FACULTAD DE POSGRADOS

PROPUESTA DE UN MODELO DE SIMULACIÓN EN EL LABORATORIO DE INGENIERÍA DE PRODUCCIÓN INDUSTRIAL DE LA UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS, PARA MEJORAR LA PRODUCTIVIDAD EN PROCESOS INDUSTRIALES

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos establecidos para optar por el título de Magister en Dirección de Operaciones y Seguridad Industrial

Profesor Guía

Msc. Omar Cristóbal Flor Unda

Autora

Carla Sofía Rivadeneira Ortiz

Año

2017

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con la estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.

_____

Omar Cristóbal Flor Unda
Master en Automática, Robótica y Telemática
C.C.: 1713531331

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

Declaro haber revisado este trabajo, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.

_____

Christian Leonardo Chimbo Naranjo
Magister en Administración de Empresas
con mención en Gerencia de la Calidad y Productividad
C.C.: 1802719581

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.

_____

Carla Sofía Rivadeneira Ortiz

C.C.: 1719316307

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios y a María Auxiliadora por permitirme cumplir una meta más en mi vida.

A mi familia: Luis, Martha, Erika y Edwin por su apoyo incondicional.

Al personal docente de la carrera de Ingeniería en Producción Industrial, especialmente a Christian Chimbo y Omar Flor, por brindarme su amistad, confianza y guía para desarrollar este proyecto y culminarlo con éxito.

Gracias a todos

DEDICATORIA

A Dios y a María Auxiliadora.

A mis padres Luis y Martha, a mi hermana Erika y a Edwin, por estar siempre a mi lado y confiar en mí.

RESUMEN

El sector industrial enfrenta la necesidad de mejorar su productividad para satisfacer los requerimientos del cliente en cuanto a calidad, flexibilidad, tiempo de entrega y bajo costo; razón por la cual, la utilización de nuevas tecnologías, como los sistemas de manufactura flexible, se ha convertido en una opción relevante. Sin embargo, tomar decisiones sobre la implementación de cambios requiere un análisis previo, y una herramienta que facilita este análisis es la simulación, pues permite representar la realidad de forma simplificada y evaluar los impactos de una decisión sin necesidad de realizar altas inversiones de dinero o parar la producción.

El presente proyecto de titulación desarrolla un modelo de simulación físico-análogo en base a las estaciones de distribución, verificación y clasificación del sistema de producción modular, que se encuentran en el laboratorio de Ingeniería en Producción Industrial de la Universidad de las Américas. Con el modelo desarrollado se simuló el proceso de recepción de materia prima de una empresa de curtiembre ecuatoriana, tomada como caso de estudio.

Se realizaron dos simulaciones: la primera, considerando al proceso de estudio con sus características actuales de funcionamiento; y la segunda, con el posible funcionamiento que tendría el proceso si se llegara a automatizar. Con esto se observó que al implementarse un sistema automatizado se obtendría un incremento en la productividad debido principalmente a la reducción de tiempos en el desarrollo de las actividades y a la precisión de las decisiones tomadas por el sistema automatizado; y que además habría una disminución en los costos de producción para dicho proceso.

Finalmente, con el presente trabajo de titulación se brinda a los estudiantes de la carrera de Ingeniería en Producción Industrial un ambiente simulado de operaciones de manufactura, mediante el cual, y en base a la simulación de un proceso productivo, pueden reforzar sus conocimientos teóricos a través de prácticas de laboratorio.

ABSTRACT

Nowadays, industry needs to improve its productivity to satisfy the costumers needs about quality, flexibility and cost. For that reason, the use of new technology like flexible manufacturing systems, become an option. Implement this kind of changes it´s an important decision that needs to be analyzed. Simulation becomes an useful tool that helps to make decisions like those, because it allows to represent reality in a simplified way and it helps to evaluate the impact from a decision without needing a representative investment or stopping the production.

In the present project, a simulation model was developed with tree stations (distribution, verification and sorting) from a modular production system of the laboratory of “Ingeniería de Producción Industrial” from “Universidad de las Américas”. This model, which is physic and analogous, simulated a raw material receiving process from a tannery industry from Ecuador, which was taken as a case of study.

It was made two simulations: one that works as the actual process is made; and the second one that works as if the process has been automated. As the result from the simulation, it could be seen that with an automated process the productivity increases, it is because when the process is automated the time that takes to make some activities reduces and the decisions are more accurate. Also, it could be seen that there was a reduction in the cost of the process.

With the present project, the students from “Ingeniería de Producción Industrial” at “Universidad de las Américas”, have a simulated environment of manufacturing operation, were they can reinforce with laboratory practices the knowledge that they have acquired in class.

ÍNDICE

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN 1
   1.1 Antecedentes 2
   1.2 Planteamiento del problema 3
   1.3 Alcance 4
   1.4 Justificación 5
   1.5 Objetivos 7
      1.5.1 Objetivo general 7
      1.5.2 Objetivos específicos 7
2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO 8
   2.1 Toma de decisiones 8
   2.2 Productividad 10
      2.2.1 Producción 10
      2.2.2 Procesos 11
      2.2.3 Productividad 13
   2.3 Simulación de procesos 16
      2.3.1 Conceptos 17
      2.3.2 Modelo de simulación 18
      2.3.3 Metodología de simulación 21
         2.3.3.1 Validación 22
      2.3.4 Ventajas y desventajas de la simulación 26
      2.3.5 La simulación como herramienta de aprendizaje 28
   2.4 Manufactura flexible 28
      2.4.1 Definición 29
      2.4.2 Componentes de un sistema de manufactura flexible 30
      2.4.3 Aplicaciones de los sistemas flexibles de manufactura 31
3. CAPÍTULO III. ESTACIONES Y CASO DE ESTUDIO . 33

3.1 Descripción de las estaciones del sistema de producción modular (MPS) 33
3.1.1 Estación de distribución 34
3.1.2 Estación de verificación 36
3.1.3 Estación de clasificación 38
3.1.4 Controlador de las estaciones: PLC S7-1200. 40
3.2 Caso de estudio: Empresa de curtiembre 41
3.2.1 Situación actual de la industria de la curtiembre en Ecuador 42
3.2.2 Descripción del proceso de curtido de cuero 43
3.2.3 Descripción de la empresa en estudio 46
3.2.4 Decisión que enfrenta la empresa 47
3.2.5 Medición de tiempos del proceso de recepción de materia prima 50
4. CAPÍTULO IV. SIMULACIÓN 52
4.1 Diseño del modelo de simulación 52
4.1.1 Calibración de sensores 52
4.1.2 Elaboración del tablero de control 54
4.1.3 Desarrollo del software 56
4.1.3.1 Estación de distribución 56
4.1.3.2 Estación de verificación 58
4.1.3.3 Estación de Clasificación 59
4.2 Aplicación de la metodología de simulación 61
4.2.1 Definir el problema 61
4.2.2 Elaboración del modelo de simulación 61
4.2.3 Especificación de valores de variables y parámetros 65
4.2.4 Ejecución de la simulación 67
4.2.5 Evaluación de la ejecución 69
4.2.6 Validación 70
4.2.7 Proponer un nuevo experimento 73
4.3 Análisis de resultados 77
4.4 Estandarización de procedimientos para realizar prácticas de laboratorio 81

5. CAPÍTULO V. ANÁLISIS COSTO - BENEFICIO 98
5.1 Inversiones 98
5.2 Beneficios 99
6. CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 102
6.1 Conclusiones 102
6.2 Recomendaciones 105
REFERENCIAS 109
ANEXOS 113

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

La simulación de sistemas es una herramienta que se ha utilizado desde la década de los 40 para representar de forma simplificada la realidad, se la aplica en áreas como la administración, economía, logística e ingeniería, entre otras. Es muy útil al momento de evaluar los impactos de una decisión dentro de una planta industrial, puesto que permite el análisis del sistema real sin la necesidad de realizar altas inversiones de dinero o de parar la producción; además porque puede capturar las características de los procesos y sus interacciones con las operaciones, equipos, personal, productos o materia prima.

En la actualidad, con el avance de la tecnología y el incremento de los requerimientos del cliente en cuanto a calidad, flexibilidad y bajo costo de los productos, las industrias han visto la necesidad de mejorar su productividad y enfrentan el reto de implementar mejoras tecnológicas en sus procesos de manufactura. De ahí que, los sistemas de manufactura flexible se han convertido en una alternativa a los sistemas de manufactura actuales, puesto que brindan una mayor flexibilidad en las operaciones, un uso eficiente de maquinarias, reducción de costos, y facilitan la interacción entre el ser humano, la tecnología y la información.

En el presente proyecto de titulación se desarrolla un modelo de simulación en base a las estaciones de distribución, verificación y clasificación del sistema de producción modular, que se encuentran en el laboratorio de Ingeniería en Producción Industrial de la Universidad de las Américas. Luego se simula con ellas, tomando como caso de estudio el proceso de recepción de materia prima de una empresa de curtiembre ecuatoriana, y finalmente se estandariza un procedimiento de simulación para la realización de prácticas de laboratorio.

1.1 Antecedentes

La simulación de sistemas es una herramienta que tiene aplicación en diversos ámbitos como la administración, ingeniería, economía, logística, etc., ya que facilita el análisis de estos sistemas cuando es demasiado costoso hacerlo de forma experimental. Tiene sus inicios en la década de los 40 en el campo de la física, cuando John Von Neumann y Stanislaw Ulam la utilizaron para resolver problemas complejos de la teoría de las reacciones nucleares en cadena con el método Monte Carlo, en el cual una solución analítica no era factible (Rodríguez y Delgado, 2009).

En ambientes industriales, la simulación se ha reconocido como una herramienta válida para capturar las características, complejidad y dinamismo de sus procesos, que incluyen operaciones, equipo, personal, materia prima, variedad de productos, etc., y sus interacciones. En consecuencia, por varios años, los modelos de simulación han tenido que adaptarse al desarrollo industrial y evolucionar para ser utilizados en diseño de productos, diagnóstico e identificación de problemas en procesos, entrenamiento y capacitación de personal, probar la capacidad del sistema de producción, logística y facilitar la planeación. Así, las herramientas de simulación contribuyen a mejorar el análisis de los sistemas de manufactura y sirven de soporte para tomar decisiones en cuanto a cronogramas, planeación de la producción, cambios en el layout, introducción de cambios tecnológicos, etc., mejorando la eficiencia y la competitividad de las empresas que la utilizan (Marques et al., 2013).

Además, la simulación constituye una herramienta valiosa para afrontar el reto actual de las industrias, en el sentido de evolucionar hacia “manufactura inteligente”, que haga sus procesos más precisos, ágiles, altamente eficientes y de bajo costo. La manufactura inteligente se considera el futuro de la industria manufacturera, puesto que facilita la interacción entre el ser humano, la tecnología y la información; respondiendo en tiempo real a complicaciones y diversas situaciones que se presentan en el campo de la manufactura para satisfacer las necesidades del cliente (Kang et al., 2016). En este contexto, se

espera que sean los sistemas de manufactura flexible los que permitan dar los primeros pasos para el desarrollo de la manufactura inteligente en el país.

1.2 Planteamiento del problema

El avance tecnológico y las nuevas exigencias de los clientes han incrementado la variedad de productos requeridos en el mercado; por lo que el costo, la calidad, el tiempo de entrega y la flexibilidad en la producción se convierten en elementos muy importantes. La flexibilidad, sobre todo en la manufactura, es un elemento esencial en la estrategia de operaciones, ya que permite mejorar la capacidad de una industria para reaccionar frente a la demanda de los clientes, sin incurrir en tiempos y costos excesivos (Manyoma, 2011).

Así, los sistemas de manufactura flexible se han convertido en una alternativa para los sistemas de manufactura tradicionales, por ciertos beneficios como: reducción de costos, uso eficiente de maquinarias, control por computador y la respuesta rápida a cambios operativos. Sin embargo, su implementación debe ser una decisión bien pensada debido a la alta inversión económica requerida para automatizar los procesos, a la necesidad de realizar cambios en el diseño, operación y layout de la planta, así como al impacto de la decisión en todas las áreas de la industria; a lo que se añade el riesgo en la inversión si no se ha analizado correctamente todos los aspectos de la decisión tomada.

Para implementar los cambios en la planta industrial, además, se deben interrumpir las actividades cotidianas; es decir, dejar de producir y dedicar tiempo y recursos a realizar los cambios planeados. Así, en el caso de una empresa de curtiembre, por cada semana que detuviera su producción para realizar cambios en la planta, quedarían sin curtir 100 pieles de 340 dm2 cada una; si el precio de venta del decímetro cuadrado de cuero es de $0.18, habría una pérdida en ventas de aproximadamente $6000 semanales.

Se corre riesgo también al no haber considerado todas las características del sistema (como el alto flujo de materiales) y que por ello la solución propuesta

no satisfaga las necesidades de producción de la empresa. Entonces, difícilmente se pueden volver a realizar cambios para probar otro escenario y encontrar nuevas soluciones, por lo que la empresa debe utilizar la solución planteada por un largo periodo de tiempo, aun cuando no se vean los resultados esperados.

En el presente proyecto de titulación se plantea el problema que enfrenta la empresa ecuatoriana “Curtiembre Z&H”, con el fin de mejorar su proceso de recepción de materia prima, que al momento se realiza de forma manual y las decisiones para selección de pieles se toman en base al criterio y experiencia de los trabajadores. Y para dar respuesta a esta necesidad, se decide recurrir a la simulación como herramienta para conocer si con la automatización de dicho proceso mejorará su productividad.

1.3 Alcance

En el presente proyecto de titulación, se propone realizar un modelo de simulación utilizando tres estaciones del sistema de producción modular del laboratorio de Ingeniería en Producción Industrial de la Universidad de las Américas; esto es, las correspondientes a los procesos de distribución, verificación y clasificación de piezas, para aplicarlo en un caso de estudio.

La estación de distribución separa las piezas de colores rojo, negro o plateado que se encuentran apiladas (máximo diez) en el almacén de apilado; las piezas se expulsan una por una del almacén de apilado para, posteriormente, ser sujetadas por un brazo neumático con ventosa que las transportará al punto de transferencia de la siguiente estación.

La estación de verificación mide la altura de las piezas por medio de sensores, y de acuerdo al valor de altura, establecido como línea base, las piezas correctas pasan a la estación siguiente por la rampa con colchón de aire, o son rechazadas por defectuosas a través de la rampa inferior.

La estación de clasificación clasifica las piezas utilizando tres rampas, dependiendo de la característica de color de cada pieza (negra, roja, metálica). Un sensor de retro-reflexión detecta el nivel de llenado de las rampas.

Para el caso de estudio se realiza el análisis del proceso de recepción de materia prima de una empresa de curtiembre ecuatoriana que quiere mejorar la productividad automatizando este proceso, se recurre a la simulación como herramienta de análisis para evaluar los impactos en la producción que tendría la implementación de esta decisión.

Finalmente, y en base al caso de estudio, se plantea una práctica de laboratorio que permita a los estudiantes de la carrera de Ingeniería en Producción Industrial, de la Universidad de las Américas, reforzar los conocimientos adquiridos en las clases teóricas en un ambiente simulado.

1.4 Justificación

Al encargarse de la gestión de los procesos productivos, la dirección de operaciones ocupa una posición importante en las empresas, ya que permite una administración eficaz de los recursos y es el motor de la generación de valor para la empresa. De acuerdo con Schroeder, Meyer y Rungtusanatham (2011), la dirección de operaciones tiene como responsabilidad tomar decisiones sobre cuatro aspectos clave: procesos, calidad, capacidad e inventario.

La simulación es una herramienta útil para tomar decisiones, pues facilita el estudio de aspectos como: diseño, planeación de la capacidad de producción, política de inventario, logística, flujo de materiales, layout, entre otros. Permite predecir el comportamiento de sistemas complejos de manufactura o servicios, al observar los movimientos y las interacciones de los componentes del sistema; ayuda a estimar el comportamiento de los procesos reales sin la necesidad de grandes cambios o altas inversiones de dinero, y facilita la selección de la mejor opción para resolver un problema. Se utiliza también para entrenar y capacitar personal.

Con la simulación se ha enfrentado tareas que han mejorado la productividad y la eficiencia en las empresas. Es así como Trujillo, Vallejo y Becerra (2010) utilizaron la simulación para modelar un centro de llamadas, formularon propuestas para mejorar la productividad del sistema, e identificaron cuellos de botella. Taddei, Rodríguez y Ruiz (2013) emplearon la simulación en el sector de servicios con la finalidad de resolver problemas de asignación de recursos y toma de decisiones en el proceso de Inscripciones de Primer Ingreso en el campus Hermosillo de la Universidad de Sonora, norte de México, con el objetivo de encontrar el número óptimo de servidores requeridos en los subprocesos involucrados, sin comprometer la calidad del servicio; como resultado se redujeron los tiempos de espera y se brindó una mejor atención.

En el presente proyecto de titulación, mediante la simulación en un modelo físico análogo del proceso de recepción de materia prima de una empresa de curtiembre ecuatoriana, se observarán las mejoras en la productividad del proceso, debido principalmente a la automatización del proceso, la reducción de tiempos en el desarrollo de actividades y la precisión en las decisiones tomadas, así como la disminución en los costos de producción.

Por tanto, la simulación es una herramienta útil para evitar pérdida de tiempo y de recursos, facilita el estudio de diseños, planeación de la producción, generar una política de inventario, distribución de oficinas, bodegas, logística y programación de mantenimiento; a la vez que comparar diferentes alternativas y escenarios (Meyers y Stephens, 2006). Además, permite predecir el comportamiento de sistemas complejos, comprender los impactos del cambio, ahorrar recursos y minimizar el factor de riesgo, antes de aplicar la solución en un sistema real. De acuerdo con Piera, Guasch, Casanovas y Ramos (2006), utilizar técnicas de simulación en las empresas genera un incremento entre el 5 y 10% en su productividad global.

Además, con el presente trabajo de titulación se busca brindar a los estudiantes de la carrera de Ingeniería en Producción Industrial, de la Universidad de las Américas, un ambiente simulado de operaciones de manufactura mediante el cual, en base a la simulación de un proceso

productivo, se puedan reforzar los conocimientos teóricos adquiridos a través de prácticas de laboratorio en módulos de manufactura flexible.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

- Diseñar un modelo de simulación, utilizando las estaciones del sistema de producción modular del laboratorio de Ingeniería en Producción Industrial de la Universidad de las Américas, para mejorar la productividad de los procesos de distribución, verificación y clasificación de una industria.

1.5.2 Objetivos específicos

- Definir los procesos que van a ser programados en las estaciones del sistema de producción modular del laboratorio de Ingeniería en Producción Industrial en la Universidad de las Américas.
- Formular un caso de estudio en el cual sus procesos puedan ser modelados en las estaciones del sistema de producción modular.
- Desarrollar un modelo para aplicar una metodología de simulación sobre el mismo.
- Plantear una propuesta de mejora en los procesos en base a los resultados obtenidos de la simulación, para mejorar la productividad en procesos industriales.
- Establecer un procedimiento estandarizado de simulación para la realización de prácticas de laboratorio.

2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

Actualmente en el mercado compiten empresas que ofrecen a sus clientes una variedad de productos de calidad a bajos costos, lo cual les ha permitido mantenerse dentro de las preferencias de los consumidores. Estas empresas, en su mayoría, fundamentan sus decisiones en datos, hechos, análisis y herramientas que hacen posible dimensionar el impacto de los cambios que se generan para mantener su ventaja competitiva; y se apoyan también en la tecnología y la automatización de sus procesos. Una herramienta que facilita la toma de decisiones es la simulación, la cual permite análisis de escenarios y planear ambientes de manufactura flexibles.

2.1 Toma de decisiones

Las empresas exitosas se esfuerzan por identificar el valor agregado que genera el producto o servicio que ofrecen con la finalidad de tomar decisiones de mejoramiento. Las decisiones influyen en el diseño, ejecución y desempeño de las operaciones, por lo cual deben coordinarse y analizarse de manera adecuada.

El proceso de toma de decisiones (Mariscal, 2009) se refiere al conjunto de "actividades necesarias desde identificar un problema, hasta finalmente resolverlo poniendo en práctica la alternativa seleccionada; por lo tanto, está enmarcado en la solución de problemas donde se debe encontrar alternativas de solución" (p. 4). Por lo general, comprende los siguientes pasos: reconocimiento y definición del problema, recopilación de la información necesaria para analizar las posibles alternativas de solución, selección de la alternativa más atractiva y su implementación.

Schroeder et al. (2011) afirman que la dirección de operaciones tiene como responsabilidad tomar decisiones sobre cuatro aspectos clave: procesos, calidad, capacidad e inventario. Estos tipos de decisiones deben integrarse, de forma sistémica con las demás funciones de la organización, para que una

operación se considere bien administrada. A continuación, se presenta una tabla con el enfoque de cada tipo de decisiones.

Tabla 1.
Decisiones de operaciones.

Decisiones operacionales	Enfoque
Proceso	Determinan el proceso físico o las instalaciones usadas, así como las políticas de la mano de obra asociada. Son a largo plazo y no se pueden revertir ya que requieren de fuertes inversiones, por ello deben tomarse en base a los objetivos estratégicos de la empresa.
Calidad	Afectan la calidad de los bienes o servicios que se producen y entregan a los clientes, determinan en qué medida se pueden satisfacer las especificaciones de los clientes. Deben ser diseñadas e incorporadas en todas las etapas de la producción, y la entrega de bienes y servicios a los clientes.
Capacidad	Tienen como finalidad suministrar la cantidad adecuada de recursos en el lugar correcto y en el momento adecuado. Están relacionadas con la programación de personal, equipos e instalaciones.
Inventario	Especifican el tipo y el nivel de inventario que deben mantenerse en función de las incertidumbres. Se administran inventarios de materias primas, de productos en procesos y productos terminados. Se administra el flujo de materiales dentro de la empresa y al interior de la cadena de suministro.

Tomado de: Administración de operaciones. Conceptos y casos contemporáneos, Schroeder, et al., 2011, p.12.

Las decisiones pueden ser estratégicas (con consecuencias a largo plazo) o tácticas (más rutinarias y repetitivas con consecuencias a corto plazo). Las decisiones estratégicas no conducen a ninguna parte si las decisiones tácticas que las sustentan son equivocadas (Krajewski, Ritzman y Mahotra, 2008).

En la industrial, de acuerdo con Piera, Guasch y Casanovas (2006), la planificación de la producción debe considerar tres tipos de periodos para la toma de decisiones: largo plazo, mediano plazo y corto plazo. Las de largo

plazo se centran en aspectos estratégicos (productos, selección de equipos, procesos, recursos, servicios y localización); las de mediano plazo son de carácter táctico (acopio de material, cantidades de producción, optimización), y las de corto plazo se vinculan con aspectos más operativos como programación diaria de operaciones o tareas.

Las decisiones de selección de procesos (de carácter estratégico) requieren de una perspectiva a largo plazo y de coordinación entre áreas y funciones. Tienen impacto en áreas como: mercadotecnia, finanzas, recursos humanos y operaciones. Involucran grandes inversiones y no pueden cambiarse con facilidad, por lo que una empresa queda vinculada a esas decisiones durante muchos años. Por esta razón, se vuelve fundamental la utilización de herramientas e información que permitan reconocer y definir el problema, analizar el impacto de las posibles soluciones y elegir la mejor solución para satisfacer los requerimientos de la empresa.

Dentro de las herramientas que apoyan la toma de decisiones estratégicas se pueden mencionar: análisis interno de la cadena de valor de Porter, análisis FODA, pronóstico, estudio de mercado, Six Sigma, Calidad Total, árboles de decisión, la simulación, análisis estadístico, entre otras (Mariscal, 2009).

2.2 Productividad

2.2.1 Producción

Se puede definir producción como el conjunto de actividades que utilizan recursos debidamente seleccionados, organizados y gestionados, para la obtención de productos con valor añadido, a través de un proceso productivo que satisfaga las necesidades de los consumidores. El proceso productivo debe sujetarse a métodos operativos que maximicen la eficiencia, minimicen el tiempo y el costo, y brinden mejor calidad. Así, la producción se lleva a cabo a través de la ejecución de un conjunto de operaciones integradas en procesos y dentro de un sistema productivo. Los sistemas productivos están formados por

los insumos, que permiten llevar a cabo la producción, la mano de obra y el proceso de producción (Cuatrecasas, 2012).

Figura 1. Elementos de un sistema productivo.
Tomado de: Cuatrecasas (2012), p. 14.

2.2.2 Procesos

Los procesos de producción son el elemento central de los sistemas productivos, y se los puede definir como el conjunto de actividades coordinadas que convierte los insumos de entrada en productos terminados, los cuales deben satisfacer al máximo las necesidades de los consumidores (Cuatrecasas, 2012).

De acuerdo con Schroeder et al. (2011), la perspectiva de procesos proporciona una base para contemplar la totalidad de la empresa como un sistema de procesos interconectados. Estos procesos interactúan con sus ambientes internos y externos, por lo que es imprescindible supervisar constantemente el medio y hacer cambios en las operaciones cuando sea necesario. Esta perspectiva, sustenta el hecho de que las operaciones no pueden aislarse de los cambios en el ambiente, sino que deben adaptarse a ellos.

Existen varios criterios para clasificar los procesos productivos: en función del flujo del producto (producción continua, líneas de ensamble, flujo por lote, talleres de trabajo y proyectos), en función del cumplimiento de la orden (Ensamblado a la orden – ATO: assemble to order, Producción a la orden –

MTO: make to order, y Producción para almacenamiento – MTS: make to stock), según la intensidad con que se utiliza el factor de trabajo en relación con el capital, y según el número y variedad de productos que se obtienen. Los criterios de flujo del producto y cumplimiento de la orden se pueden combinar en la práctica, dependiendo de los productos y volúmenes requeridos por el mercado, teniendo en cuenta las condiciones del mercado, las necesidades de capital, la mano de obra y la tecnología (Schroeder, et al., 2011).

Tabla 2.
Matriz de características del proceso.

	Producción para almacenamiento	**Producción a la orden/ ensamblado a la orden**
Continuo y línea de ensamble	Ensamble de automóviles Refinamiento de petróleo Enlatados Cafetería	Ensamble de automóviles Computadoras Dell Localizadores Motorola Comida rápida
Lotes y talleres de trabajo	Taller de maquinados Vinos Fábrica de cristalería Joyería personalizada	Taller de maquinados Restaurante Hospital Joyería personalizada
Proyecto	Construcción de unidades habitacionales Pintura comercial Arte no comisionado	Edificios Películas Barcos

Tomado de: Schroeder et al., 2011, p. 71.

Según el grado e intensidad con el que se utiliza el factor trabajo en relación con el capital, Asensio del Arco y Vázquez (2013) clasifican los procesos como:

- **Manuales**: cuando son realizados por trabajadores sin la intervención de máquinas. Ejemplo: tareas agrícolas o de prestación de servicios.
- **Mecánicos**: cuando la ejecución la realizan hombres y máquinas. Ejemplo: Arar la tierra con un tractor.
- **Automáticos**: cuando la intervención de los trabajadores es mínima y se limita a la vigilancia y a la supervisión. Ejemplo: cadena de ensamble de autos que utiliza robots.

Según el número y la variedad o gamas de producción:

- **Producción simple**: se elabora un solo tipo de producto con características técnicas homogéneas.
- **Producción múltiple**: se obtienen varios productos diferentes. Ejemplo: una fábrica automotriz que produce varios modelos de autos.

2.2.3 Productividad

La productividad es el coeficiente existente entre los resultados logrados y los recursos empleados. Los resultados pueden medirse en utilidades, unidades producidas o piezas vendidas; mientras que los recursos empleados pueden cuantificarse por el número de trabajadores, de horas máquina, etc.

$$Productividad = \frac{Productos\ y/o\ servicios\ logrados}{Recursos\ empleados} \qquad \text{(Ecuación 1)}$$

En concordancia con esta definición, incrementar la productividad es lograr mejores resultados optimizando la utilización de recursos. Así, Gutiérrez (2010) manifiesta que la productividad utiliza dos conceptos: eficiencia y eficacia; entendiéndose por eficiencia el optimizar los recursos evitando que existan desperdicios, y por eficacia el grado de cumplimiento de las actividades planeadas y el logro de resultados; y agrega que la efectividad es el logro de los objetivos planteados y se alcanza mediante la optimización de recursos. Por tanto, en la productividad se trata de mejorar continuamente el sistema, de producir mejor y no más rápido. El mismo autor presenta las siguientes ecuaciones para el cálculo de la productividad.

$$Productividad = Eficiencia\ x\ Eficacia \qquad \text{(Ecuación 2)}$$

$$Productividad = \frac{Unidades\ producidas}{Tiempo\ total} = \frac{Tiempo\ útil}{Tiempo\ total} * \frac{Unidades\ producidas}{Tiempo\ útil} \qquad \text{(Ecuación 3)}$$

Esto quiere decir que para mejorar la productividad se debe mejorar la eficiencia reduciendo los tiempos que no agregan valor en la fabricación del

producto, como son por ejemplo: paros por equipos, falta de materiales, mantenimiento no programado, retraso en suministros, fallas en arranques y en la operación de procesos, entre otros.

Otra alternativa para el cálculo de la productividad es la utilización de índices que relacionan las salidas del sistema con las entradas del mismo. Para calcular los índices de productividad se requiere tomar en cuenta dos aspectos: la definición correcta del sistema (delimitar las entradas y salidas a utilizarse) y aclarar qué índice de productividad se va a utilizar (cómo se expresarán las entradas y salidas). Los índices de productividad pueden clasificarse en parciales o totales, entendiéndose por índice de productividad parcial aquel que relaciona la salida de un sistema con uno de los recursos de entrada (mano de obra, materias primas, energía, etc.), mientras que el índice de productividad total, global o multifactor se calcula tomando en cuenta todos los recursos de entrada utilizados por el sistema, no de forma individual como en el anterior (Biasca, 2006).

Los índices de productividad parcial pueden ser de mano de obra, materias primas, energía, producción, etc. Las ecuaciones para calcularlos se muestran a continuación:

$$Índice\ de\ productividad\ parcial\ del\ personal = \frac{Salida\ del\ sistema}{Personal\ total} \quad \text{(Ecuación 4)}$$

$$Índice\ de\ productividad\ de\ mano\ de\ obra = \frac{Salida\ del\ sistema}{Mano\ de\ obra\ directa} \quad \text{(Ecuación 5)}$$

$$Índice\ de\ productividad\ de\ materias\ primas = \frac{Salida\ del\ sistema}{Materias\ primas,\ \ materiales} \quad \text{(Ecuación 6)}$$

$$Índice\ de\ productividad\ parcial\ de\ energía = \frac{Salida\ del\ sistema}{Energía} \quad \text{(Ecuación 7)}$$

$$Índice\ de\ productividad\ parcial\ de\ producción = \frac{Salida\ del\ sistema}{Costo\ de\ producción} \quad \text{(Ecuación 8)}$$

Como se observa en las ecuaciones, el recurso o factor con respecto al cual se mide la productividad se encuentra en el denominador, esto implica que la productividad se mide respecto a dicho factor. Así por ejemplo se la puede expresar en Kg/Kw, Kg/hora-hombre o Kg/m2, lo que quiere decir que se midió

la productividad de un proceso respecto a los factores de energía, mano de obra y espacio respectivamente. Ejemplos de productividad parcial pueden ser: 57 paquetes realizados por hora-hombre, 100 Kg de producto por hora-máquina, 1 Kg de galletas por Kg de harina, etc.

En cuanto al índice de productividad total, se lo puede calcular a través de la siguiente ecuación:

$$I. Productividad\ total = \frac{Salida\ total}{Entrada\ total} = \frac{Bienes\ o\ servicios\ producidos}{Mano\ de\ obra + Capital + Materias\ primas + Energía + Otros}$$

(Ecuación 9)

Como se observa en esta ecuación, en el denominador se tienen varios factores; por tal motivo, para realizar la suma de estos es necesario expresarlos en las mismas unidades, que generalmente son monetarias. Cuando la unidad de medida adoptada es la misma para el numerador y el denominador, la productividad se expresa como una magnitud sin dimensiones y se denomina rendimiento (Castanyer, 1988). Un ejemplo de índice de productividad total es: $150 de producto por cada $100 de recursos utilizados.

Otros conceptos importantes a definir son el índice de productividad física y el índice de productividad valorizada. Se entiende por índice de productividad física el cociente entre la cantidad física de la salida y la cantidad necesaria de insumos para generarla; así, las salidas pueden expresarse en metros o unidades producidas, por ejemplo, mientras que las entradas en horas hombre, horas máquina, etc. El índice de productividad valorizada es el cociente entre la salida y la entrada, en el cual la salida se expresa en términos monetarios, por ejemplo $1.000 por hombre en la industria manufacturera (Biasca, 2006).

La viabilidad del cálculo del índice de productividad puede tener como guía la siguiente tabla.

Tabla 3.
Ámbito de cálculo de la productividad.

		Ámbito de cálculo de la productividad	
		Productividad parcial	Productividad global
Tipo de productividad	Productividad física	Es su ámbito natural	Cálculo imposible
	Productividad monetaria	Puede calcularse	Es su ámbito natural

Tomado de: Monzón, 2002, p. 9.

2.3 Simulación de procesos

La simulación de procesos es una herramienta que permite predecir el comportamiento de sistemas complejos de manufactura o servicios, al observar los movimientos y las interacciones de los componentes del sistema. También en la industria, ayuda a determinar programas de producción, nivel de inventario, procedimientos de mantenimiento, la capacidad de la planta, recursos y procesos. En servicios se emplea para análisis de filas de espera, por ejemplo. Permite estimar el comportamiento de los procesos reales sin la necesidad de grandes cambios o altas inversiones de dinero.

Es una herramienta útil para los planificadores de instalaciones industriales ya que facilita el estudio de aspectos como: diseños, planeación de capacidad, política de inventario, distribución de oficinas, de sistemas de calidad y confiabilidad, planeación de bodegas, logística y programación de mantenimiento. También se puede evaluar alternativas de sistemas de manejo de materiales, como montacargas, sistemas de almacenamiento y recuperación automática (SARA), transportadores y acumulación. Se compara diferentes alternativas y escenarios (Meyers y Stephens, 2006).

La simulación se utiliza para planear sistemas de manufactura flexibles (SMF) en los cuales se produce una amplia variedad de objetos manufacturados. Las razones de utilización de máquinas, los requerimientos de espacio, las políticas de inventarios, los sistemas de manejo de materiales y las capacidades de las

celdas de manufactura, se evalúan en realidad virtual antes de su implantación para evitar errores costosos (Meyers y Stephens, 2006).

2.3.1 Conceptos

***Simulación*:** Coss (2003) define la simulación como el proceso de diseñar y desarrollar un modelo de un sistema para conducir experimentos sobre él, con el propósito de entender el comportamiento del sistema y evaluar las estrategias bajo las cuales es óptimo operarlo.

Sistema: es un conjunto de elementos que se interrelacionan para funcionar como un todo, los elementos deben estar delimitados con claridad y ser relevantes en la construcción del modelo de simulación. El estado del sistema es una fotografía de la condición que guarda el sistema bajo estudio en un instante determinado (García, García y Cárdenas, 2006).

Guasch, Piera y Casanovas (2002) clasifican los sistemas en: continuos, discretos, orientados a eventos discretos y combinados. En los sistemas continuos las variables evolucionan continuamente a lo largo del tiempo; en los sistemas discretos las propiedades del sistema cambian de acuerdo a un patrón periódico. Los sistemas orientados a eventos discretos se caracterizan porque sus variables cambian en una secuencia aleatoria de instantes de tiempo. Finalmente, los sistemas combinados responden a características continuas y discretas.

Experimento: es el proceso de extraer datos de un sistema, sobre el cual se ha ejercido una acción externa para conocer su comportamiento. Experimentar con un sistema real presenta indudables ventajas, sin embargo, no siempre es posible por factores como: una escala de tiempo muy larga, el sistema aún no existe físicamente, elevado costo económico, puede producir un perjuicio o incomodidad, etc. (Urquía y Martín, 2013).

2.3.2 Modelo de simulación

Un modelo de simulación de un sistema es la representación desarrollada para un propósito específico como una alternativa para la experimentación. Por ejemplo, se lo puede utilizar en la ampliación de una fábrica; así, en lugar de experimentar en el sistema real se experimenta sobre el modelo simulando varias configuraciones con la finalidad de comparar el comportamiento de los modelos. En un modelo adecuado se pueden ensayar condiciones de operaciones extremas o impracticables en un sistema real (Urquía y Martín, 2013)**.**

Los modelos no necesariamente tienen que ser realizados en ordenador. Se han utilizado modelos icónicos (maquetas) para el estudio de los fenómenos hidráulicos, como por ejemplo el modelo en miniatura de un puerto, en el cual se crean corrientes marinas con el uso de chorros de agua para estudiar e impedir malos funcionamientos. Ciencias como la física y la biología han utilizado y desarrollado ecuaciones que determinan con cierta precisión el comportamiento de fenómenos meteorológicos, trayectorias o movimientos. Fue así cómo se logró retornar el Apolo XII a la tierra (Riverola y Cuadrado, 2004).

De acuerdo con Rodríguez y Delgado (2009), los modelos no necesariamente representan todos los aspectos de la realidad, sino que se convierten en una versión simplificada de la realidad que contiene todos los elementos y características que permitan conocer, analizar, experimentar y concluir acerca de esta; debe ser simple y permitir obtener conclusiones confiables. Así mismo, los autores clasifican los modelos de la siguiente manera:

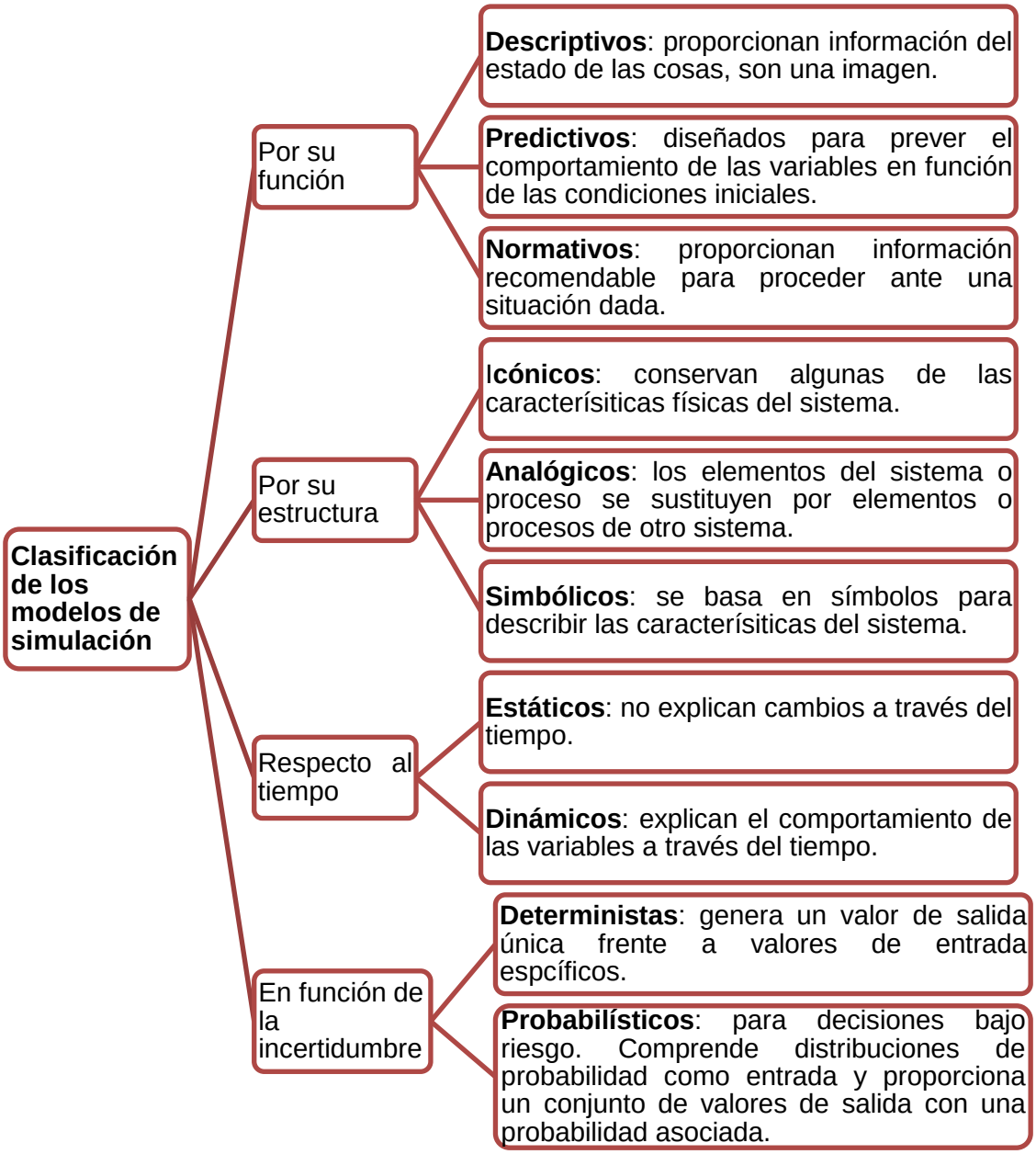


Figura 2. Clasificación de los modelos de simulación.

Guasch, Piera y Casanova (2002) consideran que, para garantizar una eficiente representación del sistema real, hay que tomar en cuenta los siguientes aspectos sobre los modelos:

- Deben desarrollarse a partir de una serie de aproximaciones e hipótesis, por lo cual representa parcialmente la realidad.
- Se construye con una finalidad específica.

- Debe ser simple y recoger los aspectos esenciales del sistema en estudio.
- Debe representar el conocimiento que se tiene del sistema, de modo que permita su interpretación, realizar cambios, prever, comprender y controlar el comportamiento del sistema real.
- Un modelo es un sustituto de un sistema físico concreto.

Meyers y Stephens (2006) mencionan seis aspectos por los que se lleva a cabo la modelación de sistemas, y son: evaluación cumplimiento de requerimientos, comparación de diseños alternativos, predicción del comportamiento del sistema frente a las especificaciones, análisis de sensibilidad para determinar los factores que más influyen en el sistema, optimización de los factores críticos determinados y análisis de cuellos de botella.

Una vez construido el modelo, existen dos formas para su estudio: por optimización y por simulación. En la primera se responde a la pregunta ¿cuál es la mejor forma de proceder? y se obtiene la respuesta óptima; mientras en el segundo caso se responde a la pregunta ¿qué pasa si?, sin embargo, no se puede optimizar sin poder calcular el modelo. Optimizar implica considerar varias alternativas y elegir entre ellas, mientras que simular es calcular los resultados de una alternativa. Existen tres características que impiden la utilización de la técnica de optimización: no linealidad, incertidumbre y presencia de relaciones causales o difusas. El propósito de la simulación es, por tanto, que se entienda mejor el problema y las relaciones existentes entre los diferentes elementos del modelo, no que se crea los números del modelo (Riverola y Cuadrado, 2004).

Se puede decir que cuando se reemplaza un sistema real por una versión simplificada, se construye un modelo; los experimentos llevados a cabo sobre el modelo se denominan simulación.

2.3.3 Metodología de simulación

Los pasos que Chase y Jacobs (2014) describen y recomiendan seguir, en un estudio de simulación, son los siguientes: definir el problema, elaborar el modelo de simulación, especificar valores de las variables y parámetros, ejecutar la simulación, evaluar los resultados, validación y proponer un nuevo experimento.

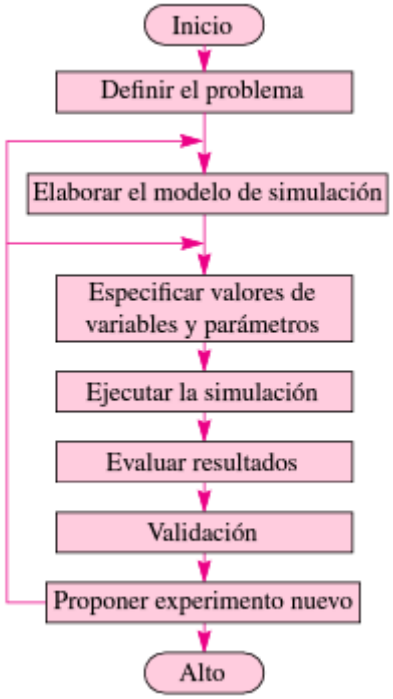


Figura 3. Fases principales de un estudio de simulación.
Tomado de: Chase y Jacobs, 2014, p. 652.

Definir el problema: implica especificar los objetivos e identificar las variables controlables e incontrolables del sistema que se van a estudiar.

Elaboración del modelo de simulación: el modelo de simulación debe elaborarse conforme a las necesidades de cada situación del problema. En esta etapa se debe especificar: variables (varían durante la ejecución de la simulación) y parámetros (permanecen fijos en el sistema real), las reglas de decisión o reglas operativas (condiciones en las cuales se observa el comportamiento del modelo de simulación), el tipo de distribución y el procedimiento para incrementar el tiempo: incrementos fijos (la simulación

avanza en intervalos uniformes de un periodo al siguiente) o incrementos variables (la simulación avanza de acuerdo a la cantidad requerida para iniciar el siguiente suceso).

Especificación de valores de variables y parámetros: se debe determinar las condiciones iniciales y la duración de la ejecución de la simulación. Los parámetros son las propiedades del sistema real que permanecen fijos, mientras que las variables deben tener un valor inicial y cambiar conforme avanza la simulación. Determinar las condiciones iniciales es una decisión táctica importante ya que, si no se eligen de forma adecuada, pueden tardar mucho tiempo en alcanzar la estabilidad. La duración de la simulación debe establecerse de forma adecuada para obtener una muestra significativa.

Evaluación de la ejecución: las conclusiones que se obtienen de la simulación dependen del grado en que el modelo refleja el sistema real. En la mayoría de los casos se cuenta con información que permite comparar los resultados de la simulación, como por ejemplo: datos operativos antiguos del sistema real, la percepción del analista del sistema real, etc.

Validación: se refiere a garantizar que la simulación esté bien; es verificar si la simulación representa adecuadamente al sistema real.

Proposición de un nuevo experimento: con base en los resultados de la simulación se puede generar un nuevo experimento, en el que se pueden variar factores como: parámetros, variables, reglas, etc. Se utiliza generalmente para comparar resultados y observar nuevas perspectivas de solución del problema.

2.3.3.1 Validación

Para validar los datos obtenidos de la simulación es necesario conocer un poco de estadística básica, como las medidas de tendencia central (media, mediana y moda), las medidas de variabilidad (varianza, desviación estándar y rango) y las funciones de distribución. Para aclarar algunas de estas definiciones, se recurre a Quevedo y Pérez (2014):

Estadística: conjunto de métodos utilizados para representar y analizar la información contenida en un conjunto de datos.

Media: es el valor promedio de los datos, es decir, la sumatoria de los valores de los datos dividida para el número total de datos.

Mediana: valor que se encuentra en el centro de un conjunto de datos ordenados.

Moda: es el valor que más se repite en un conjunto de datos. Si los datos no se repiten no se tiene una moda.

Cuartiles: dividen a un conjunto de datos ordenados en cuatro partes iguales, y son tres: Q1, Q2 y Q3.

Rango: es una medida de dispersión correspondiente a la longitud del intervalo en el cual se distribuyen los datos. Es igual al valor máximo menos el valor mínimo.

Varianza: se denota por s^2, es una clase de promedio al cuadrado de las desviaciones de cada dato respecto a la media. Es más grande mientras mayor sea la dispersión de los datos.

Desviación estándar: es la raíz cuadrada de la varianza. Indica qué tan dispersos se encuentran los datos respecto a la media.

Error estándar de la media: mide el grado en que se espera que varíen las medidas de una muestra como consecuencia del azar; si el valor es bajo, hay mayores posibilidades de que la media de la muestra se aproxime a la media de la población. El error estándar de la media se calcula dividiendo la desviación estándar para la raíz cuadrada del tamaño de la muestra (n).

Clase: son los intervalos que permiten agrupar los datos de una muestra cuando existe una cantidad elevada de datos diferentes.

Frecuencia absoluta de una clase: es el número de datos de la muestra que se agrupan en dicha clase.

Frecuencia acumulada de una clase: es igual al número de datos que se encuentran en las clases menores o iguales a la clase en estudio.

Función de distribución: es aquella que indica la probabilidad acumulada de la variable aleatoria, se denota con letras mayúsculas; es creciente y continua por la derecha, tiende a cero en menos infinito y a uno en más infinito.

Distribución normal: es la distribución de probabilidad más utilizada para modelar variables continuas, posee forma de campana y se aplica generalmente a situaciones en las cuales las variables aleatorias tienen la misma probabilidad de ocurrir a ambos lados del valor medio esperado. Se la describe con la media y la desviación estándar de la función.

Ahora bien, un aspecto importante en la validación es analizar la uniformidad en la distribución de los datos obtenidos en la simulación, esto con la finalidad de determinar si se comportan de manera similar a los del sistema real. Existen pruebas denominadas de bondad de ajuste, que permiten probar estadísticamente si la distribución de frecuencias observadas se ajusta a otra distribución teórica conocida (uniforme, binomial, de Poisson, Normal); estas pruebas son la JI-cuadrada y la de Kolmogorov-Smirnov.

De acuerdo con Marques (1991), JI-cuadrada es una prueba que puede utilizarse tanto en funciones continuas como discretas y trata de comprobar que no existe diferencia entre la distribución de frecuencia de una muestra y una distribución teórica. Para su aplicación se considera que se tiene una muestra con frecuencias observadas O_1, O_2, O_3…. O_k y se espera que los mismos resultados se presenten con frecuencias esperadas E_1, E_2, E_3… E_k. Entonces, la diferencia entre las frecuencias observadas y las esperadas está dada por el estadígrafo X^2, que se define por la siguiente ecuación:

$$X^2 = \sum_{i=1}^{k} \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \qquad \text{(Ecuación 10)}$$

$$donde \sum_{i=1}^{k} O_i = \sum_{i=1}^{k} E_i = n;\ k = \#\ de\ clases, n = \ tamaño\ de\ la\ muestra$$

Si las frecuencias observadas se aproximan a las esperadas, el valor de X^2 tiende a cero; caso contrario, el valor de X^2 será positivo y tan grande como la diferencia existente entre las frecuencias.

Para aplicar estas pruebas, primero se requiere establecer la hipótesis nula (Ho) como: los datos provienen de una población distribuida de acuerdo al modelo teórico; y la hipótesis alternativa (H1), como la negación de Ho. Luego se debe agrupar los datos en k clases y calcular los valores tanto de la frecuencia observada como de la frecuencia esperada para cada clase; y finalmente, en base a estos valores, obtener el estadístico X^2 utilizando la Ecuación 10. Si el valor calculado para X^2 es menor que el obtenido en tablas (de acuerdo a los grados de libertad k-1, y el nivel de significancia α), entonces no se rechaza Ho, sino que se la acepta como verdadera.

$$X^2{}_{calculado} < X^2(k-1,1-\alpha)_{Tablas} \qquad \text{(Ecuación 11)}$$

Para realizar esta prueba se aconseja que se construyan al menos 5 clases y que se tenga en cuenta que los grados de libertad son iguales al número de clases menos uno, así como también que el nivel de significancia (α) es la probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando esta sea verdadera.

La otra prueba que se mencionó es la de Kolmogorov-Smirnov, la cual, de acuerdo con Rodríguez y Delgado (2009), se utiliza para determinar la bondad de ajuste de una distribución empírica a una teórica, es válida solo para variables aleatorias continuas y tiene la ventaja de que se puede utilizar con muestras pequeñas. Al igual que la anterior, trabaja bajo la hipótesis de que no existe diferencia significativa entre la distribución muestral de frecuencias y la distribución uniforme teórica. En esta prueba se considera a Fx(X) como la función de distribución acumulativa continua de la distribución teórica y a St(X) como la distribución acumulativa de frecuencias observada en una muestra; y se espera como hipótesis nula que la desviación entre Fx(X) y St(X) sea mínima. Para llevar a cabo esta prueba se debe especificar la función de distribución acumulativa teórica Fx(X), ordenar la muestra observada en una

distribución acumulativa de frecuencias con el mismo número de clases que la teórica, determinar la máxima desviación D mediante la fórmula:

$$D = máx\ [F_X(X) - St(X)] \qquad \text{(Ecuación 12)}$$

Finalmente se determina el valor crítico de D(1-α) en tablas, de acuerdo con el valor de significancia establecido, y se lo compara con el valor $D_{calculado}$. Si $D_{calculado} < D(1-\alpha)_{Tablas}$ se acepta Ho, es decir, los números provienen de la distribución propuesta.

Al utilizar esta prueba, se debe tener en cuenta que no es válida cuando se estima uno o más parámetros usando los datos de la muestra. Cabe mencionar que, debido a que la prueba de Kolmogorov-Smirnov se basa en la diferencia de clases en forma individual y no en la sumatoria de estas como en la JI-cuadrado, no se pierde información y tampoco existe una restricción en el tamaño de las clases, por lo que se puede afirmar que es más poderosa que la JI-cuadrada.

Una herramienta alternativa que facilita la resolución de estas pruebas y permite obtener los resultados sin realizar los cálculos a mano es utilizar un software estadístico. Cuando se utiliza un software estadístico el criterio para aceptar o rechazar la hipótesis nula es el “valor-p”, el cual se define, para una prueba de hipótesis, como el valor más pequeño de α que llevará al rechazo de la hipótesis nula. Por tanto, para un nivel de significancia α, la regla de decisión para las pruebas de contraste se toma bajo el siguiente criterio: si “valor-p” ≥ α, entonces se acepta Ho; mientras que si “valor-p” < α, se rechaza Ho. En el caso particular de la prueba de Kolmogorov-Smirnov, la mayoría de los paquetes de software estadísticos proporcionan el “valor-p” (Quevedo y Pérez, 2014).

2.3.4 Ventajas y desventajas de la simulación

Las técnicas de simulación pueden utilizarse como una metodología de trabajo barata y segura, que contribuye a la reducción del riesgo inherente a la toma de decisiones, puesto que permite conocer satisfactoriamente lo que ocurriría si se

realiza un cambio en el sistema en estudio. También puede utilizarse como una herramienta pedagógica de aprendizaje.

Las principales ventajas que Guasch, et al. (2002) encuentran en la simulación son:

- La simulación no interrumpe actividades continuas del sistema real.
- Permite comprender mejor el sistema real, analizar y estudiar la incidencia de variables sobre el rendimiento del sistema cuando se realizan cambios.
- Cambios organizacionales y de gestión informática son de fácil simulación y sus efectos en el sistema real pueden ser analizados a partir de la experimentación en el modelo.
- Los conocimientos adquiridos del proceso de simulación permiten sugerir mejoras en el sistema real.
- Se pueden inferir aspectos relativos a la sensibilidad del sistema con respecto a sus variables, al observar los resultados que se obtienen de la simulación y la experimentación en el modelo del sistema.
- Es una herramienta pedagógica útil para ilustrar y facilitar la compresión de los resultados que se obtienen mediante técnicas analíticas.
- Permite experimentar con condiciones de operación que podrían ser de elevado costo económico o peligrosas.

Las desventajas que Chase y Jacobs (2014) mencionan en la simulación son:

- No hay garantía de que las respuestas que se generan sean correctas en la realidad, por más esfuerzo que se ponga en la elaboración del modelo.
- No hay forma de comprobar que el desempeño del modelo de simulación es totalmente confiable.
- Dependiendo del sistema que se quiera simular, la elaboración del modelo puede tardar mucho tiempo o ser muy costosa.

- No existe un método estandarizado de simulación, por lo que los modelos de un mismo sistema creados por diferentes personas pueden ser muy distintos.

2.3.5 La simulación como herramienta de aprendizaje

La construcción del conocimiento ha estado siempre ligada a la teoría y la práctica. El concepto de praxis viene de acción y la teoría es el soporte para conectar los conceptos abstractos con el mundo real (comprende los fundamentos, fórmulas, conceptos, modelos, etc.). En el aspecto práctico, los conocimientos teóricos se llevan a situaciones simuladas que se asemejan a la realidad con la finalidad de realizar actividades de investigación, aplicación de conceptos y solución de problemas. Esto es muy importante en la actualidad, y más en el campo académico, ya que proporciona a los estudiantes un ambiente en el cual las ideas teóricas generadas en clases puedan experimentarse para reflexionar y reforzar el aprendizaje (Zuluaga y Aguirre, 2014).

Los laboratorios prácticos fortalecen las competencias técnicas y refuerzan el contenido teórico de los programas de aprendizaje, por tal razón la utilización de espacios de simulación facilita la asimilación de la teoría con la práctica y permiten comprender la importancia de lo aprendido en clase. Adicionalmente, los laboratorios aportan con el desarrollo de habilidades como comunicación, cooperación, toma de decisiones, trabajo en equipo, entre otras.

2.4 Manufactura flexible

En las últimas décadas, la aparición de nuevos competidores globales, el avance tecnológico y mayores exigencias de los clientes han incrementado la variedad de productos requeridos y, a la vez, se ha reducido sus ciclos de vida. Debido a ello, las empresas han soportado su estrategia empresarial (que abarca el propósito y los objetivos fundamentales de la empresa) en hechos y datos, con la finalidad de construir una ventaja competitiva sostenible a largo plazo. La ventaja competitiva se puede sustentar en cuatro conceptos básicos: competencia por costo, por calidad, por velocidad (tiempo) y por flexibilidad. Si

bien el costo y la calidad son elementos fundamentales para la competitividad, la flexibilidad se ha convertido en una propiedad complementaria de la productividad. Y en el campo de la manufactura, la flexibilidad es un elemento importante en la estrategia de operaciones, ya que permite mejorar la habilidad de una organización para reaccionar frente a la demanda de los clientes, sin incurrir en tiempos y costos excesivos (Manyoma, 2011).

Así, los sistemas de manufactura flexible se han convertido en una alternativa a los sistemas de manufactura tradicionales, por sus beneficios como: reducción de costos, uso eficiente de maquinarias, control por computador y la flexibilidad que brinda a los procesos de manufactura.

2.4.1 Definición

Doria, Melo y Chávez (2013) definen los sistemas de manufactura flexible (FMS, por sus siglas en inglés) como: “sistemas automatizados que brindan una producción y variedad de productos mediana, con alto grado de calidad final. De la misma manera, permiten flexibilidad productiva y gestión en tiempo real, con lo que se obtiene un alto nivel de automatización de los procesos” (p. 633).

De acuerdo con Zambrano, Fúquene y Aguirre (2010), “los sistemas de manufactura flexible están constituidos con máquinas y soluciones de software altamente flexibles, cuyo objetivo es incrementar la flexibilidad a través del uso adecuado de centros mecanizados, sistemas de manejo de materiales y sistemas avanzados de ensamble y almacenamiento” (p.120).

Ahora bien, ningún sistema de manufactura puede ser completamente flexible, puesto que existen límites de flexibilidad, por tal motivo los FMS están diseñados para producir piezas dentro de rangos, estilos, tamaños y procesos determinados, es decir, son capaces de producir una familia de piezas únicas o un rango limitado de familia de piezas. Cuando el sistema solo tiene algunas máquinas se usa el término celda flexible de manufactura (FMC).

Groover (2007) expone que los criterios para que un sistema de manufactura pueda ser calificado como flexible son:

1. Procesar diferentes estilos de piezas, pero no por el modelo de lotes.
2. Aceptar cambios en el programa de producción.
3. Responder en forma inmediata cuando se presente averías y errores del equipo en el sistema.
4. Aceptar la introducción de nuevos diseños de piezas.

Si el sistema automatizado no cumple estos criterios, no puede clasificarse como un sistema o celda flexible de manufactura.

2.4.2 Componentes de un sistema de manufactura flexible

De acuerdo con Groover (2007), los sistemas de manufactura flexible están formados por un hardware y un software (que deben integrarse en una unidad eficiente y confiable), y por el personal humano.

Hardware: incluye estaciones de trabajo (inspección, limpieza de piezas, etc.), un sistema de manejo de material y una computadora de control central que funciona como una interfaz con otros componentes del software.

El sistema de manejo de material es el medio que permite transportar las piezas e incluye una capacidad limitada de almacenamiento, y dependiendo del tamaño, configuración de la pieza y los factores económicos, el sistema de manejo de material puede ser: rodillos transportadores, carros enganchados al piso, vehículos guiados de forma automática, robots industriales, entre otros. Los sistemas de manejo establecen la distribución básica de los FMS; las distribuciones pueden ser en línea, en ciclo, en escalera a campo abierto y en celda centrada en un robot.

Software: consiste en módulos asociados con las diversas funciones que ejecuta el sistema de manufactura; entre las principales funciones se encuentran: programación de piezas, control de producción, control de

máquinas, control de piezas de trabajo, administración de herramientas, control de transporte y administración del sistema, dependiendo de la aplicación específica.

Mano de obra: los trabajadores realizan actividades como cargar y descargar piezas del sistema, cambiar y preparar herramientas, dar mantenimiento y reparar equipos, encargarse de la programación, operación y administración del sistema.

2.4.3 Aplicaciones de los sistemas flexibles de manufactura

Entre las principales aplicaciones que tienen los sistemas flexibles de manufactura, Groover (2007) menciona los siguientes:

- Se utiliza en una producción de volumen medio y variedad intermedia.
- En los sistemas flexibles de maquinado (torneado, perforado y fresado), ya que es posible conectar varias máquinas y herramientas a una computadora central y diseñar métodos automatizados para transferir las piezas de trabajo entre las máquinas. Presenta como beneficios: mayor utilización de máquinas que un taller especializado convencional, menor trabajo en proceso debido a la producción continua, tiempo de manufactura más cortos y mayor flexibilidad en el programa de producción.
- Para la distribución, verificación y clasificación de piezas de características distintas.

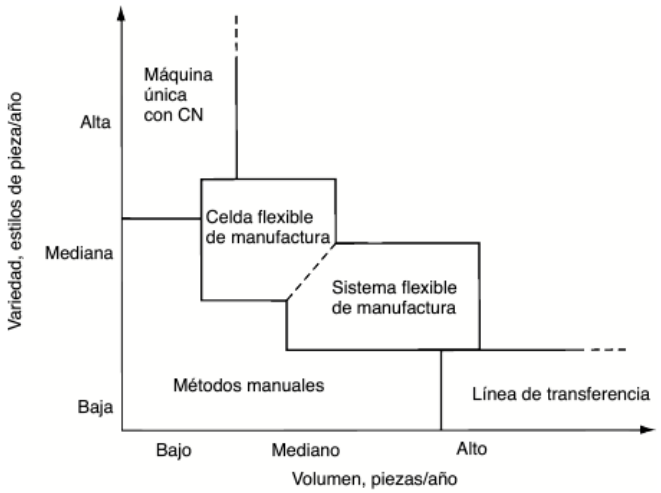


Figura 4. Características de la aplicación de sistemas y celdas flexibles de manufactura en relación con otros sistemas de producción.
Tomado de: Groover, 2007, p. 919.

Como se observa las estaciones del sistema de producción modular, en las cuales se desarrolla este proyecto, cumplen con las características para ser catalogados como sistema de manufactura flexible.

3. CAPÍTULO III. ESTACIONES Y CASO DE ESTUDIO

En el presente capítulo se realiza una descripción de las estaciones del sistema de producción modular que se encuentran en el laboratorio de Ingeniería en Producción Industrial de la Universidad de las Américas, sus principales características y los procesos que pueden ser modelados en las mismas. Posteriormente se selecciona como caso de estudio, para el modelado y simulación, una empresa industrial ecuatoriana.

3.1 Descripción de las estaciones del sistema de producción modular (MPS)

El laboratorio de Ingeniería en Producción Industrial cuenta en la actualidad con tres estaciones del Sistema de Producción Modular FESTO. Cada estación es la representación a escala de un subproceso industrial automatizado con sensores y actuadores electro-neumáticos reales que permiten simular un sistema de manufactura flexible. Las estaciones representan los subprocesos más comunes de todo tipo de fabricación automatizada y han sido diseñados para su aplicación en programas formativos, orientados a estudiar procesos y a la enseñanza de tecnología en universidades y escuelas politécnicas. El sistema MPS se utiliza desde 1991 en competencias internacionales de mecatrónica, ya que los módulos ofrecen las mismas características que la fabricación automatizada mundial al integrar la mecánica, electrónica y tecnología de la información (FESTO, 2017).

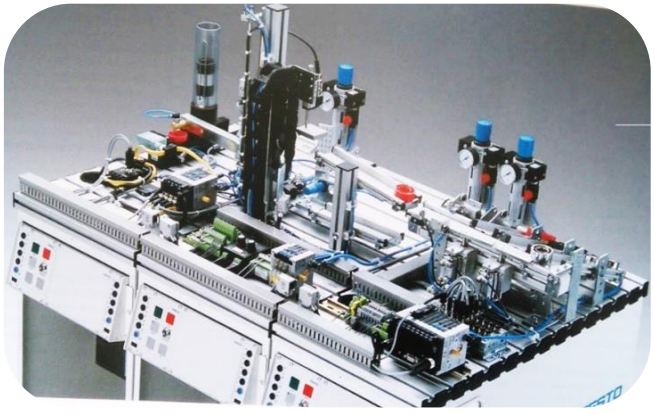


Figura 5. Estaciones del MPS FESTO.
Tomado de: FESTO Didactic, 2011, p. 286.

La combinación de estaciones permite montar un sistema productivo, en el cual cada estación tiene una función específica en el proceso. Para el presente proyecto se utilizan las estaciones de distribución, verificación y clasificación de piezas, cuyas características se detallan a continuación.

3.1.1 Estación de distribución

Se encarga de separar las piezas que se encuentran apiladas en el tubo del almacén de apilado. Un cilindro expulsa las piezas individualmente, para que el módulo cambiador, por medio de su brazo con ventosa, sujete la pieza separada y la transporte hasta la siguiente estación. El tubo del almacén apilador tiene capacidad máxima de 10 piezas.

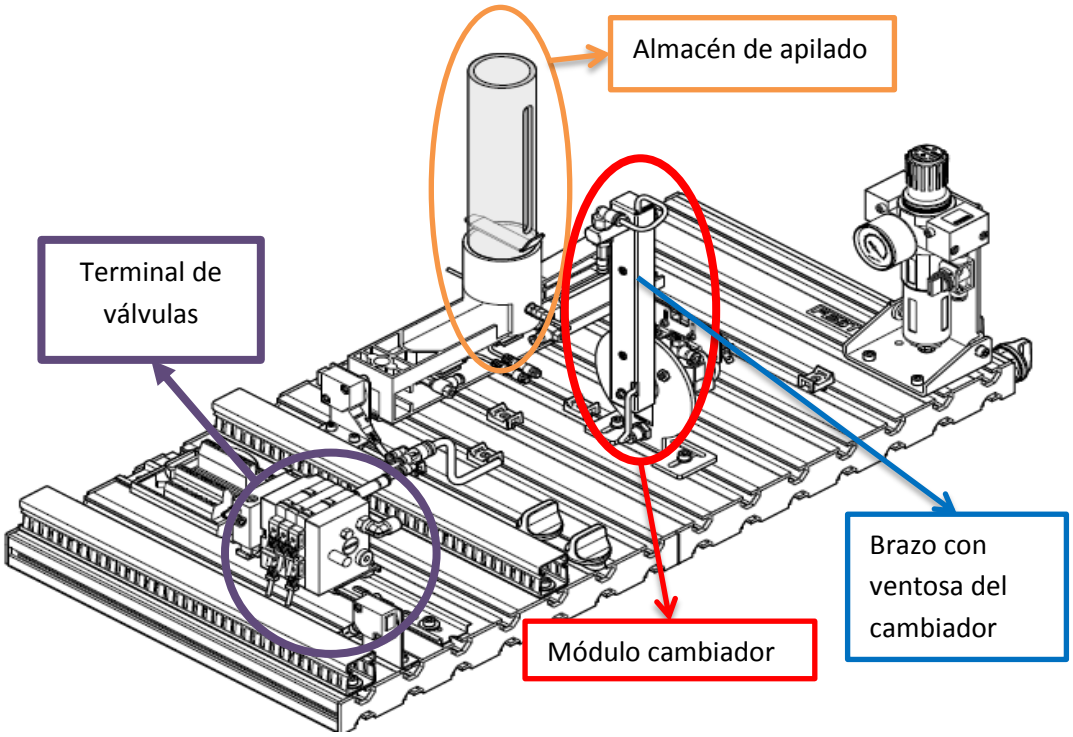


Figura 6. Estación de distribución.
Tomado de: FESTO Didactic, 2015, p. 69.

La estación de distribución se alimenta con un voltaje auxiliar de 24 VDC - 4.5A y trabaja con una presión de aire que no debe exceder los 600 KPa (6 bar). El tipo de comunicación industrial que utiliza es AS-i y cuenta con 3 esclavos que controlan los actuadores neumáticos. Los componentes de la estación de distribución se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4.
Componentes estación de distribución.

Sección	Elemento	Función
ALMACÉN APILADOR Separa piezas de un almacén con un cilindro de doble efecto que empuja la pieza de la parte inferior, sacándola del almacén por gravedad, contra un tope mecánico.	Cilindro de doble efecto.	Actuador neumático que separa las piezas del almacén
	2 sensores inductivos (metálico)	Detectan la posición del pistón del cilindro; están ubicados en la parte baja del almacén apilador.
	Sensor óptico de reflexión directa con AS-interface integrado (ESCLAVO 1)	Emite una luz roja visible, la cual se interrumpe con la presencia de una pieza. Detecta la presencia de una pieza en la parte baja del almacén.
MÓDULO CAMBIADOR Dispositivo manipulador neumático. Utiliza una ventosa para tomar piezas y colocarlas a posiciones de 0° y 180° utilizando un actuador semi-giratorio	Actuador semi-giratorio (brazo con ventosa)	Es un actuador neumático con capacidad de girar de 0° a 180°. En su parte superior cuenta con una ventosa.
	Micro-switch	Detecta las posiciones de 0° y 180° del actuador semi-giratorio.
	Vacuostato	Detecta que se ha generado vacío en la ventosa del actuador semi-giratorio, con lo cual se asegura que la pieza se encuentra sujeta de forma segura antes de ser transportada por el actuador semi-giratorio.
TERMINAL DE VÁLVULAS AS-interface CP. (ESCLAVO 2)	Conexión para 2 válvulas y 4 sensores	Concentra las señales del módulo cambiador en un esclavo AS-i. Permite: detección de vacío, control del actuador semi-giratorio, detección de la posición del actuador semi-giratorio.
Conector de válvulas AS-interface. (ESCLAVO 3)	Conector de válvula simple con una salida para bobina y dos entradas de sensores.	Combina las señales del módulo almacén apilador: control del cilindro de doble efecto y sensores inductivos.

Tomado de: FESTO Didactic, 2015, pp. 78-81.

3.1.2 Estación de verificación

La estación de verificación detecta la altura de la pieza que manipula. Las piezas provenientes de la estación de distribución se colocan en la placa del módulo elevador, una vez que se detecta la presencia de una pieza y cuando el área de trabajo se encuentra libre, el módulo elevador levanta la pieza hasta el módulo de medición de altura. Si la altura de la pieza es correcta, se la coloca en la rampa neumática con cama de aire que la guiará hacia la siguiente estación. Si la altura de la pieza no es correcta, se la rechaza y coloca en la rampa inferior.

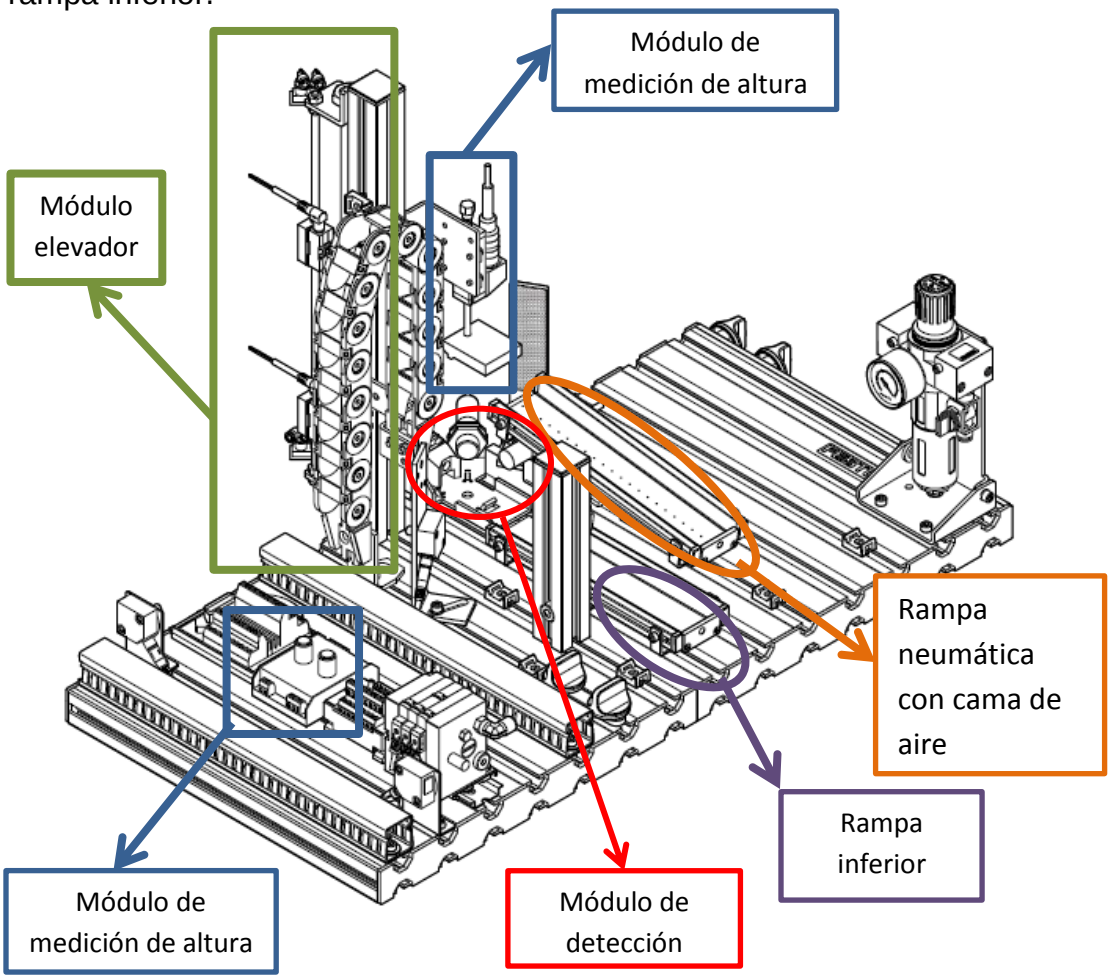


Figura 7. Estación de verificación.
Tomado de: FESTO Didactic, 2015, p. 89.

La estación de verificación trabaja con un voltaje de alimentación de 24 VDC - 4.5A, una presión de aire para su funcionamiento de 600 KPa (6 bar). Cuenta con 8 entradas digitales y 5 salidas digitales. Los componentes de la estación de distribución se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5.
Componentes de la estación de verificación.

Sección	Elemento	Función
MÓDULO DE DETECCIÓN Comprende dos sensores que detectan la característica de color y material de las piezas.	Sensor óptico de proximidad	Detecta las piezas plateadas y rojas, por ser las que reflejan la luz emitida por el sensor. La distancia entre el sensor y las piezas debe encontrarse entre los 15mm y los 20mm.
	Sensor capacitivo (proximidad)	Detecta la presencia de todo tipo de piezas independientemente del color y material. Debe ubicarse a 2mm o 3mm de la pieza a censar.
DETECCIÓN ÁREA DE TRABAJO	Sensor retro-reflectivo	Monitorea que el espacio de trabajo del módulo elevador se encuentre libre al momento de elevar la pieza.
MÓDULO ELEVADOR Se encarga de llevar las piezas desde el módulo de detección hasta el módulo de medición	Cilindro sin vástago	Actuador neumático que se encarga de elevar pieza.
	Cilindro de simple efecto	Actuador neumático que se encarga de expulsar la pieza de la placa del módulo elevador.
	Placa	Lugar donde se ubican las piezas provenientes de la estación de distribución para ser elevadas.
	Sensores finales de carrera inductivos	Detectan la posición de los dos cilindros del módulo elevador.
MÓDULO MEDICIÓN Mide la altura de la pieza	Sensor de desplazamiento lineal y módulo comparador	El sensor de desplazamiento lineal se desliza de acuerdo con la altura de la pieza, la medida de ese deslizamiento ingresa al módulo comparador para determinar si la medida obtenida corresponde al valor establecido.
RAMPA NEUMÁTICA Transporta las piezas con altura correcta hacia la estación de clasificación.	Rampa con cama de aire. El módulo tiene una capacidad para albergar hasta 5 piezas en la rampa.	Envía aire a través de los orificios en la rampa con la finalidad de trasladar las piezas y evitar la fricción entre la pieza y la rampa.

RAMPA INFERIOR Transporta las piezas con altura incorrecta hacia la estación de clasificación.	Rampa con capacidad de almacenar hasta 4 piezas.	Almacena todas las piezas que no cumplen con las características de altura establecidas como correctas.

Tomado de: FESTO Didactic, 2015, pp. 90-95.

3.1.3 Estación de clasificación

La estación de clasificación se encarga de clasificar las piezas en tres rampas. El proceso inicia con la identificación del color de la pieza (negra, roja, metálica), posteriormente se la lleva, mediante una cinta transportadora, hasta la rampa asignada para su color. Existe un sensor de retro reflexión que se enciende cuando una de las rampas se encuentra a su máxima capacidad. La estación está equipada con un terminal de válvulas Profibus-DP (DP-Slave), el cual concentra todas las entradas y salidas del proceso.

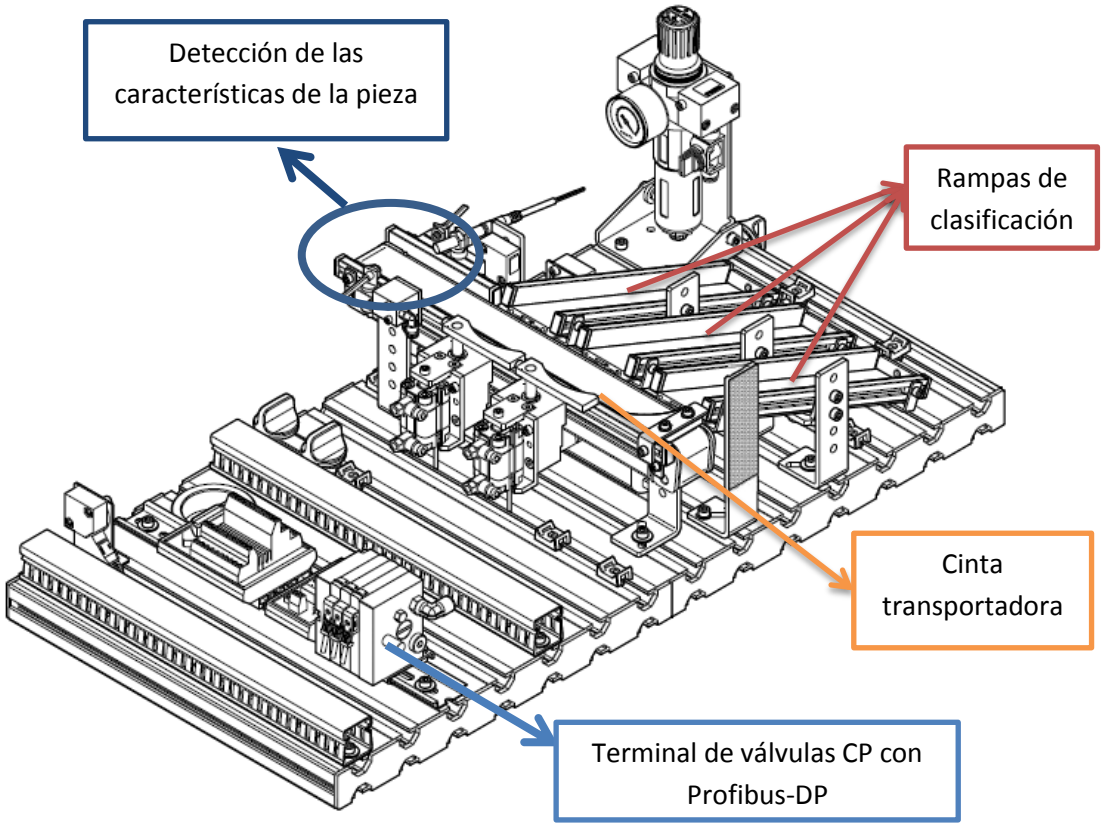


Figura 8. Estación de clasificación.
Tomado de: FESTO Didactic, 2015, p. 79.

La estación trabaja con un voltaje de alimentación de 24 VDC - 4.5A auxiliar, con una presión de aire de 600 KPa (6 bar). La información generada por los sensores y actuadores de la estación se transfiere hacia un PLC a través del bus de campo Profibus-DP, esto gracias a que la estación se encuentra configurada para trabajar como un esclavo Profibus. Los componentes de la estación se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6.
Componentes de la estación de clasificación.

Sección	Elemento	Función
DETECCIÓN Detiene la pieza hasta identificar sus características de clasificación.	2 sensores ópticos	Uno detecta la presencia de cualquier pieza por reflexión de la luz roja visible que el sensor emite. El segundo detecta la reflexión de la luz infra roja emitida por el sensor, al chocar con la pieza roja o plateada.
	Sensor inductivo	Detecta la presencia de metal en la pieza.
	Tope neumático con cilindro de carrera corta de simple efecto (retenedor).	Detiene las piezas provenientes de la estación de verificación, hasta que los sensores óptico e inductivo identifiquen las características de color y material de las piezas, y se determine a que rampa corresponde la pieza.
CINTA TRANSPORTADORA Transporta la pieza hasta la rampa correspondiente	Módulo derivador neumático	Se encuentra a los costados de la cinta transportadora para desviar las piezas hacia la rampa correspondiente. Es un cilindro de doble efecto de carrera corta y dos sensores para detección de posición del cilindro.
	Cinta transportadora	Se acciona mediante un motor de 24VDC.

RAMPAS DE CLASIFICACIÓN Almacenan las piezas clasificadas	Rampa	Almacena las piezas
	Sensor de retro-reflexión	Detecta que la rampa se encuentre llena. Se empleará para evitar que se envíen más piezas si una de las rampas se encuentra llena.
Terminal de válvulas CP con Profibus DP	Esclavo Profibus DP con tres electroválvulas y placa de relé con dos relés eléctricamente aislados.	Conecta todas las entradas y salidas del proceso para transportar la información al PLC mediante un bus de campo Profibus-DP.
	Módulo de entradas CP con 16 entradas para conexión al terminal de válvulas con Profibus-DP	

Tomado de: FESTO Didactic, 2015, pp. 80-85.

3.1.4 Controlador de las estaciones: PLC S7-1200.

Para poder realizar la programación y control de las estaciones de producción modular descritas, es necesario calibrar los sensores y contar con un controlador programable. Así, para programar el funcionamiento de las estaciones se ha utilizado el PLC S7-1200 de SIEMENS, al cual se le han adicionado dos módulos que le permitirán manejar la comunicación PROFIBUS y AS-i de las estaciones de clasificación y distribución. Estos módulos son: el CM1243-5 PROFIBUS DP MASTER y el CM1243-2 AS-i MASTER.

Figura 9. PLC SIEMENS S7-1200 con módulos AS-i y PROFIBUS.

El PLC S7-1200 tiene una CPU modelo 1214C, con 14 entradas digitales, 10 salidas digitales y dos entradas analógicas. Cuenta con un puerto de comunicación Ethernet y tiene la posibilidad para ampliar 3 módulos adicionales de comunicación en su lado izquierdo. La capacidad del equipo en memoria de trabajo es de 50KB; en memoria de carga, de 2MB, y en memoria remante, 2KB. El equipo se alimenta con 110VAC (SIEMENS, 2009).

Para poder programar el PLC, es necesario contar con el software Step 7 – Totally Integrated Automation Portal (TIA Portal), el cual sirve para realizar las configuraciones de comunicación entre las estaciones y el PLC, a la vez que funciona como interface gráfica entre el PLC y el programador.

En resumen, el laboratorio de Ingeniería en Producción Industrial de la Universidad de las Américas, cuenta con estaciones del sistema de producción modular FESTO, las cuales son capaces de representar a escala, con sensores y actuadores neumáticos reales, los procesos de distribución, verificación y clasificación de piezas, las cuales se diferencias por su color (rojo, negro y plateado) y por su altura. Para programar y controlar las estaciones, y consecuentemente efectuar la simulación se utilizó el PLC S7-1200, con sus módulos adicionales de comunicación PROFIBUS y AS-i. También fue necesario calibrar los sensores de cada estación.

3.2 Caso de estudio: Empresa de curtiembre

Para el desarrollo del presente proyecto, se seleccionó una empresa del sector industrial de la curtiembre, que cuenta con procesos de distribución, verificación y clasificación de pieles crudas, similares a los de las estaciones del sistema de producción modular del laboratorio de Ingeniería en Producción Industrial de la Universidad de las Américas, lo cual permitió realizar la modelación y simulación.

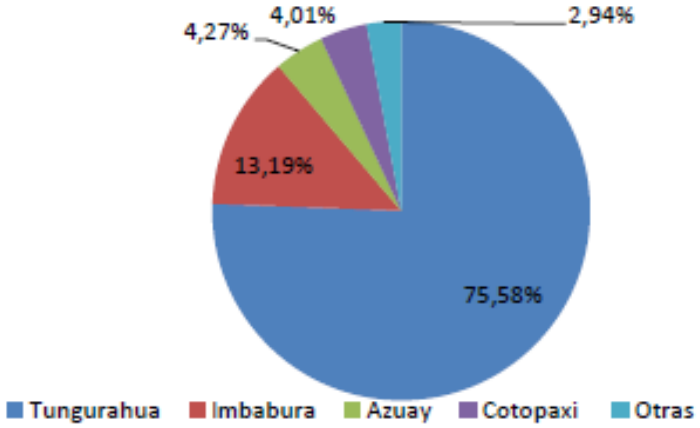
3.2.1 Situación actual de la industria de la curtiembre en Ecuador

Recientemente en nuestro país, la industria de curtiembre ha tenido que enfrentar serios problemas por la disminución en un 50% de sus ventas, debido a factores como el uso de material sintético para fabricación de calzado y el ingreso por las fronteras de Colombia y Perú de productos de cuero más baratos (El productor, 2015).

A lo anterior se suma el hecho de que la Asociación de Curtidores del Ecuador (ANCE) estima que, del total de pieles que se disponen por el faenamiento y que se procesan en 250 curtiembres a escala nacional, el 27% (aproximadamente 300.000 pieles) salen de forma ilegal del país, con destino hacia Colombia y Perú principalmente. Por lo que se da un incremento en el precio del cuero por la poca disponibilidad de materia prima; en efecto, la membrana cruda pasó a comercializarse de $25 a $40 en 2014, y el decímetro cuadrado de cuero pasó de $0.28 en el 2013 a $0.35 en 2014, precio que es poco competitivo en el mercado internacional, ya que en países como Colombia, Perú o Brasil, el cuero se comercializa entre los $0.24 y los $0.25 (Mera, 2014).

Otros factores que también afectan a la industria de la curtiembre son: baja calidad de las pieles por el deficiente cuidado del ganado en pie, sistema inadecuado de faenamiento de reses, mala conservación de las pieles antes de su ingreso a las curtiembres, comercio informal de pieles, entre otros (EL HERALDO DIGITAL, 2014).

En el Ecuador, la producción de cuero se concentra principalmente en la Sierra, en las provincias de Tungurahua, Imbabura, Azuay y Cotopaxi. Hay 1.770 talleres en la provincia de Tungurahua, distribuidos en los cantones de Ambato, Baños, Cevallos y Quisapincha; 309 talleres en Imbabura, especialmente en el cantón Cotacachi; 100 talleres en Azuay, 94 en Cotopaxi, y 69 en las provincias restantes (FLACSO - MIPRO, 2011).



Fuente: Asociación Nacional de Curtidores del Ecuador.

Figura 10. Principales zonas de producción de cuero en el Ecuador. Tomado de: FLACSO - MIPRO, 2011, p. 3.

3.2.2 Descripción del proceso de curtido de cuero

El proceso de curtido es aquel que permite la conservación de las pieles de animales transformándolas en cuero, con características distintas de suavidad y duración. Este proceso se realiza después de una preparación de las pieles con materias curtientes, que pueden ser vegetales para obtención de suelas, correas, calzado y carteras; minerales o curtidos al cromo, hierro o humo para producción de guantería, suelas, correas y pieles finas; o grasas para la obtención de pieles para agujetas, tacos, cueros transparentes y gamuzas (SALVAT Editores, 2004).

Para obtener estos productos terminados, la materia prima debe atravesar por una serie de pasos que son: recepción de la materia prima, pre-tratamiento, curado y desinfectado, pelambre, desencalado, descarnado, piquelado, curtido, secado, engrasado, planchado y clasificación, cada uno de los cuales se describen a continuación.

- **Recepción de la materia prima**: en esta etapa del proceso se reciben las pieles crudas de animales y se realiza una inspección visual para verificar que no tengan daños que afecten la calidad del producto final. Se pesan y clasifican las pieles por tamaño y especie.

- **Pre-tratamiento**: se recorta partes del cuello, la cola y las extremidades. Se lava las pieles con productos químicos como hidróxido de sodio, hipoclorito de sodio y detergentes para eliminar residuos de sangre, excreta y otros.
- **Curado y desinfectado**: en esta etapa se curan las pieles salándolas con sal muera. Para ello se coloca las pieles en grandes cubas con desinfectante, bacterias y solución salina casi saturada; se agita el contenido y se deja reposar por 48 horas para que se absorba completamente la sal.
- **Pelambre**: se elimina la epidermis y el pelaje de las pieles escurridas, sumergiéndolas y agitándolas constantemente en una solución de cal y sulfuro de sodio. Esto produce un desdoblamiento de las fibras a fibrillas, preparando las pieles para el curtido.
- **Desencalado**: es el proceso en el cual se lava la piel para remover la cal y el sulfuro, para ello se utilizan sustancias químicas como ácidos orgánicos tamponados, peróxido de hidrógeno, azúcares y melazas.
- **Descarnado**: se separa la grasa y la carnaza que todavía permanecen unidas a la parte interna de la piel, utilizando máquinas para tener una buena absorción de los productos químicos en las siguientes etapas. Posteriormente se la lava con abundante agua.
- **Desengrasado**: se sumerge la piel con detergentes y soluciones, y se las deja en reposo por un tiempo. Se utiliza cloruro de amonio para darle a la piel una textura homogénea, tersa y elástica.
- **Piquelado**: comprende la preparación química de la piel con soluciones de ácido fórmico y ácido sulfúrico para su curtido, los cuales permiten que la piel recepte de manera adecuada el agente curtidor, y no se dañen las capas de colágeno, mejorando así su conservación.
- **Curtido**: se transforma la piel en cuero utilizando sales de cromo. Se escurre la piel, se colocan las sales de cromo y la piel en una máquina denominada divisora por un tiempo entre 8 y 24 horas para transformar la piel en cuero.

- **Secado**: después del curtido se seca el cuero; dependiendo de la velocidad y el método empleado, el cuero adquiere sus propiedades finales. La velocidad de secado es determinante, puesto que si se lo seca muy rápido únicamente se seca la superficie y el interior queda húmedo. Para secar el cuero se lo estira.
- **Engrasado**: se realiza impregnando el cuero con aceites emulsionados, que se fijan en las fibras del cuero y evitan que se cuartee; le dan una textura suave, fuerte y flexible.
- **Planchado y clasificación**: se plancha al cuero para darle brillo, se lo realiza en máquinas de prensado. Luego, los cueros se clasifican por tamaño y calidad.
- **Almacenamiento**: se los almacena de acuerdo a su tamaño, calidad y color, sobre pallet de superficie plana en áreas libres de humedad y ventiladas, en las cuales no les llegue mucho la luz solar.

En la Figura 11 se muestra un diagrama del proceso de curtido de cuero descrito.

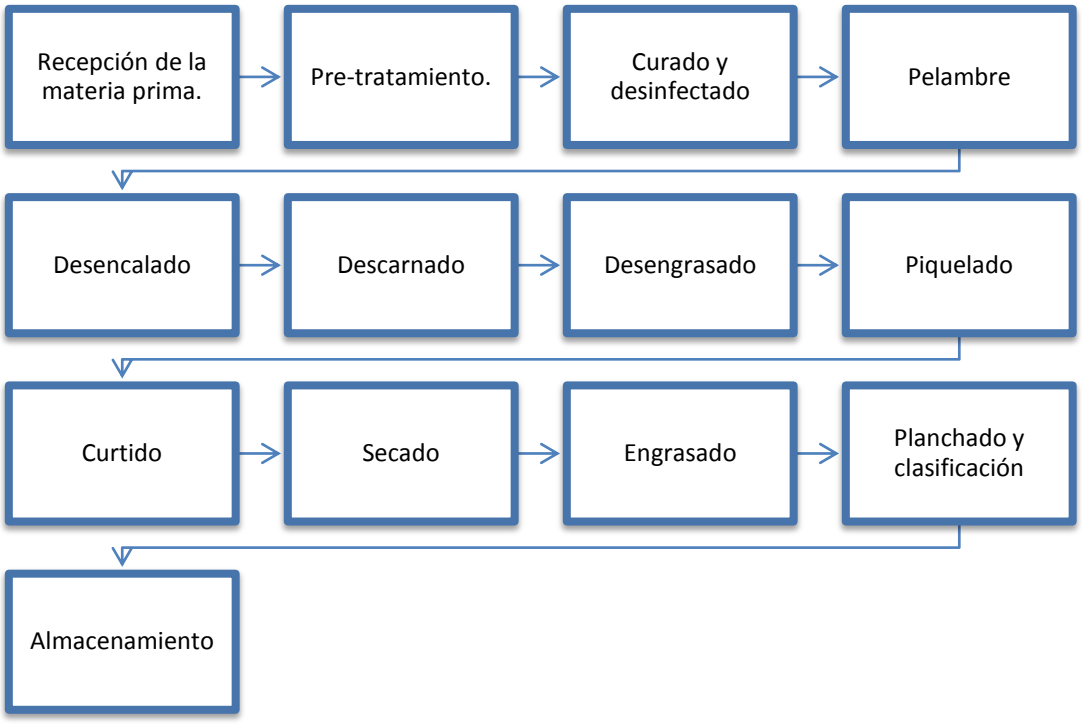


Figura 11. Diagrama del proceso de curtido de cuero.

Figura 12. Proceso de curtido de cuero. Curtiembre Z&H, 2016.

3.2.3 Descripción de la empresa en estudio

La “Curtiembre Z&H” se ubica en la provincia de Tungurahua, en el parque industrial de Ambato, y se dedica al curtido de pieles de ganado vacuno. Tiene una trayectoria en el mercado ecuatoriano de aproximadamente 30 años, es de carácter familiar y desarrolla el proceso de curtido de forma manual y semiautomática. Se extiende en un terreno de aproximadamente 2.520m2, que se distribuye en oficinas, bodegas, saladero, planta de tratamiento de aguas y

una nave industrial de 2 pisos. Actualmente, en la empresa laboran 12 empleados que no tienen un puesto o actividad fija, sino que rotan según las necesidades de producción y de acuerdo a los pedidos realizados por los clientes.

La empresa produce bajo pedido cuero en color negro, café o abano dependiendo de la necesidad de sus clientes, que mayoritariamente son fabricantes de calzado escolar. Los productos principales son: wet blue (cuero casi procesado) y cuero cross color negro. Elaboran un promedio mensual de 960 bandas de cuero wet blue y 750 bandas de cuero cross negro.

Figura 13. Wet blue. Curtiembre Z&H.

Figura 14. Cuero cross: Curtiembre Z&H.

3.2.4 Decisión que enfrenta la empresa

La “Curtiembre Z&H” analiza la posibilidad de automatizar su proceso de recepción de materia prima para mejorar su productividad y precautelar la salud de sus trabajadores, quienes cargan y manipulan pieles crudas manualmente.

La empresa ha seleccionado este proceso debido a que actualmente se lo realiza de forma manual, y necesita mejorarlo porque juega un papel importante en la producción, pues de la adecuada recepción y clasificación de la materia prima depende en gran parte la calidad del producto final. Y como las actividades de este proceso son muy similares a las realizadas por las estaciones del sistema de producción modular, lo hace idóneo para realizar una simulación utilizando como modelo físico análogo las estaciones.

La recepción de materia prima se realiza los días lunes entre 7:00 y 8:00 de la mañana, cuando el camión del proveedor ingresa a la zona de descarga, y deja

un promedio de 100 pieles (equivalente a 1.800kg), provenientes de la región Sierra. Dos trabajadores realizan el proceso de recepción: descargan las pieles del camión, inspeccionan visualmente el estado de cada una para verificar que no presenten cortes, garrapatas o gusanos, y deciden si están en buen o mal estado. Las pieles que se encuentran en buen estado, de acuerdo al criterio de los trabajadores, se clasifican por su tamaño en tres: tipo 1, tipo 2 o tipo 3; mientras que las pieles en mal estado se devuelven al camión. Para clasificar las pieles en tipos 1, 2 o 3, los operarios deciden en base a su experiencia y utilizan sus pies para medir. El criterio de clasificación es por el tamaño de las pieles en decímetros cuadrados; así, las pieles de tipo 1 son aquellas de 340dm2, las de tipo 2 miden 314 dm2 y las de tipo 3 miden 288 dm2, aproximadamente.

Figura 15. Clasificación de materia prima. Curtiembre Z&H.

El diagrama de flujo del proceso se muestra en la Figura 16, a continuación.

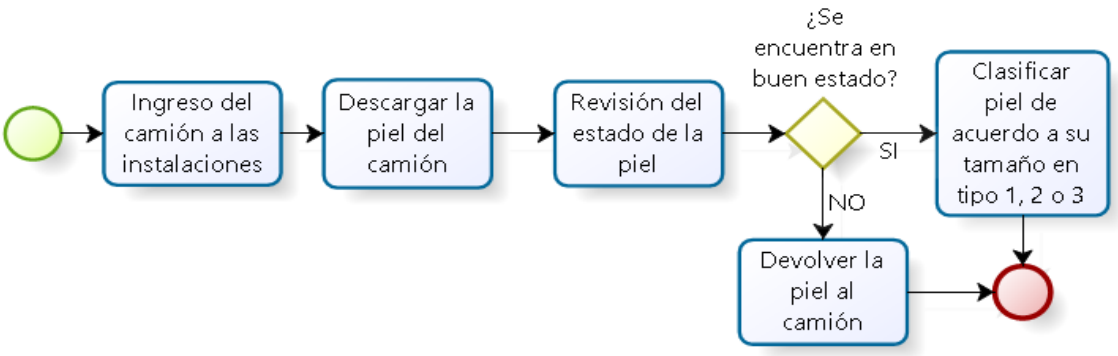


Figura 16. Diagrama de flujo: proceso de recepción de pieles.

Por lo tanto, la recepción de materia prima es una fase crítica del proceso de curtido, puesto que si una piel se daña o se recibe con daños se compromete la calidad del producto final. En la Figura 17 se muestra un análisis de los principales problemas que afectan a este proceso en la empresa “Curtiembre Z&H”.

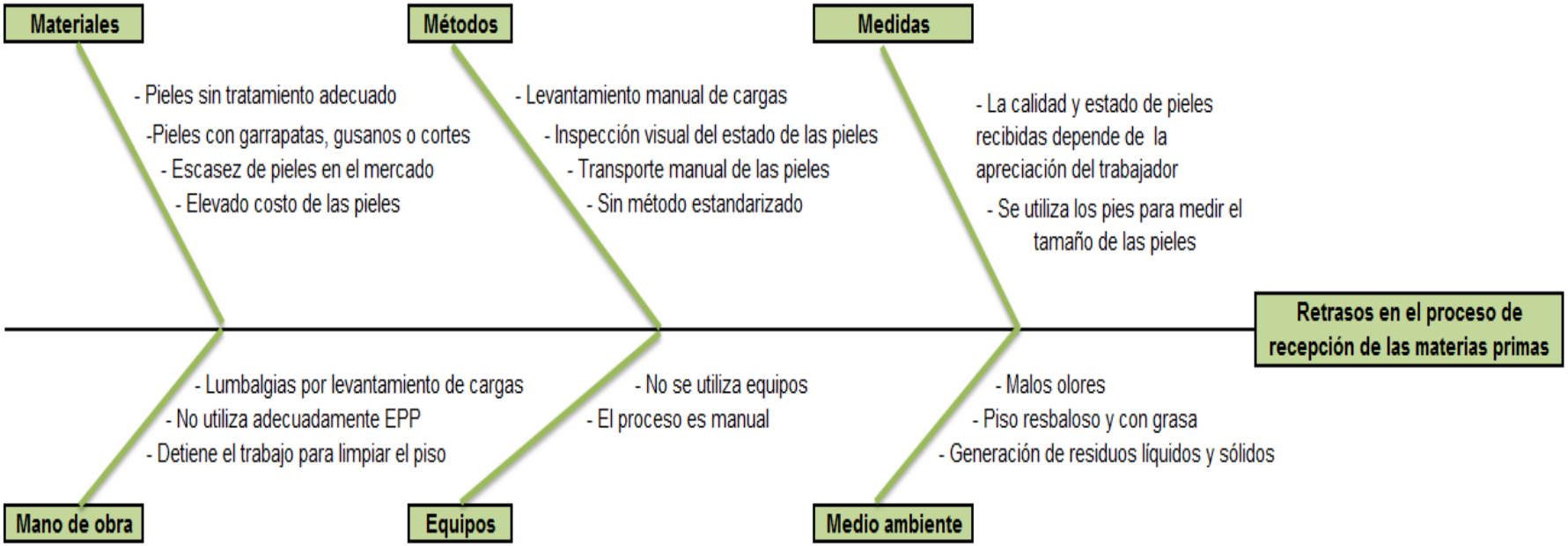


Figura 17. Ishikawa, problemas que afectan el proceso de recepción de materias primas.

Como se observa, en la recepción de materia prima, a más de las posibles afectaciones a la salud de los trabajadores, se tiene paros constantes en el proceso para limpiar los líquidos que se escurren de las pieles y tornan el suelo resbaladizo y grasoso.

3.2.5 Medición de tiempos del proceso de recepción de materia prima

Para determinar si la automatización es una decisión adecuada en el proceso de recepción de la materia prima, se midió tiempos de las actividades involucradas para su análisis. Por cuatro meses (de agosto a noviembre) un delegado del jefe de producción realizó la toma de datos de acuerdo con los criterios que se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7.
Parámetros para la toma de datos.

Medida	Localización de la fuente de datos	Definición operacional	Tamaño de la muestra	Cuándo realiza la medida	Cómo realiza la medida
Tiempo	Descarga de pieles del camión	Desde que se recoge la piel del camión hasta que se la coloca en el área de inspección.	10 muestra por actividad cada día que se entregan las pieles	Los días lunes en los meses de agosto a noviembre de 2016	Toma de tiempos con un cronómetro de acuerdo a la definición operacional.
	Revisión del estado de las pieles	Desde que se toma la piel para inspeccionar su estado hasta que se decide si está buena o mala.			
	Regreso de pieles en mal estado al camión	Desde que se recoge la piel en mal estado hasta que se la deposita en el camión.			
	Clasificación de las pieles en buen estado por su tamaño	Desde que se toma la piel en buen estado hasta que se la deposita en el lugar correspondiente a su tamaño.			

Durante el periodo de muestreo y de acuerdo con la definición operacional planteada se tomaron datos, que corresponden a tiempos medidos en segundos. El promedio diario de estos datos fue proporcionado por la empresa “Curtiembre Z&H” y se muestran a continuación.

Tabla 8.
Registro de medición de tiempos en segundos.

Registro de medición de tiempos en segundos													
Periodo:	Agosto - noviembre 2016							**Producto:**	Materia prima Piel cruda de vaca			
Estudio No.:	1											
Hoja No.	1 de 1 hoja							No. proceso	2			
Elemento	Descarga de pieles del camión		Revisión del estado de las pieles		Regreso de las pieles en mal estado al camión		Clasificación de las pieles en buen estado por su tamaño					
	1		**2**		**3**		**4**		**S**			
	T	**L**	**T**	**L**	**T**	**L**	**T**	**L**	**N**	**L**	**T**	**Elementos extraños**
1	6		12		4		10					
2	7		12		4		10		A			
3	8		13		4		10					
4	7		13		4		10		B			
5	7		13		4		10					
6	10		12		4		10		C			
7	9		12		4		10					
8	6		12		4		10		D			
9	7		21		4		9					
10	10		12		4		10		E			
11	6		12		4		9					
12	9		12		4		10		F			
13	7		21		4		9					
14	10		12		4		10		G			
15	5		12		4		10					
Moda	7		12		4		10					
Promedio	7		14		4		10					
No. observaciones	15							**Hora de análisis**	7:00 am a 8:00 am			
Nombre del operador	Luis López											

4. CAPÍTULO IV. SIMULACIÓN

En este capítulo se presenta el diseño del modelo de simulación que incluye: la calibración de sensores, la elaboración del tablero de control para concentrar las señales eléctricas y de datos, y los diagramas de flujo del programa elaborado para cada estación de acuerdo al caso de estudio. Luego se realiza una simulación con el modelo, se analizan los resultados y se concluye con la estandarización de una práctica de laboratorio.

4.1 Diseño del modelo de simulación

Para poner en funcionamiento las estaciones de distribución, verificación y clasificación del sistema de producción modular fue necesario calibrar los sensores de cada estación, elaborar un tablero de control y desarrollar el programa que permite a cada estación simular el caso de estudio.

4.1.1 Calibración de sensores

Como se describió en el capítulo 3, cada estación cuenta con un promedio de seis sensores, cuyos datos de salida se concentran en el PLC y permiten monitorear el estado de cada estación. En base a estos datos, el software programado en el PLC determina las acciones de los actuadores neumáticos para mover las piezas.

Existen tres sensores críticos en las estaciones, cuya adecuada calibración es indispensable para un correcto funcionamiento del programa en el PLC, y son: sensor óptico de reflexión directa AS-i, sensor capacitivo de proximidad y sensor de desplazamiento lineal.

El sensor óptico de reflexión directa AS-i se encuentra en la estación de distribución, apuntando hacia el almacén apilador; emite un haz de luz roja visible que, al chocar contra una superficie, se refleja permitiendo detectar la presencia de un objeto. El prerrequisito para que se inicie la secuencia de funcionamiento de la estación de distribución es que exista una pieza en la parte inferior del almacén apilador; por tal motivo, se debe garantizar que el sensor tenga un alcance adecuado para que pueda detectar la pieza que se

encuentra en la parte inferior del almacén; caso contrario, no se iniciará con la secuencia. Si existe una pieza en la parte inferior del almacén apilador y la luz amarilla del costado izquierdo del sensor no se enciende, se debe calibrar el sensor. Para ello se gira el tornillo color negro que está a un costado del sensor hasta que la luz amarilla se encienda; dependiendo del número de vueltas que se le dé al tornillo, el sensor tendrá mayor o menor alcance de detección.

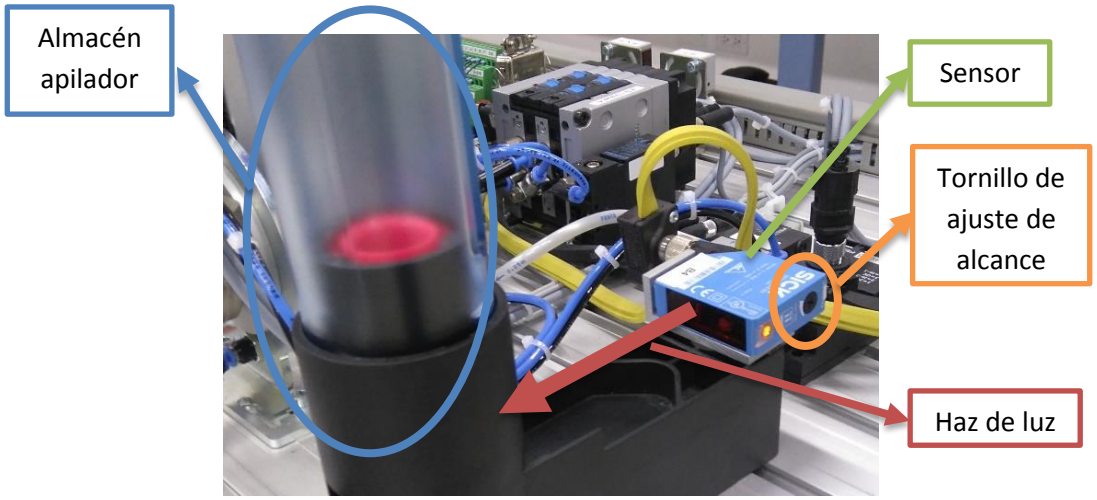


Figura 18. Sensor de reflexión directa AS-i. Estación de distribución.

El sensor capacitivo de proximidad se encuentra en la estación de verificación, es de color azul y detecta la presencia de las piezas independientemente de su color o material. Debe ubicarse máximo a 2 o 3mm de la pieza que va a detectar. Si una pieza se encuentra en el módulo de detección y la luz amarilla de la parte posterior del sensor no se enciende, se debe ajustar el potenciómetro (tornillo rojo) ubicado en la parte posterior del sensor hasta que la luz amarilla se encienda.

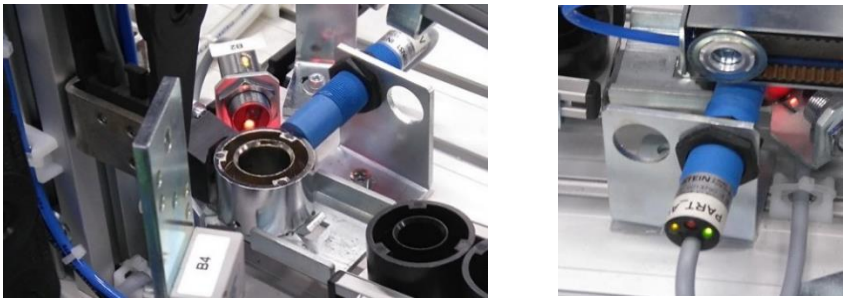


Figura 19. Sensor capacitivo de proximidad. Estación de verificación.

El sensor de desplazamiento lineal también se encuentra en la estación de verificación y permite determinar si la altura de la pieza que se está censando coincide con el valor prestablecido. El programa desarrollado para la estación permite el paso a las piezas cuya altura es igual o mayor a la pieza estándar de color rojo y descarta las piezas de menor tamaño. Si esto no ocurre al funcionar la estación, es necesario calibrar el sensor. Para ello se coloca la pieza roja en el módulo elevador y se la sube hasta el tope superior, una vez arriba se debe ajustar las perillas del módulo comparador (LEVEL 1 y LEVEL 2) hasta que el led de estatus se torne de color verde. En la Figura 20, se muestra, en el lado izquierdo, la posición en la que se debe colocar la pieza roja para realizar la calibración, y en el lado derecho, el módulo comparador con la posición correcta de las perillas.

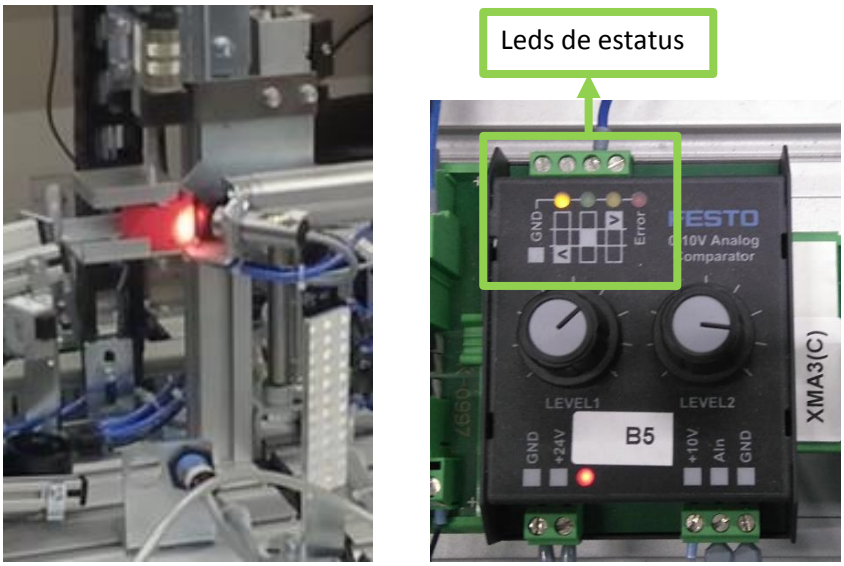


Figura 20. Calibración sensor de desplazamiento lineal. Estación de verificación.

Información más detallada sobre los sensores de las estaciones, sus características y técnicas de calibración, se las encuentra en los manuales de cada estación.

4.1.2 Elaboración del tablero de control

Para que los equipos no sufran daños por una inadecuada manipulación o conexión, se diseñó un tablero de control que centraliza las conexiones

eléctricas requeridas por los equipos, las fuentes y las estaciones; contiene el PLC, los módulos PROFIBUS y AS-i, y la fuente AS-i POWER. El tablero facilita la movilización de las estaciones y se diseñó en dos secciones: en la parte superior se ubicaron la fuente AS-i POWER y el PLC S7-1200 con sus módulos AS-i y PROFIBUS, dejando 2cm libres en la parte superior e inferior de los equipos para permitir la ventilación de sus circuitos internos. La fuente AS-i POWER cumple la función de desacoplar las señales de datos que viajan junto con la alimentación a través del bus de comunicación AS-i (cable amarillo AS-i).

En la parte inferior del tablero se colocaron borneras industriales que permiten distribuir la energía a la fuente, las estaciones, al PLC y sus módulos. Las conexiones incluyen: una toma de 24VDC para alimentar la estación de clasificación y el módulo CM1243-5 PROFIBUS DP MASTER, otra toma de 24VDC para la alimentación auxiliar del módulo AS-i (estación de distribución), y una tercera de 110VAC para alimentar el PLC y la fuente AS-i POWER.

El tablero se colocó en la parte inferior de la estación de distribución. El esquema de conexiones del tablero se muestra en el ANEXO 1.

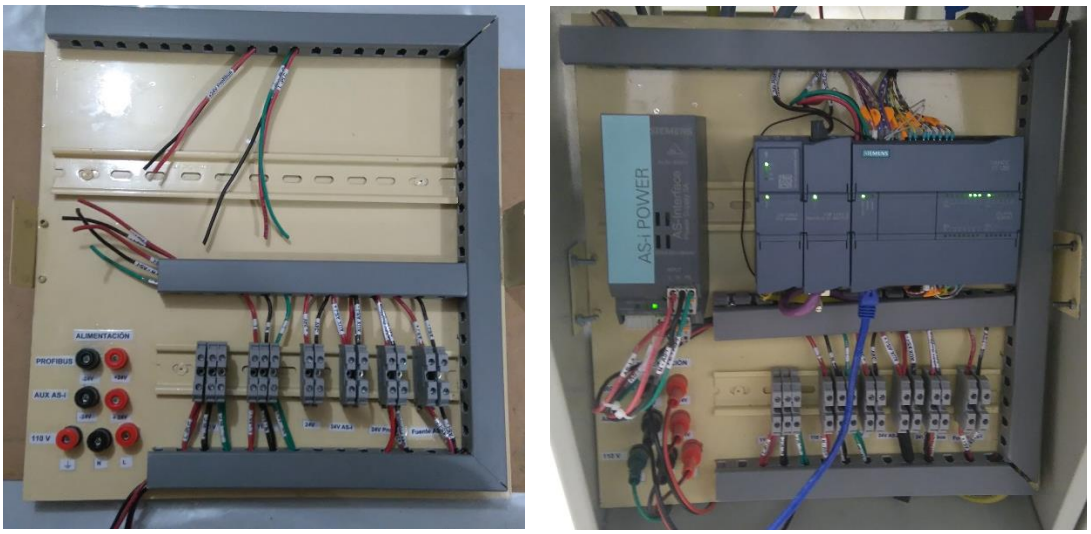


Figura 21. Tablero de control estaciones de distribución, verificación y clasificación.

4.1.3 Desarrollo del software

El software desarrollado y que se encuentra cargado en el PLC determina las acciones que cada estación ejecuta. Se diseñó pensando en los procesos de distribución, verificación y clasificación presentes en ambientes industriales, y, para ello, se tomó en cuenta las características de comunicación de las estaciones, la lectura de datos de los sensores y la secuencia lógica que deben seguir las piezas al cruzar por cada una de las estaciones.

Para elaborar el programa y cargarlo en el PLC es necesario establecer comunicación con el PLC a través de un cable de red y una computadora que tenga instalado el software TIA Portal, así como también configurar los módulos PROFIBUS Y AS-i. Los pasos a seguir para cargar un programa en el PLC se detallan en la práctica de laboratorio, que se encuentra al finalizar el presente capítulo.

Utilizando TIA Portal se programó el PLC en lenguaje “lader” o escalera, que permite visualizar las entradas y salidas conectadas al PLC como contactos y bobinas, respectivamente, lo cual facilita la programación.

El programa general está conformado por tres bloques independientes, que corresponden a cada una de las estaciones.

4.1.3.1 Estación de distribución

La estación de distribución inicia el ciclo de procesamiento de las piezas. Al presionar el botón START, que se encuentra en la parte frontal de la estación, se verifica que exista una pieza en el almacén apilador. Si existe la pieza, un pistón neumático la empuja para sacarla del almacén y ubicarla en posición para ser recogida por el brazo neumático, el cual para sujetar la pieza genera vacío con la ventosa, luego la levanta suavemente y coloca sobre la placa de detección del módulo elevador ubicado en la siguiente estación. Para depositar la pieza se requiere dejar de hacer vacío y soplar aire. Después de depositada la pieza, el brazo neumático se retira para no interferir con la subida del módulo elevador de la estación de verificación. La secuencia se repite mientras existan

piezas en el almacén apilador. Si no existen piezas en el almacén por más de 20 segundos el programa se detiene y es necesario volver a presionar el botón START.

A continuación, en la Figura 22, se muestra el diagrama de flujo del programa de la estación.

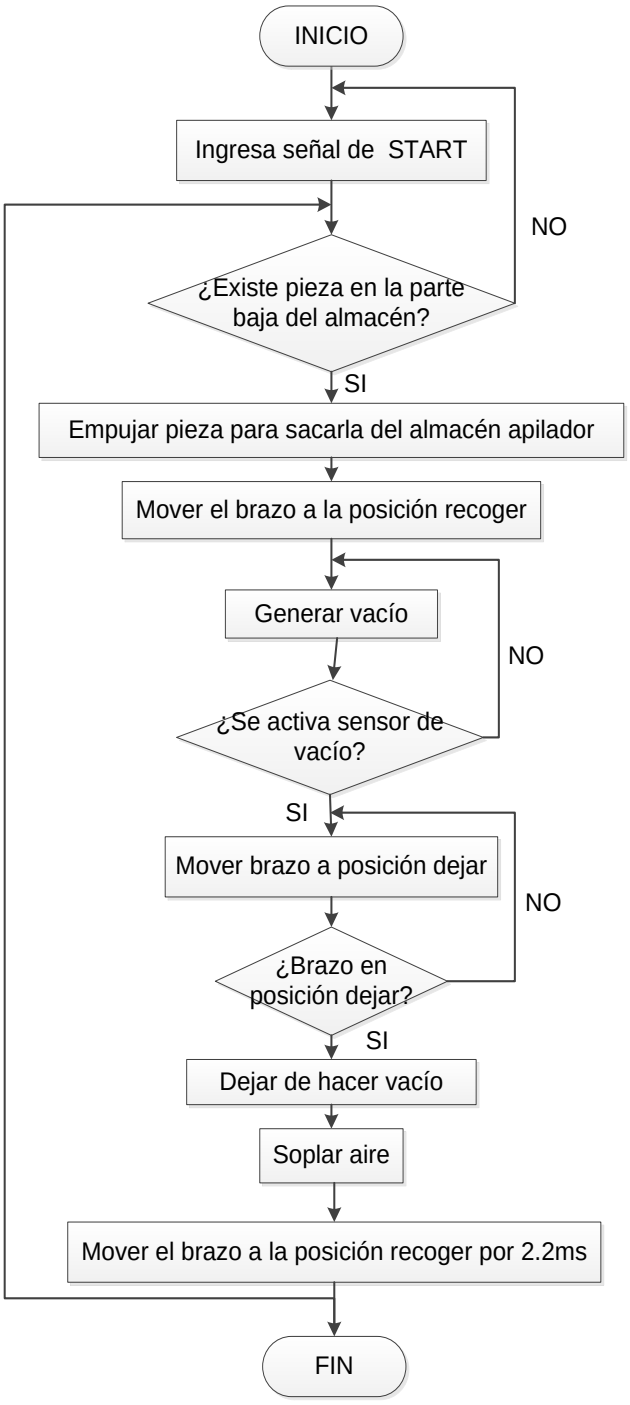


Figura 22. Diagrama de flujo programa estación de distribución.

4.1.3.2 Estación de verificación

Una vez que la pieza proveniente de la estación de distribución está en el módulo de detección y el brazo neumático se ha retirado, el sensor capacitivo confirma la presencia de la pieza, luego el módulo de elevación la levanta hasta llegar al sensor de desplazamiento lineal. En este punto, se determina si la altura de la pieza corresponde a la prestablecida; si este es el caso, se la guía mediante un pistón neumático a la rampa con cama de aire que la depositará en la siguiente estación. Si la altura de la pieza es incorrecta, se la baja y coloca en el lugar de almacenamiento de piezas rechazadas. Una vez concluido el ciclo se espera por la llegada de una nueva pieza. El diagrama de flujo del programa de la estación de verificación es el siguiente.

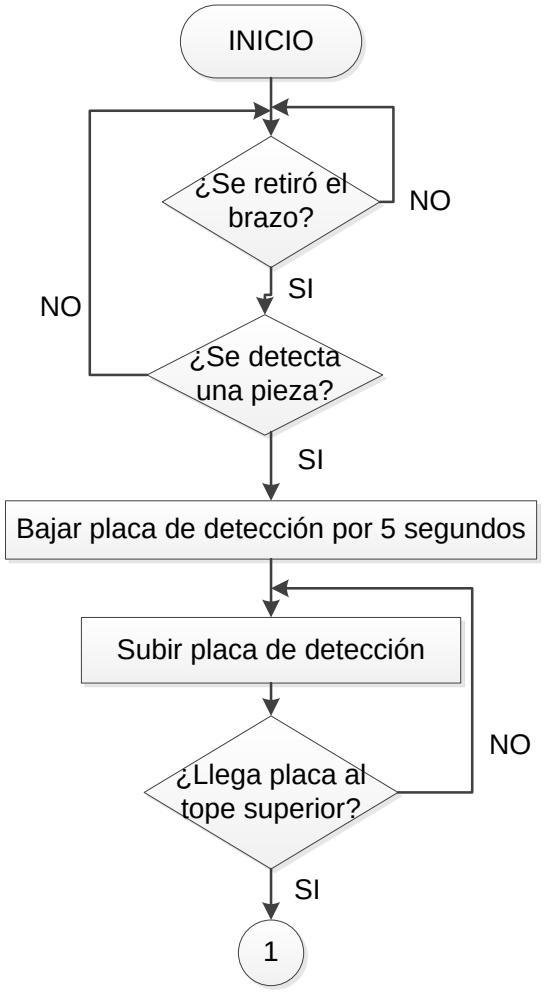


Figura 23. Diagrama de flujo programa estación de verificación (parte 1).

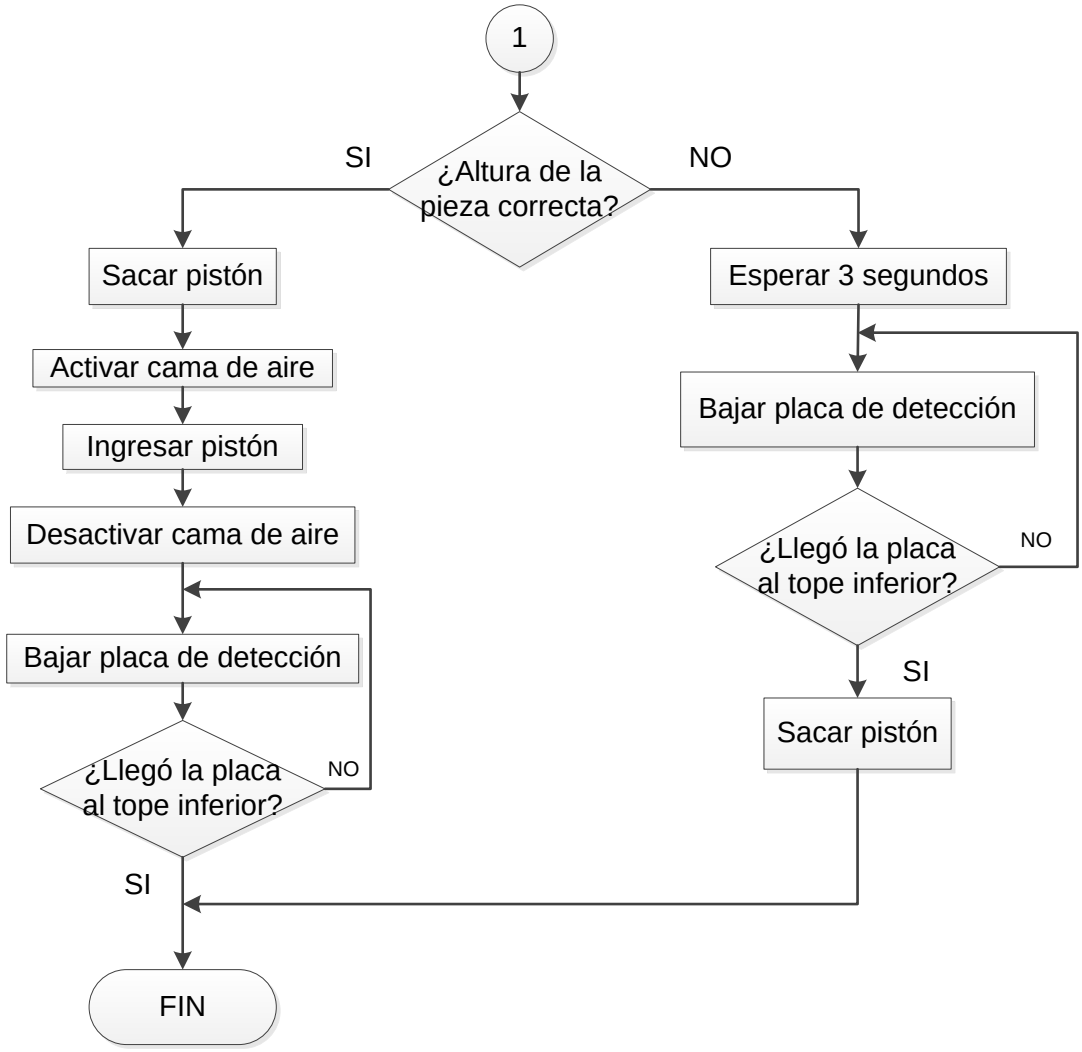


Figura 24. Diagrama de flujo programa estación de verificación (parte 2).

4.1.3.3 Estación de Clasificación

Cuando al inicio de esta estación se detecta una pieza, la banda transportadora se enciende para moverla hasta el retenedor, ahí un tope detiene la pieza momentáneamente hasta que el software, mediante la lectura de los sensores, identifica el color de la pieza (rojo, plateado o negro). Hecho esto, el tope se retira para permitirle pasar hasta su respectivo contenedor. La estación tiene tres contenedores al final de la banda transportadora, uno para cada color; cuando cualquiera de los contenedores se llena por completo (detector de lleno encendido por más de 10 segundos), se emite una señal que detiene la banda transportadora, enciende una alarma de llenura en el PLC y evita el paso de

más piezas hasta que se vacíe manualmente el contenedor. El diagrama de flujo del programa se muestra en la Figura 25.

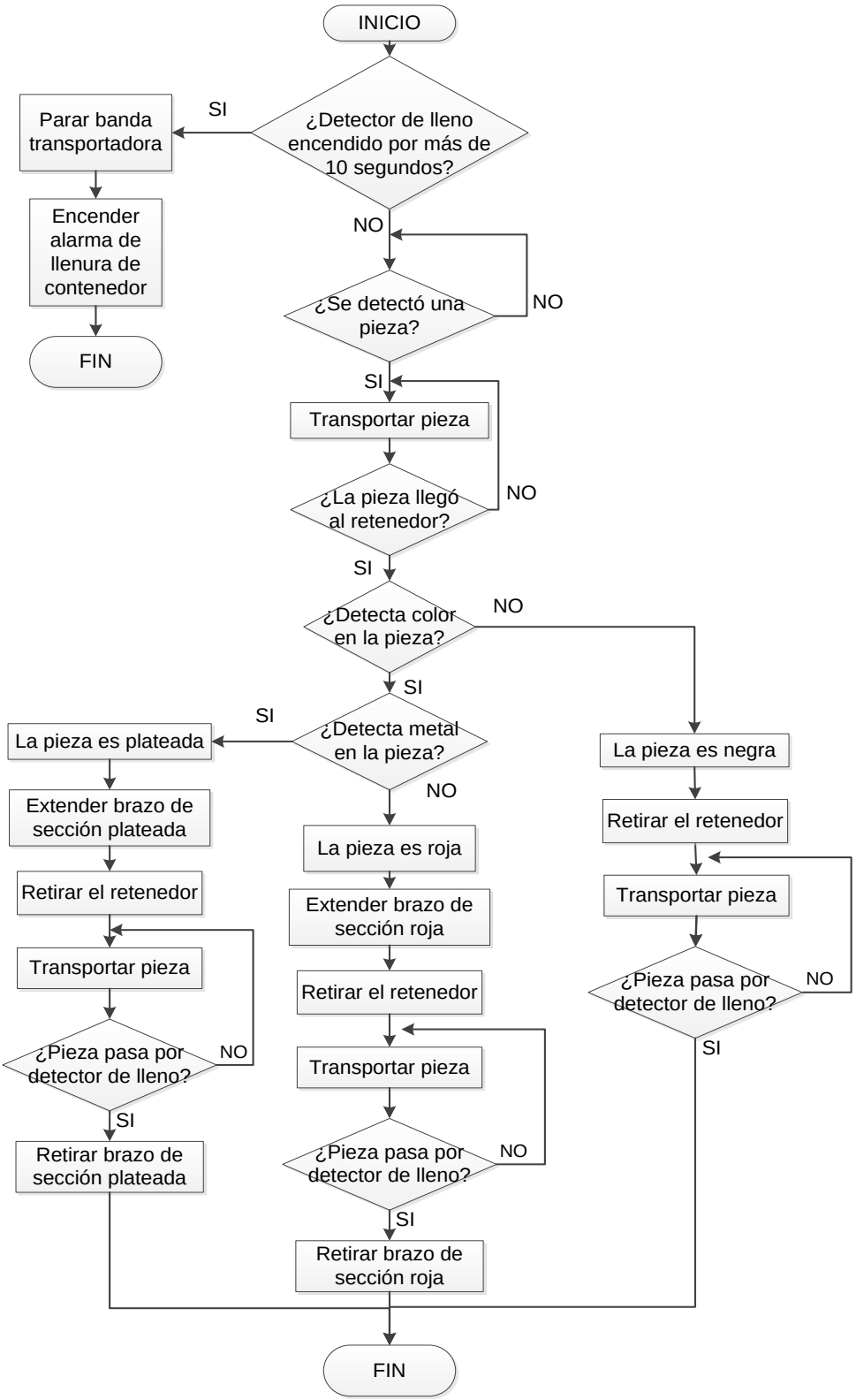


Figura 25. Diagrama de flujo estación de clasificación.

4.2 Aplicación de la metodología de simulación

Para realizar la simulación se aplicó la metodología planteada por Chase y Jacobs (2014), cuyos pasos son: definir el problema, elaborar el modelo de simulación, especificar valores de variables y parámetros, ejecutar la simulación, evaluar resultados, validar y proponer un nuevo experimento. A continuación, se presenta el desarrollo de cada uno de los pasos.

4.2.1 Definir el problema

Actualmente la “Curtiembre Z&H” realiza su proceso de recepción de materia de forma manual, en base al criterio y experiencia de sus trabajadores; por lo que desea conocer si la automatización de este proceso mejorará su productividad. Debido a ello, la empresa recurre a la simulación como una herramienta que le permitirá decidir si al automatizar su proceso de recepción de materia prima aumentará su productividad.

Por tanto, el proyecto de simulación busca determinar si mediante la automatización de su proceso de recepción de materia prima la “Curtiembre Z&H” logrará mejorar la productividad.

Para cumplir con este objetivo se requiere elaborar un modelo de simulación que represente adecuadamente las características del sistema real, por lo que se utilizará las medidas de los tiempos de las actividades del proceso real, sus entradas y salidas.

4.2.2 Elaboración del modelo de simulación

En este paso se debe tomar en cuenta tres puntos: el diseño conceptual del modelo (especificar las características que se van a representar del sistema a estudiar), la recolección de los datos para la elaboración del modelo y la construcción del modelo (en base al modelo conceptual y los datos).

Para el diseño conceptual es importante especificar las características del proceso de recepción de materia prima, detallando entradas, salidas y

requerimientos de cada actividad del proceso como se muestra en el diagrama SIPOC, de la Tabla 9, a continuación:

Tabla 9.
Diagrama SIPOC del proceso de recepción de materia prima.

PROVEEDOR	ENTRADAS							PROCESO	SALIDAS	REQUERI-MIENTOS DE LAS SALIDAS	CLIENTE
	M. Obra	Material	Método	Medición	Tipo de entrada (N, C, S ó X)	Cantidad	Descripción				
Proveedor pieles		Pieles			S	100	Piel de vaca	Descargar pieles del camión	Piel fuera del camión	Piel de vaca	Curtiembre Z&H
Recursos humanos	Obrero		Manual		N	1	Descarga manual de pieles				
Recursos humanos		EPP			S	1	Overol, botas, guantes, gorra				
Recursos humanos	Obrero		Inspección visual		N	1	Inspecciona visualmente el estado de la piel	Revisión del estado de las pieles	Piel revisada su estado	Se tiene la decisión de si se encuentra en buen o mal estado la piel	Curtiembre Z&H
Proveedor pieles		Pieles			S	100	Piel de vaca				
Recursos humanos	Obrero		Manual		N	1	Retorno manual de pieles en mal estado al camión	Regreso de pieles en mal estado al camión	Piel en mal estado devuelta al camión	Que la piel esté con gusanos, cortes o garrapatas	Curtiembre Z&H
Proveedor pieles		Pieles			S	% pieles en mal estado	Piel con cortes, garrapatas o gusanos				
Recursos humanos	Obrero		Manual	Utilizando sus pies	N	1	Mide y clasifica la piel por su tamaño	Clasificación de pieles en buen estado por su tamaño	Piel clasificada de acuerdo al tamaño	Pieles clasificadas en tipo 1, tipo 2 y tipo 3	Curtiembre Z&H
Proveedor pieles		Pieles			S	% pieles en buen estado	En buen estado				

Donde **N**: entradas de ruido, **C**: entradas controlables, **S**: operación estándar, y **X**: entradas críticas.

NOTA: SIPOC (Supplier, Input, Process, Output, Customer) Permite observar en las actividades del proceso los proveedores clave, las entradas, salidas y usuarios.

Debido a que las estaciones de distribución, verificación y clasificación del sistema de producción modular, del laboratorio de Ingeniería en Producción Industrial de la Universidad de las Américas, constituyen la herramienta principal para la elaboración del modelo de simulación, fue necesario realizar analogías para representar el proceso real utilizando las estaciones.

El modelo elaborado se lo puede clasificar como descriptivo, porque proporciona una imagen del estado actual del proceso; análogo, pues se representa el proceso de recepción de materia prima mediante analogías con el proceso realizado por las estaciones; dinámico, porque permite observar el comportamiento del proceso en el tiempo; y determinista, ya que los valores de entrada son específicos.

Para la simulación, la variable es el tiempo de las actividades desarrolladas durante el proceso de recepción de materia prima, y se consideran parámetros a las pieles de vaca que se reciben del proveedor.

Para representar los elementos del sistema real en las estaciones de distribución, verificación y clasificación del laboratorio, las analogías realizadas para la materia prima y para la parte operativa se detallan en la Tabla 10.

Tabla 10.
Analogías entre el sistema real y el modelo de simulación.

	SISTEMA REAL	MODELO DE SIMULACIÓN
Materia prima	Piel tipo 1	Ficha estándar de color negro
	Piel tipo 2	Ficha estándar de color plata
	Piel tipo 3	Ficha estándar de color rojo
	Piel en mal estado	Ficha pequeña de color negro
Operativo	Operario descargando la piel de vaca.	Brazo neumático con ventosa del módulo de distribución.
	Operario evaluando estado de la piel.	Sensor de desplazamiento lineal de la estación de verificación.
	Operario clasificando la piel en buen o mal estado.	Estación de clasificación.
	Operario devolviendo la piel en mal estado al camión.	Rampa inferior de la estación de verificación.
Criterio de decisión	Decisión de si la piel es buena o mala	Decisión de si la altura de la pieza es o no la prestablecida.

Así, las fichas representan las pieles y los actuadores neumáticos de las estaciones, las acciones realizadas por los operarios en el proceso de recepción de materia prima. Las fichas en las estaciones, al igual que las pieles en el sistema real, siguen un flujo continuo durante todo el proceso, pasando de forma ordenada por las estaciones de distribución, verificación y clasificación, como se muestra en la Figura 26.

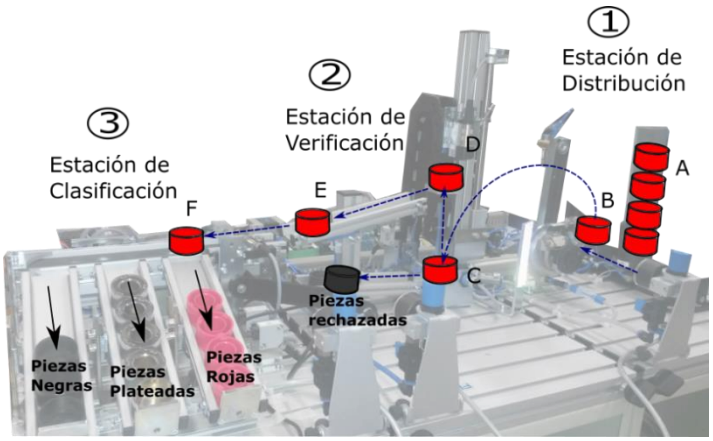


Figura 26. Flujo de las piezas en las estaciones.

Los datos utilizados para la elaboración del modelo de simulación corresponden a los presentados al final del capítulo 3, en el “Registro de medición de tiempos en segundos”, que como se mencionó fueron proporcionados por la empresa y recolectados durante cuatro meses de acuerdo a la definición operacional establecida. Así, en base a la moda (valor que se repite con más frecuencia en un conjunto de datos) de estos tiempos se colocó temporizadores en los programas diseñados para las estaciones, de tal forma que los tiempos de ejecución de las actividades realizadas por las estaciones se asemejen a los tiempos medidos en el sistema real. Se utilizó como referencia el valor de la moda de cada actividad del proceso real y no el promedio, ya que en los datos de tiempo recolectados por la empresa, especialmente en la columna de revisión del estado de las pieles, se observa valores atípicos que elevan el valor del promedio y evitan una adecuada representación de los datos y su tendencia. Los valores de la moda utilizados para representar el sistema real en las estaciones son los siguientes.

Tabla 11.
Tabla de tiempos programados en las estaciones.

TIEMPOS PROGRAMADOS POR PIEL PROCESADA				
Actividad del proceso	Descarga de pieles del camión	Revisión del estado de las pieles	Regreso de las pieles en mal estado al camión	Clasificación de las pieles en buen estado por su tamaño
Moda de la actividad (tiempo en segundos)	7	12	4	10

En base a las analogías planteadas y a los tiempos seleccionados para cada actividad del proceso, se ajustó los programas diseñados para las estaciones de tal forma que el comportamiento de los actuadores neumáticos y las piezas se asemeje al comportamiento del sistema real. Para realizar este ajuste de tiempos se colocó temporizadores en lugares específicos del software desarrollado para cada estación, los cuales retrasan el recorrido de las piezas un tiempo determinado a fin de que la sumatoria de tiempos de todo el conjunto de movimientos realizado por los elementos de las estaciones en una actividad del proceso, sea equivalente a la moda de cada actividad del sistema real.

4.2.3 Especificación de valores de variables y parámetros

Una de las ventajas que presenta la simulación es que no se debe esperar al lunes para recibir las pieles por parte del proveedor, sino que en la simulación se las podría recibir de forma continua. Por tal motivo, la simulación se realizó alimentando continuamente las fichas en el almacén de apilado de la estación de distribución. Adicionalmente, para obtener 15 datos de cada actividad del proceso (como se los tiene en el sistema real) se realizó 15 corridas continuas de simulación. Cada corrida corresponde a un día de recepción de materia prima, en el cual se recibe un total de 5 fichas: una ficha estándar de color rojo, una ficha estándar de color negro, una ficha estándar de color plata y dos fichas pequeñas de color negro, que representan las pieles recibidas. Estas 5 fichas se las coloca en el almacén apilador aleatoriamente, y se toman los datos de tiempo de cada actividad del proceso simulado, de acuerdo a las definiciones operacionales análogas que se presentan en la Tabla 12, a continuación.

Tabla 12.
Analogía entre las definiciones operacionales del sistema real y el modelo de simulación.

Medida	Actividad del proceso	Definición operacional para el sistema real	Definición operacional para el modelo de simulación
Tiempo	Descarga de pieles del camión. (Estación de distribución)	Desde que se recoge la piel del camión hasta que se la coloca en el área de inspección.	Desde que el brazo empieza a hacer vacío hasta que deposita la pieza en el módulo de detección de la estación de verificación.
	Revisión del estado de las pieles. (Estación de verificación)	Desde que se toma la piel para inspeccionar su estado hasta que se decide si está buena o mala.	Desde que se empieza a elevar la pieza, se censa su altura y se decide si coincide con el valor de altura prestablecido.
	Regreso de las pieles en mal estado al camión. (Estación de verificación)	Desde que se recoge la piel en mal estado hasta que se la deposita en el camión.	Desde que el módulo de medición empieza a bajar con la pieza rechazada hasta que la coloca en la rampa inferior.
	Clasificación de las pieles en buen estado por su tamaño. (Estación de clasificación)	Desde que se toma la piel en buen estado hasta que se la deposita en el lugar correspondiente a su tamaño.	Desde que la pieza topa la banda transportadora de la estación de clasificación hasta que ingresa a la rampa que le corresponde de acuerdo a su color.

En resumen, para realizar la corrida de simulación, las piezas (parámetros) se colocarán en el almacén de apilado de la estación de distribución en grupos de 5 (una estándar roja, una estándar negra, una estándar plata, y 2 pequeñas negras) y de forma aleatoria, 15 veces; y con las estaciones en funcionamiento se tomará la medida de la variable tiempo en segundos para cada actividad del proceso simulado, de acuerdo a la definición operacional establecida para el modelo de simulación. Con estos criterios se procedió a ejecutar la simulación.

4.2.4 Ejecución de la simulación

Para ejecutar la simulación se debe energizar las estaciones del sistema de producción modular alimentando el tablero de control, cuidando que el voltaje de alimentación proporcionado por la fuente DC externa no exceda los 24 VDC. Una vez energizado el tablero, se debe verificar que los sensores críticos de cada estación se encuentren calibrados adecuadamente y, finalmente, se debe cargar en el PLC el programa elaborado para el modelo de simulación.

Teniendo en cuenta lo expuesto, se realizó las corridas de simulación poniendo en funcionamiento las estaciones y alimentando el almacén apilador de la estación de distribución con grupos de 5 piezas (en orden aleatorio) y por 15 veces, de forma consecutiva.

Se filmó la simulación para posteriormente observar el video y obtener los valores de los tiempos correspondientes a cada actividad del proceso, reduciendo así la variabilidad en la toma de datos de tiempo. Los datos obtenidos en la simulación para cada actividad del proceso y su promedio se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13.
Datos obtenidos durante la simulación. Los tiempos se encuentran en segundos.

REGISTRO DE TIEMPOS DE SIMULACIÓN EN SEGUNDOS																			
Fecha:	24/01/2017					**Proceso:**	Recepción materia prima						**Observador:**		Carla Rivadeneira				
Estudio No.	1					**No. proceso**	2						**Hora de análisis:**		17:18 a 18:15				
Hoja No.	1 de 1					**Producto:**	Piel de vaca cruda												
Elemento	Descarga de pieles del camión						Revisión del estado de las pieles						Regreso de las pieles en mal estado al camión			Clasificación de las pieles en buen estado por su tamaño			
Corrida	1	2	3	4	5	Promedio	1	2	3	4	5	Promedio	1	2	Promedio	1	2	3	Promedio
1	6	8	9	21	8	10	11	10	11	11	10	11	4	6	5	12	10	13	12
2	7	7	7	7	7	7	10	12	10	12	11	11	5	4	5	11	11	11	11
3	7	6	8	7	6	7	10	11	11	10	10	10	5	4	5	11	11	12	11
4	6	8	8	7	15	9	11	10	12	10	12	11	4	3	4	11	11	12	11
5	11	6	8	7	6	8	15	11	10	10	12	12	4	6	5	11	12	10	11
6	6	7	8	8	7	7	11	10	11	10	12	11	4	3	4	12	12	10	11
7	8	6	7	7	7	7	11	11	10	10	12	11	3	4	4	12	12	11	12
8	8	7	7	8	7	7	12	10	12	12	10	11	4	4	4	11	10	12	11
9	7	8	9	7	7	8	12	12	11	10	10	11	5	4	5	11	11	11	11
10	6	12	8	6	8	8	12	11	10	12	10	11	4	3	4	11	11	10	11
11	7	9	6	7	26	11	10	10	11	12	11	11	3	5	4	11	10	13	11
12	6	9	7	7	8	7	10	15	10	11	10	11	3	4	4	10	12	11	11
13	8	7	8	7	7	7	10	12	12	10	11	11	5	5	5	11	11	13	12
14	8	7	7	7	8	7	11	10	10	11	11	11	3	4	4	12	11	12	12
15	8	8	8	6	7	7	10	11	10	13	13	11	5	3	4	12	11	12	12

4.2.5 Evaluación de la ejecución

Una vez efectuada la simulación, se observa la semejanza existente entre los tiempos del proceso real de recepción de materia prima y el realizado por las estaciones. Los datos obtenidos de la simulación y los reales se muestran juntos en la siguiente tabla.

Tabla 14.
Tiempos del sistema real y la simulación en segundos.

No. de dato	Descarga de pieles del camión (s)		Revisión del estado de las pieles (s)		Regreso de pieles en mal estado al camión (s)		Clasificación de las pieles en buen estado por su tamaño (s)	
	Datos sistema real	Datos simu-lación	Datos sistema real	Datos simu-lación	Datos sistema real	Datos simu-lación	Datos sistema real	Datos simu-lación
1	6	10	12	11	4	5	10	12
2	7	7	12	11	4	5	10	11
3	8	7	13	10	4	5	10	11
4	7	9	13	11	4	4	10	11
5	7	8	13	12	4	5	10	11
6	10	7	12	11	4	4	10	11
7	9	7	12	11	4	4	10	12
8	6	7	12	11	4	4	10	11
9	7	8	21	11	4	5	9	11
10	10	8	12	11	4	4	10	11
11	6	11	12	11	4	4	9	11
12	9	7	12	11	4	4	10	11
13	7	7	21	11	4	5	9	12
14	10	7	12	11	4	4	10	12
15	5	7	12	11	4	4	10	12
Promedio	7	8	14	11	4	4	10	11
Moda	7	7	12	11	4	4	10	11
Desviación estándar	1,57	1,24	3,14	0,31	0,00	0,60	0,24	0,33

Como se observa, en los datos obtenidos de la simulación existe una variabilidad propia del funcionamiento de las estaciones, a pesar de que se

utilizó un modelo físico automatizado. Así, por ejemplo, se puede ver una mayor dispersión de los datos en la primera actividad del proceso (descarga de las pieles del camión), debida principalmente a que en la estación de distribución la ventosa del brazo neumático no sujeta adecuadamente la pieza en ciertas ocasiones y, al momento de colocarla en la estación de verificación, la suelta accidentalmente en una posición inadecuada, lo cual requiere de la intervención de un operador para acomodar la pieza y que esta pueda culminar su recorrido por las estaciones.

4.2.6 Validación

Para validar el modelo de simulación se tomó en cuenta dos aspectos: la similitud existente entre el proceso real y el realizado por las estaciones del sistema de producción modular, así como la comparación entre los valores de tiempo del sistema real y el simulado.

En cuanto al proceso, en la Figura 27 se presentan los diagramas de flujo del proceso real y del simulado. Como se observa, las actividades realizadas en ambos procesos son análogas.

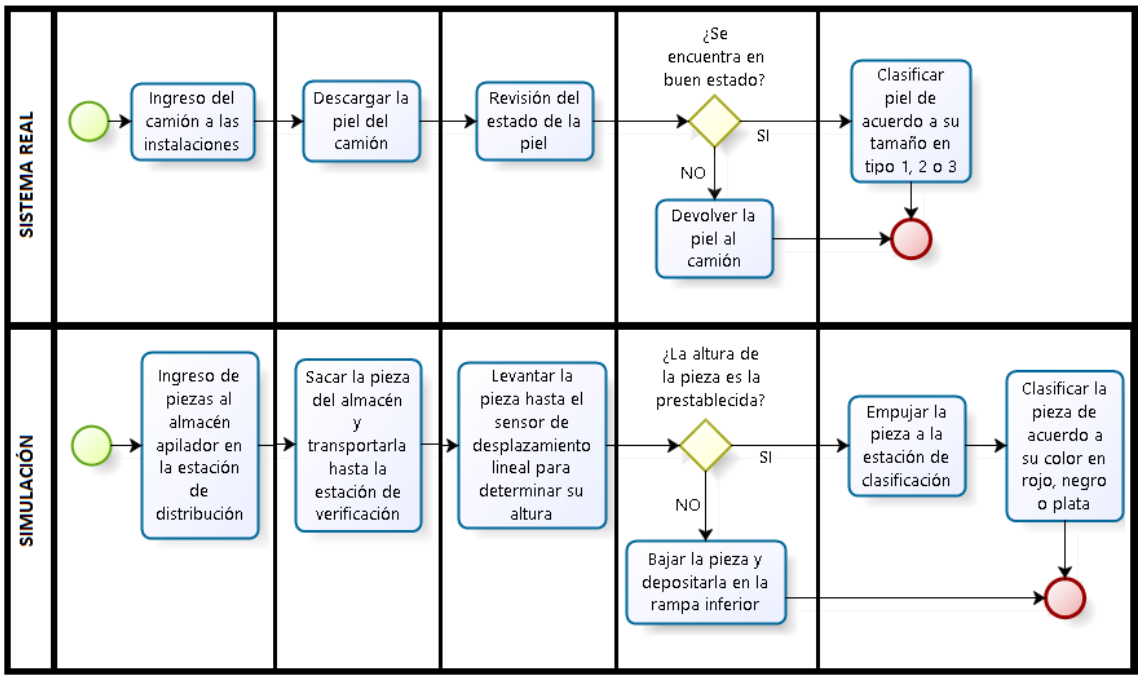


Figura 27. Diagramas de flujo del proceso real y el simulado.

Para comparar los valores de tiempo obtenidos en la simulación con los del sistema real, se calculó tanto para el sistema real como para la simulación el tiempo de ciclo de cada elemento de trabajo, mediante la suma de los tiempos promedio de cada una de las actividades del proceso. Estos datos se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 15.
Tiempo de ciclo del sistema real y simulado en segundos.

Elemento de trabajo		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Tiempo de ciclo (seg.)	Sistema real	33	33	34	33	34	36	35	33	42	36	32	35	41	36	32
	Simulación	38	34	33	35	35	33	33	34	34	33	37	33	35	33	34

Con estos tiempos de ciclo se realizó un histograma y se calculó los estadísticos descriptivos básicos para el proceso real y el simulado. Los resultados se muestran a continuación.

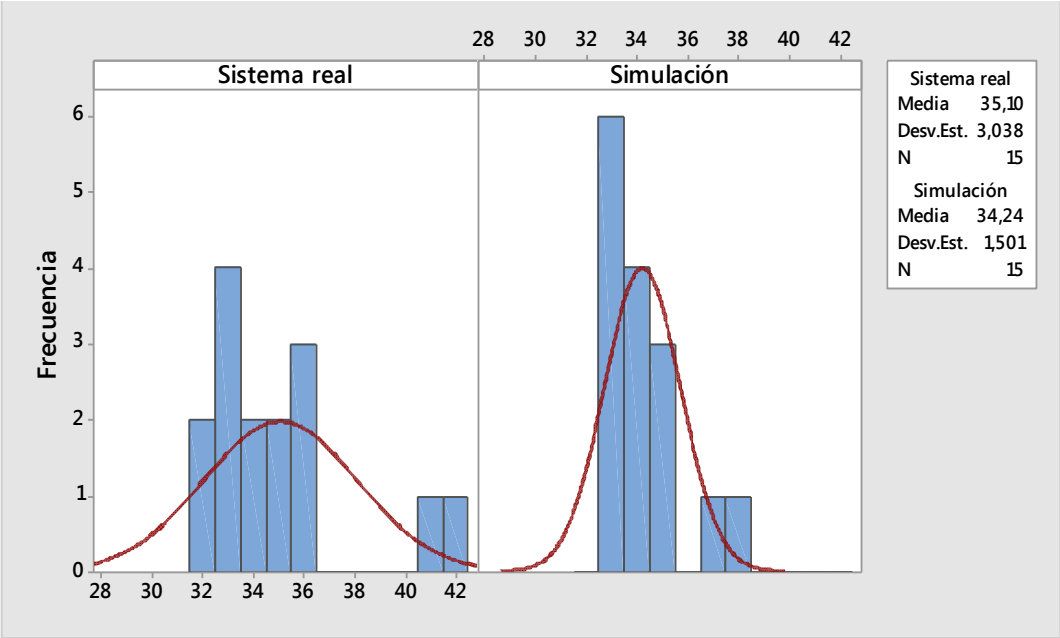


Figura 28. Histogramas del sistema real y de la simulación.

Variable	N	Media	Desv.Est.	Mínimo	Mediana	Máximo	Rango
Sistema real	15	35,101	3,038	31,704	34,482	41,814	10,110
Simulación	15	34,242	1,501	32,833	33,600	37,667	4,833

Figura 29. Estadísticos descriptivos del sistema real y la simulación.

Observando el histograma y los estadísticos descriptivos, se puede decir que el valor promedio del sistema real y el simulado son similares. Sin embargo, el proceso simulado presenta una menor dispersión de sus datos como lo muestran los valores de desviación estándar y rango.

Otro aspecto que se determinó fue si los datos obtenidos del proceso real y el simulado se ajustan a una distribución normal. Para ello se realizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov, que por contraste permite determinar si los datos obtenidos se ajustan a una distribución normal. Se utilizó este método ya que es válido sólo para variables aleatorias continuas y es útil cuando se tiene una muestra de datos pequeña.

Para este método se consideró como hipótesis nula Ho: los datos de tiempo analizados siguen una distribución normal, y como hipótesis alternativa H1: Los datos de tiempo analizados no siguen una distribución normal. Luego se introdujo los valores de tiempo en Minitab y se realizó la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov tanto para el sistema real como para el simulado, con un nivel de significancia del 5% (α=0.05). Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

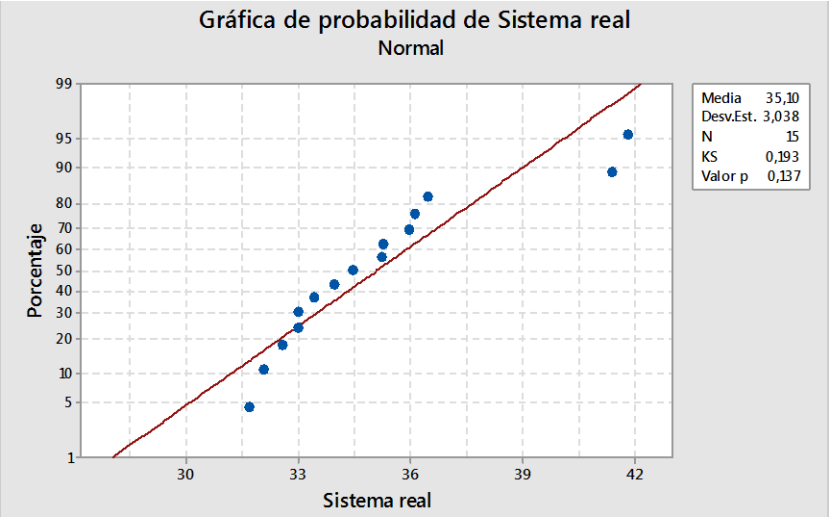


Figura 30. Gráfica de probabilidad del sistema real.

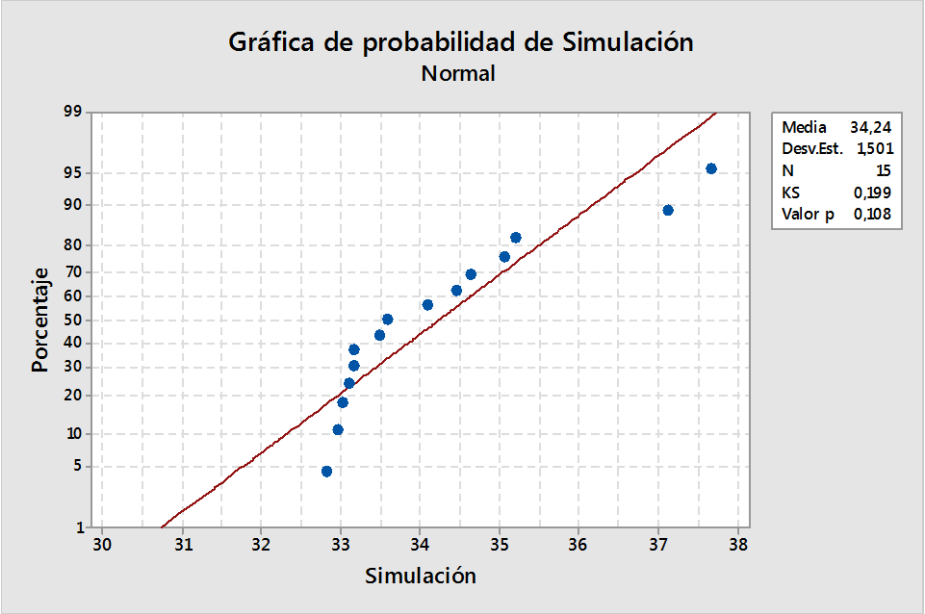


Figura 31. Gráfica de probabilidad de la simulación

Como se observa en el recuadro superior derecho de las gráficas, el “valor-p” obtenido para el sistema real es de 0,137 y para el sistema simulado es de 0,108, y en ambos casos es mayor a 0,05. Por tanto, no se tiene suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula, por lo que se la acepta y se concluye que los datos de tiempo tanto del sistema real como del simulado siguen una distribución normal.

En base a lo expuesto, se puede aceptar como válido el modelo de simulación ya que tanto el sistema real como el simulado presentan una distribución normal de sus datos, tienen estadísticos descriptivos semejantes, y procesos análogos.

4.2.7 Proponer un nuevo experimento

Como el objetivo propuesto para la simulación es determinar si la automatización del proceso de recepción de materia prima permitirá mejorar la productividad, el nuevo experimento se corrió con un sistema automatizado de manufactura flexible, el cual está representado por las estaciones del sistema de producción modular del laboratorio de Ingeniería en Producción Industrial de la Universidad de las Américas.

Para ejecutar el nuevo experimento fue necesario realizar un ajuste en el software de cada estación del sistema de producción modular, lo cual implicó retirar los temporizadores usados para realizar la simulación anterior y ajustar el programa, de tal forma que las estaciones cumplieran con los criterios de un sistema de manufactura flexible, es decir que tuvieran la capacidad de procesar diferentes tipos de piezas (no por lotes), aceptar cambios en el programa de producción, responder de forma inmediata a averías o errores del equipo en el sistema, y aceptar la introducción de nuevos diseños de piezas.

Por tanto, la simulación del proceso de recepción de materia prima de la “Curtiembre Z&H” se corrió a través de un sistema automatizado de manufactura flexible, ya sin la intervención de trabajadores y sus criterios de decisión. En este nuevo escenario, es el programa colocado en el PLC que controla el sistema de manufactura flexible el que toma las decisiones de cada actividad del proceso.

El sistema de manufactura flexible se programó para que realice las mismas actividades del proceso manual, con la ventaja de que ahora son los actuadores neumáticos los que manipulan las pieles y que las decisiones del estado bueno o malo de las pieles y su criterio de clasificación, están a cargo del software del PLC, a través de las medidas generadas por los sensores, reduciendo así la variabilidad que se tenía en estas actividades en el proceso manual. Además, el sistema automático tiene funciones adicionales como alarma por llenura de contenedores con pieles ya clasificadas, paro de emergencia y RESET de las estaciones.

De igual forma que en la simulación anterior, para este nuevo experimento se requirió energizar el tablero de control, cargar el nuevo programa en el PLC y colocar aleatoriamente en el almacén de apilado de la estación de distribución grupos de 5 piezas de forma continua por 15 veces. Esto con la finalidad de poder comparar los datos de tiempo tanto del sistema real simulado y del nuevo sistema automatizado simulado. Los datos obtenidos al correr la simulación con el sistema automatizado de manufactura flexible se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16.
Datos obtenidos en simulación del proceso automatizado.

REGISTRO DE TIEMPOS DE SIMULACIÓN PROCESO AUTOMATIZADO EN SEGUNDOS																			
Fecha:	24/01/2017					**Proceso:**	Recepción materia prima automatizado						**Observador:**		Carla Rivadeneira				
Estudio No.	2					**No. proceso**	2						**Hora de análisis:**		18:20 a 18:50				
Hoja No.	1 de 1					**Producto:**	Piel de vaca cruda												
Elemento	Descarga de pieles del camión						Revisión del estado de las pieles						Regreso de las pieles en mal estado al camión			Clasificación de las pieles en buen estado por su tamaño			
Corrida	1	2	3	4	5	Promedio	1	2	3	4	5	Promedio	1	2	Promedio	1	2	3	Promedio
1	10	4	6	5	5	6	2	3	2	3	3	3	1	1	1	4	3	3	3
2	5	4	5	6	6	5	2	3	3	1	1	2	2	1	2	3	2	4	3
3	6	5	4	4	4	5	3	3	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3
4	5	5	6	5	5	5	2	2	3	1	3	2	3	1	2	4	3	2	3
5	5	5	5	5	5	5	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	3	1	2
6	4	6	5	5	11	6	4	3	2	3	2	3	2	2	2	2	3	3	3
7	10	5	6	5	4	6	3	2	2	2	3	2	2	3	3	3	4	2	3
8	6	4	6	6	5	5	3	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	2	3
9	5	6	6	6	10	7	2	2	2	3	2	2	2	3	3	2	3	3	3
10	6	5	5	6	6	6	3	2	2	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3
11	4	6	6	6	5	5	3	3	2	2	2	2	2	3	3	2	3	3	3
12	5	6	5	6	4	5	3	2	2	3	3	3	2	1	2	2	3	3	3
13	11	5	4	6	5	6	3	3	3	2	2	3	2	2	2	2	3	2	2
14	4	6	6	6	6	6	3	3	3	1	3	3	3	2	3	2	4	3	3
15	6	6	6	5	11	7	2	3	2	2	4	3	2	2	2	3	3	2	3

Como se observa hay una reducción notable en los tiempos de realización de cada actividad en el proceso de recepción de materia prima. Esto es, se puede procesar un mayor número de pieles y con criterios de decisión mucho más precisos, lo cual acorta el tiempo de ciclo de este proceso. Las diferencias de la implementación de un sistema automatizado se muestran a continuación.

Tabla 17.
Comparación entre datos del sistema real, datos simulación sistema real y datos simulación sistema automatizado.

Elemento de trabajo		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Tiempo de ciclo	Datos sistema real	33	33	34	33	34	36	35	33	42	36	32	35	41	36	32
	Datos simulación sistema real	38	34	33	35	35	33	33	34	34	33	37	33	35	33	34
	Datos simulación sistema automatizado	13	12	12	12	11	14	14	12	14	14	13	12	13	14	14

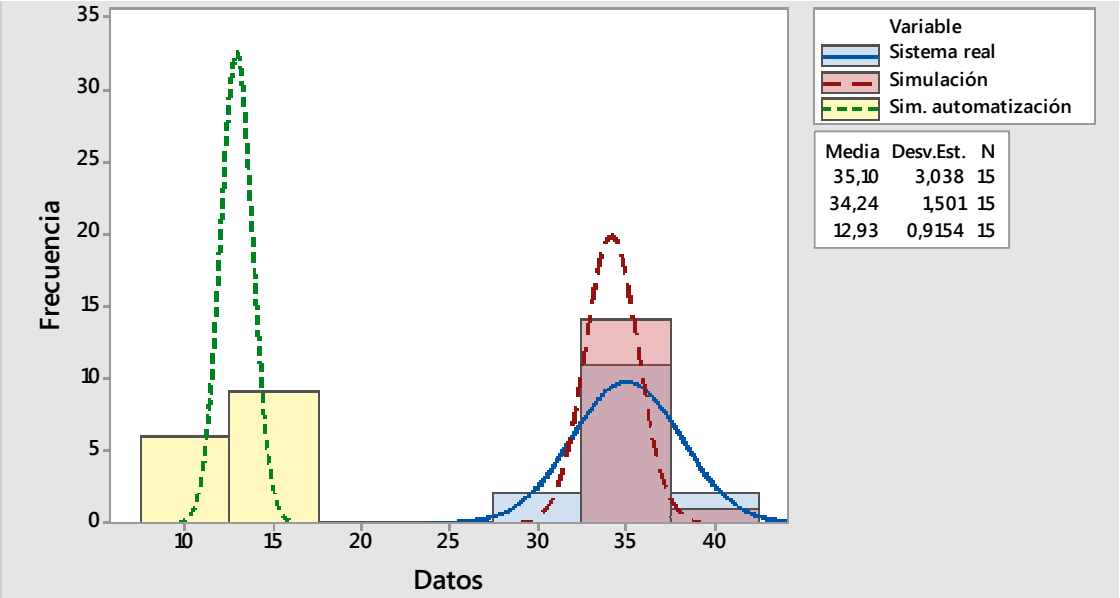


Figura 32. Histograma del sistema real, el sistema simulado en base al real y del sistema simulado automatizado.

Como se observa en los histogramas, con el sistema automatizado (color amarillo) el tiempo de ciclo se reduce prácticamente a la mitad y la variabilidad del proceso también es mucho menor.

4.3 Análisis de resultados

Al realizar la simulación del sistema real y de un posible sistema automatizado, se obtuvo una reducción en el tiempo de ciclo del proceso de recepción de materia prima con el sistema automatizado; esto debido a que se acortaron tiempos en las actividades del proceso, lo cual conduciría a un incremento en la productividad.

Para verificar la mejora existente en la producción, se calculó los índices de productividad parcial en ambas situaciones, tomando en cuenta dos aspectos: primero, la correcta determinación del sistema con sus entradas y salidas, y segundo, definiendo el tipo de índice de productividad a utilizarse.

El sistema para el cual se calculó la productividad parcial es el proceso de recepción de materia prima de la "Curtiembre Z&H", cuyas entradas son las pieles que trae el proveedor y dos trabajadores encargados de todo el proceso, y su salida es una piel en buen estado clasificada de acuerdo a su tipo. Al ser el tiempo la variable que permitió realizar las simulaciones, el cálculo de la productividad parcial se realizó en base a los tiempos de ciclo obtenidos de la simulación, tanto en el sistema real como en el automatizado, y se tomó como salida una piel en buen estado clasificada para ambos casos.

Para el caso del sistema real simulado, se utiliza el índice de productividad de la mano de obra puesto que son los operarios quienes manipulan las pieles y realizan el trabajo, y se lo calcula de la siguiente manera:

$$Índice\ productividad\ mano\ de\ obra - simulación\ sistema\ real = \frac{Unidades\ producidas}{Tiempo\ total}$$

$$Índice\ productividad\ mano\ de\ obra - simulación\ sistema\ real = \frac{1\ piel}{34.24\ segundos\ hombre}$$

$$Índice\ productividad\ mano\ de\ obra - simulación\ sistema\ real = 105.14\ \frac{pieles}{hora\ hombre}$$

Lo cual da como resultado una capacidad para procesar 105.14 pieles por cada hora-hombre.

Por otro lado, si la empresa llegara a automatizar su proceso de recepción de materia prima, se tendría una máquina realizando el trabajo de los operarios, con lo cual el índice de productividad a calcularse es el siguiente:

$$Índice\ productividad\ sistema\ automatizado - simulación = \frac{Unidades\ producidas}{Tiempo\ total}$$

$$Índice\ productividad\ sistema\ automatizado - simulación = \frac{1\ piel}{12.93\ segundos\ máquina}$$

$$Índice\ productividad\ sistema\ automatizado - simulación = 278.42\ \frac{pieles}{hora\ máquina}$$

Lo cual da como resultado una capacidad para procesar 278.42 pieles por hora-máquina.

Como se observa, existe un incremento notable en la productividad cuando se reemplaza a los operarios con una máquina, se pasa de procesar 105.14 pieles/hora-hombre a 278.42 pieles/hora-máquina, lo cual corresponde a un incremento del 164.8% en la capacidad de procesamiento de pieles, debido a que la automatización reduce los tiempos en las actividades del proceso.

Este incremento en la productividad también se lo puede demostrar analizando los costos para cada caso. Para ello, se debe considerar que en el sistema real se analiza la mano de obra, mientras que en el posible sistema automatizado se analiza la maquinaria, la energía para ponerla en funcionamiento y el personal para supervisarla.

En la tabla siguiente se presenta el costo por hora de la mano de obra directa que se ocupa en el proceso de recepción de materia prima actualmente.

Tabla 18.
Costo por hora - mano de obra sistema real.

Costo mano de obra sistema real – 2 trabajadores		
Rubro	**Valor por trabajador**	**Valor por dos trabajadores**
Sueldo básico	$375,00	$750,00
Décimo tercero mensualizado	$31,25	$62,50
Décimo cuarto mensualizado	$31,25	$62,50
Aportación patronal al IESS (11,15%)	$41,81	$83,63
	Total mensual	$958,63
	Total por hora	$5,99

En cambio, para el caso de una posible automatización del proceso de recepción de materia prima se ha considerado la posible implementación de un sistema automatizado más simple que el de las estaciones del sistema de producción modular. En este sistema se emplearía un operador para supervisar el proceso y colocar las pieles en el sistema; contaría con pinzas sujetadoras, una riel (para llevar las pieles desde el lugar de descarga hasta el lugar de clasificación y de regreso), un sistema de visión artificial y un sistema de control automatizado con sus respectivos sensores y actuadores.

El funcionamiento del sistema se inicia cuando el operador sujeta una piel en las pinzas montadas sobre la riel, sigue su desplazamiento hasta ubicarse en posición para ser analizada por el sistema de visión artificial, el cual decide si la piel se encuentra en buen o mal estado y determina su clasificación en tipo 1, 2 o 3 de acuerdo a su tamaño. Entonces, una vez decidido el estado y tipo, la piel continúa su recorrido hasta ser colocada en el lugar correspondiente a su clasificación, o devuelta al camión en caso de estar en mal estado.

Se estima que la inversión aproximada para implementar este sistema sería de aproximadamente $50.000 entre materiales, diseño de ingeniería, cambios en infraestructura, instalación del sistema y capacitación al personal sobre el uso y operación. A más de esta inversión inicial, para este nuevo escenario se tomará en cuenta los costos de mano de obra directa, la utilización de energía eléctrica para el funcionamiento del sistema, y el hecho de que la recepción de la materia prima bajo las condiciones actuales se realizaría por un máximo de una hora a la semana.

Por tanto, para el sistema automatizado mencionado cuya inversión inicial se estima en $50.000 con un tiempo de vida útil de 10 años, se calcula que su depreciación anual es de $5.000 ($50.000/10 años) y su depreciación mensual es de $416.67 ($5.000/12 meses). Adicionalmente, para operar y monitorizar el sistema automatizado propuesto se requiere 1 operario, y un 10% de consumo de energía eléctrica adicional a la facturación mensual de la curtiembre; de acuerdo con información proporcionada por la empresa, se cancela por concepto de energía eléctrica un promedio de $300 mensuales, es decir que el

costo por el consumo de energía para el sistema automatizado sería de $30 aproximadamente. En base a lo expuesto en la siguiente tabla se calcula el costo total por hora que implicaría el posible sistema automatizado a implementarse.

Tabla 19.
Costo por hora sistema automatizado.

Sistema automatizado	
Rubro	**Valor mensual**
Trabajador con sueldos y aportación patronal	$479,31
Sistema automatizado	$416,67
Consumo de energía	$30,00
Total mensual	$925,98
Total por hora	$5,79

Como se observa, existe una reducción del costo por hora en el proceso de recepción de materia prima al utilizar un sistema automatizado. Sin embargo, vale recalcar que para implementar un sistema automatizado es importante realizar un estudio de viabilidad de esa implementación, ya que se debe tomar en cuenta aspectos técnicos (ciclos de trabajo, variables del proceso, características de implantación como áreas y alturas, características del producto, modificaciones a las instalaciones, etc.), económicos (incremento de mano de obra calificada, aumento del consumo de energía, reducción de mano de obra directa, etc.) y laborales (capacitación, traslados, puestos que se mantienen, etc.).

Por tanto, la recomendación para la “Curtiembre Z&H” es que si bien automatizar su proceso de recepción de materia prima le permitirá incrementar notablemente su productividad, se debe realizar un estudio más detallado sobre su viabilidad, tomando en cuenta factores importantes como las restricciones de ingreso de pieles (100 semanales), el tiempo de utilización del sistema automatizado a implementarse, los cambios en personal capacitado, por mencionar algunos. Todo lo que, junto con el análisis de la simulación, será un aspecto decisivo para emprender la automatización del proceso.

Ahora bien, por lo observado en el desarrollo de este proyecto de titulación, la simulación es una herramienta de análisis útil para la toma de decisiones, pues permite mediante la utilización de un método debidamente estructurado (planteamiento del problema, elaboración del modelo de simulación, especificación de variables y parámetros, ejecución de la simulación, evaluación de resultados y validación) obtener una lectura del estado actual del proceso de recepción de materia prima de la "Curtiembre Z&H" y mostrar cómo cambiaría el mismo si se lo automatizara, todo esto sin parar la producción ni realizar una alta inversión.

4.4 Estandarización de procedimientos para realizar prácticas de laboratorio

A continuación se expone la práctica de laboratorio que permitirá a los estudiantes, de la carrera de Ingeniería en Producción Industrial de la Universidad de las Américas, utilizar las estaciones del sistema de producción modular como material didáctico para realizar simulaciones físicas de procesos productivos, conocer los componentes de un sistema de manufactura flexible y reforzar sus conocimientos en simulación de procesos y automatización industrial. La práctica formará parte de la materia de Automatización Industrial y Robótica, que se dicta en el octavo semestre de la carrera, cuya guía práctica de laboratorio se presenta a continuación:

Tabla 20.
Práctica de laboratorio estandarizada

ASIGNATURA:	**Automatización industrial y robótica**		**PARALELO:**	**PERÍODO:**
FECHA:	**PRÁCTICA No.: 01**	**SESIONES: 2**	**TEMA:** Simulación de procesos productivos en un modelo físico.	

1.- OBJETIVOS

Objetivo general:

Simular el proceso de recepción de materia prima de una empresa de curtiembre, aplicando la metodología de simulación y utilizando las estaciones

del sistema de producción modular como un modelo de simulación físico análogo.

Objetivos específicos:

- Identificar los tipos de modelo de simulación existentes (consulta y lectura).
- Familiarizar a los estudiantes con las estaciones del sistema de producción modular y los sistemas de automatización en la industria.
- Aplicar la metodología de simulación en base a un caso de estudio.
- Observar los beneficios de los sistemas de manufactura flexible.
- Analizar los resultados obtenidos de la simulación.

2.- RESULTADOS DE APRENDIZAJE ESPERADOS

Adquirirás las siguientes habilidades:

1. Abstraer en un modelo de simulación las características de un sistema real.
2. Aplicar una metodología de simulación en un modelo físico análogo.

3.- MATERIALES/RECURSOS Y EQUIPOS

Para realizar la práctica de laboratorio se requiere lo siguiente:

- Estaciones de distribución, verificación y clasificación del sistema de producción modular.
- Tablero de control de las estaciones del sistema de producción modular energizado.
- Cable de red.
- Computador con el software TIA portal (TRIAL).
- Programas realizados para las estaciones del sistema de producción modular.
- Cronómetro para tomar datos.

4.- ACTIVIDAD FORMATIVA

Prerrequisitos

Antes de empezar este ejercicio, deberás dominar lo siguiente:

- Conocer los principales componentes de las estaciones del sistema de producción modular y el proceso que realizan.
- Investigar los tipos de modelo de simulación existentes.
- Revisar el caso de estudio propuesto sobre la “Curtiembre Z&H”
- Revisar cómo cargar al PLC desde un computador el programa creado para las estaciones del sistema de producción modular.
- Conocer la metodología de simulación a aplicarse.

Descripción de la actividad:

A. Analizar la información proporcionada para el caso de estudio en cuanto a diagrama de flujo del proceso de recepción de materia prima, características de las entradas y salidas del proceso, tiempos del proceso.
B. Revisar las analogías propuestas para representar el sistema del caso de estudio con las estaciones del sistema de producción modular (modelo).
C. Cargar en el PLC el programa con nombre “Simulación sistema actual”, de acuerdo con las siguientes instrucciones:

HARDWARE

1. Encender la fuente DC, sin cables conectados en sus tomas, y verificar que en las 2 tomas de voltaje variable marquen 24VDC. Luego conectar los cables banana provenientes del tablero de control en las tomas de voltaje variable. Recordar que el cable color rojo es positivo, y el de color negro es negativo.

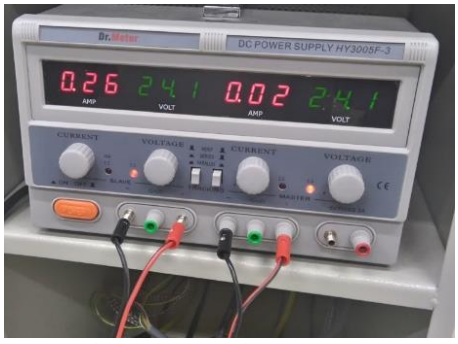


Figura 33. Fuente DC conectada adecuadamente.

2. Verificar que el LED de diagnóstico del módulo CM1243-5 PROFIBUS DP MASTER se ponga de color tomate. Entonces conectar el cable de 110V AC a una toma de energía para energizar los demás componentes del tablero y las estaciones.

Figura 34. Energización de componentes del tablero de control y estaciones.

3. Observar si las luces indicadoras del PLC, sus módulos PROFIBUS y AS-i, y la fuente AS-i POWER se tornan de color verde.

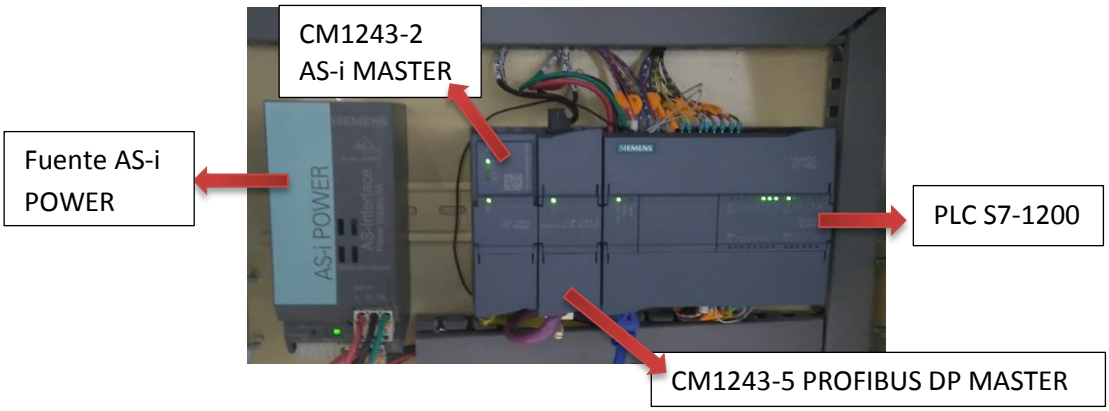


Figura 35. Componentes del tablero de control.

4. Conectar un extremo del cable de red al puerto PROFINET (LAN) del PLC y el otro extremo al puerto de RED del computador ubicado en la parte posterior del computador.

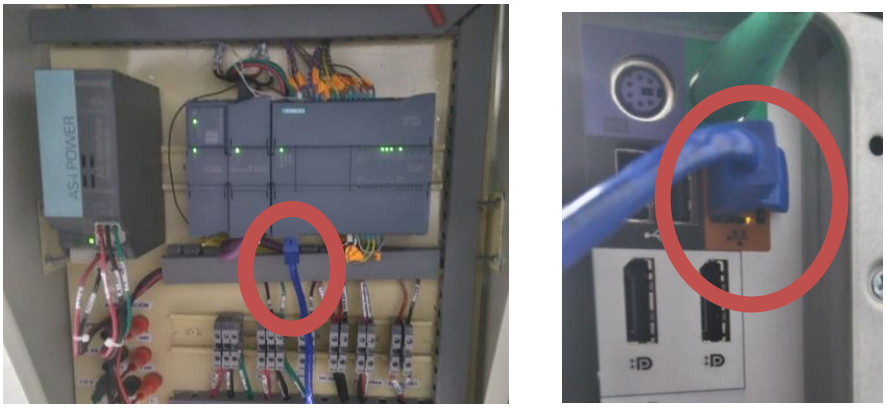


Figura 36. Conexión cable de red.

SOFTWARE

1. En el escritorio de la computadora del laboratorio, se encuentra la carpeta “Programas simulación en estaciones”, la cual contiene dos carpetas: la del programa para simular el sistema actual, y la del programa para la simulación del sistema automatizado.

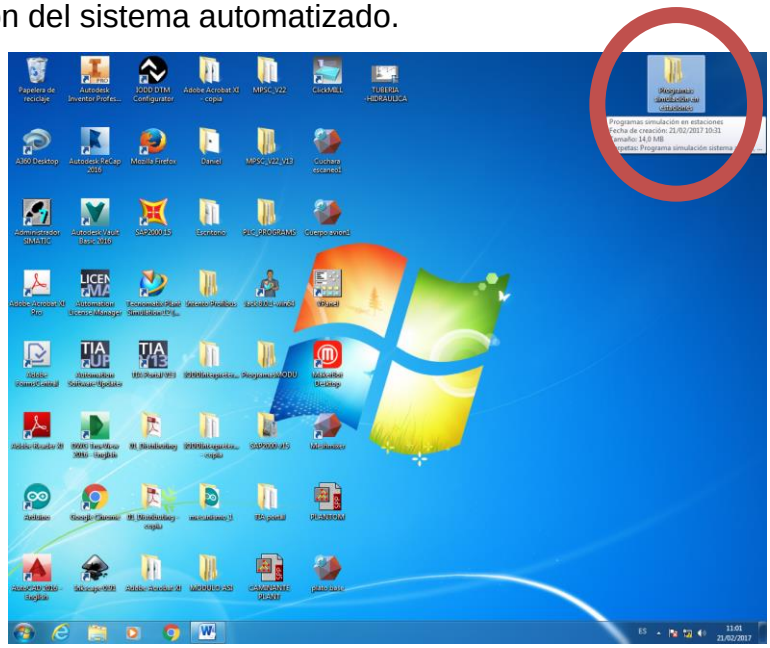


Figura 37. Localización de la carpeta “Programas simulación en estaciones”.

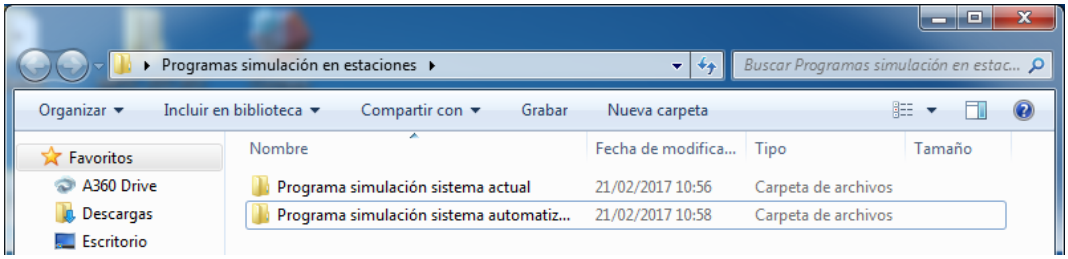


Figura 38. Contenido de la carpeta "Programas simulación en estaciones".

2. Abrir la carpeta “Programa simulación sistema actual”, seleccionar el programa “Simulación sistema actual” y dar doble click.

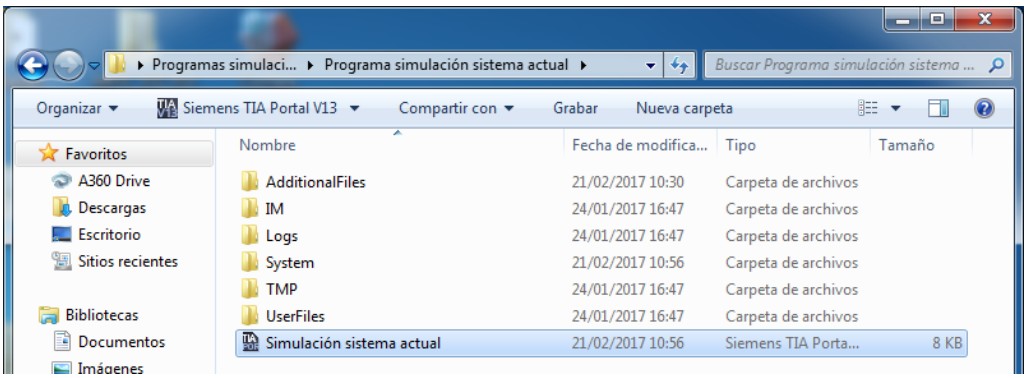


Figura 39. Localización programa "Simulación sistema actual".

3. Se despliega una pantalla en TIA PORTAL con el nombre del programa “Simulación sistema actual” subrayado. Dar clic en OPEN.

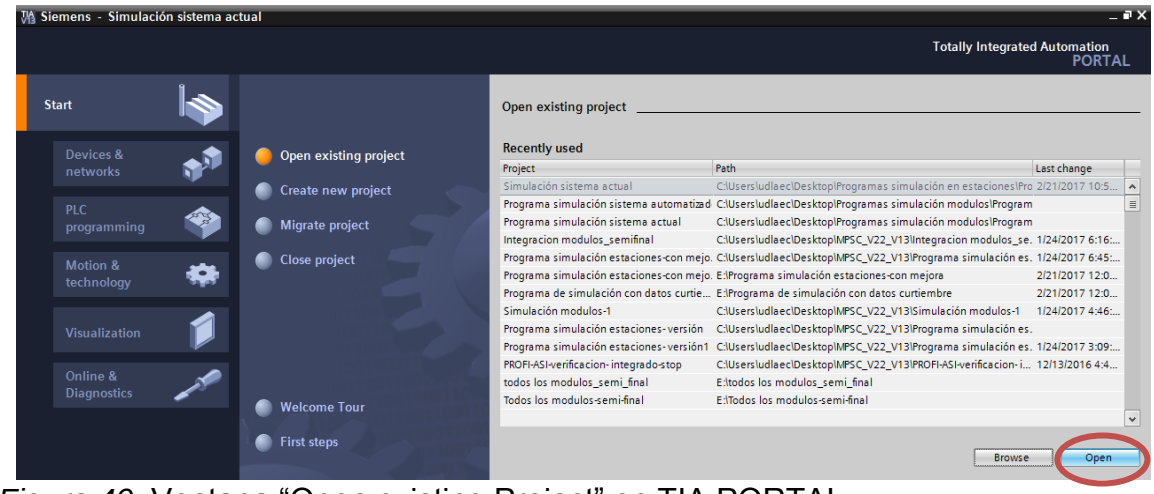


Figura 40. Ventana “Open existing Project” en TIA PORTAL.

4. Aparece una ventana, en la cual se selecciona la opción “Write PLC program”.

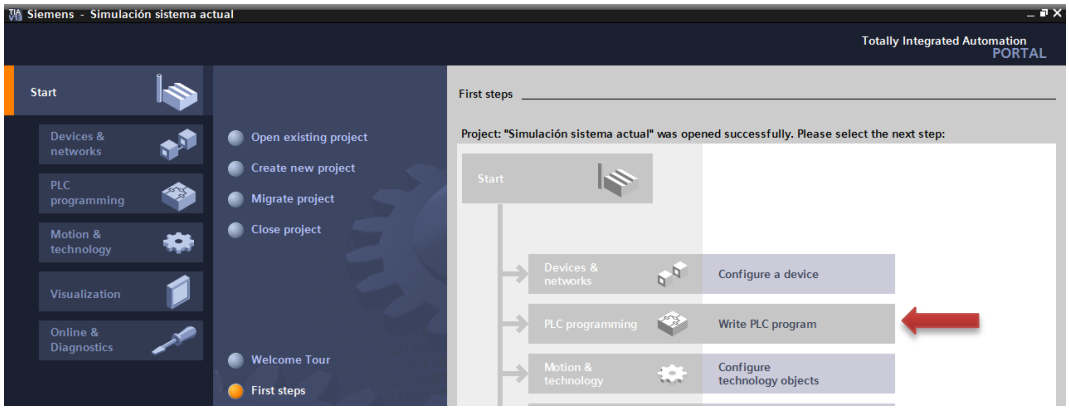


Figura 41. Ventana en TIA PORTAL para seleccionar la opción escribir programa.

5. En la ventana que se despliega a continuación se observan tres bloques (uno por cada estación), que forman parte del programa general que controla las estaciones. Dar doble clic sobre el bloque color morado que tiene por título “Clasificación_Profibus”.

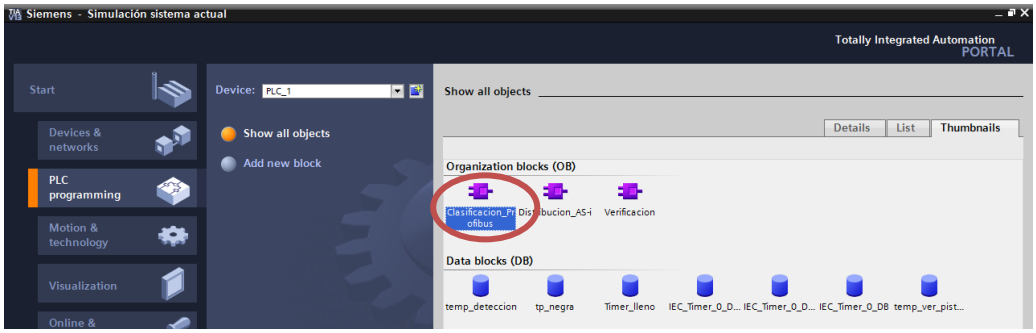


Figura 42. Bloques de programa que conforman el programa general.

6. Se despliega en la parte central de la pantalla la ventana “bloque de programas” en que se observa el código programado para ese bloque, y a la izquierda la ventana “árbol de proyecto” que contiene la carpeta “Program blocks” donde se encuentran los bloques del programa general a cargarse en el PLC. Los bloques son Clasificación_Profibus, Distribución_AS-i y Verificación.

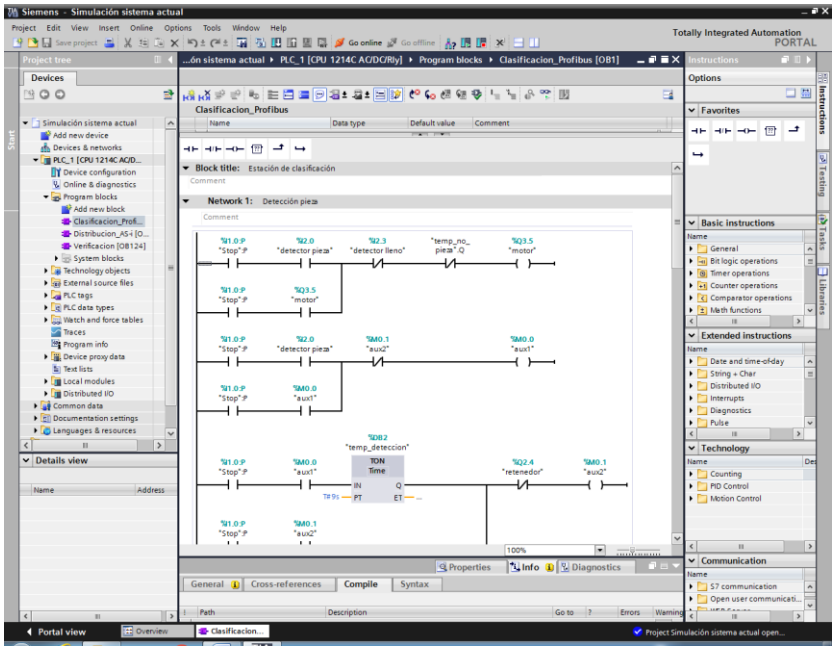


Figura 43. Pantalla con principales ventanas de TIA PORTAL.

7. En la parte superior de la pantalla se tiene el ícono “Download to device”. Dar clic sobre el ícono para descargar el programa en PLC.

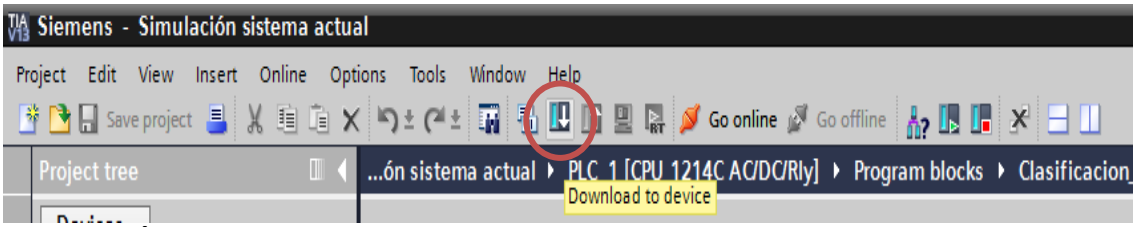


Figura 44. Ícono para descargar programa al PLC.

8. Aparece la ventana para realizar configuraciones de comunicación entre la computadora y el PLC. Seleccionar en “Type of the PG/PC interface” la opción “PN/IE”, y en “PG/PC interface” la opción “Intel(R) Ethernet connection I217-LM”. Luego presionar el botón “START SEARCH”.

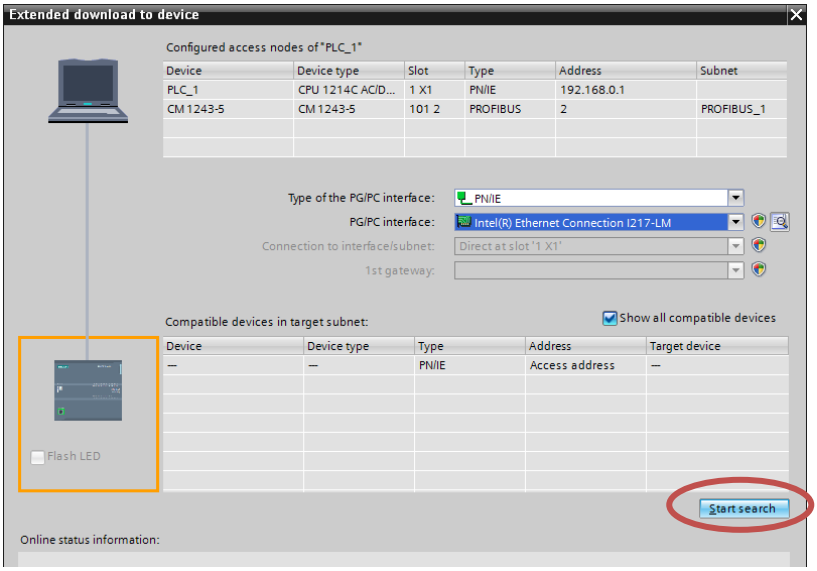


Figura 45. Ventana para configurar la comunicación entre PLC y computador.

9. Entonces, el software TIA PORTAL se comunica con el PLC, lo cual se puede observar en la ventana ya que el software reconoce el PLC, los módulos PROFIBUS y AS-i, y se encuentra listo para cargar el programa. Para cargar el programa se debe dar clic en el botón “LOAD”.

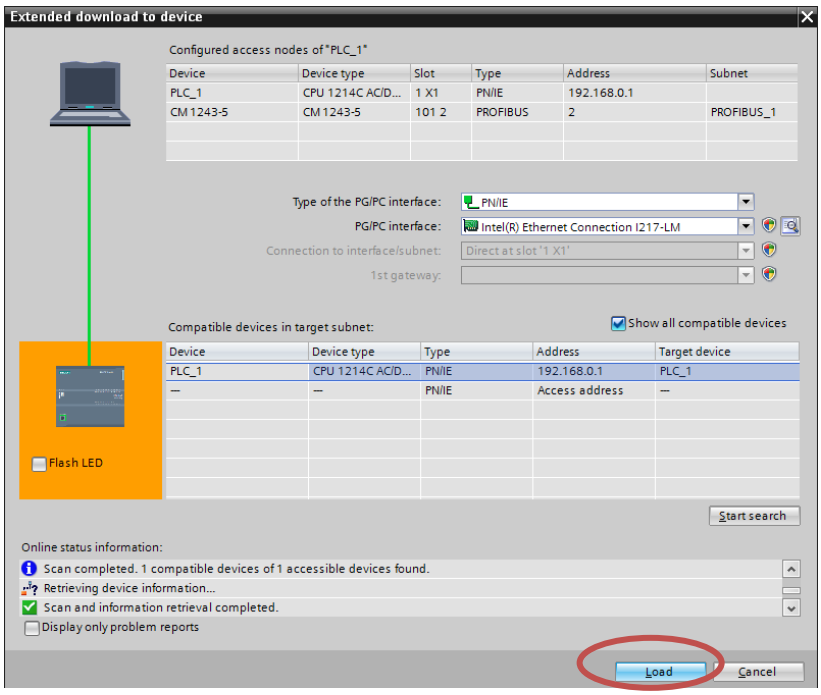


Figura 46. Ventana cuando TIA PORTAL se comunica adecuadamente con el PLC

El programa empieza a descargarse en el PLC, y se observa la siguiente pantalla.

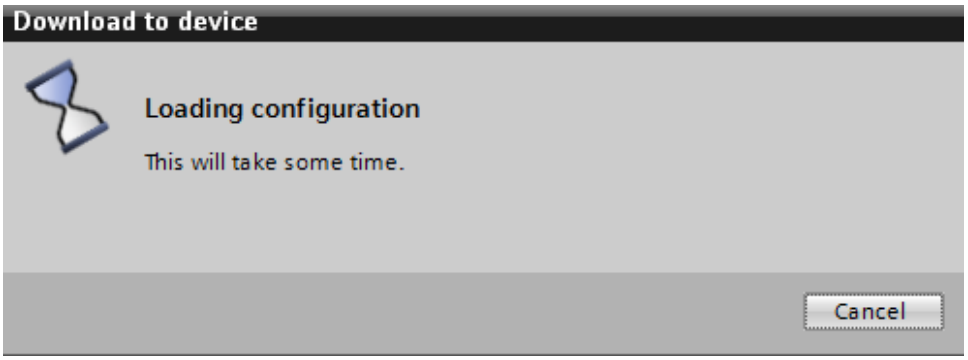


Figura 47. Indicación de que se está descargando el programa al PLC.

Cuando esta última pantalla desaparece, el programa se ha cargado de manera exitosa en el PLC y, por tanto, los módulos se encuentran listos para entrar en funcionamiento y realizar la simulación.

NOTA: Seguir los mismos pasos para cargar el programa del sistema automatizado. Seleccionar “Programas simulación en estaciones” (carpeta) -> “Programa simulación sistema automatizado” (carpeta) -> “Simulación sistema automatizado” (programa).

D. Observar el comportamiento del sistema actual simulado y tomar datos de tiempos de las actividades que se realizan en el proceso.
E. Cargar el PLC con el programa “Simulación sistema automatizado”, observar los resultados y tomar tiempos de las actividades del proceso.
F. Concluir sobre los resultados obtenidos en ambos casos, analizando los problemas que presenta el proceso actual, la productividad y la validez de los datos obtenidos y del modelo.

5.- CASO DE ESTUDIO

La “Curtiembre Z&H” se dedica a la transformación de pieles de ganado vacuno en cuero; produce bajo pedido cuero en color negro, café o abano, dependiendo de la necesidad de sus clientes, que mayoritariamente son fabricantes de calzado escolar. Los productos principales son: wet blue (cuero

casi procesado) y cuero cross color negro. En la empresa laboran 12 empleados que no tienen un puesto o actividad fijos, sino que rotan según las necesidades de producción y de acuerdo a los pedidos de los clientes.

Actualmente la empresa enfrenta la decisión de automatizar su proceso de recepción de materia prima y mejorar así la productividad de este proceso. Para ello recurre a la simulación como una herramienta que le ayude a tomar esta decisión.

La recepción de materia prima se realiza los días lunes entre 7:00 y 8:00 de la mañana, cuando el camión del proveedor ingresa a la zona de descarga, y deja un promedio de 100 pieles, provenientes de la región Sierra. Dos trabajadores se encargan del proceso de recepción: descargan las pieles del camión, luego inspeccionan visualmente el estado de cada una para verificar que no presenten cortes, garrapatas o gusanos, y determinan si están en buen o mal estado. Las pieles que se encuentran en buen estado, de acuerdo al criterio de los trabajadores, se clasifican por su tamaño en tres: tipo 1 (340 dm2), tipo 2 (314 dm2) o tipo 3 (288 dm2); mientras que las pieles en mal estado son devueltas al camión.

Por tanto, la entrada del proceso lo constituyen las pieles que ingresan a la empresa los días lunes, y la salida son las pieles clasificadas en tipo 1, 2 o 3. El tiempo que toma realizar cada una de las actividades, de acuerdo con la empresa, son los siguientes:

Tabla 21.
Tiempo por actividad del proceso

TIEMPO POR PIEL PROCESADA				
Actividad del proceso	Descarga de pieles del camión	Revisión del estado de las pieles	Regreso de las pieles en mal estado al camión	Clasificación de las pieles en buen estado por su tamaño
Tiempo en segundos	7	12	4	10

Para simular el sistema real se requiere realizar un modelo de simulación. Para el caso de esta práctica, será un modelo físico análogo al real, utilizando las

estaciones de distribución, verificación y clasificación del sistema de producción modular, junto con las siguientes analogías entre el proceso realizado por el sistema real y el realizado por las estaciones.

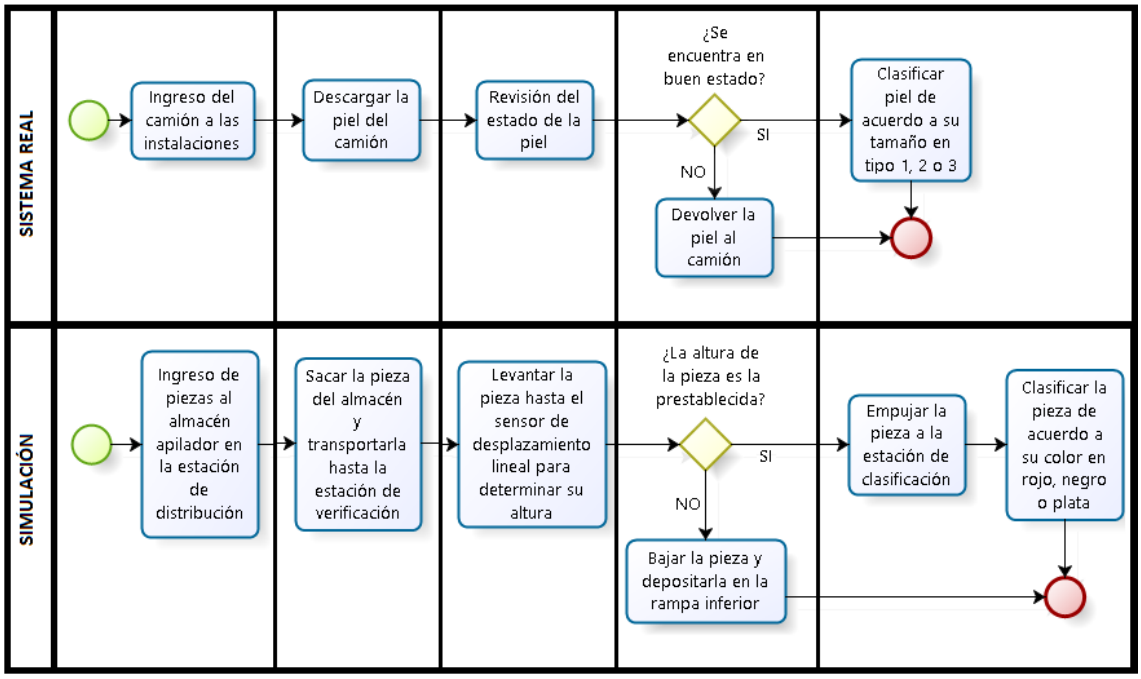


Figura 48. Analogías entre el proceso del sistema real y el proceso realizado por las estaciones.

Tabla 22.
Analogías entre el sistema real y el modelo de simulación (estaciones).

	SISTEMA REAL	MODELO DE SIMULACIÓN
Materia prima	Piel tipo 1	Ficha estándar de color negro
	Piel tipo 2	Ficha estándar de color plata
	Piel tipo 3	Ficha estándar de color rojo
	Piel en mal estado	Ficha pequeña de color negro
Operativo	Operario descargando la piel de vaca.	Brazo neumático con ventosa del módulo de distribución.
	Operario evaluando estado de la piel.	Sensor de desplazamiento lineal de la estación de verificación.
	Operario clasificando la piel en buen o mal estado.	Estación de clasificación.
	Operario devolviendo la piel en mal estado al camión.	Rampa inferior de la estación de verificación.
Criterio de decisión	Decisión de si la piel es buena o mala	Decisión de si la altura de la pieza es o no la prestablecida.

Basándose en los tiempos y las analogías presentadas, se programó las estaciones de distribución, verificación y clasificación del sistema de producción modular para que pudieran simular el proceso de recepción de materia prima, bajo las condiciones actuales de funcionamiento y para el caso de una posible automatización del proceso. Para realizar la presente práctica se sugiere utilizar la metodología de simulación que se presenta a continuación.

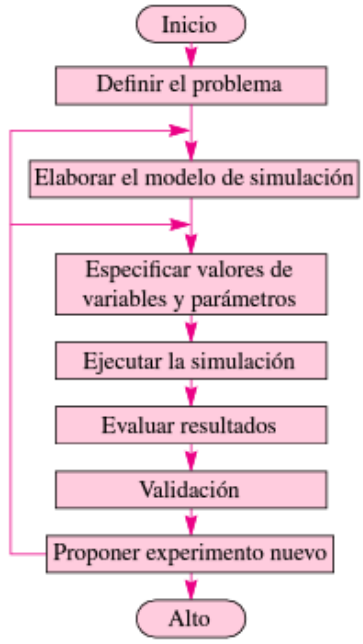


Figura 49. Fases principales de un estudio de simulación.
Tomado de: Chase y Jacobs, 2014, p. 652.

6.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chase, R. y Jacobs, F. (2014). *Administración de operaciones Producción y cadena de suministros* (Decimotercera ed.).
- Ebel, F. y Pany, F. (2006). *Sorting station Manual*. Dekendorf. Festo Didactic.
- Ebel, F. y Pany, F. (2015). *Distributing station Manual*. Festo Didactic.
- Ebel, F. y Pany, F. (2015). *Testing station Manual*. Dekendorf. Festo Didactic.
- Piera, M., Guasch, T., Casanovas, J. y Figueras, J. (2013). *Cómo mejorar la logística de su empresa mediante la simulación.*

- Rodríguez, F. y Delgado, R. (2009). *Técnicas y modelos de simulación de sistemas.*

7.- MECANISMO DE EVALUACIÓN

Cada grupo (de 3 personas) presentará un informe realizado en computadora que contenga:

- Comparación entre el proceso que realiza el sistema real y el realizado por las estaciones. (Análisis de las analogías del modelo de simulación).
- Resumen de los aspectos que se tomaron en cuenta al realizar cada uno de los pasos de la metodología de simulación sugerida.
- Cuadro con las definiciones operacionales (criterios para decidir el inicio y el fin de la toma de tiempos para cada actividad) utilizadas para tomar el tiempo durante las simulaciones.
- Cuadro con los valores de tiempos tomados durante la simulación para cada actividad del proceso de recepción de materia prima. Tanto para la simulación del sistema real como para la simulación del sistema automatizado.
- Conclusiones y recomendaciones.

A más de ello, deberá contestar las siguientes preguntas:

1. ¿Es conveniente para una empresa, como la del caso de estudio, automatizar su proceso de recepción de materia prima? Justifique en base a datos y la simulación realizada.

2. ¿Se puede calcular la productividad parcial para el sistema real y el sistema automatizado en base a la simulación? De ser la respuesta afirmativa, calcule las productividades parciales.

3. A su criterio, ¿considera usted que es mejor realizar una simulación con un modelo físico o con un modelo por computadora? Justifique su respuesta.

Se evaluará el informe escrito sobre un puntaje de 10 puntos y el día de la presentación escrita del informe se realizarán preguntas sobre el informe a cada participante también sobre 10 puntos. Se promediará las notas obtenidas para la nota final de la práctica.

8.- ANEXOS

A continuación, se presentan los anexos que facilitarán la realización de la práctica:

ANEXO A: Estaciones del sistema de producción modular y sus componentes.

ANEXO B: Registro de tiempos en la realización de la simulación.

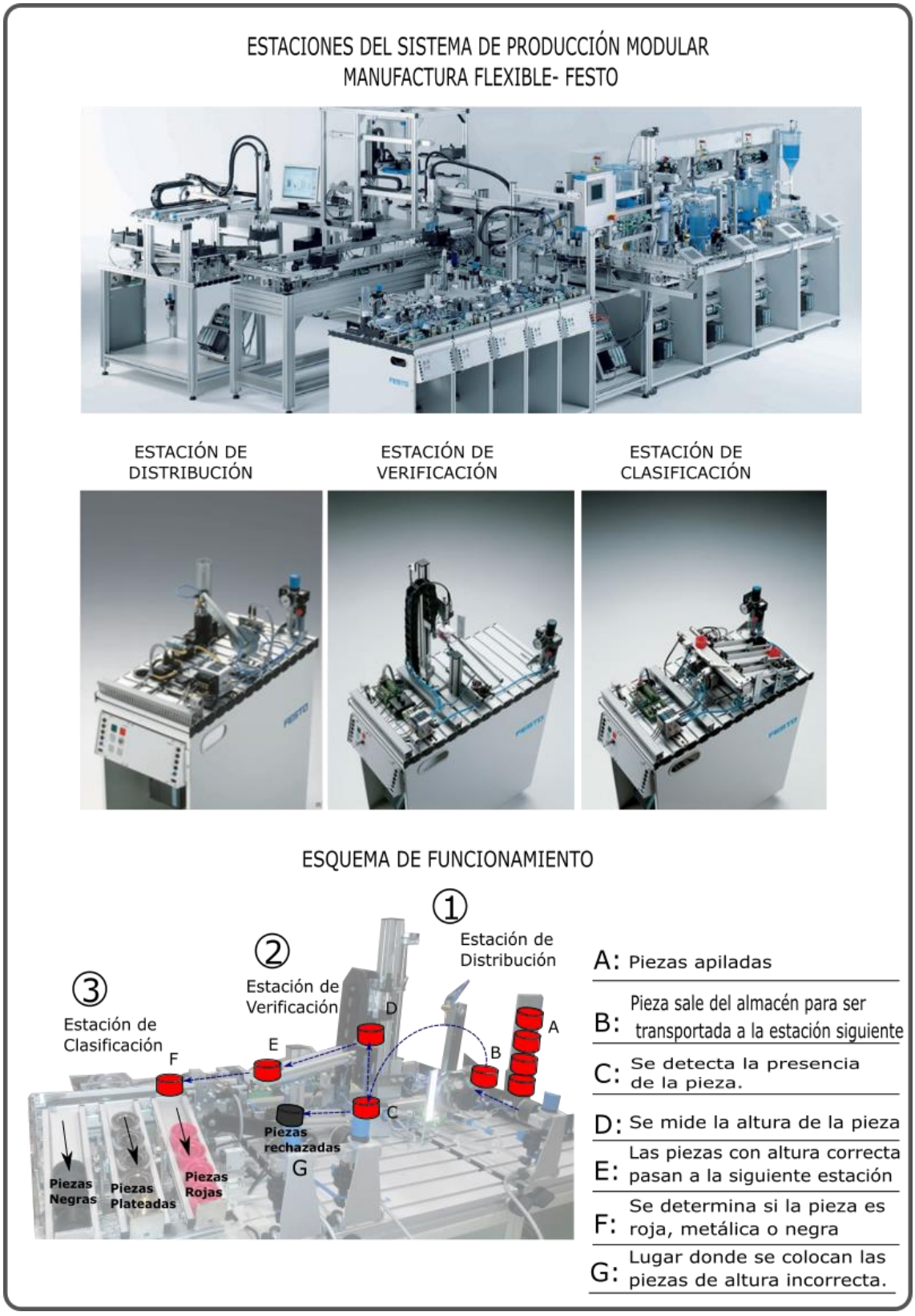


Figura 50. ANEXO A-1: Estaciones del sistema de producción modular y sus componentes.
Adaptado de: FESTO Didactic, 2011, pp. 286-390.

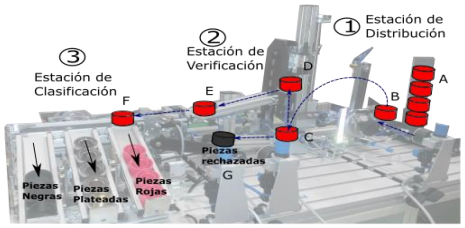
Figura 51. Anexo A-2: Estaciones del sistema de producción modular y sus componentes.
Adaptado de: FESTO Didactic, 2011, pp. 286-390.

REGISTRO DE TIEMPOS PARA REALIZAR LA SIMULACIÓN

FECHA:		**PROCESO:**		**OBSERVADOR:**	
ESTUDIO No.:		**PROCESO No.:**			
HOJA No.:		**PRODUCTO:**		**HORA DE ANÁLISIS:**	

SIMULACIÓN SISTEMA REAL

SIMULACIÓN SISTEMA AUTOMATIZADO



- Cargar en el PLC programa "Simulación sistema actual".
- Colocar 5 fichas en el almacén apilador (1 roja estandar, 1 plateada estandar, 1 negra estandar y 2 negras pequeñas).
- Iniciar la secuencia de simulación y tomar datos de tiempo.

- Cargar en el PLC programa "Simulación sistema automatizado".
- Colocar 5 fichas en el almacén apilador (1 roja estandar, 1 plateada estandar, 1 negra estandar y 2 negras pequeñas).
- Iniciar la secuencia de simulación y tomar datos de tiempo.

ACTIVIDAD	PIEZA 1	2	3	4	5	PROMEDIO
Descarga de pieles del camión						
Revisión del estado de las pieles						
Regreso de pieles en mal estado al camión						
Clasificación de pieles por su tamaño						

ACTIVIDAD	PIEZA 1	2	3	4	5	PROMEDIO
Descarga de pieles del camión						
Revisión del estado de las pieles						
Regreso de pieles en mal estado al camión						
Clasificación de pieles por su tamaño						

Figura 52. ANEXO B: Registro de tiempos en la realización de la simulación.

5. CAPÍTULO V. ANÁLISIS COSTO - BENEFICIO

En el presente capítulo se realiza un análisis de los costos y beneficios de llevar a cabo la simulación de procesos, para el caso de la recepción de pieles en la “Curtiembre Z&H”.

5.1 Inversiones

Como para la empresa “Curtiembre Z&H”, la mejor opción para saber si debe automatizar su proceso de recepción de materia prima es realizar la simulación del proceso, debería contratar un servicio de consultoría. Este servicio bien lo podría ofrecer la Universidad de las Américas, cuya carrera de Ingeniería en Producción Industrial cuenta con los elementos necesarios (las estaciones del sistema de producción modular operativas) y el personal docente capacitado y con experiencia en materia de simulación de procesos industriales para llevar a cabo una correcta simulación y obtener resultados confiables.

Por lo tanto, el cálculo de los costos de inversión tomará en cuenta dos aspectos: la inversión requerida por la Universidad de las Américas para poner en funcionamiento el modelo de simulación y la inversión requerida por la empresa para solicitar una consultoría. En el primero, la universidad invirtió inicialmente en poner en funcionamiento las estaciones del sistema de producción modular (que fueron utilizadas como modelo de simulación físico-análogo en este caso), es decir, costos de adquisición por las estaciones de distribución, verificación y clasificación; el PLC con sus módulos de comunicación, materiales eléctricos, software, y por la contratación de personal especializado en electrónica que realizó el diseño de ingeniería para el desarrollo de los programas que permiten el funcionamiento adecuado de las estaciones. Los costos para la puesta en funcionamiento del modelo de simulación se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 23.
Detalle de costos para el funcionamiento del modelo de simulación.

Elemento	Costo
Estaciones de distribución, verificación y clasificación del sistema de producción modular FESTO.	$ 23.985,21
PLC S7-1200	$ 542,25
CM1243-5 PROFIBUS DP MASTER	$ 340,00
CM1243-2 AS-i MASTER	$ 352,00
Fuente AS-i POWER	$ 283,00
Diseño y elaboración del tablero de control	$ 200,00
Fuente de poder DC variable	$ 300,00
Materiales adicionales (acoples neumáticos, cable de red)	$ 50,00
Software TIA Portal V13	$ 550,00
Ingeniería: desarrollo del software, configuración de comunicación, calibración de sensores y simulación.	$ 6.000,00
Total simulación	$ 28.602,46

Cabe anotar que el tiempo de desarrollo del modelo fue de seis meses, debido a que se necesitó integrar los distintos tipos de comunicación (AS-i y PROFIBUS) con que cuentan las estaciones para poder agrupar sus señales y controlar todo el sistema bajo un mismo PLC.

Para el caso de que la “Curtiembre Z&H” contratara el servicio de consultoría en la Universidad de las Américas, incurriría en los siguientes gastos: pago al profesor asignado por hora de consultoría y un 25% de dicho valor a la universidad por los servicios prestados. La hora de consultoría tendría un costo aproximado de $60 la hora; y se considera que para realizar un estudio de simulación que arroje datos certeros se requiere de aproximadamente 80 horas de trabajo del docente encargado. Luego, si se multiplican las 80 horas de trabajo, por el costo-hora y se adiciona el 25% requerido para la universidad, se tiene que la “Curtiembre Z&H” requeriría una inversión de $6.000.

5.2 Beneficios

Entre los principales beneficios de la simulación de procesos está el hecho de que es una herramienta que facilita la toma de decisiones, pues permite conocer de manera satisfactoria lo que ocurriría si se realizara cambios en el

sistema en estudio sin interrumpir las actividades cotidianas; a más de la posibilidad de experimentar condiciones de operación que podrían ser de elevado costo económico, como se ha observado en el caso de estudio del presente proyecto.

Así, mediante la simulación se ha podido determinar que, para el caso de la "Curtiembre Z&H", la implementación de un sistema automatizado le permitiría mejorar su productividad, incrementando su capacidad de procesamiento de pieles de 105.14 pieles/hora-hombre a 278.42 pieles/hora-máquina. Esto también se refleja en los costos directos del proceso de recepción de materia prima, ya que pasan de $5.99 la hora a $5.79 la hora, cuando se automatiza el proceso.

Tomando en cuenta estos datos, y el hecho de que la empresa recibe máximo 100 pieles a la semana, proceso en el que se demora una hora en promedio, se estima que el ahorro para la empresa por concepto de la automatización del proceso de recepción de materia prima sería de $15.24 mensuales, como se detalla en la siguiente tabla.

Tabla 24.
Ahorro productivo mensual

Ahorro productivo mensual		
	Manual	Automatizado
Costo por 105 pieles/hora	$ 5,99	$ 2,18
Costo mensual	$ 23,96	$ 8,72
Ahorro productivo mensual	$ 15,24	

Como se observa, la capacidad actual para procesar 105 pieles por hora tiene un costo de $5.99 la hora, mientras que si se automatiza la capacidad de procesar 278.42 pieles/hora-máquina tendría un costo de $5.79 la hora. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que la empresa recibe un promedio de 100 pieles semanales. Por tanto, y para tener las mismas condiciones en ambos casos y poder comparar, se ha aplicado una regla de tres para obtener el costo por procesar 105 pieles (la capacidad del sistema manual) en el sistema automatizado, con lo cual se tiene como resultado un costo de $2.18. Si a los

valores de $5.79 y $2.18 se los multiplica por 4 (número de semanas del mes), se tiene los costos mensuales de $23.96 para el proceso actual y de $8.72 en el caso de una posible automatización. En consecuencia se podría prever, para el proceso de recepción de materia prima, un ahorro productivo mensual de $15.24, si se opta por el sistema automatizado.

De esta manera, para el caso en estudio de la “Curtiembre Z&H”, aunque automatizar el proceso de recepción de materia prima incrementa su productividad y genera un ahorro productivo mensual de $15.24, antes de poner en marcha el proyecto, conviene tener presente que si bien la recepción de materia prima es un proceso clave para la producción de cuero, existen otros procesos igual de importantes como son la pelambre, descarnado, curtido, secado, etc., que deberían también ser analizados, conjuntamente con las restricciones que se tienen en la demanda de la venta de cuero.

Otro beneficio adicional, que se desprende del presente proyecto, es que la Universidad de las Américas, a través del laboratorio de Ingeniería en Producción Industrial, podría ofrecer las estaciones del sistema de producción modular como modelo de simulación para empresas que necesiten servicios de consultoría y cuyos procesos puedan ser representados por las actividades que realizan las estaciones; así, las estaciones, a más de ser un recurso didáctico para el aprendizaje de los estudiantes, pueden convertirse en una herramienta para ofertar servicios de consultoría a la comunidad.

6. CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Una vez realizado el análisis de los sensores y actuadores de las estaciones del sistema de producción modular, que se encuentran en el laboratorio de Ingeniería en Producción Industrial, se concluye que los procesos que se pueden programar en las estaciones son aquellos con actividades de distribuir piezas, verificar su altura y clasificarlas de acuerdo a tres criterios diferentes (en este caso: color rojo, negro o plata), y que las piezas deben procesarse de forma individual y no por lotes. Por esta razón, el proceso de recepción de materia prima de la “Curtiembre Z&H” es idóneo para su correcta representación en las estaciones del sistema de producción modular, ya que la empresa procesa pieles de forma individual, verifica su estado y las clasifica por tres criterios, dependiendo de su tamaño, en tipos 1, 2 o 3.

Para que las estaciones del sistema de producción modular pudieran simular el proceso de recepción de materia prima de la curtiembre, se realizaron comparaciones entre procesos, actividades y elementos. Así, los tipos de pieles del proceso real se representaron por las fichas (negro, rojo y plateado) de las estaciones; la decisión tomada por los operadores sobre el estado bueno o malo de una piel se representó, en las estaciones, por la decisión del programa del PLC de acuerdo a la medida del sensor de desplazamiento lineal sobre si la altura de la ficha corresponde o no a la preestablecida; entre otros.

El caso de estudio planteado en este proyecto de titulación es actual y pertinente, pues se aplica a una empresa ecuatoriana dedicada a la producción de cuero, que necesita tomar decisiones sobre la mejora productiva de su proceso de recepción de materia prima, y recurre a la simulación en cuanto la considera una herramienta para analizar los tiempos de las actividades de su proceso y compararlos con los resultados que se tendrían en una posible automatización del mismo. El caso de estudio es una realidad de empresas ecuatorianas, por lo que permite a los estudiantes familiarizarse con el campo laboral en el cual pueden desempeñarse.

El modelo de simulación desarrollado utilizó las estaciones de distribución, verificación y clasificación del sistema de producción modular, del laboratorio de Ingeniería en Producción Industrial de la Universidad de las Américas, para la representación física del proceso de recepción de materia prima de una empresa de curtiembre ecuatoriana. Para ello, aplicando conocimientos de electrónica, se programó el controlador de las estaciones de tal forma que los tiempos de las actividades realizadas por las estaciones correspondan a los tiempos tomados en el proceso real. En base a estos tiempos y utilizando analogías, como por ejemplo fichas en lugar de pieles, se consiguió representar con las estaciones la recepción de la materia prima de la empresa de curtiembre y realizar la simulación.

En consecuencia, este modelo de simulación desarrollado puede ser utilizado por otras empresas industriales o de servicios que cuenten con actividades de distribución, verificación y clasificación (similares a las que realizan las estaciones del sistema de producción modular). Las empresas, a partir de sus propios datos, pueden correr simulaciones para analizar su estado actual y pensar alternativas para mejorar su productividad.

Para que los resultados obtenidos de una simulación representen adecuadamente un proceso real y puedan ser tomados como válidos, es importante utilizar una metodología de simulación. A través del desarrollo de este proyecto, se ha identificado que los puntos clave de la metodología de simulación que permiten tener un modelo válido son la elaboración del modelo de simulación y su validación; ya que solo si el modelo es válido, los datos obtenidos de la simulación representarán de manera adecuada el proceso real y por tanto los resultados serán confiables.

Al realizar el estudio, análisis y programación del modelo de simulación en las estaciones de distribución, verificación y clasificación del sistema de producción modular, se observó que las estaciones cumplen con los requisitos para ser consideradas sistemas de manufactura flexible, pues permiten procesar piezas de diferentes estilos, aceptan cambios en la programación, responden de forma

inmediata a errores, es posible introducir nuevos diseños de piezas, entre otros. Todo ello dependiendo de la habilidad del programador.

En el caso de estudio, al realizar la simulación con el proceso de recepción de materia prima de la “Curtiembre Z&H”, se observó su capacidad para procesar 105.14 pieles/hora-hombre con un costo de $5.99 por hora, y se obtuvo que si se llevara a cabo una automatización del proceso, se tendría una capacidad para procesar 278.42 pieles/hora-máquina con un costo de $5.79 por hora. Es decir, existiría una mejora en la productividad del proceso de recepción de materia prima, generando un ahorro mensual de $15.24.

Si bien en este caso de estudio hay un incremento en la productividad al implementar un sistema automatizado, para emprender esta iniciativa es importante verificar la viabilidad del proyecto, principalmente por la alta inversión requerida; a la que debe agregarse aspectos técnicos (ciclos de trabajo, características del producto, modificaciones a las instalaciones), económicos (incremento de mano de obra calificada, mejora de la calidad, aumento del consumo de energía, reducción de mano de obra directa, etc.) y laborales (capacitación, traslados, etc.), así como las restricciones del mercado y características de la demanda.

Las estaciones del sistema de producción modular, como se ha demostrado con este proyecto, pueden ser utilizadas para realizar prácticas de laboratorio; pues ofrecen a los estudiantes de la carrera de Ingeniería en Producción Industrial de la Universidad de las Américas, la posibilidad de recrear ambientes simulados de trabajo y reforzar así sus conocimientos de calidad, productividad, mecanismos y automatización, fortaleciendo su formación profesional con el acceso a nuevas tecnologías industriales, y aplicar sus conocimientos en las estaciones del sistema de producción modular.

Con el presente proyecto se establece la práctica de laboratorio: “Simulación de procesos productivos en un modelo físico”, cuyo objetivo es simular un proceso productivo utilizando las estaciones del sistema de producción modular como modelo físico análogo. Así, los estudiantes de la carrera de Ingeniería en

Producción Industrial adquirirán habilidades como abstraer, en un modelo de simulación físico, las características de un sistema real y aplicar una metodología de simulación al modelo, que constituirán los principales resultados de aprendizaje planteados para la práctica.

El estudio, análisis y programación de las estaciones del sistema de producción modular utilizadas para elaborar el modelo de simulación, sirvió como base para el análisis e implementación de nuevas funciones en las estaciones, como por ejemplo: un sistema de control de calidad por visión artificial y un sistema de control de inventario, que actualmente están siendo desarrollados por estudiantes de la carrera de Ingeniería en Producción Industrial.

La simulación es una herramienta que permite el análisis de procesos industriales y la toma de decisiones críticas sobre cambios o automatizaciones. Esto se demostró con el estudio a la empresa de curtiembre, cuando mediante simulación, sin necesidad de realizar paros en las actividades productivas o una inversión considerable de dinero, se logró determinar que existiría una mejora en la productividad del proceso de recepción de pieles si se llegara a automatizarlo, es decir, pasando de procesar 105.14 pieles/hora-hombre a 278.42 pieles/hora-máquina.

Mediante el modelo de simulación desarrollado, se consiguió representar un proceso real: la recepción de materia prima de una empresa de curtiembre. El modelo implementado fue físico-análogo, ya que los elementos del sistema real se representaron con elementos propios del modelo de simulación a través de analogías. También se programó el modelo (estaciones del sistema de producción modular) para que tuviera criterios de decisión y tiempos de ejecución de actividades muy similares a los del proceso real.

6.2 Recomendaciones

Para asegurar la validez de los resultados generados por el modelo de simulación, se recomienda estudiar las características principales del sistema real que se quiere representar y, a partir de ahí, seleccionar el tipo de modelo

que permita plasmar dichas características adecuadamente para su estudio y realización experimental. También, deberá cuidarse que los datos ingresados para elaborar el modelo de simulación sean confiables y que se hayan tomado las medidas necesarias para reducir la variabilidad en la obtención de los datos, por ejemplo, que se haya realizado un análisis del sistema de medición a fin de reducir errores debido a factores humanos, procedimientos deficientes o sistemas automatizados con diseños inadecuados.

Si bien la simulación es una herramienta que ayuda a tomar decisiones importantes, es necesario considerar, a más de los resultados obtenidos de la simulación, los impactos que podrían generarse como consecuencia de implementar la alternativa ofrecida por la simulación. Es decir, no descuidar los impactos económicos, las restricciones de la demanda, las condiciones del mercado, la inversión requerida, las características del proceso y la viabilidad para implementar la alternativa de mejora seleccionada.

Cuando se planea el desarrollo de un modelo de simulación físico, en el cual se utilicen elementos tecnológicos como sensores, actuadores neumáticos, diferentes tipos de comunicación industrial y controladores lógicos programables relativamente nuevos en el mercado, es importante asegurarse de contar con personal capacitado en electrónica y automatización para manejar estos elementos, pues de lo contrario el tiempo que toma implementar el modelo se incrementa significativamente y se requiere un esfuerzo adicional para ponerlo en marcha y funcionamiento adecuado conforme a lo requerido.

Para futuros proyectos de simulación en las estaciones del sistema de producción modular, se deberá realizar el análisis en empresas cuyos procesos de distribución, verificación y clasificación se encuentren ya automatizados, con la finalidad de determinar si existe un incremento en la precisión de los datos generados en la simulación al experimentar sobre el modelo.

Debido a la globalización y el crecimiento tecnológico, las industrias manufactureras enfrentan el reto de tecnificar y automatizar sus procesos productivos para poder reducir costos y así mantener su posición en el

mercado, satisfacer los requerimientos de los clientes y cumplir con las políticas de estado cambiantes. Una opción que les brindaría la flexibilidad necesaria a estas empresas para responder adecuadamente a los cambios, podría ser la implementación de sistemas automatizados de manufactura flexible.

Para poner en funcionamiento las estaciones del sistema de producción modular, en el presente proyecto se utilizó un PLC que centraliza las señales provenientes de las estaciones y controla sus acciones, lo cual implicó la utilización de un gran número de variables de programación y generó un programa extenso. Para futuras expansiones y para dar mayor flexibilidad y autonomía a cada estación, se recomienda utilizar un PLC individual para cada estación, lo que facilitaría la programación, el traslado de las estaciones y su cambio de posición.

Para realizar las prácticas de laboratorio por parte de los estudiantes, se recomienda establecer normas de seguridad para la manipulación y correcto uso de las estaciones, ya que los actuadores neumáticos ejercen fuerzas considerables sobre las piezas para movilizarlas, y una inapropiada manipulación puede causar que el estudiante se lastime. También se debe supervisar el uso que los estudiantes den a las estaciones, ya que los elementos electrónicos que conforman las estaciones pueden verse afectados por sobre voltajes, cortocircuitos o conexiones inadecuadas.

Se recomienda utilizar la simulación en aquellos casos en los que es difícil o peligroso experimentar sobre el sistema real debido a su complejidad, o cuando no se pueden interrumpir las operaciones del sistema real, o porque el sistema evoluciona muy lentamente o muy rápidamente, o porque el periodo de tiempo de evaluación es muy largo o se requiere la utilización de muchos recursos, entre otras. En el caso de estudio de la curtiembre, realizar una automatización directa del proceso hubiera implicado parar la producción e invertir una cantidad considerable de recursos, sin tener una certeza sobre los resultados esperados y, además, para medir estos resultados se hubiera tenido que

recolectar información por varios meses, puesto que la entrega de pieles se realiza una vez por semana.

La utilización de sistemas didácticos que representan procesos industriales reales a escala, como las estaciones del sistema de producción modular, desarrolla en los estudiantes ciertas habilidades que los preparan para la vida laboral. En este caso se adquirieron habilidades en procesos, simulación, electrónica, comunicación industrial, medición de tiempos, entre otras, sin la necesidad de visitas técnicas o experimentar en un proceso real. Se sugiere a la carrera de Ingeniería en Producción Industrial adquirir materiales didácticos con sistemas reales, como las estaciones, puesto que facilitan el aprendizaje y brindan a los estudiantes la oportunidad de aprender haciendo.

Para una siguiente etapa del proyecto, se recomienda realizar un estudio detallado sobre la viabilidad de implementar la automatización del proceso de recepción de materia prima en la “Curtiembre Z&H”.

El proyecto de titulación presentado, a más de ser una herramienta didáctica de aprendizaje, abre un campo para la prestación de servicios de consultoría; aspecto de importancia que debe ser considerado para futuros trabajos con las estaciones o para brindar servicios a la comunidad.

REFERENCIAS

Biasca, R. (2006). *Productividad: un enfoque integral del tema.* Buenos Aires, Argentina: Ediciones Macchi.

Castanyer, F. (1988). *Cómo mejorar la productividad en el taller.* Barcelona, España: Marcombo.

Chase, R. y Jacobs, F. (2014). *Administración de operaciones. Producción y cadena de suministros* (Decimotercera ed.). México D.F., México: McGraw-Hill.

Coss, R. (2003). *Simulaicón. Un enfoque práctico.* México D.F, México: Limusa S.A.

Cuatrecasas, L. (2012). *Organización de la producción y dirección de operaciones: sistemas actuales de gestión eficiente y competitiva.* Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos.

Doria, J., Melo, F. y Chávez, J. (2013). *Implementación de proceso de Pick and Place mediante Grúa-Robot aplicado a celda de manufactura flexible.* Recuperado el 21 de octubre de 2016 de http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84929984007.

Ebel, F. y Pany, F. (2006). *Sorting station Manual*. Dekendorf, Alemania: Festo Didactic.

Ebel, F. y Pany, F. (2015). *Distributing station Manual*. Dekendorf, Alemania: Festo Didactic.

Ebel, F. y Pany, F. (2015). *Testing station Manual*. Dekendorf, Alemania: Festo Didactic.

EL HERALDO DIGITAL. (2014). *ANCE revela falta de datos y las debilidades del sector curtidor*. Recuperado el 22 de diciembre de 2016 de http://www.elheraldo.com.ec/index.php?fecha=2014-06-22&seccion=Ciudad&noticia=41885

El productor. (2015). *Ecuador: La producción de cuero disminuye en un 50%. El Productor, el periódico del campo*. Recuerado el 22 de diciembre de 2016 de http://elproductor.com/2015/07/17/ecuador-la-produccion-de-cuero-disminuye-en-un-50/

FESTO. (2017). *Estaciones MPS®: sistemas mecatrónicos para campeones mundiales*. Recuperado el 19 de enero de 2017 de FESTO: http://www.festo-didactic.com/es-es/productos/mps-sistema-de-produccion-modular/descripcion-del-sistema/estaciones-mps-sistemas-mecatronicos-para-campeones-mundiales.htm?fbid=ZXMuZXMuNTQ3LjE0LjE4LjY0NC43NjMy

FLACSO - MIPRO. (2011). *Boletín mensual de análisis sectorial de MIPYMES - Ropa para vestir de cuero para exportación. Centro de Investigaciones Económicas y de la Micro, Pequeña y Mediana Empresa, 22*. Recuperado el 15 de diciembre de 2016 de https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiV37DipqrUAhVDOCYKHfwhBqAQFggqMAE&url=https%3A%2F%2Fwww.flacso.edu.ec%2Fportal%2FpnTemp%2FPageMaster%2Fdvwqb97pv9quz2d9pwvqomo3wnqad7.pdf&usg=AFQjCNGIlw4wmGKs6w0WkIAxZzlb-MoYBw.

García, E., García, H. y Cárdenas, L. (2006). *Simulación y análisis de sistemas ProModel.* México D.F., México: Pearson Educación.

Groover, M. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna* (Tercera ed.). México D.F., México: McGraw Hill.

Guasch, A., Piera, M., Casanovas, J. y Figueras, J. (2002). *Modelo y simulación, aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicio.* Barcelona, España: EDICIONS UPC.

Gutiérrez, H. (2010). *Calidad Total y Productividad* (Tercera ed.). México D.F, México: McGraw Hill.

Kang, H., Lee, J., Choi, S., Kim, H., Park, J., Son, J. y Kim, B. (2016). *Smart Manufacturing: Past Research, Present Findings and Future Directions. International Journal of Precision Engineering and Manufacturirng - Green Technology*. Recuperado el 21 de octubre de 2016 de https://link-springer-com.bibliotecavirtual.udla.edu.ec/article/10.1007/s40684-016-0015-5.

Krajewski, L., Ritzman, L. y Mahotra, M. (2008). *Administración de operaciones. Procesos y cadena de valor* (Octava ed.). México D.F, México: PEARSON Educación.

Manyoma, P. (2011). *Medición de la flexibilidad en manufactura*. Recuperado el 11 de noviembre de 2016 de http://revistas.eia.edu.co/revistas/index.php/reveia/article/view/432/425.

Mariscal, B. (2009). *Proceso de toma de decisiones gerenciales.* Córdoba, España: El Cid Editor.

Marques, A., Mujica, M., Pinho de Sousa, J., Marques, P., Rebelo, R. y Alves, A. (2013). *An Innovative Framework for the Simulation of Manufacturing Systems: An Application to the Footwear Industry. Advances in Sustainable and Competitive Manufacturing Systems, Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Recuperado el 21 de octubre de 2016 de https://link-springer-com.bibliotecavirtual.udla.edu.ec/chapter/10.1007/978-3-319-00557-7_18.

Marques, M. (1991). *Probabilidad y estadísitica para ciencias químico-biológicas.* México D.F., México: McGraw-Hill Interamericana.

Mera, M. (2014). *El precio del cuero aumenta debido a su escasez. EL COMERCIO.* Recuperado el 12 de diciembre de 2016 de http://www.elcomercio.com/actualidad/precio-cuero-aumenta-debido-escasez-industria-calzado-tungurahua-ecuador.html

Meyers, F. y Stephens, M. (2006). *Diseño de instalaciones de manufactura y manejo de materiales* (Tercera ed.). México D.F., México: Pearson Educación.

Monzón, J. (2002). *Técnicas de análisis de la eficiencia empresarial.* Barcelona, España: UOC papers.

Piera, M., Guasch, T. y Casanovas, J. (2006). *Cómo mejorar la logística de su empresa mediante la simulación.* Madrid, España: Díaz de Santos.

Quevedo, H. y Pérez, B. (2014). *Estadística para ingeniería y ciencias.* México D.F., México: Larousse - Grupo Editorial Patria.

Riverola, J. y Cuadrado, B. (2004). *Arte y oficio de la simulación.* Navarra, España: EUNSA.

Rodríguez, F. y Delgado, R. (2009). *Técnicas y modelos de simulación de sistemas*. Recuperado el 21 de octubre de 2017 de http://www.ebrary.com.bibliotecavirtual.udla.edu.ec

SALVAT Editores. (2004). *La Enciclopedia. (6)*. Madrid, España: SALVAT Editores S.A.

Schroeder, R., Meyer, S. y Rungtusanatham, M. (2011). *Administración de operaciones. Conceptos y casos contemporáneos* (Quinta ed.). México D.F., México: McGraw-Hill.

SIEMENS. (2009). *Manual de usuario: SIMATIC S7 - Controlador programable S7-1200.* NÜRNBERG, Alemania: SIEMENS A.G.

Taddei, J., Rodríguez, R. y Ruiz, J. (2013). *Mejora del proceso de inscripciones en una Institución de Educación Superior mediante Simulación*. Recuperado el 2 de septiembre de 2016 de http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=360433593003.

Trujillo, J., Vallejo, J. y Becerra, M. (2010). Metodología para la simulación de centros de llamadas–Caso de estudio. Recuperado el 2 de septiembre de 2016 de http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3951276

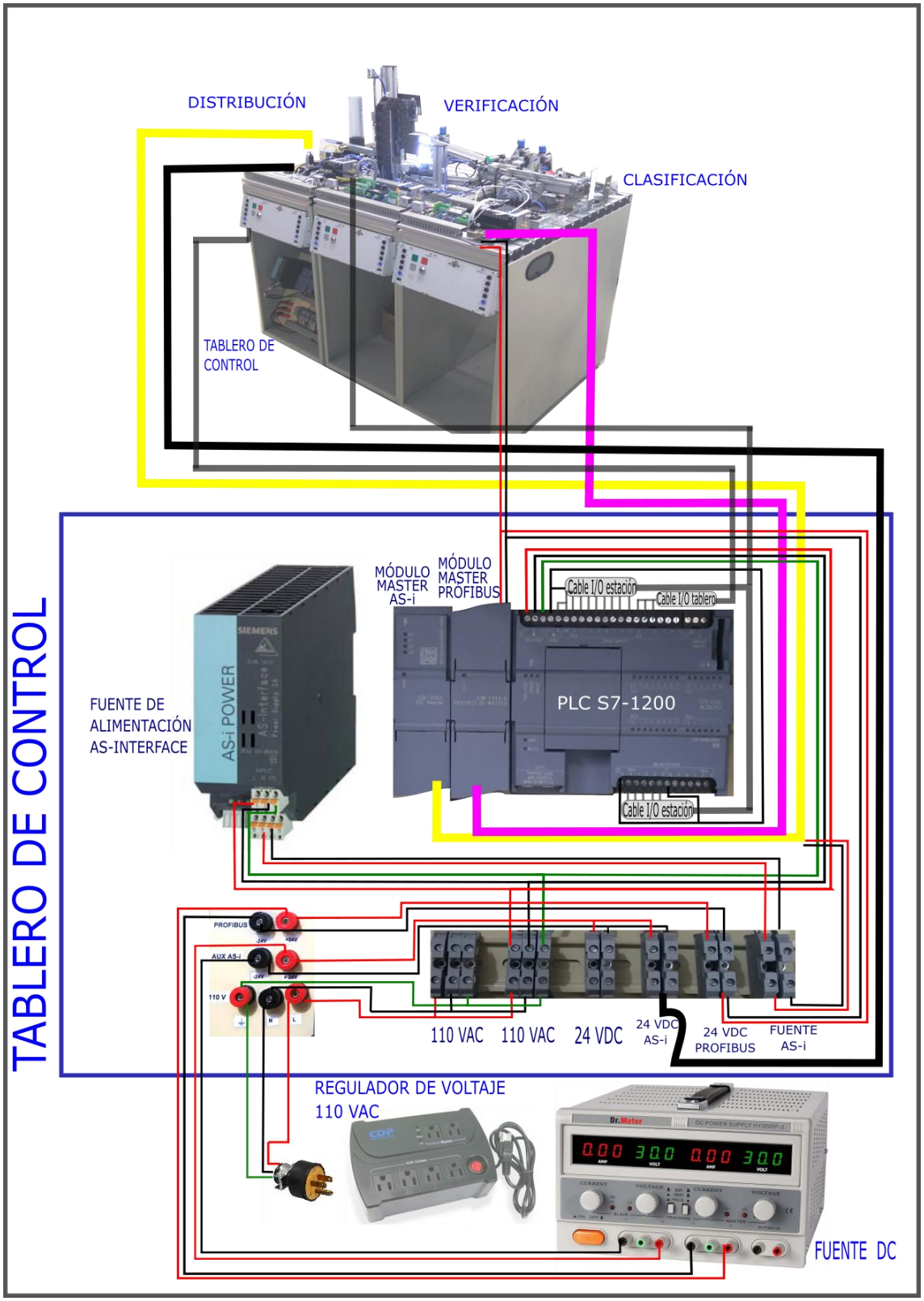
Urquía, A., y Martín, C. (2013). *Modelado y simulación de eventos discretos.* Madrid, España: Universidad Nacional de Educación a Distancia.

Zambrano, G., Fúquene, C. y Aguirre, H. (2010). Aplicativo para el control estadístico de procesos en línea integrado a un sistema de manufactura flexible. Recuperado el 2 de septiembre de 2016 de http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47715438006.

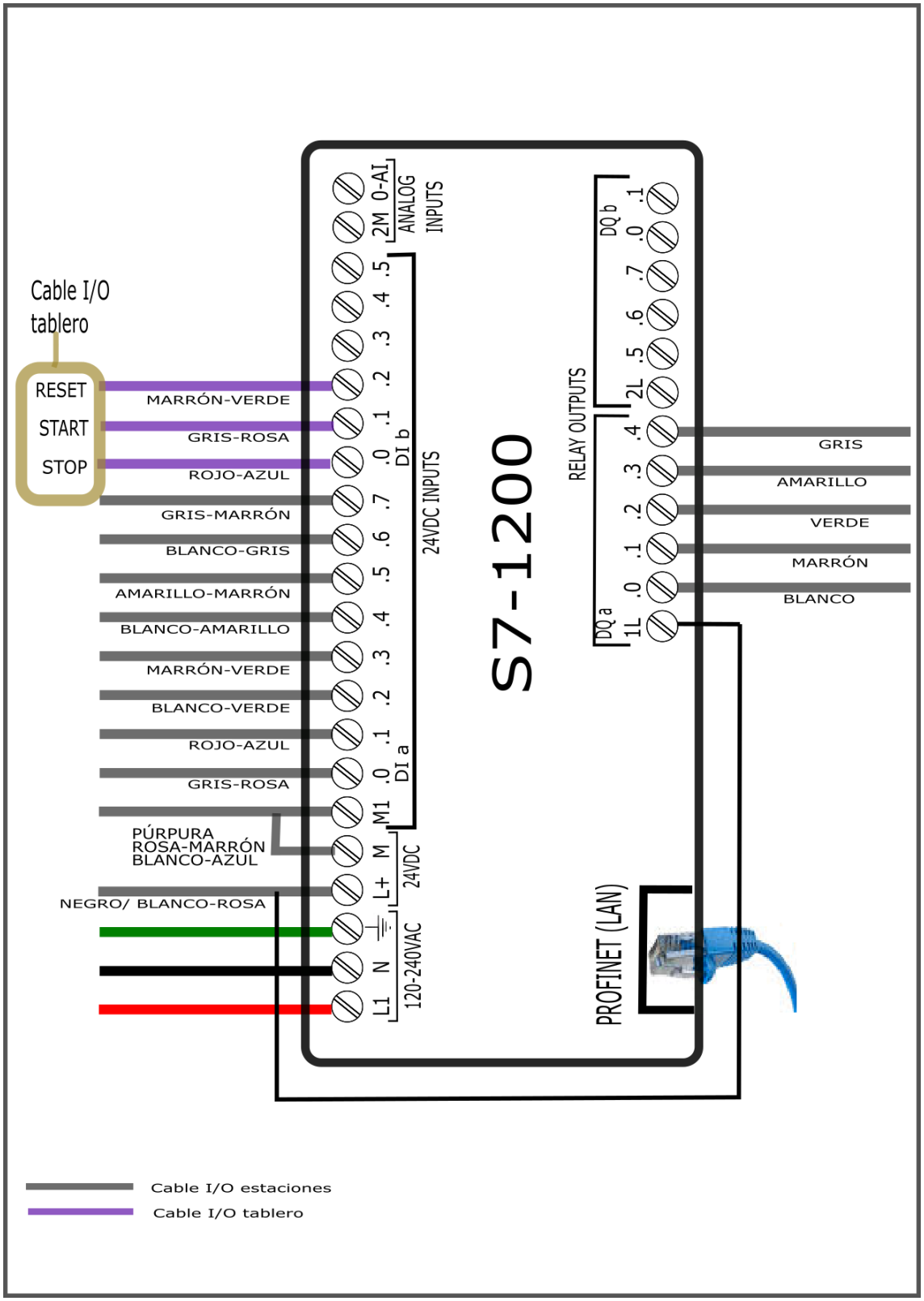
Zuluaga, C., y Aguirre, A. (2014). Actividades prácticas del grupo GEIO automatizadas en la celda de manufactura flexible. *Ingeniería y tecnología UNILIBRE.* Recuperado el 2 de septiembre de 2016 de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1900-38032014000100020&script=sci_abstract&tlng=es.

ANEXOS

ANEXO 1- ESQUEMA CONEXIÓN TABLERO DE CONTROL

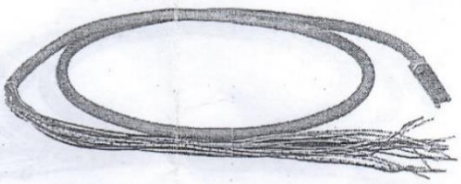


ANEXO 2- CONEXIONES DE PINES EN EL PLC S7-1200



ANEXO 3 – HOJA DE DATOS CABLE I/O CON TERMINALES ABIERTOS Y CONECTOR SYSLINK (FESTO DIDACTIC, 2000)

Cable I/O con terminales abiertos y conector SysLink



Diseño

Cable con 21 hilos de una sección de 0,34 mm².
Un extremo está dotado de un conector con clavija de 24 pines, mientras que el otro extremo tiene los hilos sueltos con fundas. Los pines 9 y 10, 21 y 22, 23 y 24 están interconectados en dos grupos.

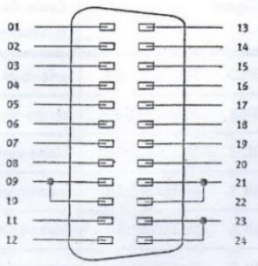
Función

Este cable de I/O proporciona una conexión universal entre el módulo Easyport (Nº de artículo 167121) y un PLC o el hardware de cualquier sensor/actuador. Puede transmitir hasta 16 señales de I/O. Además, el cable puede llevar la alimentación para sensores y actuadores (no sobrepasar la carga máxima permisible).

Datos técnicos

Datos eléctricos	
Nº de hilos	21
Sección transversal	0,34 mm²
Tipo de clavija	Amphenol 24-pines

Colores de los hilos y asignación de pines



Pin	Señal		Color de hilo	Pin	Señal		Color de hilo
01	Bit 0	Output word	Blanco	13	Bit 0	Input word	Gris/rosa
02	Bit 1	Output word	Marrón	14	Bit 1	Input word	Rojo/azul
03	Bit 2	Output word	Verde	15	Bit 2	Input word	Blanco/verde
04	Bit 3	Output word	Amarillo	16	Bit 3	Input word	Marrón/verde
05	Bit 4	Output word	Gris	17	Bit 4	Input word	Blanco/amarillo
06	Bit 5	Output word	Rosa	18	Bit 5	Input word	Amarillo/marrón
07	Bit 6	Output word	Azul	19	Bit 6	Input word	Blanco/gris
08	Bit 7	Output word	Rojo	20	Bit 7	Input word	Gris/marrón
09	24 V	Alimentación	Negro	21	24 V	Alimentación	Blanco/rosa
10				22			
11	0 V	Alimentación	Rosa/marrón	23	0 V	Alimentación	Blanco/azul
12	0 V	Alimentación	Púrpura	24			

© Festo Didactic GmbH & Co. • 380156 (04/2000) Reservados los derechos de modificación

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1. Elementos de un sistema productivo.
Figura 2. Clasificación de los modelos de simulación.
Figura 3. Fases principales de un estudio de simulación.
Figura 4. Características de la aplicación de sistemas y celdas flexibles de manufactura en relación con otros sistemas de producción.
Figura 5. Estaciones del MPS FESTO.
Figura 6. Estación de distribución.
Figura 7. Estación de verificación.
Figura 8. Estación de clasificación.
Figura 9. PLC SIEMENS S7-1200 con módulos AS-i y PROFIBUS.
Figura 10. Principales zonas de producción de cuero en el Ecuador.
Figura 11. Diagrama del proceso de curtido de cuero.
Figura 12. Proceso de curtido de cuero. Curtiembre Z&H, 2016.
Figura 13. Wet blue. Curtiembre Z&H.
Figura 14. Cuero cross: Curtiembre Z&H.
Figura 15. Clasificación de materia prima. Curtiembre Z&H.
Figura 16. Diagrama de flujo: proceso de recepción de pieles.
Figura 17. Ishikawa, problemas que afectan el proceso de recepción de materias primas.
Figura 18. Sensor de reflexión directa AS-i. Estación de distribución.
Figura 19. Sensor capacitivo de proximidad. Estación de verificación.
Figura 20. Calibración sensor de desplazamiento lineal. Estación de verificación.
Figura 21. Tablero de control estaciones de distribución, verificación y clasificación.
Figura 22. Diagrama de flujo programa estación de distribución.
Figura 23. Diagrama de flujo programa estación de verificación (parte 1).
Figura 24. Diagrama de flujo programa estación de verificación (parte 2).
Figura 25. Diagrama de flujo estación de clasificación.
Figura 26. Flujo de las piezas en las estaciones.
Figura 27. Diagramas de flujo del proceso real y el simulado.

Figura 28. Histogramas del sistema real y de la simulación.
Figura 29. Estadísticos descriptivos del sistema real y la simulación.
Figura 30. Gráfica de probabilidad del sistema real.
Figura 31. Gráfica de probabilidad de la simulación.
Figura 32. Histograma del sistema real, el sistema simulado en base al real y del sistema simulado automatizado.
Figura 33. Fuente DC conectada adecuadamente.
Figura 34. Energización de componentes del tablero de control y estaciones.
Figura 35. Componentes del tablero de control.
Figura 36. Conexión cable de red.
Figura 37. Localización de la carpeta “Programas simulación en estaciones”.
Figura 38. Contenido de la carpeta "Programas simulación en estaciones".
Figura 39. Localización programa "Simulación sistema actual".
Figura 40. Ventana “Open existing Project” en TIA PORTAL.
Figura 41. Ventana en TIA PORTAL para seleccionar la opción escribir programa.
Figura 42. Bloques de programa que conforman el programa general.
Figura 43. Pantalla con principales ventanas de TIA PORTAL.
Figura 44. Ícono para descargar programa al PLC.
Figura 45. Ventana para configurar la comunicación entre PLC y computador.
Figura 46. Ventana cuando TIA PORTAL se comunica adecuadamente con el PLC
Figura 47. Indicación de que se está descargando el programa al PLC.
Figura 48. Analogías entre el proceso del sistema real y el proceso realizado por las estaciones.
Figura 49. Fases principales de un estudio de simulación.
Figura 50. ANEXO A-1: Estaciones del sistema de producción modular y sus componentes.
Figura 51. Anexo A-2: Estaciones del sistema de producción modular y sus componentes.
Figura 52. ANEXO B: Registro de tiempos en la realización de la simulación.

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1. Decisiones de operaciones.
Tabla 2. Matriz de características del proceso.
Tabla 3. Ámbito de cálculo de la productividad.
Tabla 4. Componentes estación de distribución.
Tabla 5. Componentes de la estación de verificación.
Tabla 6. Componentes de la estación de clasificación.
Tabla 7. Parámetros para la toma de datos.
Tabla 8. Diagrama SIPOC del proceso de recepción de materia prima.
Tabla 9. Registro de medición de tiempos en segundos.
Tabla 10. Analogías entre el sistema real y el modelo de simulación.
Tabla 11. Tabla de tiempos programados en las estaciones.
Tabla 12. Analogía entre las definiciones operacionales del sistema real y el modelo de simulación.
Tabla 13. Datos obtenidos durante la simulación.
Tabla 14. Tiempos del sistema real y la simulación en segundos.
Tabla 15. Tiempo de ciclo del sistema real y simulado en segundos.
Tabla 16. Datos obtenidos en simulación del proceso automatizado.
Tabla 17. Comparación entre datos del sistema real, datos simulación sistema real y datos simulación sistema automatizado.
Tabla 18. Costo por hora - mano de obra sistema real.
Tabla 19. Costo por hora sistema automatizado.
Tabla 20. Práctica de laboratorio estandarizada
Tabla 21. Tiempo por actividad del proceso.
Tabla 22. Analogías entre el sistema real y el modelo de simulación (estaciones).
Tabla 23. Detalle de costos para el funcionamiento del modelo de simulación.
Tabla 24. Ahorro productivo mensual.