividades por diferentes razones, entre ellas: distracciones, cansancio y actividades repetitivas. Como consecuencia de lo anterior; se tiene repercusión directamente en la producción, dado que en muchas ocasiones no se cumple con la meta, elevando por consiguiente los costos de manufactura.

Algunos centros de trabajo de ensamble final incluyen estaciones dedicadas al encintado de arneses, destacándose por ser un proceso que puede llegar a caracterizarse por invertirle mucho tiempo, induciendo que en muchas ocasiones no se logre la meta especificada, provocando los cuellos de botella en los centros de trabajo. Con la finalidad de reducir el efecto de estas situaciones, se utilizan más

operadores de los que indica el estándar, lo que da como consecuencia un incremento en los costos de producción. Actualmente se tienen 10 estaciones de encintado con un promedio de 4 personas cada una. Los problemas mencionados anteriormente se presentan desde abril del 2015, cuando la planta inició operaciones.

## **1.2. Planteamiento del problema**

En las actividades que son realizadas de forma manual solo se utilizan herramientas o accesorios. Esta clase de operaciones son susceptibles a errores humanos debido a distintos factores, entre ellos: distracciones, cansancio y repetitividad. Las estaciones de trabajo incluyen áreas que se dedican al encintado de arneses, en este proceso hay retrasos constantes y como consecuencia en muchas ocasiones no se cumple con la meta especificada. Debido lo anterior, se requiere de más operadores en ese proceso, generando que el costo de producción se incremente.

## **1.3. Objetivo General**

Proponer opciones para la adecuación de una estación de encintado mediante un sistema flexible automatizado para la disminución del costo de fabricación e incrementar la productividad.

## **1.4. Objetivos Específicos**

- Identificar y analizar el nivel mínimo de automatización requerido tal que se obtenga un incremento en la productividad y sea acorde a la inversión que la empresa pueda realizar.
- Proponer opciones para el diseño del control eléctrico y mecánico, así como la programación del sistema con base en el nivel de automatización identificado.
- Simular el sistema de automatización de acuerdo al diseño desarrollado.

## 1.5. Hipótesis

El cambio de un nivel de automatización superior disminuirá el tiempo de ciclo y el número de operadores necesarios en la estación de encintado, lo que dará como resultado un incremento en la productividad en el centro de trabajo.

## 1.6. Alcances y delimitaciones

Este proyecto está enfocado a la automatización de la operación de encintado de arnés en la línea de producción WL9806 de la empresa TE Connectivity, con fines de llegar hasta la implementación si los recursos son proporcionados por la empresa y, en caso contrario, llegar hasta una propuesta de diseño.

Para la propuesta de automatización del proceso se utilizarán diferentes dispositivos y programas de cómputo:

- Para realizar la lógica se pretende disponer de un controlador lógico programable (PLC) de la compañía Allen Bradley con su respectivo programa de cómputo de programación.
- Para el diseño eléctrico se utilizará el software AutoCAD de la compañía Autodesk.
- Para la simulación se utilizará el software Flexsim.

## 1.7. Justificación

Durante los últimos meses la demanda, por parte de los clientes, para el producto en cuestión, se ha incrementado y de acuerdo a los pronósticos obtenidos por la empresa este crecimiento continuará, por lo que se tiene la necesidad de reducir el promedio de operadores por estación de encintado de 4 hasta un mínimo de 2, llevando a una reducción total máxima posible de 40 operadores a 20 operadores, considerando las 10 estaciones disponibles. Con esta reducción a nivel planta se tendrá la ventaja de disminuir la cantidad de operadores de las estaciones en un 50%, teniendo además como beneficio la reducción de tiempos de ciclo y un incremento en la productividad del centro de trabajo.



## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Introducción**

En este capítulo se expondrá el marco teórico para ayudar a entender algunos conceptos básicos, así también con la finalidad de proporcionar una idea de cómo está la situación actual, respecto a los sistemas automáticos dentro de las empresas manufactureras.

Dentro del contenido de este capítulo se tocarán temas sobre la situación actual de la manufactura flexible, otros relacionados con el concepto de manufactura integrada por computadora, sus tecnologías y las razones de porque las empresas deciden implementarlas, la introducción de la robótica industrial, sus cercanía en la cooperación con el operador y la seguridad que esto conlleva, los controladores utilizados en las industrias y sus lenguajes; incluyendo así también información referente al nivel de automatización, una metodología para su análisis y por último tres estudios previos relevantes para el proyecto a implementar.

### **2.2. Manufactura Flexible**

En las últimas décadas, el concepto de flexibilidad de fabricación se ha convertido en un criterio competitivo clave para muchas organizaciones de manufactura. La importancia de la flexibilidad en el apoyo a otros criterios competitivos tales como el costo, la calidad y la velocidad de entrega también ha sido reconocida. Sin embargo, hay una escasez de estudios que relacionan la flexibilidad con otro criterio competitivo en la innovación. Se llevó a cabo una investigación de la influencia de la interacción de la flexibilidad de la mezcla y la flexibilidad laboral en la innovación de productos en base a un estudio de las plantas de fabricación del Reino Unido. Además, se investiga el papel del clima para la innovación tanto como un antecedente de productos y un moderador que controla la influencia de la interacción de la flexibilidad de la mezcla y la flexibilidad laboral en la innovación de productos. Los análisis revelan que la interacción de la flexibilidad de la mezcla y la flexibilidad

laboral predican positivamente la innovación de productos en las plantas de manufactura (Oke, 2013).

Después de la globalización de la economía, las organizaciones manufactureras están experimentando un fenómeno en común como cambios frecuentes, incertidumbre e imprevisibilidad en los entornos empresariales. Con el fin de sobrevivir, las organizaciones están empleando diversas técnicas, tales como la manufactura celular, justo a tiempo, manufactura flexible o manufactura asistida por computadora de alto rendimiento de la producción (Singh y Singh, 2012).

Así mismo (Mehrabi et al., 2000) opinan que la globalización también ha creado un ambiente de oportunidades similares para las empresas manufactureras en todo el mundo. Se ha creado un mercado mundial impulsado por una fuerte competencia entre las compañías que se encuentran en diferentes partes del mundo, pero producen productos similares (Polden et al., 2011). Debido a lo anterior, las empresas manufactureras están enfrentando un incrementado en dinámicas de innovación, acortado ciclo de vida de los productos y ha continuado una diversificación de un rango de productos. Al mismo tiempo, se encuentran bajo presión por la carencia de trabajadores con habilidades y sus altos costos.

La competencia de hoy en día junto con el avance de la tecnología y los clientes impredecibles hacen que las demandas sean los factores primordiales para hacer que el mercado sea altamente competitivo. El incremento de los clientes con altas demandas personalizadas basadas en sus funciones, diseño, calidad y las necesidades de su estilo de vida, hacen que las industrias manufactureras tengan alta demanda para productos de cortos ciclos de vida y altos grados de flexibilidad (Choe et al., 2013).

Las organizaciones, grandes o medianas, requieren un grupo de equipo reconfigurable para satisfacer las demandas de los clientes, ya sea de un tipo o de pequeños lotes de producto personalizado. Estas demandas de pequeños

volúmenes llevan a las empresas a un cambio de paradigma de como la eficiencia debe operar para satisfacer al cliente (Wadhwa 2012).

El cambio de la tecnología también tiene como objetivo la implementación de métodos y herramientas para lograr la flexibilidad y reconfiguración, que colaboren entre dispositivos embebidos distribuidos. Esta tendencia se caracteriza por la introducción de las capacidades de la computadora, por ejemplo: Información y datos procesados dentro de la mecatrónica (Gorbach y Mick, 2002).

### **2.2.1. Manufactura Flexible Automatizada**

Industria 4.0 se considera ser la cuarta industria emergente de una revolución industrial, que es conducida por la manufactura inteligente. El concepto de Industria 4.0 se basa en la integración de las tecnologías de la información y la comunicación. La industria 4.0 es un sistema complejo y flexible que implica la tecnología de manufactura digital, tecnología de comunicación de red, tecnología informática, tecnología de automatización y muchas otras áreas. Por un lado, el fundamento de su implementación se basa en el diseño digital y la simulación de procesos de manufactura altamente automatizados, la creación de redes de gestión de datos de producción y gestión de procesos de producción, la conversión de todo el proceso para tener acceso al conocimiento y las leyes de gestión, el juicio y la toma de decisiones. El propósito de industria 4.0 es construir un modelo de producción altamente flexible de productos y servicios personalizados y digitales, con interacciones en tiempo real entre personas, productos y dispositivos durante el proceso de producción (Zhou et al., 2016).

La automatización flexible permite una rápida reconfiguración del sistema de producción para manufacturar varios productos diferentes, logrando un alto grado de utilización de máquinas, reducción de inventarios, así como reducir el tiempo de respuesta en los cambios de preferencias del cliente (Wadhwa, 2012).

(Reinhart y Loy, 2010) nos dicen que en la actualidad los productos están siendo fabricados frecuentemente en los sistemas de ensamble flexibles (FAS) debido a la

necesidad de disminución de los ciclos de vida de los productos y un creciente número de variantes. Los rangos de producción elevados deben ser llevados a cabo a bajo costo por razones de economía. Para hacer frente a estos retos, se requieren nuevas tecnologías en los sistemas de fabricación modernos. De igual manera, Walter et al. (2015) expresan que la evolución de la tecnología en el mercado y la industria han generado necesidades para sistemas de producción más flexibles y escalables, las cuales deberían de ser capaces de manejar fluctuaciones de alta variabilidad productiva con un costo razonable y reacción en tiempo real.

Las estrategias de ensamble de producción básicas se clasifican en: sistemas de ensamble manual, sistemas de ensamble flexibles (automatizados), y sistemas de ensamblados dedicados (automatizados). Estos tres sistemas pueden ser clasificados de acuerdo a sus diseños básicos, flexibilidad, tamaño de lote, volumen de producción y número de variantes (Rosati et al., 2013).

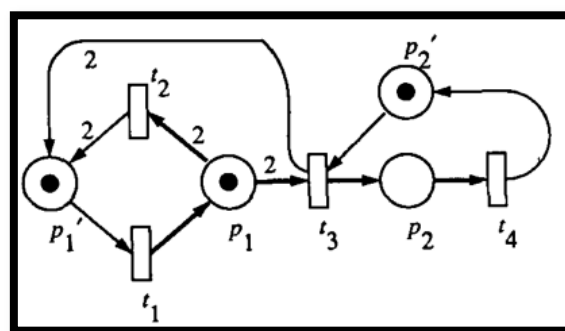
Para unir los requerimientos de producción y flexibilidad, se han desarrollado e implementado sistemas innovadores de ensamble flexibles automáticos. El FAS se ha hecho flexible gracias a las mejoras que se han realizado en la tecnología robótica y en los sistemas de control junto con los hardware/software de visión. El principal factor por lo que se lleva a cabo el diseño y el desarrollo de FAS es la economía. Esto significa que una vez que la flexibilidad y las restricciones de capacidad son satisfechas, la meta principal es minimizar los costos unitarios de producción, aunque puede ser contraproducente si no es correctamente diseñada y administrada, aumentando los costos de la automatización (Rosati et al., 2013).

### **2.3. Redes de Petri**

Las redes de Petri son una herramienta de modelado gráfica y matemática aplicable a muchos sistemas. Son una herramienta prometedora para describir y estudiar sistemas de procesamiento de información que se caracterizan por ser simultáneos, asincrónicos, distribuidos, paralelos, no determinísticos y / o estocásticos. Las redes de Petri pueden utilizarse como una ayuda de comunicación visual similar a los

diagramas de flujo, diagramas de bloques y redes. Además, se utilizan fichas en estas redes para simular las actividades dinámicas y concurrentes de los sistemas. Como una herramienta matemática, es posible establecer ecuaciones de estado, ecuaciones algebraicas, y otros modelos matemáticos que rigen el comportamiento de los sistemas (Murata, 1989). También los modelos de redes de Petri pueden convertirse fácilmente en mecanismos de control de computadora que pueden ser conectados a procesos de fabricación discretos. Esto conducirá a herramientas de diseño similares a las disponibles para sistemas discretos lineales, continuos o síncronos. Se han utilizado para modelar sistemas de eventos discretos tales como sistemas de manufactura automatizados. Las redes de Petri son útiles para diseñar e implementar controladores de dichos sistemas (Zhou et al., 1992).

La red básica de Petri es un grafo dirigido que consiste en lugares (o estados, dibujados como círculos), transiciones (es decir, acciones, típicamente barras o cajas) y arcos dirigidos. Los lugares de entrada apuntan a una transición y una transición apunta a lugares de salida. Un número de fichas se mueve alrededor de la red de un lugar a otro, y la distribución de fichas entre los lugares representa el estado dinámico de todo el sistema modelado como se muestra en la figura 2.1.



**Figura 2.1.** Gráfico de una red de Petri (Murata 1989).

Una red de Petri  $N$  está definida por los elementos  $N = (P, T, I, O)$  donde  $P$  es un conjunto de plazas,  $T$  es un conjunto de Transiciones,  $I$  es la función de entrada definiendo la entrada de las plazas de cada transición y  $O$  es la función de salida definiendo de las plazas en cada transición (Chen et al., 2011). Una definición más formal se presenta en la tabla 2.1.

Una red de Petri es un 5-tupla,  $PN = (P, T, F, W, M_0)$  Donde:

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$  es un conjunto de plazas finitas,

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  es un conjunto de transiciones finitas,

$F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$  es un conjunto de arcos (flujo),

$W: F = \{1, 2, 3, \dots\}$  es un peso de la función,

$M_0: P = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$  es el estado inicial,

$P \cap T = \emptyset \quad Y \quad P \cup T \neq \emptyset$

Una estructura red de Petri  $N = (P, T, F, W)$  Sin ningún estado inicial específico se denota  $N$

Una red de Petri con un estado inicial dada se denota por  $N, M_0$

**Tabla 2.1.** Definición formal de la red de Petri (Murata 1989).

## 2.4. Sistemas de Manufactura Integrada por Computadora

Las compañías manufactureras deben percatarse de la importancia de la disponibilidad de las capacidades que tienen las tecnologías de la manufactura integrada por computadora (CIM) para producir más rápido, barato, flexible y más eficiente. La CIM se refiere a cualquier tecnología que sea orientada por computadora ya sea para diseño, manufactura y/u operaciones de logística. Estas tecnologías son las siguientes:

- Diseño asistido por computadora (CAD)
- Ingeniería Asistida por computadora (CAE)
- Manufactura asistida por computadora (CAM)
- Robots industriales
- Sistemas automáticos de manejo de material

- Sistemas flexibles de manufactura (FMS)
- Procesos de prototipado rápido (RP)
- Máquinas de control numérico (CNC)

Las tecnologías avanzadas de fabricación implican nuevas técnicas de manufactura y máquinas combinadas con la aplicación de tecnología de la información. Estas tecnologías han encontrado una amplia aceptación en la manufactura y en los sectores de recursos y de procesamiento. Los controles numéricos por computadora, se han aplicado a los sistemas para el mecanizado, formado, el corte y moldeo. La precisión, velocidad y control de los robots han mejorado significativamente y, como resultado, se utilizan ampliamente en la soldadura, pintura, manipulación de materiales y enorme número de aplicaciones de montaje. El diseño asistido por computadora (CAD) y creación rápida de prototipos han acortado considerablemente el tiempo de desarrollo de nuevos productos. La manufactura asistida por computadora (CIM) se aplica en los talleres de máquinas herramienta para la construcción, la producción de motores y conjuntos de cuerpo para vehículos, la fabricación de trenes de aterrizaje de aviones y la producción de agujas hipodérmicas para el sector de dispositivos médicos (Gunawardane, 2016).

Los principales beneficios de estas tecnologías son: disminución de tiempo de entrega, tiempo de proceso y trabajo en proceso; reducción de trabajo directo y mayor productividad laboral, así como mejor flexibilidad. Sin embargo, estos sistemas representan un incremento de inversión y responsabilidad por el usuario de la compañía. Es muy importante la planeación, el diseño y la toma de decisiones para poder implementar las tecnologías CIM (Tansel, 2011).

Las razones para implementar automatización pueden ser vistas de diferentes perspectivas, ya sea la perspectiva de la compañía o desde el punto de vista de los sistemas de diseño de producción. Groover (2001) indica que hay nueve razones para automatizar, desde el punto de la compañía, enfocadas en productividad. Por otra parte, Wickens et al. (2004) mencionan que hay cuatro razones para

implementar sistemas automáticos en perspectiva de los sistemas de diseño de producción como se muestra en la tabla 2.2.

<b>Perspectiva de la compañía</b>	<b>Perspectiva de sistemas de producción</b>
Aumentar la productividad laboral	Cuando el trabajo es imposible o peligroso
Reducir el costo laboral	Trabajos difíciles o desagradables para el humano
Mitigar los efectos de la escasez de mano de obra	Extensión de la capacidad humana
Reducir o eliminar las tareas manuales	Viabilidad técnica
Mejorar la seguridad del trabajador	
Mejorar la calidad del producto	
Reducir el tiempo de espera de manufactura	
Realizar procesos que no pueden ser operados de forma manual	
Evitar altos costos de no automatizar	

**Tabla 2.2.** *Perspectiva de ambos casos (Groover 2001 y Wickens et al., 2004).*

Kock et al.(2013) comentan sobre la realización de casos de estudio que han ayudado a entender la razón del porque los sistemas de ensamble se siguen llevando a cabo de forma manual, a pesar de la vulnerabilidad que se conoce en países manufactureros con salarios bajos, alta rotación de personal, exposición a riesgos insalubres, riesgos en lesiones por repetición motora, escases de mano de obra, entre otras. Comúnmente las líneas automatizadas se encuentran en la producción de grandes volúmenes debido al alto costo y la inflexibilidad. Los mayores obstáculos para la automatización que se encontraron fueron:

- Costo de inversión
- Falta de flexibilidad para fácil adaptación
- Dificultad para combinar la automatización con trabajo manual donde el balanceo de carga y el aseguramiento de calidad son recomendados.

La flexibilidad de un proceso de ensamble es necesaria para la interacción del operador y del sistema de ensamble automático en conjunto. Lien y Verl (2009) comentan que, para hacer una cercana vinculación entre el hombre y la máquina en tareas de ensamble cooperativas, se debe hacer uso de los puntos fuertes de ambos lados. Normalmente, un sistema de ensamble automatizado ofrece un par de



ventajas tales como el funcionamiento sin interrupciones, ni la fatiga, y alta productividad para tareas de montaje simples. Por otro lado, un ser humano proporciona capacidades sensoriales incomparables para tareas de manipulación complejas, es capaz de adaptarse rápidamente a las nuevas secuencias del proceso, pero está restringida en fuerza y precisión. Las estaciones de trabajo cooperativas combinan las ventajas de un sistema humano y uno automatizado (Zanchettin et al., 2016).

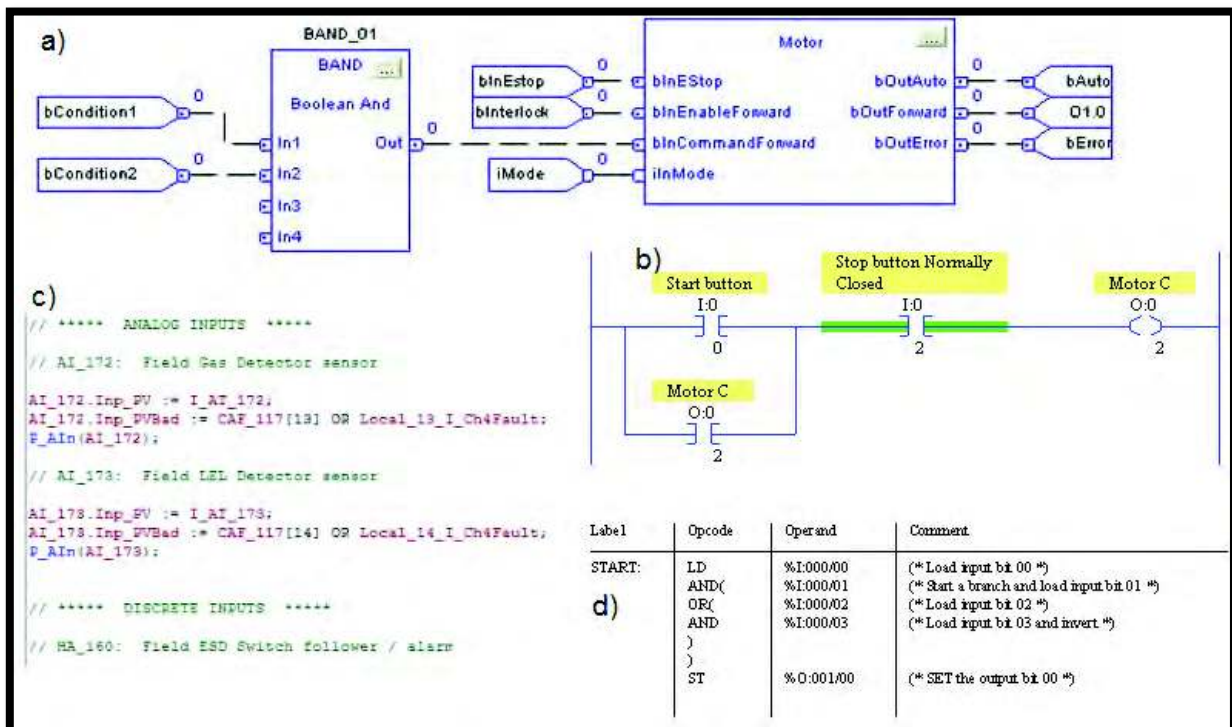
## **2.5. Controladores Lógicos Programables**

Las empresas de manufactura necesitan con urgencia de sistemas de producción, que puedan proporcionar tanto la flexibilidad necesaria para soportar la variedad de productos de forma dinámica y la capacidad de reconfiguración, así como adaptarse económicamente para la fabricación de nuevos productos. En respuesta a esta necesidad, un nuevo paradigma de automatización de colaboración está emergiendo, el cual se caracteriza por sistemas de automatización distribuidos descentralizados compuestos por módulos mecatrónicos inteligentes reconfigurables (Colombo, 2008). Los controles industriales y, en particular, el PLC constituyen actualmente una base tecnológica importante para la automatización de procesos industriales. Incluso en la era de industria 4.0 e Industrial Internet, se puede suponer que estos controladores seguirán siendo necesarios en gran medida para la producción de mañana (Langmann y Rojas-Pena, 2016).

Antes de la aparición del PLC, los sistemas de automatización se controlaban por una combinación de relés, temporizadores, secuenciadores y controladores de lazo cerrado o por una computadora personalizada para controlar el sistema de automatización. Se dice que el primer PLC fue desarrollado por Bedford Associates en respuesta a una solicitud de sustitución eléctrica para los sistemas de cableados (Sakakura y Shiba, 2016).

Los PLC son sistemas de control que se utilizan principalmente en la automatización de fábricas o industrias con procesos electromecánicos. Estos sistemas son

programados con lenguajes específicos el cual la IEC, por sus siglas en inglés *The International Electrotechnical Committee*, desarrolló un estándar llamado IEC 61131-3 para definir los elementos básicos de la programación, reglas sintácticas y semánticas para lenguajes de programación basados en texto gráfica o visual para los PLC. El estándar IEC 61131-3 define como un lenguaje gráfico los diagramas de escalera (LD) y los diagramas de bloques de funciones (FB) y como lenguaje de texto como estructura de texto (ST) y lista de instrucciones (IL). Estos tipos de lenguajes están especializados solamente en una aplicación particular. Se muestran algunos ejemplos en la figura 2.2 (Kumar y Jetley, 2016).



**Figura. 2.2.** a) Bloques de funciones b), Diagrama escalera, c) Estructura de texto, d) Lista de instrucciones (Manuales Allen Bradley).

Sapena-bañó et al. (2014) Dicen que estos sistemas se han convertido en los principales equipos de control en las industrias y varias razones fuertes han favorecido esta tendencia, por ejemplo: utilizar un hardware estándar asegura el prototipado rápido, piezas de calidad a un razonable costo, soporte de mantenimiento especializado, disponibilidad de programadores expertos,

mejoramiento a un hardware más potente que puede aumentar el rendimiento de la máquina o añadir nuevas capacidades. El éxito de los sistemas PLC ha dado lugar a la presencia en el mercado de una amplia gama de marcas y modelos, cada uno con sus propias características. Las marcas más reconocidas como Siemens, Telemecanique, Allen-Bradley, ABB, entre otros, tienen una parte significativa de este mercado.

## **2.6. Niveles de Automatización en la Manufactura**

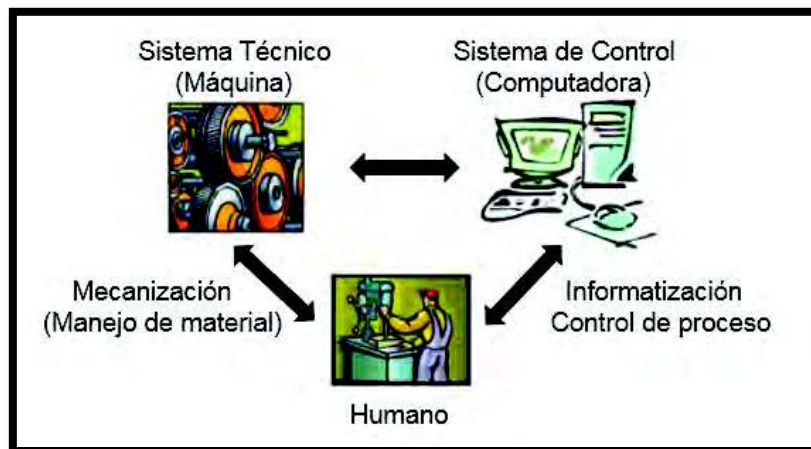
El rápido desarrollo de la mecanización y automatización de la producción durante el último siglo fue en gran medida impulsado por el deseo humano para reducir la proporción de mano de obra y por lo tanto mejorar la productividad de las instalaciones industriales. La industria tiene como objetivo encontrar enfoques que permitan la producción de productos de alta calidad a bajo costo (Aristova, 2014). El aumento de la automatización no sólo se ocupa de los procesos de fabricación actuales, sino también se centra en tareas de apoyo, por ejemplo: Manejo de materiales, transporte y almacenamiento. Sin embargo, en los años 80's se tenía una ambición para crear fabricas que fueran totalmente automatizadas, hoy en día la mayor parte de los sistemas automáticos dentro de la manufactura son semiautomáticos, los cuales consisten en la combinación de tareas automáticas y manuales (Frohman, 2008).

Las empresas están en constante búsqueda de mejoras en la productividad para aumentar su competitividad. El uso de la tecnología de la automatización es una herramienta que ha sido probada para lograr esto. Pero no asegura resultados ventajosos. Una de las claves para una inversión e implementación de equipos automatizados exitosa, es la elección de la tecnología adecuada, el tipo y nivel de automatización que mejor se adapte a la empresa, sus necesidades, objetivos y requisitos previos (Friedler et al., 2013).

Friedler et al. (2013) mencionan la existencia de empresas que están poco familiarizadas con la tecnología de automatización y específicamente el proceso de adquisición de la misma. Debido a esto, algunas empresas se abstienen de inversiones en automatización y con ello se pierden la oportunidad de tomar ventaja de la tecnología existente.

Frecuentemente se dice que la progresión de las operaciones manuales a operaciones totalmente automatizadas está hecha en una sola etapa, es decir, cuando los operadores se sustituyen por robots o máquinas modernas. Sin embargo, esto no es del todo cierto. Las operaciones manuales se definen como el trabajo hecho a mano y no por la máquina, y las máquinas, de la misma forma se define como instrumentos diseñados para transmitir o modificar la aplicación de la energía, la fuerza o el movimiento. El término manual entonces se puede definir como el trabajo realizado sin ninguna herramienta o soporte. Por lo tanto, dar las herramientas al usuario u otro apoyo para lograr la tarea puede ser visto como el incremento del nivel de automatización (Frohman, 2008).

La mayoría de los procesos automatizados en la manufactura, parecen implicar solamente la automatización de tareas mecánicas. Sin embargo, esas tareas son controladas principalmente por computadoras para un rendimiento óptimo. Por lo tanto, es importante reconocer que la automatización en la manufactura puede ser vista como dos clases básicas de automatización, mecanización e informatización. Como se muestra en la Figura 2.3. La informatización se define como la sustitución de las tareas cognitivas, tales como los procesos sensoriales humanos y la actividad mental. Esto incluiría, por ejemplo: recopilación, almacenamiento, análisis y uso de información con el fin de controlar el proceso de fabricación. La mecanización está relacionada de manera similar con la informatización y se define como la sustitución de la potencia muscular humana, como la transformación de materiales y energía (Frohman et al., 2005).



**Figura 2.3.** Separación de funciones en mecanización e informatización (Frohm et al. 2005).

Investigaciones han demostrado la importancia de la integración de los seres humanos y la tecnología en la manufactura automatizada, para el apoyo a los sistemas de manufactura sostenibles y robustos. La relación entre los seres humanos y la tecnología puede ser visto como actividades que se realizan de forma totalmente manual a completamente automatizadas compartiendo las tareas entre el ser humano y la tecnología (Lindström y Winroth, 2010). Esto implica que la automatización no es total o totalmente manual, pero puede variar en un continuo de niveles (Parasuraman et al., 2000). Este concepto se denomina niveles de automatización (LoA) y se refiere a tareas mecanizadas y cognitivas asignadas en una escala de referencia.

Se han propuesto diferentes niveles en estos dos extremos (totalmente manual y totalmente automatizados). En la tabla 2.3 se muestra una lista de 10 puntos, con niveles más altos que representan mayor autonomía de la computadora sobre la acción humana.

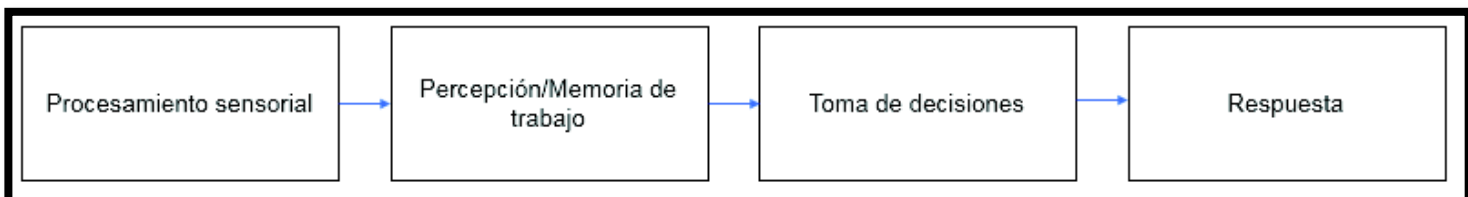
**ALTO**

10. La computadora decide todo, actúa automáticamente, ignorando al humano
9. Informa al humano solo si la computadora lo decide
8. Informa al humano solo si se le pregunta ó
7. Ejecuta automáticamente después informa al humano y
6. Permite a los humanos un tiempo restringido para vetar antes de la ejecución automática ó
5. Ejecuta esa sugerencia si el humano lo aprueba ó
4. Sugiere una alternativa ó
3. Lo reduce a algunos cuantos ó
2. La computadora ofrece un conjunto completo de decisiones/acciones alternativas ó
1. La computadora no ofrece ningún soporte: El humano debe realizar todas la decisiones y acciones

**BAJO**

**Tabla 2.3.** Niveles de automatización de decisión y selección de acción (Parasuraman et al.2000).

En el modelo propuesto por Parasuraman et al. (2000) se expandió para cubrir la automatización de diferentes tipos de funciones en un sistema humano-máquina. La escala en la tabla 2.3 se refiere principalmente a la automatización de la selección de decisiones y acciones, o funciones de salida de un sistema. Sin embargo, la automatización también puede aplicarse a funciones de entrada, es decir, a funciones que preceden a la toma de decisiones y la acción. En esta expansión del modelo se adoptó una “vista de cuatro etapas” del proceso de la información humana que se puede observar en la figura 2.4

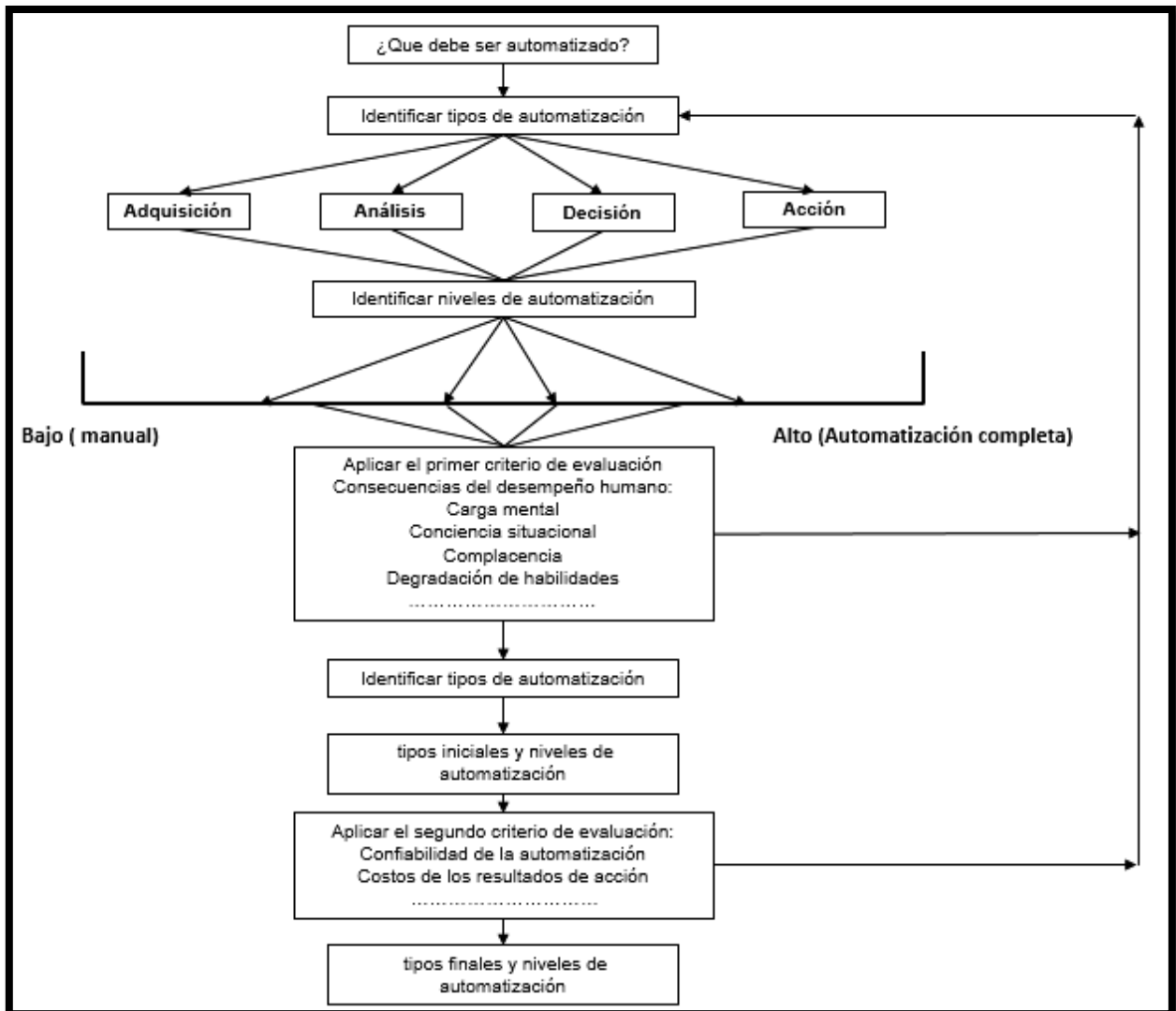


**Figura 2.4.** Vista del modelo de cuatro etapas del proceso de información humana (Parasuraman et al.2000).

La primera etapa se refiere a la adquisición y registro de múltiples fuentes de información. Esta etapa incluye el posicionamiento y la orientación de los receptores sensoriales, el procesamiento sensorial, el pre-procesamiento inicial de los datos antes de la percepción completa y la atención selectiva. La segunda etapa implica la percepción consciente, y la manipulación de la información procesada y recuperada en la memoria de trabajo (Baddeley, 1996). La tercera etapa consiste en tomar decisiones basadas en tal procesamiento cognitivo. La cuarta y última etapa implica la implementación de una respuesta o acción consistente con la elección de decisión. El modelo es equivalente en funciones de un sistema que pueden ser automatizadas. En consecuencia, se proponen que la automatización se puede aplicar a cuatro clases de funciones:

- Adquisición de información
- Análisis de la información
- Selección de decisiones y acciones
- Implementación de la acción

El modelo que ha descrito el autor Parasuraman et al. (2000) proporciona un marco para examinar los problemas de diseño de automatización para sistemas específicos y propone un procedimiento iterativo que pueden ser capturados en un diagrama de flujo como se observa en la figura 2.5.



**Figura 2.5.** Diagrama de flujo que muestra la aplicación del modelo del tipo y niveles de automatización (Parasuraman et al.2000).

Por otro lado, Frohm et al. (2008) nos dice que es importante reconocer que la automatización en la manufactura, así como en otros dominios, debe ser vista como una interacción entre dos tipos de tareas: tareas físicas y tareas cognitivas. Las tareas físicas son las tecnologías básicas, tales como perforación, molienda, etc. y las tareas cognitivas se ocupan del control y el apoyo de las tareas físicas.



Al descomponer las actividades en tareas físicas y cognitivas, sin dejar de reconocer la cooperación entre el ser humano y la tecnología, puede ser útil considerar la asignación de tareas como dos escalas de referencia independientes relacionadas con los dos tipos de niveles de automatización. Cada una de estas tareas puede ser ordenada en siete pasos, desde el control totalmente manual hasta el automático como se observa en la tabla 2.4 (Frohm et al., 2008).

LoA	Mecánico y equipo	Información y control
1	<b>Totalmente manual:</b> No uso de herramientas, solo la fuerza muscular del usuario	<b>Totalmente manual:</b> El usuario crea su propio entendimiento para la situación, y sus acciones se basa en su experiencia y conocimiento.
2	<b>Herramienta estática de mano:</b> Trabajo manual con ayuda de una herramienta estática. Ejemplo: Desarmador	<b>Decisión:</b> El usuario recibe información sobre qué hacer, o una propuesta sobre cómo se puede lograr la tarea. Ejemplo: Orden de trabajo
3	<b>Herramienta flexible de mano:</b> Trabajo manual con ayuda de una herramienta flexible. Ejemplo: Llave inglesa	<b>Enseñanza:</b> El usuario obtiene instrucciones sobre cómo se puede lograr la tarea. Ejemplo: Manuales
4	<b>Herramienta automática de mano:</b> Trabajo manual con ayuda de una herramienta automática. Ejemplo: pistola neumática	<b>Cuestionamiento:</b> La tecnología cuestiona la ejecución, si la ejecución se desvía de lo que la tecnología considera adecuada. Ejemplo: Verificación antes de la acción
5	<b>Máquina estática:</b> Trabajo automático realizado por una máquina diseñada para una tarea específica. Ejemplo: Torno	<b>Supervisión:</b> La tecnología requiere la atención de los usuarios, y dirigirla a la tarea actual. Ejemplo: Alarma
6	<b>Máquina flexible:</b> Trabajo automático realizado por una máquina que puede ser reconfigurada para diferentes tareas. Ejemplo: Máquina CNC	<b>Intervenir:</b> La tecnología toma el relevo y corrige la acción, si las ejecuciones se desvían de lo que la tecnología considera adecuado. Ejemplo: Termostato

<b>7</b>	<b>Totalmente automatizado:</b> La máquina resuelve las desviaciones o problemas que ocurran por sí misma. Ejemplo: Sistema autónomo	<b>Totalmente automatizado:</b> Toda la información y control es manejado por la tecnología. El usuario nunca está involucrado. Ejemplo: sistema autónomo
----------	--	---

**Tabla 2.4.** Escala de referencia del LOA (Frohm 2008).

La ventaja, en relación con las taxonomías anteriores, de utilizar las dos escalas de referencia propuestas en la tabla 2.4 es que tanto el nivel de soporte físico como cognitivo puede evaluarse en la misma taxonomía. Dado que las dos escalas de referencia para la evaluación son independientes, el nivel de automatización para el soporte físico y cognitivo puede variar dependiendo de la necesidad del ser humano. Utilizando la taxonomía presentada como base para una metodología de medición podría ser posible estimar el potencial de la tecnología y la automatización en diferentes tipos de sistemas de fabricación humana (Frohm et al., 2008).

La escala de referencia, que se muestra en la tabla 2.3, se ha desarrollado en una matriz. Esto se hace para obtener un terreno lógico y para poder añadir dimensiones o parámetros a la metodología. Esta matriz se utiliza para visualizar los diferentes niveles de automatización. También se utiliza en la fase de análisis para mostrar los resultados de las mediciones y las sugerencias de posibles mejoras. La matriz se llama  $LoA_{total}$  y contiene de los vectores:  $LoA_{mec}$  y  $LoA_{info}$ . La lógica de la matriz se ve en la ecuación 2.1 (Fasth et al. 2008).

$$1 \leq LoA_{total} \leq 49$$

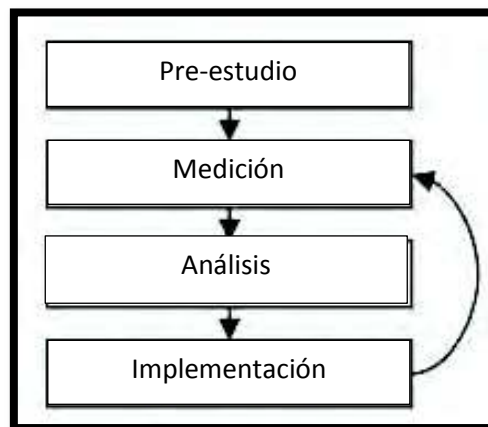
$$LoA_{total} \rightarrow (LoA_{mec}) \wedge (LoA_{info}) \quad (2.1)$$

donde  $LoA_{mec}(Y) = 1 \leq Y \leq 7$  y  $LoA_{info}(X) = 1 \leq X \leq 7$

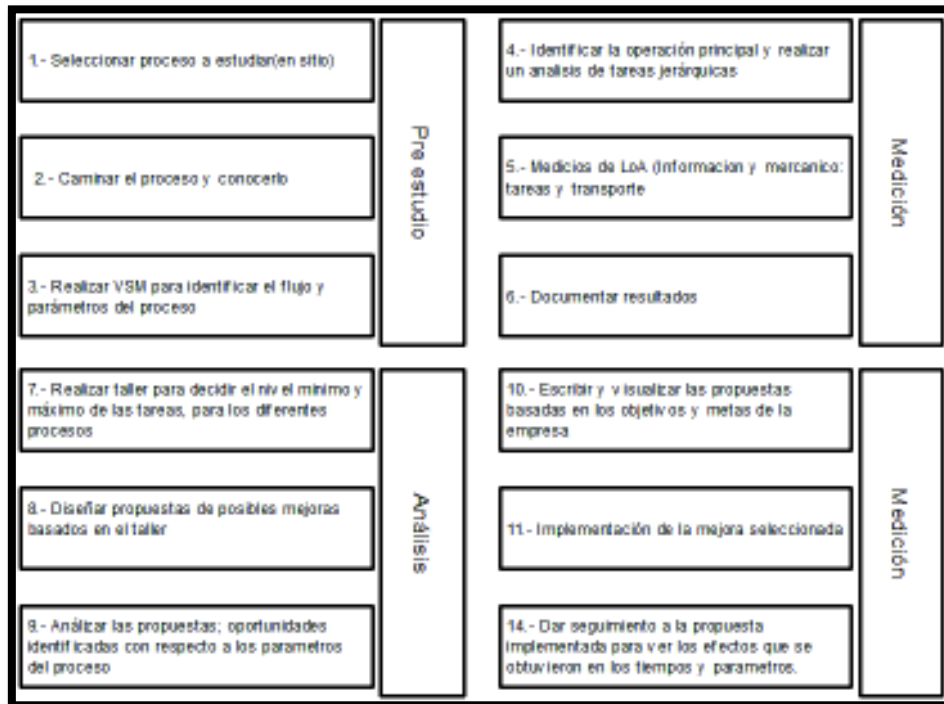
Esto significa que hay 49 posibles soluciones que podrían existir o ser desarrolladas en el sistema de ensamblaje. También significa que una tarea medida debe contener tanto una parte mecánica como una parte de información.

## 2.7. Metodología para el Análisis del Nivel de Automatización

Fasth et al. (2008) presentó una metodología para la medición del nivel de automatización de los sistemas de ensamble. Esta metodología está basada del proyecto DYNAMO con algunas adecuaciones, y ha mostrado un desarrollo de la etapa de medida y análisis, con las cuales ha proporcionado una buena visualización del sistema de ensamble, como se puede observar en la figura 2.6, Cada una de estas fases costa de tres pasos, los cuales se describen en la figura 2.7.



*Figura.2.6. Fases en la metodología de medición (Fasth et al. 2008).*



*Figura.2.7. Etapas de cada fase de la metodología (Fasth et al. 2008).*

## 2.8. Productividad

La productividad es la relación de lo que se produce y los recursos utilizados para generarlos. Se refiere a la eficiencia del sistema de producción. Es un indicador de qué tan bien se utilizan los factores de producción (área, capital, mano de obra y energía) (Kumar y Suresh, 2008). Ha sido un tema importante para la historia económica y para el desarrollo económico. Sin embargo, para algo tan importante, no es entendida como debería. Se sabe que la productividad de cualquier proceso depende de una serie de cosas, muchas de ellas relacionadas con la ingeniería de proceso: la tecnología utilizada, la cantidad de bienes aplicados a la tarea, la calidad de los materiales utilizados, entre otras. Sin embargo, los efectos precisos de estos factores no son bien conocidos y se tienen conceptos erróneos acerca de las fuentes de la productividad (Schmenner, 2015).

Para calcular la productividad la compañía TE connectivity utiliza la ecuación 2.2:

$$P=(TxN)/(HxO) \quad (2.2)$$

Donde T es el tiempo en horas para fabricar un producto, N es la cantidad de productos fabricados por semana, H son las horas trabajadas por operador y O la cantidad de operadores que participa en la fabricación.

## 2.9. Estudios Previos

En el siguiente apartado se presenta tres casos de estudio previo, encontrado en la revisión literaria, los cuales presentan semejanzas a lo que se pretende implementar en esta investigación, y que a su vez, aportan distintos enfoques y perspectivas, lo que ayuda a poder visualizar la información en diferentes puntos de vista.

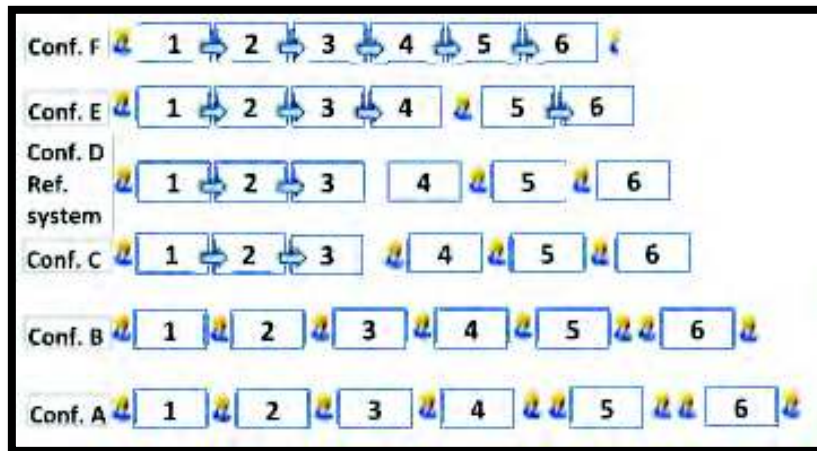
### 2.9.1. Primer Estudio Previo

Los autores Windmark et al. (2012) se dedicaron a realizar un caso de estudio que involucra una línea de producción donde las partes a producir se van trasladando por seis estaciones separadas, las respectivas funciones de estas estaciones son: 1. Corte de pieza en bruto, 2. Formado de plástico, 3. Diversas operaciones de punzonado, 4. Limpieza de partes, 5. Calidad, 6. Ensamble que implica soldadura.

La línea de producción en estudio, está dedicada a la manufactura de diferentes familias de hojas de metal con un tamaño de lote variable  $N_0$ , el tiempo de ciclo  $t_0$  es el mismo para las diferentes partes. La meta de la producción fué fabricar 300,000 partes al año, que implica un promedio de tamaño de lote de  $N_0 = 1000$ .

La actividad fue dada en un segmento del proceso de producción que puede ser automatizada en diferentes grados utilizando, equipo de manejo de material, sensores y equipo de control en combinación con diferentes cantidades de operadores.

Hay seis diferentes tipos de alterantivas A-F que pueden ser empleadas, estas alternativas se pueden observar en la figura 2.8.



**Figura.2.8.** Sistema de producción A-F con diferentes grados de automatización y la manera de cómo se maneja (Windmark, et. al 2012).

Los datos y las condiciones involucradas para los diferentes casos se encuentran en las tablas 2.5 y 2.6 que refieren a datos económicos y los datos asumidos para aplicar a cada sistema de producción A-F.

Nomenclatura	A	B	C	D	E	F	Comentarios
$K_0$	12	13	25	36	52	61	Inversión x $10^6$
$p$	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	Intereses sobre el capital
$n$	15	15	12	12	10	10	Tiempo de uso en años
$T_{plan}$	7000	6400	5600	5200	4800	4800	h/año
$K_{ren}$	0.1	0.1	0.15	0.15	0.15	0.15	Renovación/año
$Y$	250	250	200	175	150	150	Superficie en $m^2$
$k_Y$		1600			1600		Costo en SEK/ $m^2$
$h_y$	8	8	8	8	8	8	h/turno y año
$k_M$	200	200	300	400	500	500	Costo en SEK/h
$h_{p,M}$	80	80	60	40	20	20	h/h(de mantenimiento)
$k_p$	100	100	150	200	200	200	SEK/h
$n_{yren}$	20	20	15	12	12	12	Numero de años

$k_B$	400	400	400	400	400	400	Material, SEK/parte
$k_D$	75	75	250	275	350	400	SEK/h
$n_{op}$	9	8	4	3	2	1.5	No. de operadores

4

**Tabla 2.5.** Dato de cada sistema de producción A-F (Windmark, et. al 2012).

Sistema de Producción	$X_{af}$ [-]	$t_0$ [min]	$q_Q$ [-]	$q_S$ [-]	$q_B$ [-]	$T_{su}$ [min]
A	0.36	2.0	0.02	0.15	0.12	300
B	0.38	1.5	0.04	0.15	0.12	300
C	0.45	1.0	0.05	0.20	0.10	200
D	0.61	0.55	0.05	0.35	0.08	240
E	0.73	0.30	0.02	0.45	0.07	280
F	0.79	0.25	0.02	0.60	0.07	360

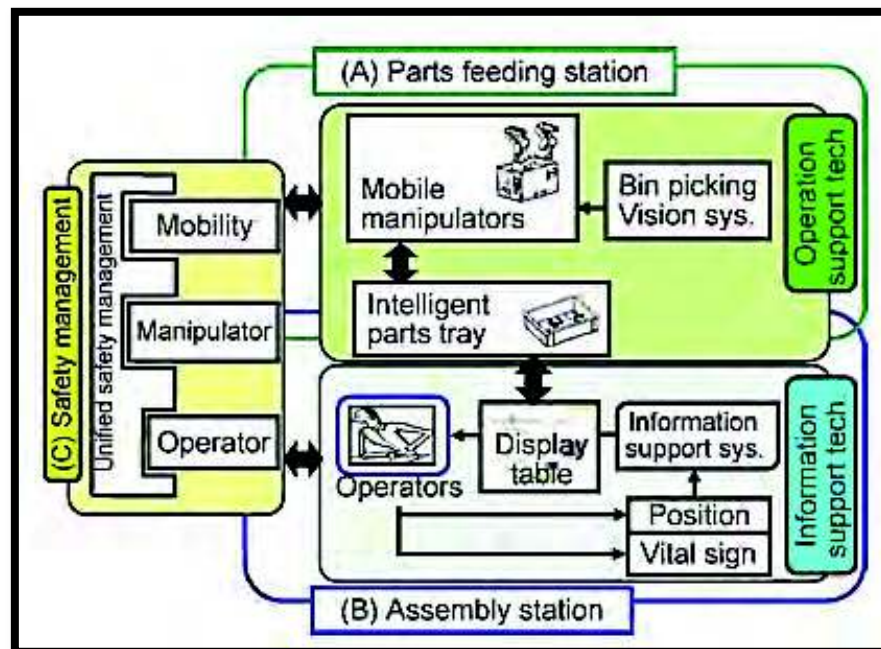
**Tabla 2.6.** Los valores nominales para los parámetros de producción para cada sistema de producción (Windmark, et. al., 2012).

Los autores concluyeron que el modelo que fue desarrollado permite estudiar muchas variables diferentes, además del efecto que estos tienen en el costo de las partes y la capacidad del sistema de producción de diferentes configuraciones.

El factor de automatización no es una variable definida, ya que varía para cada sistema de producción y esto depende de donde se encuentre.

## 2.9.2. Segundo Estudio Previo

Los autores Morioka y Sakakibara (2010) presentaron un nuevo diseño de celda para un sistema de producción en el cual un robot y un operador humano realizan tareas en colaboración, estas tareas se llevan a cabo de manera que queden más adecuadas a sus características particulares. Este nuevo diseño contiene tres subsistemas: (A) un alimentador de partes, (B) una estación de ensamble, (C) tecnologías de seguridad. Como se muestra en la figura 2.9.



*Figura. 2.9. Configuración de la nueva celda (Morioka y Sakakibara. 2010).*

En la estación de alimentador de partes (A), un robot alimenta automáticamente todas las piezas necesarias para la parte del producto que se va a manufacturar o ensamblar en la estación de ensamble (B). En esta estación, un operador humano puede realizar una operación complicada ayudada por robots. C supervisa la interacción del humano y el robot de (A) y (B), lo cual asegura la seguridad en estas actividades en cooperación. El producto que se ensambla en este estudio es un arnés con varios conectores y grapas de placas. Este ensamble dura aproximadamente diez minutos con un operador experimentado.

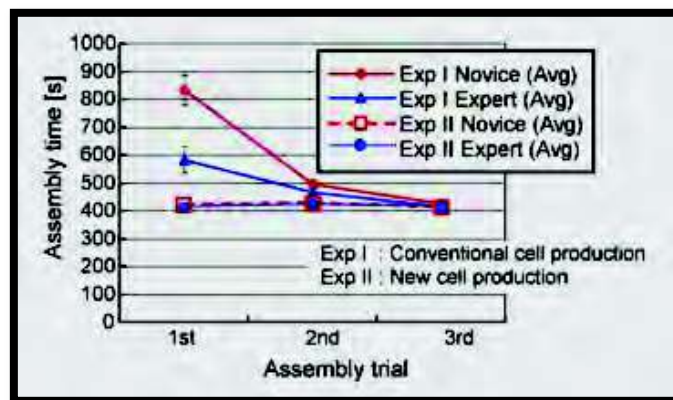
Para evaluar este sistema los autores requirieron un grupo de operadores que realizaran el proceso del ensamble de arnés, el cual consistía en insertar el cable en su respectivo orificio del conector.

Los autores midieron dos parámetros en el experimento: tiempo de ensamble y tasa de errores. Compararon estos dos parámetros entre una estación convencional



manual y la nueva celda de producción propuesta. Para realizar esta prueba utilizaron a cinco operadores novatos y cinco expertos.

Los autores muestran los resultados en la figura 2.10 lo que ellos observan es que el desempeño es mejor, el cual reduce el tiempo de ensamble en la nueva celda de producción (EXP II). También observan que ya sea con un operador novato o experto se puede realizar la tarea al mismo tiempo. Comparándolo con la estación convencional manual (EXP I) solo se necesita el 50% del tiempo en la nueva celda de producción, lo que significa que la producción se duplicó. Los autores notan que los tiempos en el tercer intento convergen. Esto indica que la operación es relativamente sencilla y el aprendizaje del operador es elevado. Lo que los autores concluyeron, fue que este sistema es benéfico para productos que son fabricados y tienden cambios constantes.



**Figura 2.10.** Diferencias entre el tiempo de ensambles de operadores expertos y novatos (Morioka y Sakakibara 2010).

Los autores comentaron que la tasa de error en la EXP I fue de 10% a 20% mientras que EXP II los errores fueron totalmente evitados gracias a la ayuda del robot.

De acuerdo a los resultados presentados en este estudio los autores concluyen que la nueva celda de producción puede acelerar la velocidad a la cual un operador puede trabajar, reduciendo los errores de ensambles.

### 2.9.3. Tercer Estudio previo

Lindström y Winroth (2010) presentan el desarrollo de un marco de trabajo para la incorporación de la medición y el análisis de los niveles de automatización en el proceso de formulación de la estrategia de manufactura. Para lograr este objetivo, los autores identificaron varios objetivos subyacentes:

- Fase 1: Desarrollar una metodología para medir y analizar los niveles de automatización que es empíricamente factible.
- Fase 2: Validar y probar la metodología descrita en la usabilidad y utilidad.
- Fase 3: Examinar y evaluar los procesos de formulación de la estrategia de manufactura para identificar los criterios de evaluación y metodologías adecuadas, para la formulación de estrategias funcionales que guarden relación con la estrategia de negocio.
- Fase 4: Incrustar la medición y el análisis de los niveles de automatización en una metodología adecuada para la formulación de la estrategia empresarial y la fabricación.

La metodología utilizada en este caso de estudio se llama Metodología DYNAMO. Había sido aplicada durante los años 2004-2007 en siete estudios de casos utilizando el método de estudio de caso único en secuencia. Todos los casos fueron realizados en sistemas de producción existentes (Lindström y Winroth 2010).

Los autores presentan las ejecuciones y los resultados de las cuatro fases de la sección anterior.

- a) Fase 1: desarrollo de la metodología DYNAMO para medir y evaluar los niveles de automatización.

El resultado del desarrollo de la metodología DYNAMO fue una secuencia de ocho pasos que se presentan en la tabla 2.7. Además, se desarrollaron escalas de referencias para niveles de automatización mecánicas e información, siendo

posible su medición, o juzgar los niveles en producción, enfocándose en el nivel de tarea.

1.- Planificas antes de la medición
2.- En sitio; Con el pre estudio para identificar el proceso
3.- Visualizar y documentar el flujo de producción
→4.- Identificar la tarea principal de cada celda o sección
→5.- Identificar las sub tareas para cada celda o sección
6.- Medición de LoA
7.- Establecer el nivel máximo y mínimo relevante de LoA
8.- Análisis de resultados

**Tabla 2.7.** Metodología DYNAMO en ocho pasos (Lindström y Winroth 2010).

b) Fase 2: Validación de la metodología DYNAMO

La validación fue realizada en la siguiente secuencia:

1. Estudiar la metodología DYNAMO.
2. Presentar la metodología a los participantes de la compañía donde se llevó a cabo.
3. Realizar los pasos de la metodología del 1-7(los autores no validaron el paso 8 en este caso).
4. Evaluación de las mediciones y resultados.
5. Desarrollar una metodología mejorada.
6. Documentar y hacer reporte.

c) Fase 3: Revisión y evaluación de los procesos de formulación de estrategias de Manufactura.

Los autores revisaron diez estrategias de formulación de manufactura y procesos donde fueron verificados contra los criterios de evaluación. La mayoría de los marcos de formulación examinados contienen una combinación de la formulación

de estrategias corporativas, de negocios y funcionales. El análisis de la revisión mostró que:

- El procedimiento de los procesos está bien descrito y se consigue una alta consistencia.
- Las herramientas y técnicas están bien descritas.
- La administración del proceso de formulación es un área de mejora.
- La comunicación y el compromiso son las áreas de mejora.

d) Fase 4: la incorporación de la metodología DYNAMO en el proceso de formulación de la estrategia de fabricación.

El diseño inicial del proceso para implementar los niveles de automatización en el proceso de formulación de la estrategia de manufactura se ha traducido en un marco de trabajo, visualizado como un proceso de decisión para decidir sobre un adecuado nivel de automatización. La metodología para la formulación de la estrategia de automatización contiene cinco sub-procesos, que se explican a continuación:

Subproceso 0: Preparación. El propósito del primer sub-proceso es llegar a un acuerdo sobre el propósito de ejecutar la metodología y hacer un plan para la ejecución.

Subproceso 1: Formulación de la estrategia empresarial y la fabricación. El primer sub-proceso se realiza en forma de un taller con participantes. El contenido de esta parte es la evaluación de negocio y estrategia de fabricación con el fin de entender la estrategia de producción elegida y destinada.

Subproceso 2: Medición de los niveles de automatización. El propósito es medir y evaluar los niveles de automatización para sub-tareas críticas en un flujo de producción.

Subproceso 3: Vinculación nivel de automatización y estrategia. Al igual que en subproceso 1, el tercer subproceso se realiza en forma de un taller con

participantes que toman parte activa en el análisis de las diferentes alternativas LoA. Por otra parte, las acciones deben ser listadas para proponer acciones que están en línea con la estrategia de producción prevista, también para comprobar los resultados de los subprocesos del uno al tres para asegurar la calidad de los resultados y también deben proporcionar un plan para la aplicación de acuerdo a lo elegido que está con las estrategias destinadas.

Subproceso 4: Documentación. El último sub-proceso debe documentar los resultados encontrados en subprocesos 1-3.

La metodología presentada anteriormente consiste en un proceso estructurado y dividida en la preparación de los sub-procesos, la formulación de la estrategia empresarial y la fabricación, la medición de los niveles de automatización, nivel de automatización, la estrategia, y la documentación de enlace. Al incorporar la medición y el análisis de los niveles de automatización en el proceso de la estrategia de producción, se pueden encontrar los niveles adecuados de automatización. Estos niveles adecuados de automatización están alineados con la estrategia de producción y, por lo tanto, forman juntos la estrategia de automatización, lo que asegura una dirección deseada de la empresa y también es compatible con la robustez y la fiabilidad del sistema de manufactura debido al enfoque holístico elegido.

### 3. METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la metodología que se va a utilizar para el desarrollo del proyecto, con la finalidad de mostrar cada una de las tareas y sub tareas que se llevarán a cabo para la realización del proyecto y lograr sus objetivos.

Esta metodología es de enfoque cuantitativo, ya que según Hernández-Sampieri et al. (2014) la secuencia que tiene el proceso es de un orden riguroso, pero sí es necesario, se puede redefinir algunas de las fases. La investigación es de tipo descriptivo, ya que se pretende recolectar información sobre el proceso, especificarlas, analizarlas y describir el fenómeno. Este trabajo se considera también no experimental debido a que solamente se tiene el objetivo de realizar un único cambio en ciertas variables para ver el efecto que tiene en la productividad.

En la figura 3.1 se muestra el diagrama de la metodología con cada uno de sus pasos y tareas, así como la secuencia que se tiene que realizar a lo largo del proyecto. Esta metodología, como se puede observar, tiene una secuencia y orden ya definida, pero en cualquier momento es posible regresar a pasos previos, eso dependerá de los resultados que se vayan obteniendo a lo largo de la realización del proyecto. La metodología cuenta con cuatro pasos y cada uno de ellos con varias actividades a realizar. Este proceso tiene su base en la metodología que se presenta en el capítulo dos por los autores Fasth et al. (2008) en el cual se harán ajustes para adecuarla al presente trabajo



Figura 3.1. Metodología basada de Fasth et al. (2008) con modificaciones.

### 3.1. Pre-estudio

Este paso consiste en identificar como está la situación actual del proceso del centro de trabajo en estudio y conocer las características con las que actualmente se está realizando la operación, en la figura 3.2 se muestran las actividades principales que se tienen que llevar a cabo para poder cumplir el objetivo de esta fase:

1. Selección de proceso: Esta actividad consiste en seleccionar en cuál de los procesos se trabajará tomando en cuenta las delimitaciones planteadas en el capítulo uno.
2. Caminar el proceso: El objetivo de esta actividad es entender cómo funciona y opera el área seleccionada en el paso anterior, es decir, procesos involucrados, como se alimenta y personal involucrado, se puede utilizar equipo de video para disponer del detalle de cada uno de los procesos.
3. Realizar VSM: En esta actividad se pretende estudiar el flujo del proceso, y llevar a cabo toma de tiempos del área seleccionada. Es necesario hacer un recorrido hacia todos los procesos previos, con la

finalidad de identificar su influencia en el proceso bajo estudio. Para la toma de tiempos se puede utilizar equipo de video.



*Figura 3.2. Tareas de fase uno (elaboración propia).*

## 3.2. Medición

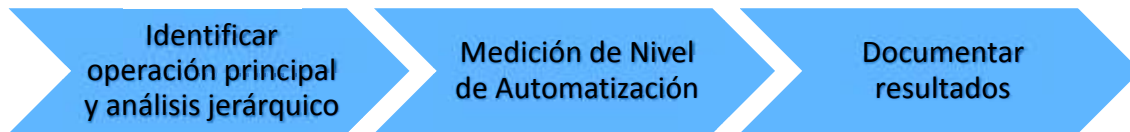
Esta fase pretende desglosar cada actividad que realizan los involucrados en el área, así como medir el nivel de automatización con que cuenta el proceso. En la figura 3.3 se muestra la secuencia de las actividades para lograr el objetivo de esta fase:

1. Identificar la operación principal y análisis jerárquico de tareas: descomponer cada una de las actividades en sub tareas, de esta manera es posible organizar las tareas adecuadamente e identificar la operación principal, también se deben de tomar los tiempos de cada uno de los movimientos que se realizan, con la finalidad de analizar e identificar con cuál de estos movimientos se requiere trabajar.
2. Medición de nivel de automatización: identificar el nivel de automatización en el cual se ubica el área con respecto al transporte de materiales, operaciones manuales, como se envía y obtiene



información y como es la toma de decisión. Para identificar el nivel de automatización se utilizará la tabla 2.4 del capítulo dos.

3. Documentar resultados: Documentar los resultados de la primera y la segunda actividad.



*Figura 3.3. Tareas de fase dos (elaboración propia).*

### 3.3. Análisis

Esta fase de la metodología pretende determinar el nivel mínimo y máximo de automatización para el área seleccionada, con ello, se deben diseñar diferentes propuestas con las mejoras que se planean realizar y por último analizar estas posibles mejoras con respecto a los parámetros que se obtuvieron en la fase uno. En la figura 3.4 se muestran las sub tareas que engloban la fase de análisis:

1. Nivel de LoA de tareas: Realizar taller para determinar el nivel mínimo y máximo de automatización. Determinar el nivel necesario para cada una de las operaciones del área, es decir, los límites entre automatizar y no automatizar. Para poder determinar lo anterior, es necesario saber cuáles son las metas de la empresa, y como desea que funcione el proceso, a su vez, es necesario conocer cuál es el estado actual y de ser necesario, conocer el proceso anterior.
2. Diseño de propuestas: En base a los resultados de la actividad anterior, diseñar varias opciones con las mejoras propuestas. Para poder realizar lo anterior, se deben de descartar las propuestas que se sabe no son factibles o adecuadas, como por ejemplo cuando no se cumpla un estándar en una propuesta o bien se disminuya algún nivel de automatización.
3. Análisis de propuestas: Se analizarán las diferentes propuestas planteadas de acuerdo a los parámetros medidos anteriormente. Las propuestas

resultantes se presentarán con la persona encargada del área para seguir

c  
o  
n  
e  
l  
a  
n  
á  
l



isis en base a sus objetivos.

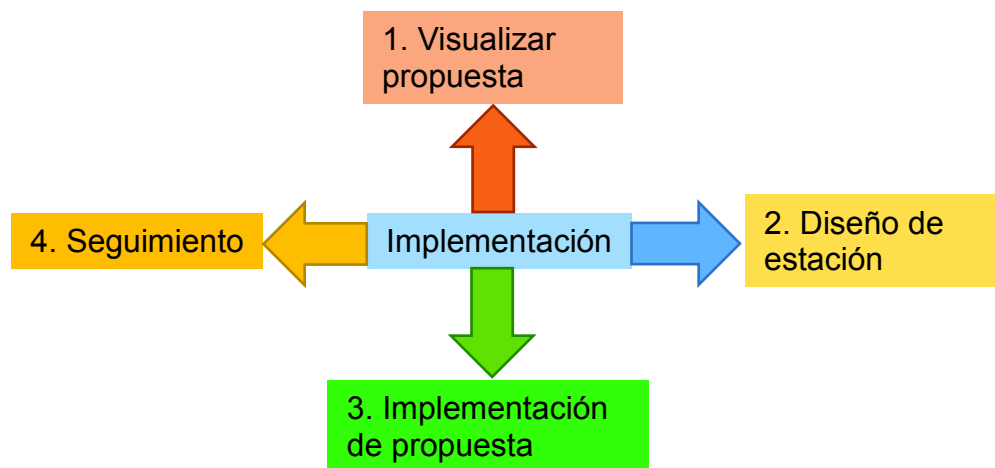
*Figura 3.4. Sub tareas de Fase de Análisis (elaboración propia).*

### 3.4. Implementación

El objetivo de la última fase consiste en visualizar las diferentes propuestas que resultaron en la fase anterior en base a los objetivos y deseo de la compañía, una vez seleccionada la propuesta se procederá a realizar el diseño de la nueva área de trabajo (eléctrico, mecánico, localización de estaciones). En esta fase se pretende llevar a cabo la implementación una vez terminado el diseño y dar seguimiento con la finalidad de verificar el efecto que se obtuvo después de la implementación, cabe mencionar que es en esta fase en donde se tiene la posibilidad de regresar a la fase dos en caso de ser necesario. En la figura 3.5 se muestra el contenido, de forma esquemática, que se debe lograr para la finalización de la última fase:

1. Visualizar propuesta: Se tiene que llevar a cabo un escrito de la propuesta planteada. Esta propuesta tiene que ser presentada a los encargados de la empresa para llevar a cabo la toma de decisión final respecto a la opción elegida en base a las metas y objetivos de la empresa.

2. Diseño de estación: Realizar un diseño de la estación utilizando software para ese fin. El diseño debe incluir el diseño eléctrico, mecánico y la lógica de su funcionalidad, así como el diseño de estación del acomode del área resultante.
3. Implementación de propuesta: en base al diseño se realizará la implementación de la nueva estación, esto con ayuda de técnicos e ingenieros de la empresa.
4. Seguimiento: Analizar los efectos que se obtuvieron en la implementación del proyecto con respecto a los parámetros mencionados en la fase uno.



**Figura 3.5.** Sub tareas de la fase de implementación (elaboración propia).

## **4. IMPLEMENTACIÓN**

En este capítulo se presentan los resultados de la metodología propuesta en el capítulo anterior, describiendo cada uno de los pasos que se realizaron con el apoyo de una serie de figuras y tablas, todo esto para dar solución a la problemática en cuestión.

### **4.1. Fase 1: Pre-Estudio**

El objetivo de esta fase consiste en definir como está la situación actual del proceso en estudio y conocer las características del centro del trabajo. Para poder lograr lo anterior se realizaron varias visitas al centro de trabajo, se estudiaron parámetros como el tiempo de ciclo de cada operación, el flujo del material, también se obtuvo información sobre la demanda para los productos que se fabrican en ese centro de trabajo, por políticas de la empresa este último dato no pudo ser revelado.

#### **4.1.1. Seleccionar proceso a estudiar**

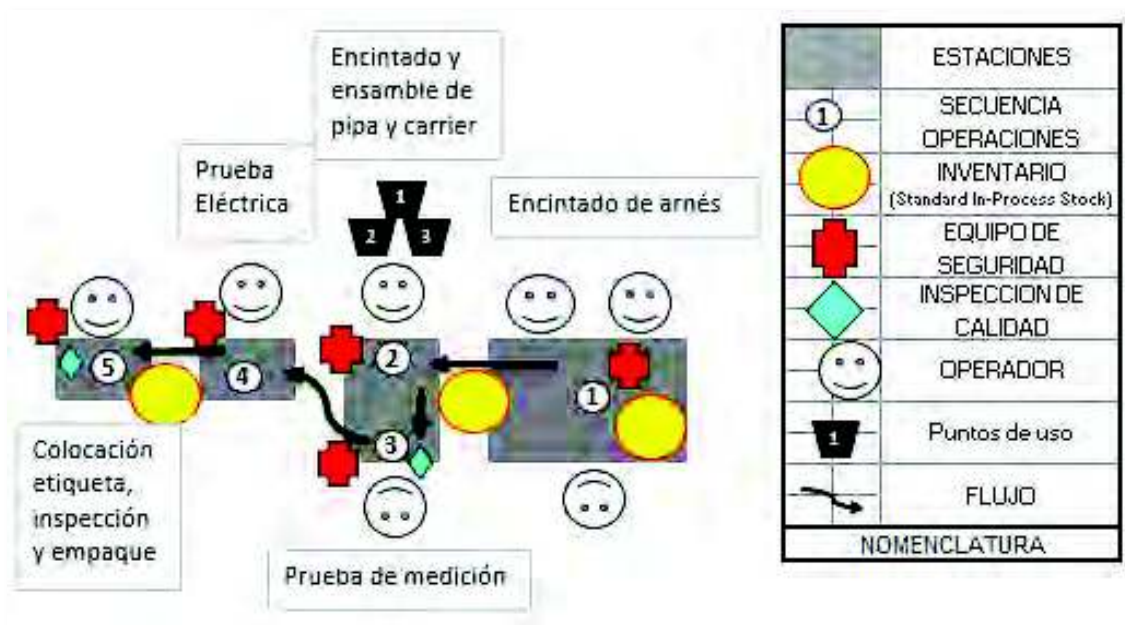
El objetivo de esta etapa es seleccionar el proceso a estudiar, para poder llevarlo a cabo se tomaron en cuenta factores como: factibilidad, dificultad de automatización y objetivos de la empresa. Por necesidades de la empresa, fue asignado un centro de trabajo con el nombre WL 9806, en el cual se manufacturan arneses, estos son encintados en su totalidad y se ensamblan diferentes componentes en sus extremos. Este centro de trabajo corre 5 números de partes distintos, pero con mucha similitud en lo que a componentes y proceso se refiere, la principal variante de estos números de parte es la longitud del arnés.

#### **4.1.2. Recorrer el proceso bajo estudio**

Para poder realizar cualquier trabajo sobre este proceso, se debe primero conocer cómo funciona siendo así la finalidad de trabajar en esta etapa, dicho en otras palabras, se tiene que conocer el número de operadores con que cuenta el centro de

trabajo, el flujo que tienen las piezas dentro del proceso, los tiempos de ciclo de cada operación, y algunas otras características necesarias en los análisis.

En el capítulo tres se menciona que se utilizaría un VSM para mostrar el flujo y parámetros, pero cuando se realizaron los recorridos, se observó que los procesos anteriores alimentaban a diferentes números de parte y diferentes líneas a la vez, por lo que en este caso se llevó a cabo una adecuación ya que no sería factible plasmarlo. El resultado de esta etapa fue el plano del centro de trabajo que se muestra en la figura 4.1, el cual cuenta con el número de operadores y flujo de proceso, entre otra información relacionada al centro de trabajo.



**Figura 4.1.** Plano del centro de trabajo bajo estudio (diseño propio utilizando formato de empresa).

También se registraron los tiempos de ciclo de cada una de las operaciones, esto con el fin de visualizar las áreas de oportunidad del centro de trabajo. A continuación, en la tabla 4.1, se presentan los tiempos.

NUM.	ACTIVIDAD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TIEMPO (SECS)	VALOR AGREGADO (Y/N)	PUNTOS OBSERVADOS
1	ENCINTADO											44.47	Y	Esta operación se dividió entre 3 operadores
		99	118	130	141	85	106	96	116	95	116			
2	COLOCION DE ZAPETA Y CARRIER											56.2	Y	
		43	47	48	48	62	51	51	48	49	49			
3	PRUEBA DE INSPECCION											42.55	N	
		36	39	37	39	51	38	48	31	37	51			
4	PRUEBA ELECTRICA											24.15	N	
		24	22	21	22	23	22	19	21	21	21			
5	INPESCCION FINAL Y ETIQUETA											31.05	Y	
		49	31	27	35	35	27	27	27	32	36			

**Tabla 4.1.** Registro de tiempos de ciclo de cada operación (formato por parte de la empresa).

Se tomaron diez veces los tiempos de ciclo de cada una de las operaciones, de acuerdo al procedimiento manejado por la empresa, como se puede observar en la tabla 4.1. Para la determinación del tiempo de ciclo de esa estación se toma en cuenta el número menor de mayor frecuencia para ser multiplicado por el factor de fatiga cuyo valor es 1.15. Lo descrito anteriormente es el procedimiento que la empresa utiliza para registrar los tiempos de ciclo de sus centros de trabajo.

## 4.2. Fase 2: Medición

Esta fase tiene como objetivo estudiar cada uno de los movimientos que realiza el operador en la estación de trabajo correspondiente y medir el nivel actual de automatización que las estaciones presentan.

### 4.2.1. Análisis de tareas jerárquicas

El objetivo de estas sub tareas es estudiar los diferentes movimientos utilizados en cada operación para, de esta forma, visualizar los movimientos que se podrían aplicar a los niveles de automatización. En este análisis se utilizó el video filmado de la fase 1. El resultado que arrojó el análisis se observa en figura 4.2.

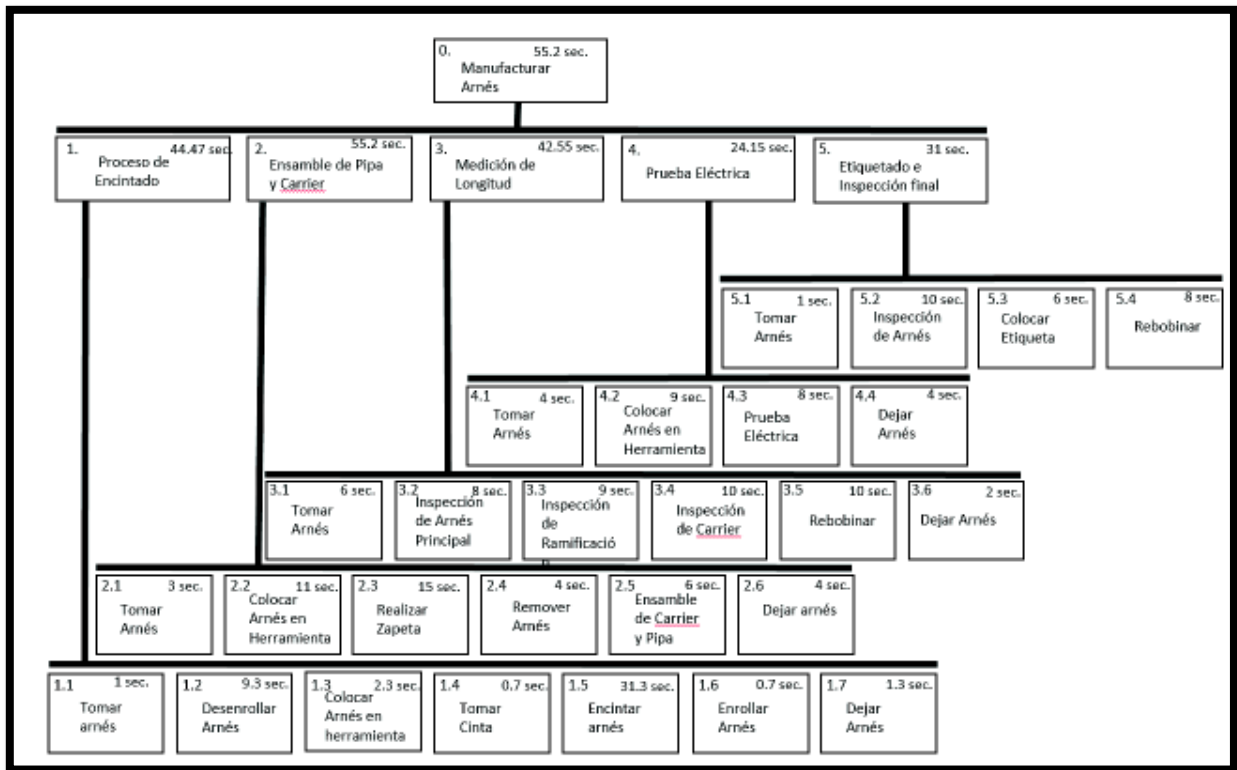


Figura 4.2. Diagrama de análisis de tareas jerárquicas (elaboración propia).

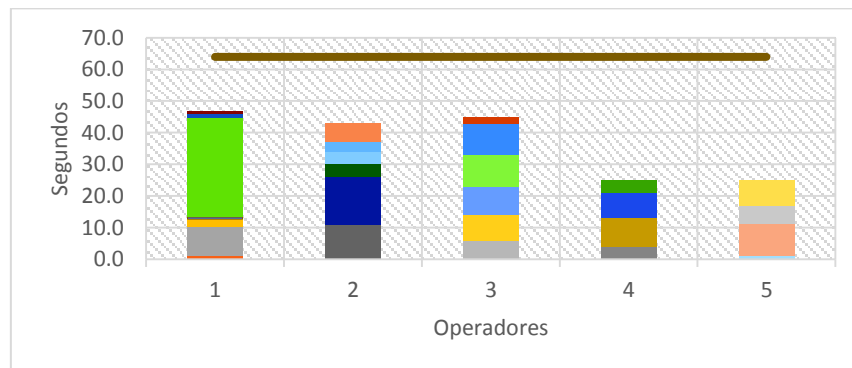
Se elaboró una tabla con los respectivos tiempos de cada uno de los movimientos que realizan los operadores en las diferentes estaciones, lo cual fue registrado en la tabla 4.2.

Operación	Seg.	Asignación por Operadores				
	Ciclo	1	2	3	4	5
TOMAR CABLE	1.0	1.0				
QUITAR CINTA	9.3	9.3				
COLOCAR ARNÉS EN FIXTURE	2.3	2.3				
TOMAR CINTA	0.7	0.7				
ENCINTAR	31.3	31.3				
ENROLLAR CABLE	0.7	0.7				
MOVER CABLE TERMINADO	1.3	1.3				
TOMAR CABLE	3.0		3.0			
COLOCAR ARNÉS	11.0		11.0			
COLOCAR ZAPETA	15.0		15.0			
QUITAR ARNÉS	4.0		4.0			
COLOCAR CARRIER	6.0		6.0			
COLOCAR CABLE TERMINADO	4.0		4.0			

TOMA DE CABLE	6.0			6.0		
INSPECCIÓN DE ARNÉS PRINCIPAL	8.0			8.0		
INSPECCIÓN DE RAMIFICACIONES	9.0			9.0		
INPECCION DE CARRIERS	10.0			10.0		
EMBOBINADO	10.0			10.0		
COLOCAR PRODUCTO TERMINADO	2.0			2.0		
TOMAR CABLE	4.0				4.0	
COLOCAR ARNÉS EN FIXTURE	9.0				9.0	
PRUEBA ELECTRICA	8.0				8.0	
QUITAR ARNÉS DE FIXTURE	4.0				4.0	
TOMAR CABLE	1.0					1.0
INPECCION DE CARRIER	10.0					10.0
COLOCAR ETIQUETA	6.0					6.0
EMBOBINAR	8.0					8.0

**Tabla 4.2.** *Tiempos de cada movimiento realizado (elaboración propia con formato de compañía).*

Para una mejor apreciación respecto a los tiempos entre los distintos movimientos se obtuvo una gráfica con los datos correspondientes, arrojados en el análisis anterior, por operador. Este gráfico se presenta en la figura 4.3, en la cual se observa que en la operación de encintado es en donde se acumula la mayor cantidad de tiempo, lo que significa que cualquier cambio que se le realice en esta operación, se verá afectado en su producción.

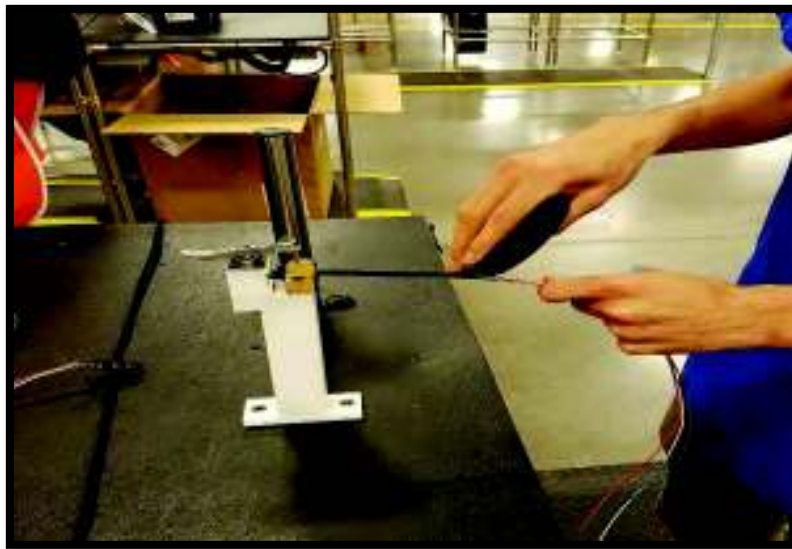


**Figura 4.3.** *Gráfico de los tiempos de cada movimiento (elaboración propia con formato de compañía).*



#### 4.2.2. Medición del nivel de automatización

Antes de empezar a realizar cualquiera cambio en el centro de trabajo, primero es necesario conocer en qué estado o nivel de automatización se encuentra, por lo que se observó de qué manera se hace el trabajo y cómo es que la información de toma de decisiones se maneja, en este caso, solamente se tomó en cuenta la estación uno del centro de trabajo, ya que es en la que se pretende implementar la mejora. En la figura 4.4 se aprecia como el trabajo es realizado y que es lo que se utiliza para llevar a cabo esta operación.



*Figura 4.4. Operación de encintado (elaboración propia).*

De acuerdo a la tabla 2.4 esta operación puede ser considerada en el nivel 1 de automatización en la sección mecánica, ya que el trabajo es totalmente manual y lo único con lo que se ayuda es una herramienta para sujetar el extremo, pero no utiliza alguna herramienta manual.

En cuanto a la manera en la que se toman las decisiones, los operadores tienen órdenes e instrucciones de trabajo, en la figura 4.5 se observan las instrucciones de trabajo que los operadores utilizan para realizar sus actividades.



**Figura 4.5.** Instrucciones de trabajo (elaboración propia).

Utilizar solo una orden de trabajo como decisión se considera que se encuentra en el nivel 3 de automatización en la sección de información, lo cual con estos dos resultados se concluye que la estación de encintado se encuentra en el nivel 1-mecánico y nivel 3 información, con lo cual, a partir de esos niveles se toma el punto de inicio para realizar las propuestas de solución, descartando las que estén debajo de este nivel. En la tabla 4.3 se puede observar el resultado de este análisis.

	<b>Mecánico<sub>(LoA)</sub></b>	<b>Información<sub>(LoA)</sub></b>
<b>Encintado de arnés</b>	1	3

**Tabla 4.3.** Nivel de automatización en proceso de encintado de arnés

### 4.3. Fase 3: Análisis

En esta fase se determinó el nivel mínimo y máximo de automatización en el que se ubica a la estación bajo estudio, con esto se pretenden desarrollar diferentes propuestas para ser presentadas al personal correspondiente en la empresa y analizar cuál podría ser la indicada para llevarla a cabo.

### 4.3.1. Determinar niveles mínimos y máximos de automatización

Para poder determinar los niveles de automatización dentro de la estación, primero se debe conocer cuál es el nivel de automatización en que se encuentra, que fue lo que se realizó en la fase 2, el cual quedó como resultado: nivel 1 en trabajo mecánico y nivel 3 en trabajo cognitivo o de información. Por otra parte, el proceso anterior de este centro de trabajo no puede ser modificado, ya que surte a diferentes líneas, por lo que no es posible realizar un proceso totalmente autónomo. Debido a lo anterior, se descarta el nivel 7 mecánico y de información.

Otros factores a considerar son las metas y los deseos que tiene la empresa, por lo que se tuvieron reuniones con el encargado de la empresa para conocer las ideas y necesidades en cuanto a ese centro de trabajo. La información obtenida fue que es deseable sustituir que la operación de encintado sea realizada por uno o más operadores, para que se lleve a cabo por un sistema de encintado semiautomático o automático, por lo que mínimamente debe estar a nivel 4 en tarea mecánico.

Ya teniendo en cuenta lo anterior se puede determinar que el nivel de automatización mínimo es 4 para tareas mecánicas y 3 para tareas cognitivas y como máximo 6 para ambas tareas obteniendo la tabla 4.3 que se muestra a continuación.

LoA	Mecánico	LoA	Información
4	Herramienta de mano automatizada	3	Enseñanza
5	Máquina estática/estación de trabajo	4	Cuestionamiento
6	Máquina flexible/estación de trabajo	5	Supervisión
		6	Intervenir

**Tabla 4.4.** Nivel relevante mínimo y máximo de automatización (elaboración propia).

### 4.3.2. Propuestas de diferentes mejoras

Teniendo ya determinado el nivel mínimo y máximo de automatización relativo se realiza un cuadro de posibles propuestas para dar solución al problema con el que se está trabajando quedando como se observa en la tabla 4.4.

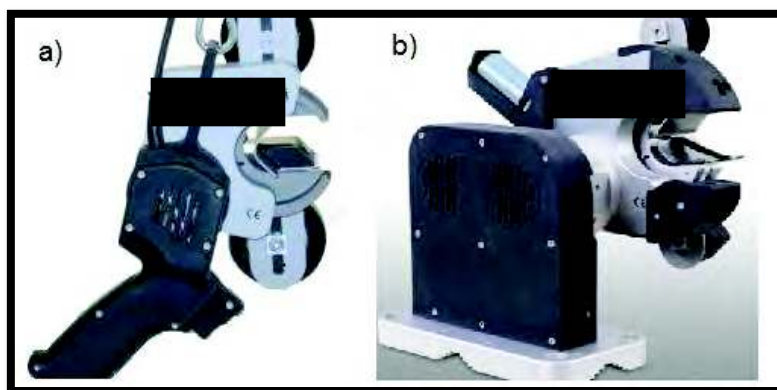
Se puede observar que se tienen doce posibles propuestas a grandes rasgos para resolver el problema, pero esto no significa que todas van a funcionar. Cada una de las propuestas (si es posible implementarse de forma física) se tiene que evaluar los costos para poder ser aplicado. Algunas de estas propuestas es posible que no se pueda llevar a cabo de forma física debido a la naturaleza del proceso.

Mecánico	Información
Herramienta de mano automatizada	Instrucción de trabajo
	Sistema que cuestione si la operación está lista para comenzar
	Alarma en caso de un mal funcionamiento
	Sistema que corrija un error que se presente de forma automática
Máquina estática/estación de trabajo	Instrucción de trabajo
	Sistema que cuestione si la operación está lista para comenzar
	Alarma en caso de un mal funcionamiento
	Sistema que corrija un error que se presente de forma automática
Máquina flexible/estación de trabajo	Instrucción de trabajo
	Sistema que cuestione si la operación está lista para comenzar
	Alarma en caso de un mal funcionamiento
	Sistema que corrija un error que se presente de forma automática

*Tabla 4.5. Cuadro de posibles propuestas (elaboración propia).*

### 4.3.3 Análisis de Propuestas de mejoras

Una vez teniendo el cuadro de posibles soluciones se puede llevar a cabo el análisis de las propuestas. Conforme a esto se buscó tecnología que pudiera realizar este trabajo. Entre ellas se encontró máquinas encintadoras de mano y encintadoras montables de mesa automáticas las cuales son mostradas en la figura 4.6. Debido a que cualquiera de estas dos opciones cumple perfectamente con el nivel mínimo de automatización requerido, se decidió por una de ellas: la encintadora montable de mesa automática.



**Figura 4.6.** a) Encintadora de mano automática, b) encintadora montable de mesa automática (elaboración propia).

Siendo esta opción, el nivel más bajo permisible para la implementación, hasta este punto se empezó a incrementar los niveles de automatización siempre en base a esta máquina teniendo entonces las siguientes propuestas con su respectivo costo mostrado en la tabla 4.5.

<b>Sistema</b>	<b>Descripción y observaciones</b>	<b>Costo</b>	<b>operadores</b>	<b>Utilización de operador</b>
Operación manual (actualmente)	La operación se lleva a cabo de forma manual por tres operadores, utilizando instrucciones de trabajo	-	3	100%
Encintadora automática con instrucción de trabajo	El operador tendrá instrucciones de trabajo para llevar a cabo la operación, el cual consiste en presionar un pedal para regular la velocidad de la máquina y a su vez el operador colocará el arnés en la máquina y lo desplazará a su ritmo.	\$USD8000	1	100%
Encintadora automática y sensores de posición	En este caso, el operador llevará acabo la misma tarea que el anterior pero la diferencia es que el	\$USD8300	1	100%

	sistema le dirá si el arnés está colocado en posición correcta para comenzar.			
Encintadora automática con control de velocidad automático	Este sistema funcionará como el anterior, pero la velocidad de giro de la encintadora esta predeterminada.	\$USD11300	1	100%
Encintadora con control de velocidad automático y sistema de movimiento lineal	En esta propuesta, la velocidad de giro y el movimiento lineal serán controladas por el sistema para realizar el encintado, para llevar a cabo el movimiento lineal se integrará un motor y un tornillo sin fin. Se debe utilizar dispositivos de seguridad, ejemplo: barreas ópticas de seguridad e interruptores de fin de carrera.	\$USD13400	1	100%
Encintadora con control de velocidad automática y sistema de velocidad automática con pantalla	En esta solución, el giro de la encintadora será automático, el movimiento lineal de igual forma, será automático, utilizando un servomotor y su respectivo controlador, por lo que será capaz de, el propio sistema, identificar la posición y detenerse cuando haya recorrido la distancia deseada. Cuenta con una pantalla para la selección del número de parte a producir.	\$USD17385	1	26.85%

**Tabla 4.6.** Análisis de propuestas y precios (elaboración propia).

## **4.4. Fase 4: Implementación**

En esta última fase se realizó la selección del sistema a implementar, la selección se llevó a cabo en base al análisis de la fase tres y a los objetivos y prerrequisitos establecidos por la empresa. Por motivos de límite de tiempo para llevar a cabo la fabricación e integración del sistema, se realizó una simulación para observar y analizar los efectos que tendrá en la línea de producción. En esta simulación se realizó utilizando Flexsim para analizar los tiempos de procesamiento, tiempos de espera y trabajo en proceso y se utilizó las redes de Petri para hacer la secuencia del proceso.

### **4.4.1 Selección de propuesta**

En la fase anterior se obtuvieron varias propuestas con sus descripciones y sus precios, a simple vista, se pueden observar las diferencias en cuanto a precio se refiere y optar por la que sea más económica. No obstante, el precio no es el único factor para la selección de la propuesta. Teniendo reuniones con el ingeniero a cargo del área donde se realizará la implementación, el ingeniero tomó la decisión de llevar a cabo la última propuesta de la tabla 4.5, esta decisión fue tomada por las siguientes razones:

- El trabajo se realizará de forma estándar, debido a que la operación tiene más alto nivel de automatización y el operador se involucra menos en ella, los productos serán manufacturados de forma estándar.
- Será posible tener más flexibilidad en números de parte que se fabrican bajo este tipo de proceso y que se manufacturan en otras plantas donde se sigue llevando a cabo de forma manual.
- Reducción de cantidad de operadores: actualmente el número de operadores en esa sola estación es de 3, este será reducido a solo un operador.
- Mejora de ergonomía: Actualmente el trabajo se realiza de forma repetitiva y muy monótona y en una jornada de 8 horas. Con la implementación este factor se esperaría reducirlo considerablemente.

Cabe mencionar que, debido a que los niveles de automatización fueron obtenidos en base a la máquina encintadora, se puede decir que los tiempos de procesamiento entre las diferentes propuestas son iguales, las diferencias recaen en la intervención del operador y el uso cognitivo de este. Por nuestra parte se recomienda implementar la encintadora con control de velocidad automático y sistema de movimiento lineal, debido a que con esto se podrían cumplir la demanda y la mayoría de sus razones mencionadas anteriormente a un precio reducido, excepto la razón de tener más flexibilidad ya que solo trabajarían con los números de parte que actualmente tienen.

#### **4.4.2 Simulación de sistema**

Para efectos de observar cómo funcionará la línea después de la implementación, se realizó una simulación utilizando el software Flexsim. En la figura 4.7 se puede observar la corrida de la simulación y el flujo del producto. En la figura 4.8 se presentan los tiempos y la cantidad de producto que se encuentra en trabajo en proceso y en la figura 4.9 se observa el porcentaje del tiempo de procesamiento y el de tiempo de espera de los operadores. En esta última figura, la 4.9, el proceso de encintado sería la implementación que se propone teniendo un 98.5% procesando, el cual básicamente la mayoría del tiempo está funcionando. Por otro lado, la operación de prueba eléctrica y etiquetado tienen un tiempo de espera bastante elevado con 43.6% y 55.9% respectivamente.



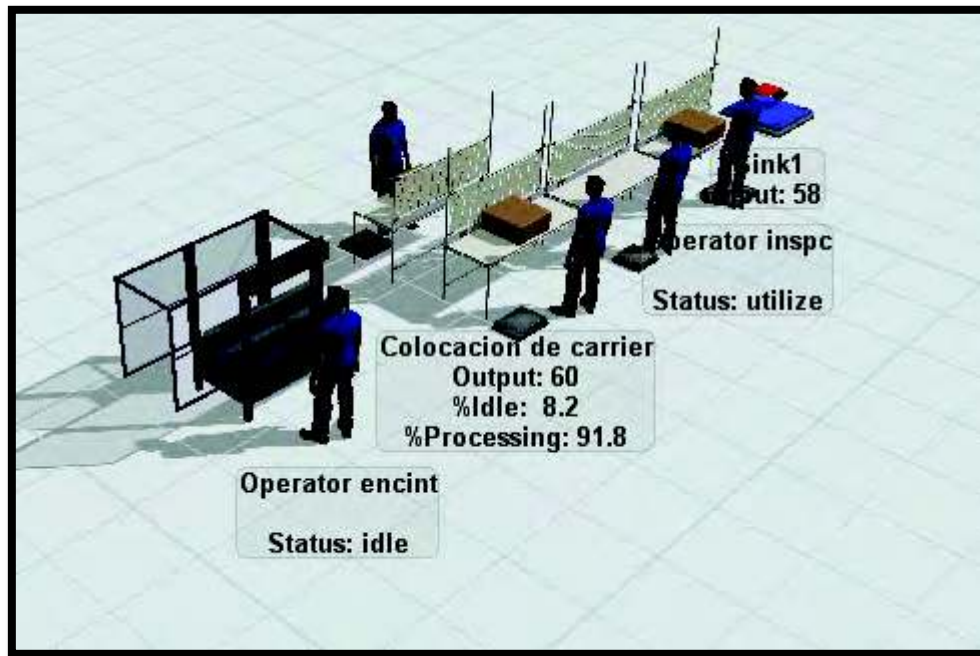


Figura 4.7. Simulación de la línea de producción de encintado de arnés (elaboración propia).

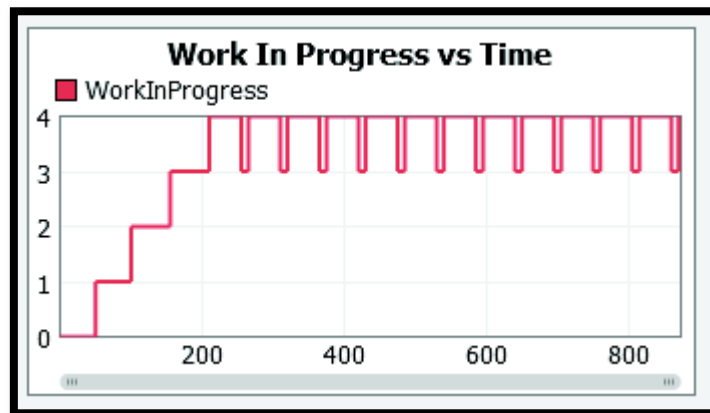
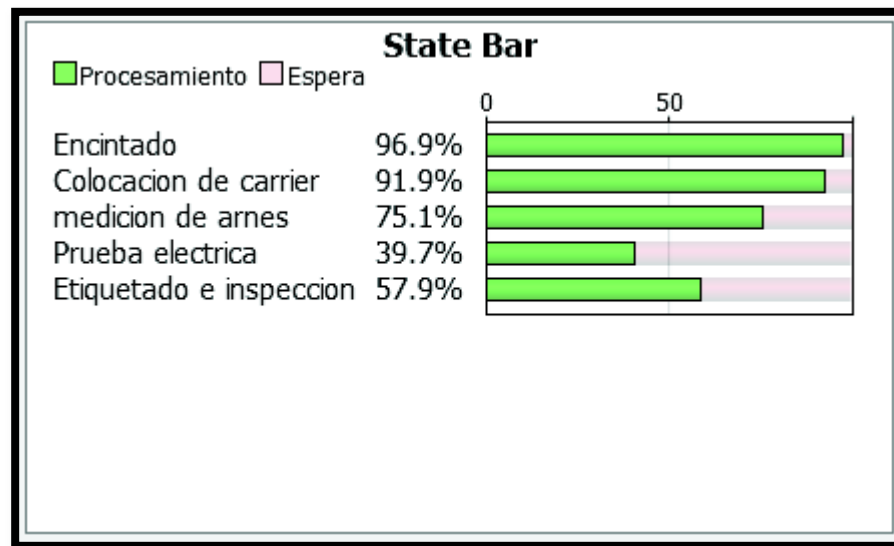


Figura 4.8. Trabajo en proceso contra tiempo (elaboración propia).



**Figura 4.9.** Porcentaje de tiempo de procesamiento y tiempo de espera del operador (elaboración propia).

Utilizando la ecuación 2.2 presentada en el capítulo dos se calcula el promedio de la eficiencia de datos de 9 días de producción continua en dos turnos, que para este caso se tomará como la base de productividad actual de la empresa, obteniéndose:

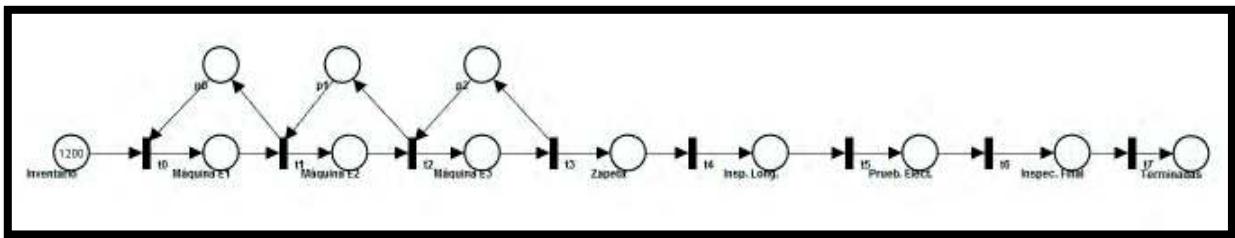
$$P = 0.7174 \text{ ó } 71.74 \%$$

Realizando la implementación de la opción que reduce en dos operadores la estación de encintado por turno, se podría alcanzar lo siguiente:

$$P = 1.0717 \text{ ó } 107.17 \%$$

De acuerdo a los cálculos realizados por la empresa, obtienen que al implementar esta propuesta, el tiempo de recuperación de su inversión sería de un año, lo cual es posible realizar, ya que el límite de recuperación de la inversión en los proyectos de mejora de procesos propuesto, es de dos años como máximo.

A continuación se muestra en la figura 4.10 la corrida de la simulación que se realizó utilizando esta herramienta



**Figura 4.10.** Simulación con redes de Petri (elaboración propia).

En base a la definición presentada en el capítulo dos sobre la red de Petri se tiene:

$$P = \{Inventario, Máquina E1, Máquina E2, Máquina E3 Encintado, Zapeta, Insp. Long, \\ Insp Elec, Insp Final, Terminadas\}$$

$$T = \{T_0, T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7\}$$

Los estados durante la corrida quedarían de la siguiente manera:

$$M_0 = \{1200, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}$$

$$M_1 = \{1199, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0\}$$

$$M_2 = \{1199, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0\}$$

$$M_3 = \{1198, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0\}$$

.....

$$M_k = \{0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1200\}$$

Las Plazas P Representan cada uno de los procesos para la manufactura del arnés, las transiciones T representan el tiempo que toma de pasar de un proceso a otro, los estados M se refieren a cada de uno de los cambios de estados, el cual permite observar cómo se va moviendo el producto dentro de la línea. Con esto se logra un mejor entendimiento del funcionamiento del proceso.

En la figura 4.10. Se puede observar que se tiene plazas con los nombres Máquina E1, Máquina E2 y Máquina E3, estas tres plazas representan a la máquina que se pretende implementar, está dividido en tres procesos debido a que el arnés cuenta con tres ramificaciones, cada vez que se complete una ramificación la maquina

deberá parar y se deberá colocar la siguiente ramificación, así, hasta completar el arnés.

La simulación utilizada en Flexsim se enfoca más en los porcentajes de procesamiento, tiempos de espera y trabajo en proceso. Por otra parte Las redes de Petri se utilizaron para visualizar la secuencia y funcionamiento del proceso.

Con la ayuda de la herramienta de las redes de Petri se obtuvo las bases para la programación de la lógica en el PLC, primordialmente los tiempos de este, y con ello los diagramas de control, ambos se pueden consultar en la sección de anexos.

## 5. CONCLUSIÓN Y TRABAJO FUTURO

En esta sección se presentan las conclusiones en base al análisis de la investigación realizada, un área de oportunidad encontrada por este análisis realizado y se muestran los trabajos futuros para este trabajo.

### 5.1. Conclusiones

Con la implementación de sistemas automáticos, es posible obtener mejores resultados en productividad, pero para lograr lo anterior, es necesario realizar un análisis de los niveles de automatización que más se adecuen a las necesidades de la empresa, sus objetivos y sus requisitos. Para realizar este análisis, fue necesario conocer a detalle el proceso, en este caso el de encintado.

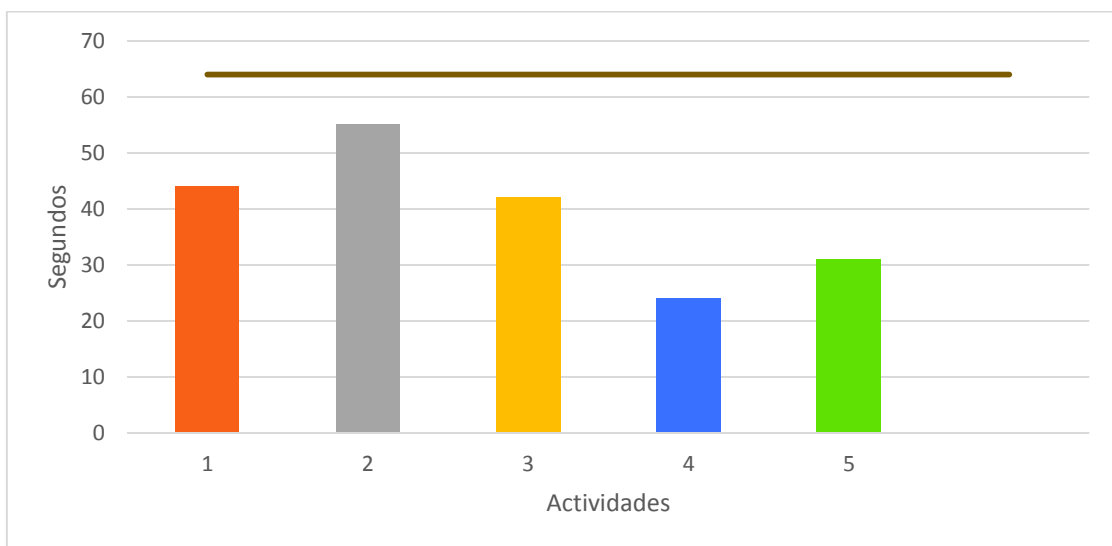
La medición de los niveles de automatización se realizó en base a la metodología consultada, la cual se enfoca en la obtención del diagnóstico actual del nivel de automatización y determinar el mínimo y máximo nivel de automatización relevante, es decir, cual puede ser el mínimo y máximo a automatizar, dependiendo del presupuesto, entre otros y en base a eso realizar un marco de posibles soluciones.

Cuando se estuvo realizando el presente trabajo en sitio, se encontró que la forma de automatizar se realiza utilizando un solo método, en otras palabras, no buscan muchas alternativas para implementar la automatización. Con este trabajo se visualiza una amplia alternativa de diferentes procedimientos para automatizar y de esta manera la empresa puede utilizar esta metodología en otros procesos en que se tenga la necesidad de automatizar.

A la empresa se le presentaron seis alternativas de automatización resultantes del marco de posibles soluciones, incluyendo, en cada caso, una cotización global de los equipos electrónicos sugeridos para su implementación. Debido a que el proyecto no llegó a la etapa de implementación física, se realizó una simulación utilizando Flexsim que fue mostrada en la presentación a la empresa y con la cual tuvieron la

oportunidad de calcular el tiempo de recuperación de la inversión dando como factible su implementación por ser menor a dos años que son el límite en proyectos de mejora de procesos.

Si la empresa implementara esta propuesta podría tener un incremento en la productividad de un 35.43% por la reducción de los dos operadores por turno, también se podría integrar más números de parte a este proceso que es la idea de esta empresa y por ultimo por realizar todo el análisis se encontró otra área de oportunidad en el cual se observa que la línea de producción está totalmente desbalanceada, esto se observa en la figura 5.1



**Figura 5.1.** Tiempo de ciclo de cada proceso en el proceso de encintado

Las actividades cuatro y cinco tienen un tiempo considerablemente bajo comparado al resto de las operaciones, por lo que estas dos operaciones podrían ser realizadas por un solo operador sin rebasar el asignado para este proceso, como aclaración, actualmente la actividad uno consta de tres operadores por lo que en total son 7 operadores.

## **5.2. Trabajo Futuro**

El trabajo futuro se deberá enfocar mayormente en la implementación física de la propuesta de la mejora. Con la finalidad de considerar un resultado efectivo del análisis en futuros trabajos, aparte del análisis realizado y con la finalidad de tomar en cuenta otros factores involucrados en la productividad, es importante tomar muy en cuenta la parte ergonómica y la de calidad. Con estas tres características los resultados pueden ser mucho más precisos y satisfactorios.

## 6. REFERENCIAS

- Aristova, N.I., 2014. Controlling Automation Level in Robot Production . Perfect and Stochastic Schemes. , 75(9), pp.1637–1645.
- C. Windmark, P. Gabrielson, C.Andersson, J.E.S., 2012. A Cost Model for Determining an Optimal Automation Level.pdf.
- Chen, T.M., Sanchez-Aarnoutse, J.C. & Buford, J., 2011. Petri net modeling of cyber-physical attacks on smart grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(4), pp.741–749.
- Choe, P., Tew, J.D. & Tong, S., 2013. Effect of cognitive automation in a material handling system on manufacturing flexibility. *International Journal of Production Economics*, 170, pp.891–899. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.01.018>.
- Fasth, Å., Stahre, J. & Dencker, K., 2008. Measuring and analysing Levels of Automation in an assembly system. , pp.169–172.
- Friedler, N., Salonen, A. & Johansson, C., 2013. The automation equipment acquisition process – experienced users ’ perspective. , i.
- Frohm, J., 2008. Levels of Automation in Manufacturing. , 1(28), pp.1–28.
- Frohm, J. & Bellgran, M., 2005. A model for parallel levels of automation within manufacturing. *18th International Conference on Production Research*.
- Hernández-Sampieri, Fernández-Collado, B.-L.P., 2014. *Metodología de la investigación*,
- Kock, S. et al., 2013. Robot Concept for Scalable , Flexible Assembly Automation A technology study on a harmless dual-armed robot. , (230902).
- Kumar, L. & Jetley, R., 2016. Source Code Metrics for Programmable Logic Controller ( PLC ) Ladder Diagram ( LD ) Visual Programming Language. , (Ld).
- Langmann, R. & Rojas-Pena, L.F., 2016. A PLC as an industry 4.0 component. *Proceedings of 2016 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation, REV 2016*, (February), pp.10–15.
- Lien, T.K. & Verl, A., 2009. CIRP Annals - Manufacturing Technology Cooperation of human and machines in assembly lines. , 58, pp.628–646.
- Lindström, V. & Winroth, M., 2010. Aligning manufacturing strategy and levels of automation: A case study. *Journal of Engineering and Technology Management - JET-M*, 27(3–4), pp.148–159.

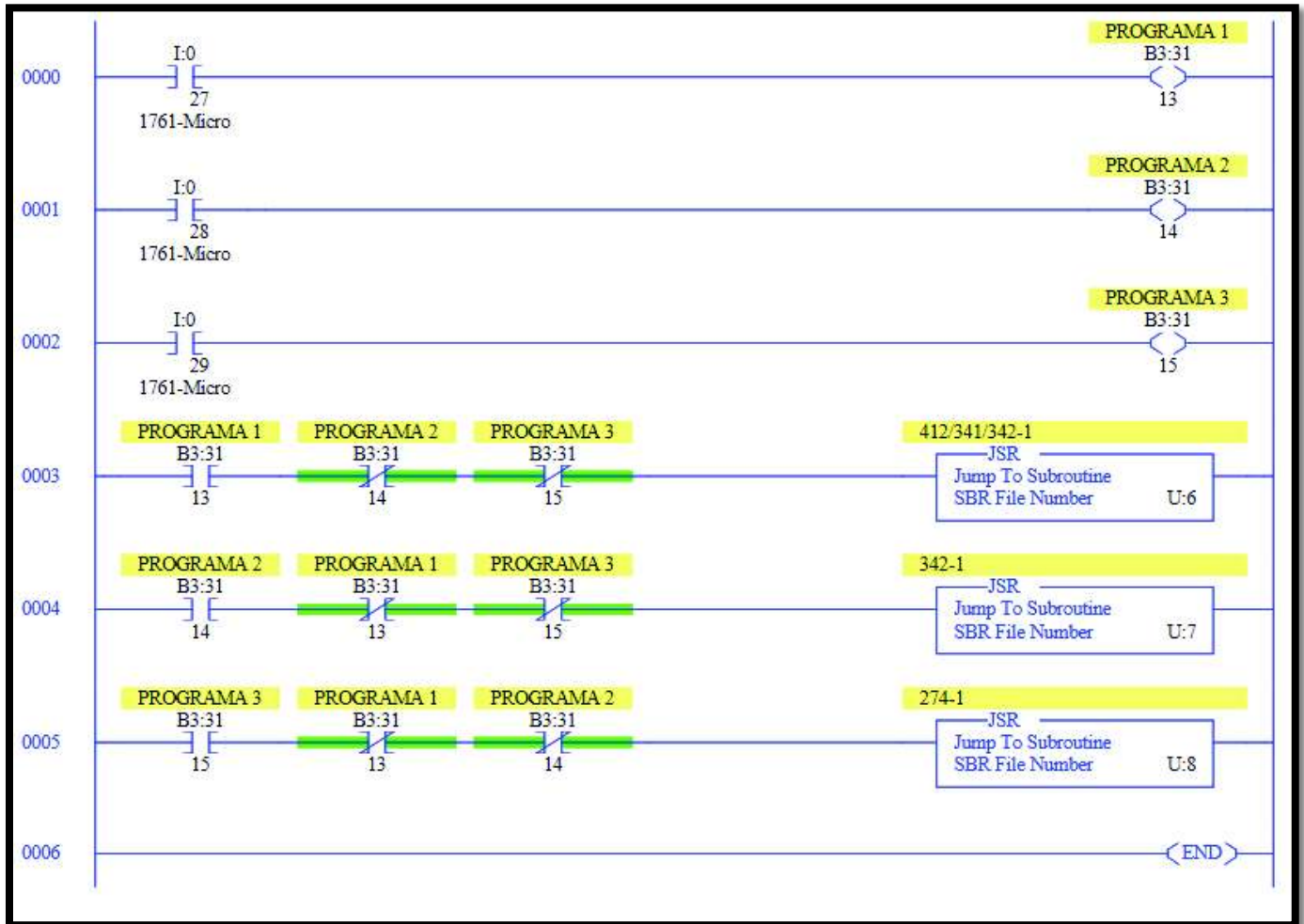


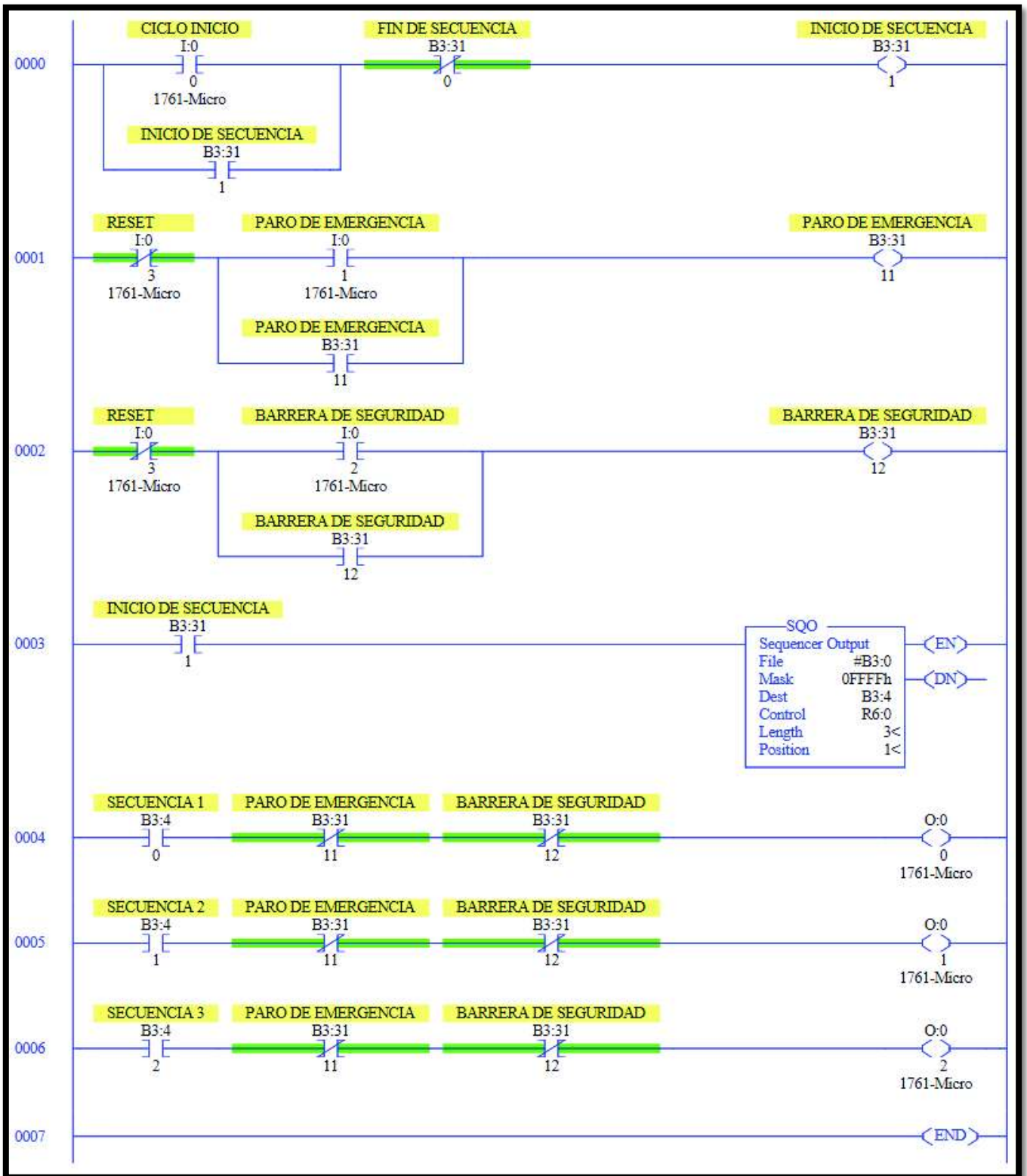
- Mehrabi, M., Ulsoy, A. & Koren, Y., 2000. Reconfigurable manufacturing systems: key to future manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11, pp.403–419. Available at: <http://link.springer.com/article/10.1023/A:1008930403506>.
- Morioka, M. & Sakakibara, S., 2010. A new cell production assembly system with human–robot cooperation.pdf.
- Murata, T., 1989. Petri Nets: Properties , Analysis and Appl k a t ions. , 77(4), pp.541–580.
- N, Z.P. & , Joseph Polden, Nathan Larkin, Stephen Van Duin, J.N., 2011. Recent progress on programming methods for industrial robots.pdf.
- Oke, A., 2013. Linking manufacturing flexibility to innovation performance in.pdf.
- Parasuraman, R., Sheridan, T.B. & Wickens, C.D., 2000. A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 30(3), pp.286–297. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/844354/>.
- Reinhart, G. & Loy, M., 2010. Design of a modular feeder for optimal operating performance. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 3(3), pp.191–195. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2010.09.003>.
- Rosati, G. et al., 2013. Fully flexible assembly systems (F-FAS): a new concept in flexible automation. *Assembly Automation*, 33(1), pp.8–21. Available at: <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/01445151311294603>.
- Sakakura, T. & Shiba, M., 2016. An Empirical Study of Applying a Reflective-Distributed Memory for Automation Systems.
- Sapena-bañó, A. et al., Automatic Translation of Programmable Logic Controllers ( PLC ) Control Programs in Packaging Machinery. , pp.445–448.
- Singh, S.K. & Singh, M.K., 2012. Evaluation of Productivity, Quality and Flexibility of an Advanced Manufacturing System. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 93(1), pp.93–101.
- Tansel, Y., 2011. An experimental design approach using TOPSIS method for the.pdf.
- Wadhwa, R.S., 2012. Flexibility in manufacturing automation: A living lab case study of Norwegian metalcasting SMEs. *Journal of Manufacturing Systems*, 31(4), pp.444–454. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2012.07.008>.
- Walter, A., Karnouskos, S. & Leita, P., 2015. Computers in Industry Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges.
- Zanchettin, A.M. et al., 2016. Safety in Human-Robot Collaborative Manufacturing

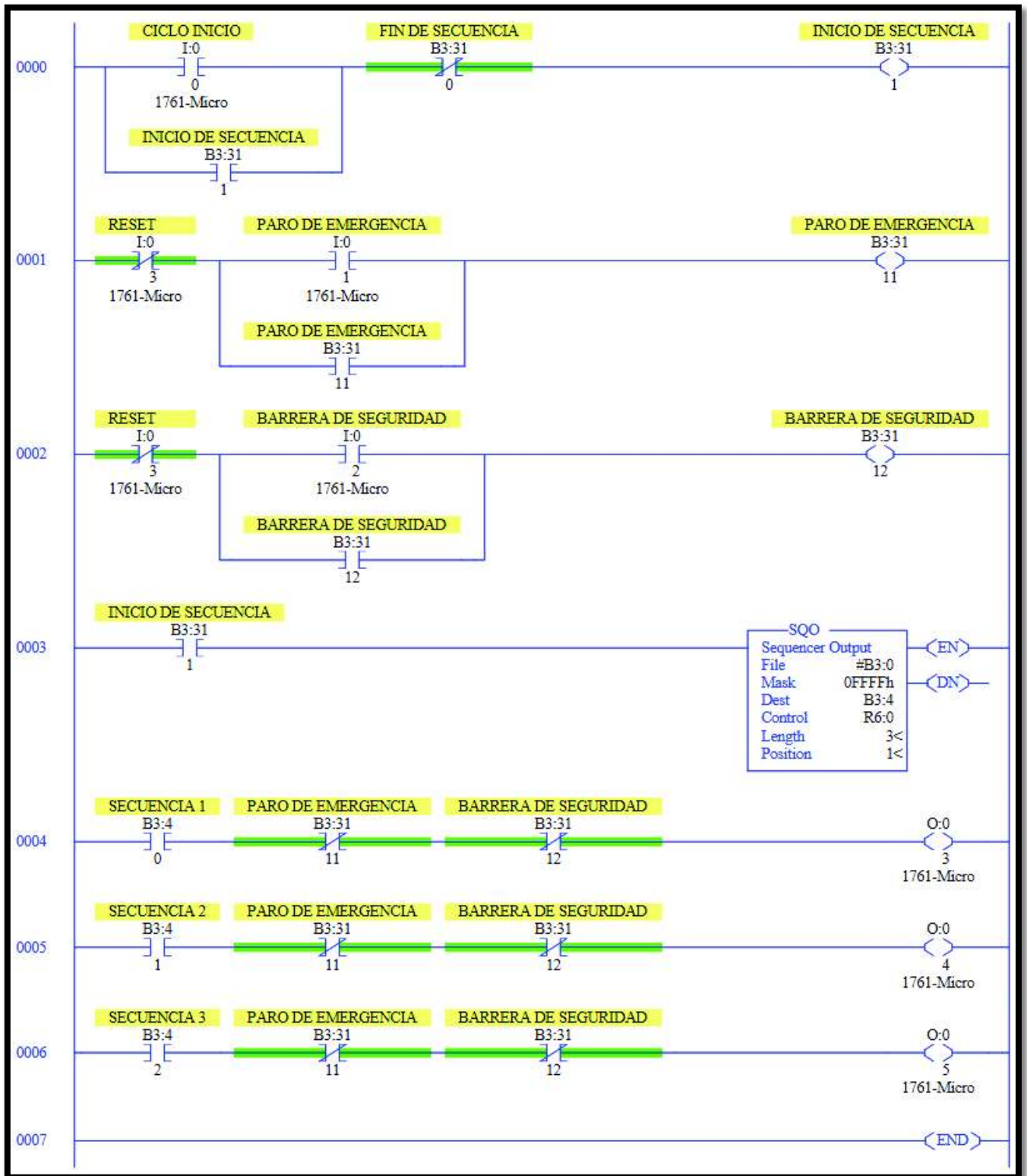
- Environments : Metrics and Control. , 13(2), pp.882–893.
- Zhou, K., Liu, T. & Zhou, L., 2016. Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. *2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, FSKD 2015*, pp.2147–2152.
- Zhou, M.C., DiCesare, F. & Desrochers, A.A., 1992. A Hybrid Methodology for Synthesis of Petri Net Models for Manufacturing Systems. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 8(3), pp.350–361.

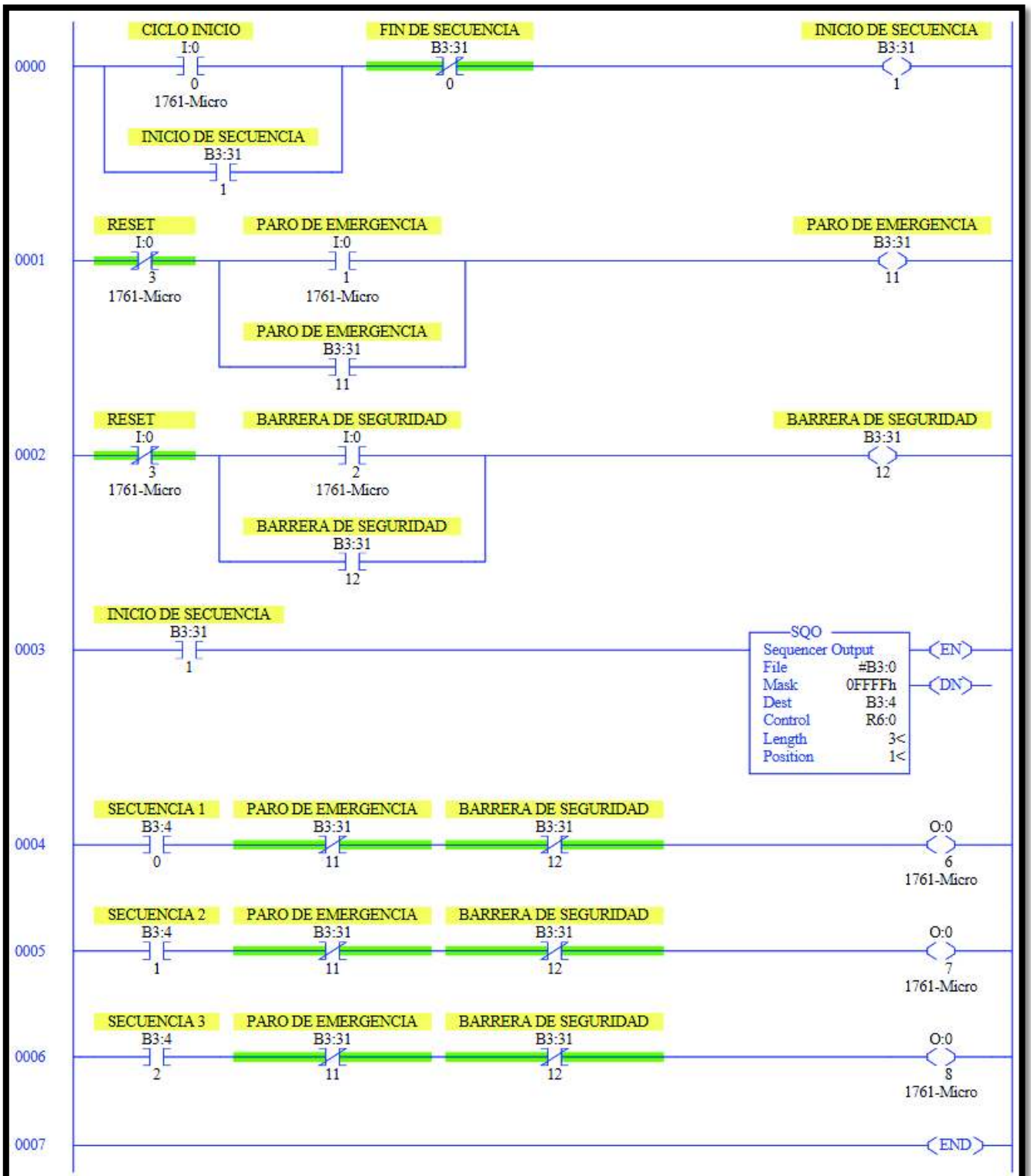
# 7. ANEXOS

## Anexo I. Diagrama de programación PLC









Anexo II. Diagramas de control.

