

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE
GUATEMALA**



FACULTAD DE INGENIERÍA

**IMPACTO DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMATIZADO
POR AUTOMATAS PROGRAMABLES INDUSTRIALES (API) EN
LA PRODUCTIVIDAD DE UN PROCESO DE MANUFACTURA,
ENSAYO EN UNA MÁQUINA EMPAQUETADORA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

Presentado a la Junta Directiva
de la
Facultad de Ingeniería

Por

LUIS ESTUARDO MUÑOZ ESTRADA

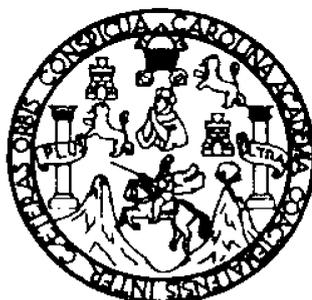
al conferírsele el título de

INGENIERO ELECTRICISTA

Guatemala, julio de 2004

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE
GUATEMALA**

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Alvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

NÓMINA QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Jorge Mario Morales González
EXAMINADOR	Ing. Edmundo Enrique Ruiz Carballo
EXAMINADOR	Ing. Dimas Noriega
EXAMINADOR	Ing. Victor Hugo Ventura
SECRETARIO	Ing. Edgar José Aurelio Bravatti Castro

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

IMPACTO DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMATIZADO POR AUTOMATAS PROGRAMABLES INDUSTRIALES (API) EN LA PRODUCTIVIDAD DE UN PROCESO DE MANUFACTURA, ENSAYO EN UNA MÁQUINA EMPAQUETADORA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica con fecha 11 de noviembre de 1999.

LUIS ESTUARDO MUÑOZ ESTRADA

Leonardo da Vinci

El hierro se oxida por el desuso, el agua estancada pierde su pureza y en el frío se congela; así como la inactividad agota la vitalidad de la mente...

DEDICADO A:

Mi esposa Gina, mis hijos Luis
Adrián, Karen Gabriela y Andrea
Marcela

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	IV
GLOSARIO	VI
RESUMEN	VII
OBJETIVO	VIII
INTRODUCCIÓN	IX

1 MARCO TEÓRICO

1.1 Productividad

1.1.1	Medición de la productividad	1
1.1.2	Medición de la productividad en un proceso repetitivo	3
1.1.3	El modelo de productividad total	4
1.1.4	Notación para el modelo de productividad total	6
1.1.5	El modelo de productividad total operativo	12
1.1.6	La productividad y la fuerza laboral	14
1.1.7	La productividad y la calidad del producto	16

1.2 Automatización

1.2.1	Sistemas de control	18
1.2.2	Principio de un sistema automático	23
1.2.3	Controladores lógicos	25
1.2.4	Controladores analógicos	26
1.2.5	Controladores PID	31
1.2.6	Controladores digitales	37

1.3	El autómata programable	
1.3.1	Ciclo de funcionamiento y control en tiempo real	40
1.3.2	Configuración	44
1.3.3	Sensores y transductores	45
1.3.4	Programación	49
1.4	Proceso de empaquetado	
1.4.1	Definición	54
1.4.2	Descripción del proceso de empaquetado	54
1.4.3	Condiciones básicas del proceso de empaquetado	55
1.4.4	Variables de proceso	57
2	ENSAYO DESARROLLADO EN LA MÁQUINA EMPAQUETADORA	
2.1	Procedimiento	63
2.2	Implementación del módulo piloto	67
2.2.1	Descripción de la maquinaria	67
2.2.2	Descripción del proceso investigado	68
2.2.3	Sensores y variables a controlar durante el proceso	68
2.2.4	Descripción del autómata programable industrial	71
2.2.5	Programa de control	72

3	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	
3.1	Análisis sobre las variables controladas	93
3.1.1	Unidades producidas	93
3.1.2	Tiempos perdidos	94
3.1.3	Producto aceptado y/o rechazado	96
3.1.4	Consumo de recurso humano	97
3.1.5	Consumo de materiales	98
3.1.6	Consumo de capital	101
3.1.7	Consumo de energía	102
3.1.8	Análisis sobre la productividad	103
3.1.9	Productividades parciales	105
	CONCLUSIONES	106
	RECOMENDACIONES	107
	BIBLIOGRAFÍA	109

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Sistema de control en lazo abierto	19
2	Sistema de control en lazo cerrado	20
3	Estructura de un sistema automatizado	24
4	Bloque realimentado	28
5	Descripción del proceso de empaque	54

TABLAS

I	Medición de producción física	4
II	Elementos de insumo tangibles	8
III	Necesidades y variables que afectan la productividad	62
IV	Maquinaria en ensayo	67
V	Etapas del proceso	69
VI	Descripción de sensores y funciones en el proceso	70
VII	Características generales del CPU 314	71
VIII	Unidades producidas	93
IX	Tiempos perdidos	95
X	Tiempos perdidos operativos	96
XI	Producto aceptado	97
XII	Recurso humano total incurrido en el ensayo	99
XIII	Consumo de materiales	100
XIV	Consumo de materiales en moneda US \$	100
XV	Consumo de capital	101
XVI	Energía eléctrica consumida	102
XVII	Costo por consumo de energía eléctrica	102
XVIII	Productividad total	103

GLOSARIO

Autómata	Dispositivo electrónico capacitado de <i>hardware</i> y <i>software</i> que permite realizar funciones de cálculo y memorización a través de un procesador electrónico.
Automatización	Acción y efecto de automatizar, sustituyen acciones humanas por un dispositivo para realizar un trabajo determinado.
Insumos	Se refieren a todos los recursos que se consumen o gastan para fabricar una producción
Lazo abierto	Conjunto de sistemas de control y accionamientos que ejecuta las ordenes provenientes de magnitudes de consigna y no recibe ningún tipo de información del comportamiento del sistema.
Lazo cerrado	Conjunto de sistemas de control y accionamiento que ejecuta las órdenes provenientes de magnitudes de consigna y recibe información del comportamiento del sistema.
Producción	Se refiere a las actividades relacionadas con la manufactura de productos.
Productividad	La productividad es técnicamente una medida de eficiencia de una persona u operación ya que comparar los fines obtenidos con los recursos utilizados y se expresa como una razón o índice.
Tangible	Inherentemente o indirectamente mensurable.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación versa sobre el estudio realizado en un proceso de empaquetado de cigarrillos de una industria nacional, en la cual se encuentran dos líneas de producción que hacen el mismo producto y en condiciones similares, con la diferencia de que a una línea de producción se le ha modificado la lógica de control y monitoreo utilizando un autómata programable industrial, mientras que la otra línea de producción utiliza el control convencional a base de relés y lógica alambrada. Esta condición se aprovecha para realizar un estudio que muestre el impacto en la productividad del proceso al utilizar esta tecnología y equipos, obteniendo y recolectando datos que puedan ser comparativos entre una línea de producción y la otra. El estudio pretende demostrar que el uso de autómatas programables puede ayudar a mejorar la productividad del proceso en el que participan.

El trabajo está estructurado iniciando con un marco teórico, donde se muestran los conceptos básicos del modelo de productividad, una descripción de los distintos dispositivos y sensores que se utilizan en la automatización de procesos industriales, el proceso de empaquetado, el proceso de recolección y cálculo de datos y al final del trabajo se encuentran tablas comparativas entre un método y otro. El trabajo finaliza en una descripción de conclusiones y recomendaciones.

OBJETIVO

Analizar los efectos sobre la productividad en un proceso de empaque de la transformación de un sistema de control en lazo cerrado utilizando un autómata programable como método para aumentar la productividad del proceso.

INTRODUCCIÓN

Desde la primera vez que se utilizó el vocablo productividad en el sentido formal a mediados del siglo XVIII, la increíble y admirada recuperación económica del pueblo japonés después de la Segunda Guerra Mundial y durante la segunda mitad del siglo XX hasta el presente, la productividad ha sido objeto de estudio y análisis debido a que algunas estrategias para alcanzar las metas de ganancias por ventas se enfocan únicamente en el incremento de precio de los bienes y servicios.

Cuando existe una tasa de inflación creciente y una reducción en el crecimiento de la productividad, se reduce el poder adquisitivo real de las personas, lo que afecta su nivel de vida. Esto a su vez reduce su capacidad de compra de bienes y servicios, lo que puede provocar nuevos incrementos del precio de éstos, y el ciclo vuelve a iniciar con el riesgo, cada vez mayor, de provocar el cierre de empresas con la consecuente pérdida de empleos.

Cuando un país no es lo suficientemente productivo para proporcionar sus propios productos y servicios básicos, tiene que depender de otros países y cuanto mayor sea esta dependencia, menor será la influencia política que tenga. El poder económico de una nación depende, entre otros factores, del nivel y tasa de crecimiento de su productividad del trabajo.

Los sistemas de control se han desarrollado como una herramienta para el incremento de la productividad y han logrado un avance sostenido, principalmente durante las últimas décadas del siglo XX, ya que se han desarrollado desde el uso de componentes netamente mecánicos de principios de siglo, hasta los sistemas altamente computarizados de hoy en día. Los sistemas de control buscan facilitar, no eliminar, el

trabajo de los operadores y entre más capacidad de toma de decisiones tenga el sistema, llamados sistemas en lazo cerrado, más ayuda proveerá al operador y más productivo será el proceso.

Los autómatas programables industriales son utilizados en los sistemas de control como herramienta para incrementar la productividad de los procesos complejos permitiendo movimientos precisos y alcanzando mayor velocidad de ejecución y verificación con lo cual se ha conseguido aumentar el volumen de producción y ayudar a aumentar la productividad del proceso. Entiéndase producción como la actividad de producir bienes y/o servicios mientras que productividad como la utilización eficiente de los recursos para producir estos bienes y/o servicios.

El estudio que a continuación se presenta corresponde a la investigación realizada en un proceso de manufactura en el que se le sustituyó el sistema de control electromecánico por un autómata programable industrial, se registraron los resultados y se compararon respecto a los registros de resultados obtenidos por otra máquina exactamente igual y durante el mismo período de tiempo, pero manteniendo el sistema de control electromecánico original.

Para el análisis de los resultados se utilizó el Método de Productividad Total Operativa (MPTO) que cubre los factores a considerar para evaluar los efectos en la productividad del proceso.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Productividad

Se estima que la primera vez que se mencionó la palabra “productividad”, en el estilo formal, fue en un artículo de Francois Quesnay (1694 – 1774) en el año 1766. Mas de un siglo después Maximilien Littré (1801 – 1881) definió la productividad como la “facultad de producir”, es decir, el deseo de producir; sin embargo, no fue sino hasta principios del siglo veinte que el término adquirió un significado más preciso como una relación entre lo producido y los medios empleados para hacerlo.

La definición del término productividad varía ligeramente según la especialidad de quien la define; sin embargo, pueden resumirse tres tipos básicos de productividades: parcial, factor total y total.

- Productividad parcial: razón entre la cantidad producida y un solo tipo de insumos tales como mano de obra, materiales, capital, energía y otros gastos.
- Productividad de factor total: razón de la producción neta con la suma asociada de los insumos de mano de obra y capital en donde “producción neta” corresponde a la diferencia entre la producción total y los servicios y bienes intermedios adquiridos.
- Productividad total: razón entre la producción total y la suma de todos los factores de insumo reflejando el impacto en conjunto de todos los insumos al fabricar los productos.

1.1.1 Medición de la productividad

La productividad es técnicamente una medida de eficiencia de una persona u operación ya que compara los fines obtenidos con los recursos utilizados y se expresa por lo general como una razón o índice:

Ecuación 1

$$\text{Productividad} = \frac{\text{Resultados}}{\text{Recursos}}$$

Es importante indicar que esta relación debe tomar en cuenta el período de tiempo analizado y las consideraciones correspondientes a la calidad. De la relación anterior se puede deducir si la productividad de un proceso mejora o empeora considerando cuatro posibilidades básicas:

- Si los resultados permanecen constantes y los costos aumentan, la productividad decrece.
- Si los resultados permanecen constantes y los costos disminuyen, la productividad aumenta.
- Si los resultados aumentan y los costos permanecen invariables, la productividad aumenta.
- Si los resultados disminuyen y los costos permanecen invariables, la productividad decrece.

La productividad puede ser incrementada o modificada como resultado directo de los avances tecnológicos y por contribuciones humanas o mezcla de ambos. Algunos ejemplos y ampliación sobre estas contribuciones se detallan a continuación:

- Factores tecnológicos:
 - **Diseño del producto o servicio:** algunas cosas son fáciles de hacer o enviar, comparadas con otras de la misma especie.

- **Planta y equipo:** las instalaciones modernas y mantenimiento adecuado logran una diferencia en la productividad.
 - **Mecanización:** la introducción de automatización, controles computarizados, robots; incrementan la rapidez, precisión y eficiencia.
 - **Proyectos y métodos de los procesos:** el congestionamiento y el desorden afectan la productividad; el orden y el flujo sin obstáculos, la aceleran.
 - **Condición de materiales:** las partes preclasificadas y convenientemente dispuestas aceleran la carga de las máquinas.
 - **El método de cuantificación de energético utilizado:** electricidad, vapor, aire comprimido, agua y combustibles.
- Factores humanos:
 - Capacidad
 - Conocimiento
 - Motivación
 - Educación
 - Experiencia
 - Nivel de aspiración
 - Horarios de trabajo
 - Entrenamiento
 - Políticas de personal

1.1.2 Medición de la productividad en un proceso repetitivo

Se entenderá por ámbito laboral repetitivo a procesos que implican hacer la misma tarea o función repetidamente en un ciclo cerrado de inicio-fin-inicio a lo largo de todo el período del proceso. Procesos fabriles, alimenticios y empaquetado en general son algunos ejemplos de procesos donde la medición de la productividad suele ser parcial y

se usa principalmente para control. Permite el monitoreo del desempeño del proceso periódicamente para identificar problemas operativos y resolverlos oportunamente.

La productividad es un concepto físico construido con variables físicas que relacionan unidades de producción con unidades de recursos. A continuación un ejemplo:

Tabla I Medición de la producción física

Recurso	Unidades en manufactura	Unidades en servicios
Mano de obra	<u>Unidades producidas</u> Hora – hombre	<u>Transacciones procesadas</u> Empleado
Materiales	<u>Toneladas producidas</u> Toneladas empleadas	<u>Unidades despachadas</u> Unidades desechadas
Capital	<u>Unidades producidas</u> Hora – máquina	<u>Toneladas despachadas</u> Camiones utilizados
Energía	<u>Toneladas procesadas</u> Unidades térmicas usadas	<u>Item completados</u> Kilovatios-hora

Fuente: John Belcher. **Productividad Total**. Página 99

Debe ser cuidadoso al utilizar este método, pues no considera el efecto de los otros insumos lo que puede conducir a juicios erróneos.

1.1.3 El modelo de productividad total

El modelo desarrollado por Sumanth en el año de 1979 considera todos los factores de insumo sobre la producción en sentido tangible. La característica especial de este modelo es que además de determinar los índices de productividad total para

propósitos de control, señala los insumos específicos o los recursos cuya utilización debe mejorarse.

La productividad total en este modelo se basa en una medida de productividad total y un conjunto de cinco medidas de productividad parcial y está definida de la siguiente forma:

Ecuación 2

$$\text{Productividad} = \frac{\text{Producción tangible total}}{\text{Insumos tangibles totales}}$$

Ecuación 3

$$\begin{aligned} \text{Producción tangible total} = & \text{valor de las unidades terminadas producidas} \\ & + \text{Valor de las unidades parciales producidas} \\ & + \text{Dividendos de valores} \\ & + \text{Interés de bonos} \\ & + \text{Otros ingresos} \end{aligned}$$

Ecuación 4

$$\begin{aligned} \text{Insumos tangibles totales} = & \text{valor de los insumos empleados} \\ & (\text{Humanos} + \text{materiales} + \text{de capital} + \text{energía} + \\ & \text{otros gastos}) \end{aligned}$$

Tanto los insumos como los productos se expresan en moneda constante de un período base.

1.1.4 Notación para el modelo de productividad total

Ecuación 5 Productividad total de la empresa:

$$PTE = \frac{\text{Producción total de la empresa}}{\text{Insumos totales de la empresa}}$$

Ecuación 6

Productividad total de producto i :

$$TP_i = \frac{\text{Producción total del producto}}{\text{Insumos totales del producto } i}$$

La productividad parcial del producto i respecto al factor de entrada j se indica con la notación PP_{ij} , donde $\{j\} = \{H, M, C, E, X\}$:

- H = Insumos humanos
- M = Insumos de materiales y partes compradas
- C = Insumos de capital
- E = Energía
- X = Otros gastos de insumo tales como impuestos, honorarios profesionales, gastos de procesamiento de información, gastos de material de oficina, gastos de viajes.

N = Número total de productos manufacturados en el período considerado.

O_i = Producción del período actual del producto i en términos del valor expresado en dólares o unidad monetaria de curso legal del período base, usando el precio de venta como ponderación.

OE = Producción total de la empresa en el período actual en términos del valor expresado en dólares o unidad monetaria de curso legal del período base, usando el precio de venta como ponderación.

I_i = Insumos totales del período actual para el producto i en términos del valor expresado en dólares o unidad monetaria de curso legal del período base, usando el precio de venta como ponderación.

I_{ij} = Insumos del período actual del tipo j para el producto i en términos del valor expresado en dólares constantes o cualquier otra unidad monetaria del período base.

IE = Insumos totales del período actual usados por la empresa en términos del valor expresado en dólares o unidad monetaria de curso legal del período base, usando el precio de venta como ponderación.

Si 0 y t representan los subíndices correspondientes al período base y el período actual, respectivamente:

Ecuación 7

$$PTE_t = \frac{OE_t}{IE_t} = \frac{\sum_i O_{it}}{\sum_i I_{it}} = \frac{\sum_i O_{it}}{\sum_i \sum_j I_{ijt}}$$

Ecuación 8

$$PTE_0 = \frac{OE_0}{IE_0} = \frac{\sum_i O_{i0}}{\sum_i I_{i0}} = \frac{\sum_i O_{i0}}{\sum_i \sum_j I_{ij0}}$$

Se define el índice de productividad total para la empresa en el período t :

Ecuación 9

$$IPTE_t = \frac{PTE_t}{PTE_0}$$

El índice de productividad total para un producto i en el período t :

Ecuación 10

$$IPT_i = \frac{PT_{it}}{PT_{i0}}$$

De donde:

Ecuación 11

$$PT_{it} = \frac{O_{it}}{I_{it}} = \frac{O_{it}}{\sum_j I_{ijt}} = \frac{O_{it}}{I_{iHt} + I_{iMt} + I_{iCt} + I_{iEt} + I_{iXt}}$$

Ecuación 12

$$PT_{i0} = \frac{O_{i0}}{I_{i0}} = \frac{O_{i0}}{\sum_j I_{ij0}} = \frac{O_{i0}}{I_{iH0} + I_{iM0} + I_{iC0} + I_{iE0} + I_{iX0}}$$

1.1.4.1 **Elementos de insumos tangibles**

- Insumos humanos. Se consideran todos los recursos humanos empleados en la producción y pueden dividirse en cuatro categorías según la cantidad de trabajo de coordinación, discreción a la que están obligados y grado en que realizan la función productiva:

Tabla II Elementos de insumo tangibles

	Discreción	No discreción
Coordinadores	Administradores	Burócratas
Productores	Profesionales	Trabajadores

Fuente: David Sumanth. **Ingeniería y Administración de la Productividad**. Página 160

Los administradores se dedican principalmente al proceso de coordinación y tienen poder discrecional; los burócratas participan en el proceso de coordinación y muestran muy poca o ninguna discreción en la realización de sus funciones puesto que la mayoría de sus procedimientos están determinados por los administradores. Los profesionales son en esencia productores más que coordinadores, empleando su discreción para determinar sus propias actividades; los trabajadores son productores cuyas actividades deciden otros, operarios, por ejemplo. En el MPT se calculan las horas-hombre y los sueldos / salarios promedio de cada uno de los cuatro tipos de empleados y para cada producto en un período dado de análisis.

- Insumo material: se refiere a la materia prima y las partes que se adquieren.

Ecuación 13

Valor de la materia prima consumida para un producto en un período	=	Cantidad de material utilizado para este producto en este período	X	Precio de compra de los materiales en el período base
--	---	---	---	---

El valor total de la materia prima se obtiene con un cálculo similar para cada material consumido en un período y después sumando los valores individuales.

Ecuación 14

Valor del insumo de material para un producto en un período	=	Valor de la materia utilizada para este producto en este período	+	Valor del total de partes compradas utilizadas en este producto durante ese período
---	---	--	---	---

Si una empresa produce más de un producto, el valor total de los insumos materiales se obtiene sumando los valores correspondientes a cada producto individual. Cuando en el período actual se fabrican uno o más productos que no se fabricaron en el período base, el cálculo de cada materia prima correspondiente a un producto es el siguiente:

Ecuación 15

Valor de la materia prima consumida en un período para un producto no fabricado en el período base	=	Cantidad de material utilizado para este producto en este período	X	Precio de compra del material en el período actual	/	Índice de precios del bien para este material
--	---	---	---	--	---	---

- **Capital.** En el modelo se consideran tanto el capital fijo como el capital de trabajo. El capital fijo comprende terreno, planta, maquinaria, herramientas y equipo, y los costos amortizados de investigación y desarrollo. Por otra parte, el capital de trabajo incluye el dinero que se necesita para mantener el inventario, el efectivo, las cuentas por cobrar.

Tradicionalmente se emplean dos métodos para medir el consumo del capital fijo, uno es el método de depreciación y el otro es el método del equivalente de insumo de mano de obra. El insumo de capital está compuesto por el valor de los servicios de capital que a su vez se determinan por el valor de renta.

Ecuación 16

Valor del insumo de capital fijo para la empresa	=	Suma de los valores anuales de cada activo, calculados sobre la base de su costo en el año base, vida productiva y el costo de capital para la empresa
--	---	--

En donde

Ecuación 17

Costo en el año base de un activo	=	precio de compra del activo +costos capitalizados en que se incurre para el uso del activo
-----------------------------------	---	--

Ecuación 18

Vida productiva de un activo	=	Período estimado en que se puede esperar que el activo sea útil antes de su deterioro físico completo o de su obsolescencia económica
------------------------------	---	---

La vida productiva es un período finito para los conceptos de capital fijo pero se puede suponer que es infinita para los conceptos de capital de trabajo como efectivo, cuentas por cobrar, inventario, etc.

Ecuación 19

Valor del insumo de capital de trabajo para la empresa	=	Suma del producto del valor de un activo líquido en términos del costo de capital para la empresa en el año base
--	---	--

En donde el valor de un activo líquido en términos del año base se obtiene mediante la deflación de su valor en el período actual.

Ecuación 20

Valor total del insumo de capital	=	Valor del capital fijo + valor del capital de trabajo
-----------------------------------	---	---

En esta forma se puede calcular el insumo de capital para cualquier período de interés.

- Energía: el insumo de energía es el costo de la energía en que se incurre al utilizar uno o más de los recursos de combustible, como petróleo, gas, carbón, electricidad y agua.
- Otros gastos: este insumo incluye gastos de viaje, impuestos, honorarios profesionales, gastos de comercialización, gastos de procesamiento de información, materiales de oficinas, etc. El título de insumos de otros gastos comprenden todos aquéllos que los otros cuatro factores de insumo no incluyen.

Los valores de insumos y producción se recopilan primero para cada producto por separado y después se agregan para obtener los valores a nivel de la empresa.

1.1.5 El modelo de productividad total operativo

El MPTO es el MPT abreviado y es adecuado para tratar de analizar el aspecto operativo, eliminando de la producción tangible los elementos de dividendos de valores, interés de bonos y otros ingresos. Cuando el impacto de estos tres elementos de producción financiera no tiene un efecto significativo sobre el consumo de recursos a nivel de unidad operativa. En forma simbólica, la productividad total operativa se define como sigue:

Ecuación 21

$$PTO_{it} = O'_{it} / I_{it}$$

En donde:

Ecuación 22

O'_{it} = Valor de unidades de producción terminadas + valor de unidades de producción parciales.

Ecuación 23

$$I_{it} = I_{iHt} + I_{iMt} + I_{iCt} + I_{iEt} + I_{iXt}$$

Puesto que $O'_{it} < O_{it}$, $PTO_{it} < PT_{it}$

1.1.5.1 Productividad total de un producto en términos de productividades parciales

Se define como la razón del valor de la producción total del producto i entre el costo total de insumos en que se incurrió al fabricar esa producción.

Ecuación 24

$$PT_i = O_i / I_i = O_i / \sum_j I_{ij}$$

La productividad parcial del producto i respecto a cualquier factor de insumo j se define como la razón del valor de la producción total del producto i entre el costo de insumo del factor j.

Ecuación 25

$$PP_{ij} = O_i / I_{ij}, \text{ para toda } j$$

De las ecuaciones anteriores se deriva:

Ecuación 26

$$PT_i = W_{ij} \times PP_{ij}, \text{ para toda } j$$

Donde W_{ij} representa la fracción del factor de insumo j respecto a la suma de todos los insumos utilizados para fabricar el producto i y está dado por la expresión:

Ecuación 27

$$W_{ij} = I_{ij} / \sum_j I_{ij}$$

1.1.6 La productividad y la fuerza laboral

La tecnología es una de las técnicas para mejorar la productividad de un proceso, pero únicamente la utilización de éstas como estrategia de mejora puede no lograr un cambio consistente y duradero de ésta. Los procesos que enfocan sus esfuerzos en las técnicas para mejorar la productividad logran éxito en el corto plazo pero a menudo no están preparados para capitalizar los beneficios que ofrecen a un mediano y largo plazo.

Enfocar a la fuerza laboral en mejoras de la productividad sólo dentro del contexto de las técnicas nunca logrará una cultura de productividad ya que no constituirá un objetivo cotidiano de sus actividades diarias. Las técnicas deben utilizarse como tácticas que respaldan una estrategia de mejora continua e integrada de la productividad.

La tecnología como una técnica de mejora de la productividad afecta la “calidad de vida laboral” y generalmente es tomada como una herramienta que atenta contra la estabilidad laboral de los empleados, por lo tanto, es difícil intentar convencer a un individuo que con la implementación de tecnología, a los procesos de manufactura, disfrutará de una alta calidad de vida laboral si teme por su estabilidad laboral. Ante tal situación será necesario acompañar a este tipo de estrategia con otro tipo de valor agregado que consiga la cooperación mutua de la fuerza laboral, pues de no hacerlo y ante la influencia de agrupaciones laborales como sindicatos y otros, el fracaso será anunciado.

Aunque la mejora de la productividad se considere un concepto técnico – administrativo, implica y exige que la gestión del recurso humano sea necesariamente una pieza vital en el proceso. Según John G. Belcher (1987): “Las organizaciones que reconocen el papel de los recursos humanos en la mejora de la productividad y aprecian el poder de una fuerza laboral comprometida e involucrada, dedican recursos sustanciales y energías administrativas al desarrollo de un ámbito donde los empleados puedan y deseen contribuir a mejorar al máximo el desempeño de sus aptitudes”.

Para David J. Sumanth la instalación de técnicas para el mejoramiento de la productividad genera una tremenda resistencia por parte de los trabajadores, ya que al no compartir las ganancias de la productividad tendrán preocupación sobre los motivos de los administradores e indica “es desafortunado que los empleados vean las mejoras de la productividad con suspicacia y sentimiento negativo ya que, en términos generales, el mejoramiento de la productividad eventualmente creará más empleos” también concluye que “ a los trabajadores que por mejoras a la productividad se queden sin lugar se les debe recapacitar, pero nunca despedir”.

1.1.7 La productividad y la calidad del producto

Tradicionalmente la calidad se ha enfocado en sentido absoluto, es decir, igualando la calidad mejorada con la perfección o especificaciones más rigurosas. Esto ha provocado que se vea como un concepto inversamente correlacionado con la productividad, es decir, mayor calidad se consigue a expensas de la productividad de un proceso o viceversa. Sin embargo, si se enfoca la calidad como conformidad con las especificaciones si el producto o servicio se produce con no-conformidades entonces hay que repararlo, reprocesarlo o producirlo de nuevo. El resultado es que se requieren más recursos-personal, material, equipo-para producir una cantidad dada de productos o servicios que satisfagan las especificaciones. Este concepto se le conoce como calidad de proceso y tiene una correlación clara y directa con la productividad. Aunque los productos terminados de una organización pueden conformarse a las especificaciones, la calidad del proceso que produjo esos productos o servicios puede variar ampliamente y tendrá decisiva influencia sobre la productividad de la organización.

Si es preciso reelaborar o reprocesar cantidades sustanciales de productos, si las materias primas son defectuosas, si el desperdicio y la pérdida de material son excesivos, si la pérdida por rechazos es elevada, la organización no puede decir que tiene altos niveles de calidad o productividad. El bajo desempeño en calidad incrementa los recursos requeridos para producir una determinada cantidad de bienes. La reelaboración incrementa la cantidad de mano de obra, tal vez el capital, y los recursos energéticos requeridos. Los desperdicios y rechazos incrementan el material requerido para un nivel dado de producción, y el desempeño de baja calidad aumenta la necesidad de inspección y control, lo cual requiere recursos adicionales.

Con la baja de calidad una cantidad sustancial de los recursos de una organización se debe consagrar a corregir defectos y manipular desperdicios en vez de producir bienes y servicios. Al mejorar la calidad, los recursos requeridos para producir una cantidad dada de productos declinan, y eso se traduce en mejor productividad.

1.2 Automatización

A finales del siglo XIX y principios del XX con la revolución industrial se desarrollaron los primeros sistemas de control, se basaron casi exclusivamente en componentes mecánicos y electromecánicos, básicamente engranajes, palancas, relés y pequeños motores. A partir de mediados del siglo XX empezaron a emplearse semiconductores que permitían el diseño de sistemas de menor tamaño y consumo, más rápidos y con menor desgaste y a partir de los años 70 empezaron a emplearse circuitos integrados y en particular los de tipo programable. Los ordenadores digitales tenían uso restringido a procesos muy complejos debido a su costo, personal especializado necesario para instalarlo y manejarlo, además poca facilidad de interconexión con el proceso ya que no estaban preparados para manejar tensiones y corrientes altas.

Los autómatas programables industriales se desarrollaron debido a la necesidad de la industria de contar con un sistema económico, robusto, flexible, fácilmente modificable y con mayor facilidad para tratar tensiones y corrientes altas que los ordenadores. Los primeros pretendían, básicamente, sustituir a los sistemas convencionales con relés o circuitos lógicos, con la ventaja evidente que suponía tener un *hardware* estándar, sus lenguajes de programación eran muy próximos a los esquemáticos empleados en las tecnologías convencionales, aunque las posibilidades que realmente podían ofrecer eran mucho mayores.

Los autómatas actuales han mejorado sus prestaciones respecto a los primeros, fundamentalmente en incorporar juegos de instrucciones más potentes, velocidad de respuesta, capacidad de comunicación, juegos de instrucciones que incluyen actualmente operaciones lógicas de bits, temporizadores, contadores, operaciones lógicas con palabras, operaciones aritméticas, tratamiento de señales analógicas, funciones de comunicación y una serie de funciones de control no disponibles en la tecnología clásica de relés.

1.2.1 **Sistemas de control**

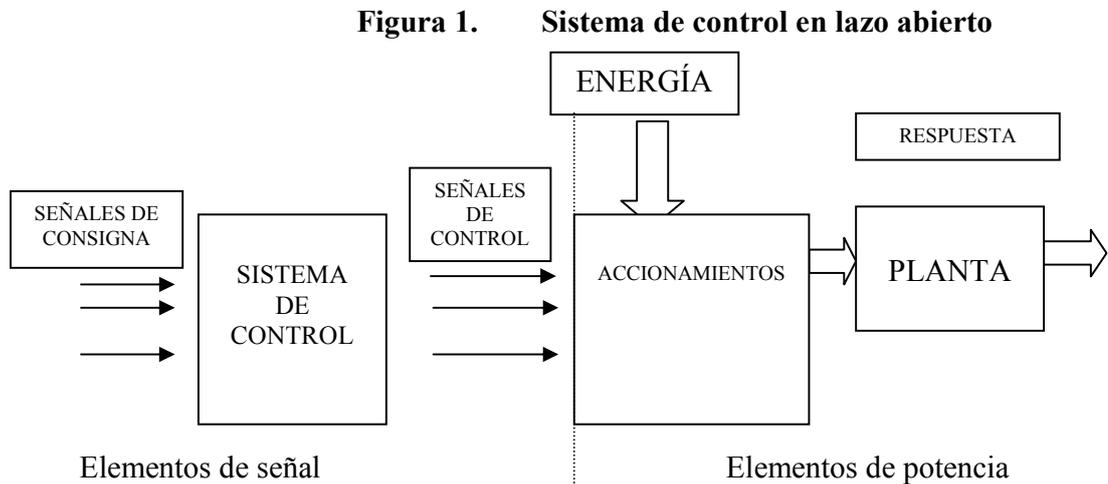
El objetivo de un sistema de control es el de gobernar la respuesta de otro sistema denominado planta sin que el “operador” intervenga directamente sobre sus elementos de salida, dejar a éste únicamente la manipulación de las magnitudes denominadas de consigna, y encargarse de gobernar dicha salida a través de los accionamientos.

El sistema de control opera en general con magnitudes de baja potencia llamadas señales y gobierna unos accionamientos que son los que realmente modulan la potencia entregada a la planta. En el caso más general, los sistemas de control se dividen en los bloques principales de unidad de control, accionamientos, sensores e interfaces. Al conjunto de señales que entran a la unidad de control se les denomina genéricamente entradas y al conjunto de señales de control obtenidas salidas.

1.2.1.1 División de los sistemas de control

- Por la respuesta del sistema de control y accionamientos

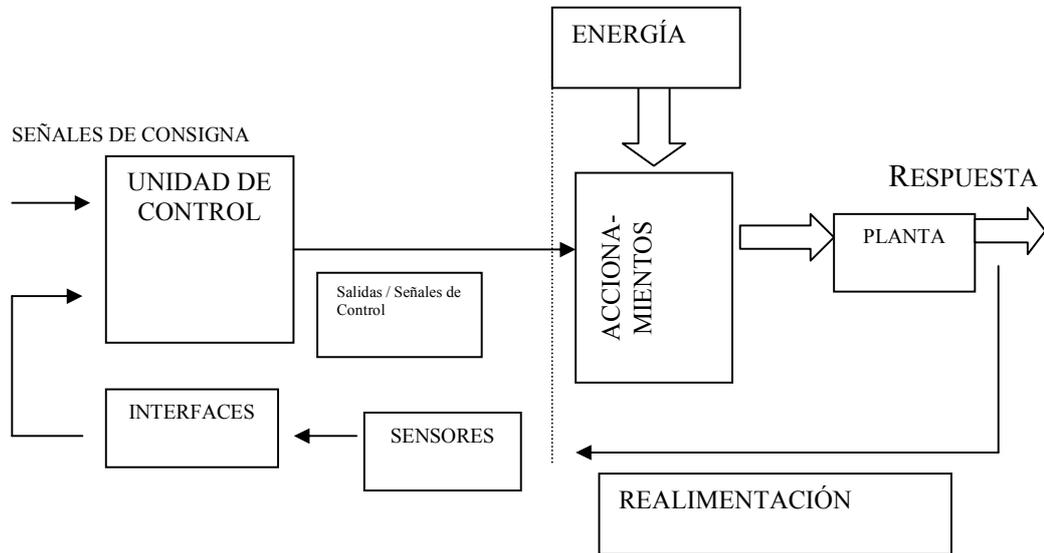
Sistemas en lazo abierto. Se les denomina con este nombre cuando el conjunto se limita a ser un convertidor amplificador de potencia que ejecuta las órdenes dadas a través de las magnitudes de consigna y no recibe ningún tipo de información del comportamiento de la planta.



Fuente: Josep Balcells y José Luis Romeral. **Autómatas programables**. Página 5

Sistemas en lazo cerrado: se les denomina con este nombre cuando en el conjunto además de ejecutar las órdenes dadas a través de las magnitudes de consigna, el sistema de control a través de sensores e interfaces, se encarga de la toma de ciertas decisiones ante determinados comportamientos de la planta hablándose entonces de sistemas automáticos de control.

Figura 2. Sistema de control en lazo cerrado



Fuente: Josep Balcells y José Luis Romeral. **Autómatas programables**. Página 5

Por la naturaleza de las señales que intervienen en el proceso

Sistemas digitales: trabajan con señales todo o nada, llamadas también binarias, que sólo pueden presentar dos estados o niveles: abierto o cerrado, conduce o no conduce, mayor o menor, etc. Estos niveles o estados se suelen representar por variables lógicas o bits, cuyo valor puede ser solo 1 ó 0, empleando la notación binaria del álgebra de Boole. A los automatismos que trabajan con variables de un solo bit se les denomina lógicos, y a los que procesan señales de varios bits, para representar, por ejemplo, valores numéricos de variables o contenido de temporizadores, contadores, etc., se les denomina digitales y se suelen representar por variables numéricas.

Sistemas analógicos: operan usando señales del tipo continuo con un margen de variación determinado. Dichas señales suelen representar magnitudes físicas del proceso tales como presión, temperatura, velocidad, etc., mediante una tensión o corriente proporcionales a su valor normalizados entre 0 a 10 voltios y 4 a 20 miliamperios de tensión directa. Teóricamente habría que distinguir infinitos estados posibles, sin embargo, mediante convertidores analógicos / digitales se convierten las magnitudes en valores numéricos.

Sistemas híbridos: son los que procesan a la vez señales analógicas y digitales.

Por la posibilidad de funciones que pueden realizar

Sistemas cableados: son los que realizan una función de control fija, que depende de los componentes que lo forman y de la forma en que se han interconectado. Por lo tanto, la única forma de alterar la función de control es modificando sus componentes o la forma de interconectarlos, por lo que son poco adaptables.

Sistemas programables: son los que pueden realizar distintas funciones de control sin alterar su configuración física, sino sólo cambiando el programa del control, por lo que son muy adaptables.

Sistemas programables por ordenador: son sistemas de control con una gran capacidad de cálculo, conexión a estaciones gráficas, múltiples canales de comunicación, facilidad de adaptación, capacidad de multiproceso, etc., a los que se les adaptan interfaces específicas para la planta a controlar. Este tipo de sistemas resulta económicamente caro y poco estándar sobre todo por el hecho de que el ordenador no suele disponer de interfaces adecuadas para recoger y enviar las señales de planta. Normalmente no está a la mano del usuario el poder alterar sus funciones, por lo que el equipo es “de programa fijo” o “adaptado a la medida”.

Sistemas programables por autómeta: son sistemas de control con unidad de control por autómeta, incluyendo total o parcialmente las interfaces con las señales de proceso. Por otro lado se trata de un sistema con un *hardware* estándar, con capacidad de conexión directa a las señales de campo y programable por el usuario. Al conjunto de señales de consigna y realimentación que entran en el autómeta se les denomina genéricamente entradas y al conjunto de señales de control obtenidas salidas, pudiendo ser ambas analógicas o digitales. El concepto de *hardware* estándar que se viene indicando para el autómeta se complementa con el de modularidad, entendiéndose como tal, el hecho de que este hardware está fragmentado en partes interconectables que permiten configurar un sistema a la medida de las necesidades.

Por la dependencia entre la salida y la entrada

Sistemas combinacionales: son aquéllos cuyas salidas dependen únicamente del estado de sus entradas, no importando en ningún momento el estado inicial de partida. La función o funciones de transferencia de estos sistemas son funciones lógicas que relacionan las salidas con las entradas mediante combinaciones de los operadores “Y”, “O”, “NO”.

Sistemas secuenciales: son aquéllos cuyas salidas dependen de las variables de entrada y del estado inicial del sistema. Cualquier estado puede ser tomado como estado inicial, por lo que el sistema es capaz de memorizar todos los estados posibles, los que se memorizan mediante variables internas denominadas variables de estado y tiene como operadores “Y”, “O”, “NO” y “Memoria”. Los nombres de los operadores para función memoria suelen llamarse:

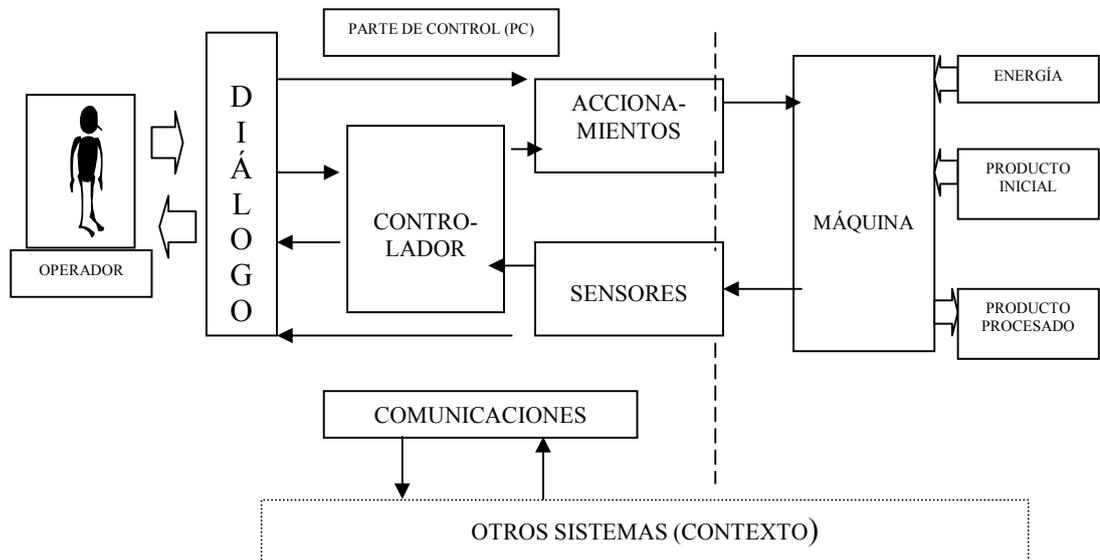
SET = Memorizar un 1
RESET = Memorizar un 0

1.2.2 Principio de un sistema automático

En todo proceso, por complicado que éste parezca será siempre de interés aislar las actividades que el propio sistema puede desarrollar y definir las actividades o acciones del operador de tal manera que no interfiera uno con el otro. El concepto de sistema automático proviene del vocablo autónomo e indica la cuantía en que el sistema puede funcionar sin la intervención física de la mano del hombre durante el proceso. Se pretende delegar las funciones de toma de decisiones al operador y programarle los algoritmos de decisión al autómata.

Figura 3. Estructura de un sistema automatizado

PARTE OPERATIVA (PO)



Fuente: Josep Balcells y José Luis Romeral. **Autómatas programables**. Página 19

Tecnologías aplicadas en automatismos

Lógica cableada: en esta lógica los elementos pueden ser electromagnéticos, eléctricos, neumáticos o hidráulicos, tales como relés, contactores, arrancadores, etc. Bajo esta tecnología el automatismo se realiza con elementos o módulos interrelacionados, dependiendo su funcionamiento del cableado que tengan. La lógica cableada tiene limitaciones técnicas impuestas por la complejidad tales como espacio, flexibilidad y costo.

Lógica programada: esta tecnología utiliza los autómatas programables, elemento básico en la automatización, está concebido para realizar ciclos

de funcionamiento automático. El programa puede realizarse en diversos lenguajes, aplicando en cada caso el método que más convenga, como son entre otros, los siguientes:

Esquemas eléctricos de contactos

Ecuaciones

Esquemas lógicos

Algoritmos

Flujogramas

1.2.3 Controladores lógicos

El diseño sistemático de un sistema controlador lógico está relacionado con un modelo del tipo matemático y reglas de operación que no admiten ambigüedades. La forma de hacer un tratamiento genérico de todas las partes de un sistema, cualesquiera que sean sus componentes y la tecnología empleada, se base en los siguientes principios:

Dividir el sistema en bloques: estos bloques pueden ser muy globales, al principio del estudio, y pueden ser divididos en bloques más elementales, según se avance, hasta llegar al nivel de componentes generales.

De cada bloque interesará sólo las magnitudes de entrada y las magnitudes de salida.

Cada magnitud de entrada o salida se representará por una variable. Estas variables podrán ser de tipo lógico o numérico, según la propiedad que interese observar.

Hallar, para cada bloque, la función que relaciona las variables de entrada y salida, denominada función de transferencia, dichas funciones podrán ser de tipo lógico, algebraico o numérico, según la naturaleza del bloque que representen. A todos los efectos, dos bloques que tengan función de transferencia idéntica se

considerarán idénticos, con independencia de los componentes que lo formen e incluso de la tecnología utilizada en su implementación.

Deducir el esquema de cableado o el programa del automatismo. Para los sistemas lógicos combinacionales y secuenciales, el álgebra de Boole es la herramienta de análisis y síntesis. Estos esquemas quedan perfectamente definidos mediante funciones de transferencia que relacionan cada salida con la entrada mediante los operadores Y, O, NOT.

Algunas magnitudes que intervienen en los automatismos presentan un margen de variación continuo. Este tipo de magnitudes se han definido como analógicas y los automatismos que las controlan se conocen en general como reguladores. Se distinguen dos tipos de reguladores dependiendo del tratamiento de señales: analógicos y digitales.

1.2.4 Controladores analógicos

Se considera un automatismo de esa naturaleza cuando cualquiera de sus variables de entrada o salida varía respecto al tiempo. La mayoría de sistemas automáticos son de este tipo y pueden ser representados como diagrama de bloques, diagramas de flujo ó gráficos y en listas de instrucciones. Considerando que las magnitudes de entrada y salida varían de forma continua en el tiempo, la función de transferencia será la ecuación diferencial que relaciona dichas magnitudes y sus respectivas derivadas respecto al tiempo, las cuales pueden ser resueltas por métodos algebraicos basándose en la Transformada de Laplace.

La función de transferencia de un bloque se define habitualmente a partir del método frecuencial, es decir como la relaciona salida- entrada para una entrada del tipo senoidal.

La respuesta temporal del automatismo analógico puede obtenerse basándose en el método de Laplace para la resolución de las ecuaciones diferenciales sustituyendo en la función de transferencia el operador (jw) por el operador (s).

- **Configuraciones básicas de bloques**

Tanto el proceso de análisis como el de síntesis de sistemas requieren encadenar o descomponer bloques para configurar sistemas más complejos a partir de sus componentes o partes. Se debe por tanto, conocer las reglas básicas para combinar dichos bloques entre sí, sus configuraciones básicas y sus equivalencias.

- Bloques en serie: denominados también como bloques en cascada, están dispuestos uno después del otro y la función de transferencia que relaciona la salida final con la entrada se obtiene multiplicando las correspondientes funciones de transferencia de los bloques:

○

Ecuación 28

$$T_s = S_n/E_1 = T_1 * T_2 * \dots * T_n$$

- Bloques en paralelo: se entiende que hay bloques en paralelo cuando tengan la misma señal de entrada y se sumen algebraicamente sus señales de salida. La función de transferencia equivalente se obtiene sumando las funciones de transferencia de los bloques:

Ecuación 29

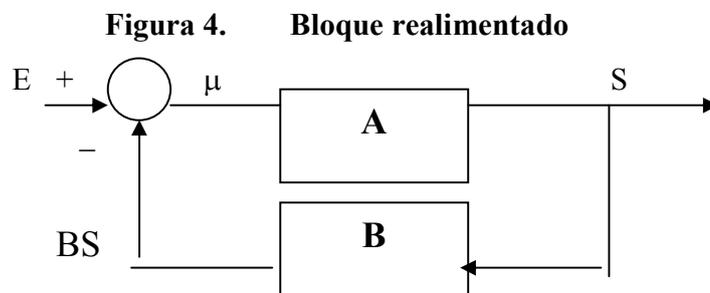
$$T_p = S/E = T_1 + T_2 + \dots + T_n$$

Un signo menos en la suma de señales puede ser atribuido al propio nudo sumador o a la función de transferencia.

- Bloque realimentado: es la estructura típica de los sistemas en lazo cerrado. Se considera como habitual que el nudo de entrada sea un nudo diferencial en vez de sumador y que dichos sistemas persiguen, en general, una realimentación negativa, con el objetivo de eliminar el error μ . Es necesario considerar que A y B son por lo general expresiones complejas dependientes de la frecuencia y, por lo tanto, la diferencia es entre dos magnitudes vectoriales o si se prefiere entre números complejos. La función de transferencia equivalente se obtiene como sigue:

Ecuación 30
$$S = A \mu = A (E - B S) = A E / (1 + AB)$$

Ecuación 31
$$T_f = S / E = A / (1 + A B)$$



Utilizando estas tres operaciones básicas entre bloques pueden transformarse los diagramas de bloques para su simplificación y análisis.

- Control en lazo cerrado: en el diagrama característico para los sistemas de control industrial configurado en lazo cerrado, puede clasificarse en dos partes:

el conjunto controlador y la planta, que forman la cadena directa o de acción y cuya función de transferencia se ha supuesto que es $A(j\omega)$.

El conjunto transductor y adaptador de señal forma la cadena de realimentación, cuya FDT hemos supuesto que es $B(j\omega)$. Según la ecuación anterior, la función de transferencia equivalente del total del sistema en función de las FDT de la cadena directa y de realimentación, será la siguiente:

Ecuación 32
$$T_f(j\omega) = S(j\omega) / E(j\omega) = A(j\omega) / (1 + A(j\omega) B(j\omega))$$

Donde el producto $A(j\omega) \times B(j\omega)$ se suele conocer como función de transferencia o ganancia en lazo abierto del sistema total.

Las FDT, tanto de la cadena directa como de realimentación son funciones de la frecuencia que contienen parte real y parte imaginaria, o, si se prefiere, relación de módulos y desfase. Así pues, para una frecuencia determinada $A(j\omega)$ y $B(j\omega)$ estarán expresadas por un número complejo.

La frecuencia en la cual el producto de ambos números complejos $A(j\omega) \times B(j\omega)$, resulte ser el número real (-1), se conoce como *frecuencia de resonancia del sistema en lazo cerrado* ya que $T(j\omega)$ tendería a tener un valor infinito y esto se interpreta como que el sistema da, para la mencionada frecuencia, una señal de salida sin que exista señal de entrada, es decir el sistema oscila a dicha frecuencia. Hay que observar que se trató únicamente de las magnitudes de control y que el hecho de oscilar, o dar salida de una determinada frecuencia en ausencia de entrada, no implica que el sistema genere energía de la nada. El hecho de oscilar indica simplemente que el sistema regula su salida, haciéndola oscilar a la frecuencia de resonancia, sin que exista magnitud de consigna

que lo ordene. Se dice en tal caso que el sistema en lazo cerrado es inestable para dicha frecuencia.

Pueden darse situaciones próximas al caso de oscilación puro; situaciones que sin llegar a originar oscilación hagan que el comportamiento dinámico ante ciertos estímulos sea oscilatorio, con tiempos largos de estabilización.

La estabilidad de un sistema en lazo cerrado puede estudiarse a partir de la representación de Bode de las FDT de la cadena directa y de realimentación. Si se dispone de una representación de la FDT en lazo abierto, donde no se da la condición de inestabilidad, se puede definir el margen de seguridad del sistema frente a la inestabilidad en términos de amplitud o de fase mediante los siguientes parámetros:

- Margen de amplitud: es la mínima distancia, medida en decibelios, entre el módulo de la FDT en lazo abierto y el eje de 0 (dB) para todas aquellas frecuencias en que la fase de dicha FDT vale 180° .
- Margen de fase: es la mínima distancia, medida en grados o radianes, entre la fase de la FDT en lazo abierto y 180° , para todas aquellas frecuencias en que el módulo de dicha FDT vale la unidad 0 (dB).

La estabilidad de un sistema en lazo cerrado es tanto mayor cuanto mayor sean los márgenes de amplitud y fase de la FDT en lazo abierto.

1.2.5 Controladores PID

La misión de un controlador consiste en comparar el valor de consigna con el valor real de la magnitud de salida de una planta y generar la señal de control más

adecuada para minimizar los errores y obtener una respuesta lo más rápida posible ante variaciones de consigna o ante perturbaciones exteriores.

La acción de control que deberá ejercer el controlador para conseguir las prestaciones antes mencionadas depende del tipo de planta a controlar, por lo que, la función de transferencia del controlador debe escogerse según ésta. Sin embargo, las funciones de transferencia de los controladores suelen obedecer todas ellas, a unos pocos modelos básicos de comportamiento o a combinaciones simples entre ellos. Dichos modelos básicos de comportamiento se denominan también acciones básicas de control.

Las acciones básicas de control que suelen llevar incorporadas los controladores industriales y los propios autómatas programables son las siguientes:

1.2.5.1 **Acción proporcional**

En un controlador de tipo proporcional puro la salida o acción de control $C(t)$ depende de la señal de error $\mu(t)$, según la expresión:

Ecuación 33
$$C(t) = K_p \mu(t)$$

Donde K_p es una constante denominada ganancia o constante proporcional.

En términos de funciones de transferencia, expresadas por la relación de Transformadas de Laplace, la expresión de la FDT de un bloque proporcional sería una constante:

Ecuación 34
$$T(s) = C(s) / \mu(s) = K_p$$

Los bloques que desarrollan una acción de tipo proporcional se denominan habitualmente controladores tipo P y se caracterizan por el hecho de que es necesaria la existencia de un error (μ) para que exista acción de control. Para una determinada salida del sistema, dicho error es tanto menor cuanto mayor sea la ganancia del sistema, como se desprende de la siguiente ecuación obtenida directamente de las ecuaciones anteriores.

Ecuación 35
$$\mu(t) = 1/K_p C(t) = BP \times C(t)$$

Al inverso de la ganancia se le denomina habitualmente *banda proporcional* (BP), con lo cual puede decirse que el error del controlador es directamente proporcional a su banda proporcional.

Para un controlador digital, una vez conocidos en forma numérica los valores de consigna $E(t_x)$ y de la realimentación $R(t_x)$ en un instante t_x determinado, las operaciones a desarrollar para obtener una acción de control $C(t_x)$ de tipo proporcional consisten simplemente en una resta y un producto, según indican las siguiente ecuaciones:

Ecuación 36
$$\mu(t_x) = E(t_x) - R(t_x)$$

Ecuación 37
$$C(t_x) = K_p \cdot \mu(t_x)$$

Sin embargo, estos sistemas digitales introducen necesariamente un retardo en su respuesta, ya que la propia adquisición en forma numérica de los valores $E(t_x)$ y $C(t_x)$ y el efectuar las operaciones indicadas anteriormente requieren tiempo. Por tanto, en todo sistema digital hay que tener presente que las señales que se manejan son las que hubo unos instantes antes $E(t_{x-1})$, cuando se pretende obtener $C(t_x)$ por ejemplo y que, por tanto, el sistema de control representa un retardo puro.

1.2.5.2 Acción integral

El principal inconveniente de un regulador que tuviera sólo acción proporcional es que deja siempre un error por corregir, tanto mayor cuanto mayor es la banda proporcional. La acción integral permite, como se verá, anular este error, haciendo que la señal de control, $C(t)$, crezca proporcionalmente al producto (error X tiempo). Pudiendo decirse, pues, que un sistema con acción integral tiende a anular el error promedio.

El comportamiento de un regulador de acción integral puede expresarse analíticamente con una de las siguientes ecuaciones:

Ecuación 38
$$d[C(t)] = K_i \mu(t) dt$$

Ecuación 39
$$C(t) = K_i \int_0^t u(t) dt$$

La ecuación anterior indica que, en tanto que exista error entre la consigna y la realimentación, el sistema aumenta la salida, intentando la corrección del mismo. En el momento en que el error es nulo, el sistema mantiene el valor de salida constante.

En términos de función de transferencia, aplicando la transformación de Laplace a cualquiera de las dos ecuaciones anteriores, resulta:

Ecuación 40
$$T(s) = C(s) / \mu(s) = K_i / s = 1 / T_i s$$

La constante K_i se denomina constante integral y su inversa T_i se denomina constante de tiempo integral. La respuesta en régimen senoidal se puede obtener de forma inmediata sustituyendo el operador s de Laplace por $(j\omega)$, resultando entonces

una FDT del tipo $(1/j\omega T_I)$. El tratamiento en el caso de un controlador digital y supuestos conocidos en forma numérica los valores de consigna $E(t_x)$ y de la realimentación $R(t_x)$ en el instante t_x .

Las operaciones que debería efectuar el controlador para obtener una acción de control $C(t_x)$ de tipo integral son:

Ecuación 41
$$\mu(t_x) = E(t_x) - R(t_x)$$

Ecuación 42
$$C(t_x) = K_I \sum_{i=0}^{i=x} \mu(t_i) \cdot (t_i - t_{i-1})$$

Según la ecuación anterior la integral se resuelve como una suma de errores por incrementos de tiempo, donde $(t_i - t_{i-1})$ es el tiempo transcurrido entre la toma de dos valores consecutivos de $\mu(t)$, llamado normalmente tiempo de muestreo.

Los controladores de tipo integral tienden a eliminar el error pero para plantas que presenten un retardo de primer orden pueden dar lugar a funcionamientos inestables en lazo cerrado o, si se eligen constantes de tiempo altas, la respuesta dinámica es excesivamente lenta.

1.2.5.3 Acción derivativa

Las acciones proporcional e integral no permiten resolver de forma satisfactoria todos los problemas de control. La primera dejaba siempre un error permanente y la segunda que podía causar inestabilidad o exceso de tiempo de respuesta. La acción derivativa complementa a las dos anteriores ayudando a obtener una respuesta dinámica

más rápida y se caracteriza por generar una señal de control proporcional a la tasa de variación del error con el tiempo. Esto se puede expresar analíticamente con la siguiente ecuación:

Ecuación 43
$$C(t) = K_D d\mu(t)/dt = T_D d\mu(t)/dt$$

Donde K_D se denomina constante de acción derivativa y es igual a la constante de tiempo derivativa T_D .

En términos de función de transferencia, aplicando la transformada de Laplace resulta:

Ecuación 44
$$T(s) = C(s)/\mu(s) = T_D s = K_D s$$

La respuesta en régimen senoidal se puede obtener de forma inmediata sustituyendo el operador s de Laplace por $(j\omega)$, resultando entonces una FDT del tipo $(j\omega T)$. Se trata de una red conocida habitualmente como red de avance de fase.

En la práctica no se encuentran bloques con un comportamiento derivativo puro, sino que la acción derivativa aparece siempre combinada con un retardo de primer orden. Sin embargo, para tiempos de respuesta de la planta muy superiores al retardo de primer orden podrá considerarse que el bloque es puramente derivativo.

En cuanto a la implementación del bloque derivativo por métodos numéricos, las operaciones a realizar por el controlador digital serían las siguientes:

Ecuación 45
$$\mu(t_x) = E(t_x) - R(t_x)$$

Ecuación 46
$$C(t_x) = K_D [\mu(t_x) - \mu(t_x - 1)]$$

Un bloque derivativo de tipo digital tiene también un retardo y presenta además un truncamiento si se sobrepasa el máximo valor numérico permitido, por lo que es un derivador imperfecto por retardo y saturación al igual que sus homónimos de tipo analógico.

Los controladores industriales combinan los tres tipos de acciones básicas, dando lugar a los conocidos reguladores de tipo PID, cuyo comportamiento corresponde a la superposición de las tres acciones proporcional, integral y derivado. El comportamiento será el siguiente:

$$\text{Ecuación 47} \quad C(t_x) = K_P \left\{ \mu(t_x) + \frac{1}{T_I} \int_0^t \mu(t) dt + T_D \frac{d\mu(t)}{dt} \right\}$$

De donde la función de transferencia es:

$$\text{Ecuación 48} \quad T(s) = K_P \left\{ 1 + \frac{K_I}{s} + K_D s \right\}$$

$$\text{Ecuación 49} \quad T(s) = K_P \left\{ \frac{1 + T_I s + T_I T_D s^2}{T_I s} \right\}$$

Hallando la solución de la ecuación del numerador y para el caso de que $T_I \gg 4T_D$ se puede aproximar la FDT del bloque PID por la siguiente fórmula simplificada:

$$\text{Ecuación 50} \quad T(s) = K_P \left\{ \frac{(1 + T_I s)(1 + T_D s)}{T_I s} \right\}$$

La acción proporcional se supone que actúa sobre el total de la respuesta, de esta forma las constantes integral y derivativa representan siempre el peso relativo de cada una de estas acciones para una acción proporcional unidad.

En la mayor parte de casos la aplicación de controladores industriales se resolverá mediante un *hardware* estándar, ya sea autómatas o regulador específico, y el usuario deberá únicamente programar o ajustar las constantes K_P , K_I y K_D . La ejecución en sí es, por tanto, sencilla, aunque la elección de los mencionados parámetros no siempre es tan simple, pues suelen aparecer problemas de inestabilidad o de falta de rapidez. Muchos reguladores actuales suelen incorporar una función de auto ajuste, denominada a veces “*auto tuning*”, que se encarga de ajustar las constantes por auto-aprendizaje o por inyección de señales de control que le permitan determinar el comportamiento de la planta.

La mayoría de controladores digitales incorporan fórmulas correctivas para evitar el rebosamiento o comportamiento brusco o incluso para cambiar las constantes K_P , K_I , y K_D en función de los valores de la planta dando lugar a lo que se llama un control adaptativo.

1.2.6 Controladores digitales

Se conocen también por controladores todo o nada cuya salida o elemento de accionamiento de la planta tiene sólo dos posiciones: conectado y desconectado o en general máxima y mínima salida. La función de transferencia de este tipo de sistemas es completamente distinta de las empleadas hasta ahora en este informe, ya que a la entrada se tienen magnitudes continuas y la salida en cambio es de tipo lógico (1,0). La función de transferencia es pues de tipo lógico. En general, se trata de funciones de comparación o bloques de comparación como se definen en la mayoría de autómatas programables.

Las ecuaciones que expresan el comportamiento del sistema son las siguientes:

$$\begin{aligned} \mu(t) &= E(t) - R(t) \\ \text{Ecuación 51} \quad C(t) &= 1 \quad \text{si } E(t) > R(t) \\ C(t) &= 0 \quad \text{si } E(t) < R(t) \end{aligned}$$

Este tipo de controles son aplicables en general, cuando la planta a controlar se comporta como un retardo de primer orden con una constante de tiempo muy grande por ejemplo: el termostato de algunos sistemas de climatización ambiental que no disponen de una regulación continua de la potencia calorífica, sino simplemente de un interruptor que conecta toda la potencia disponible o la desconecta.

En la práctica este tipo de sistemas tienen una cierta histéresis o banda muerta en la cual no actúan. Esto equivale a que:

$$\text{Ecuación 52} \quad C(t) = 1 \quad \text{si } E(t) > R(t) + \frac{h}{2}$$

$$\text{Ecuación 53} \quad C(t) = 0 \quad \text{si } E(t) < R(t) + \frac{h}{2}$$

Donde h es la banda muerta o error umbral por debajo del cual el sistema no reacciona.

1.3 El autómata programable

Un autómata programable industrial es un equipo electrónico de control con un cableado interno independiente del proceso a controlar, que se adapta a dicho proceso

mediante un programa específico que contiene la secuencia de operaciones a realizar. Esta secuencia de operaciones se define basada en señales de entrada y salida del proceso, las cuales son cableadas directamente en los bornes de conexión del autómata.

Se compone esencialmente de los siguientes bloques:

- Unidad central de proceso o de control *CPU*: consulta el estado de las entradas y recoge de la memoria de programa la secuencia de instrucciones a ejecutar, elaborando a partir de ella las señales de salida u órdenes que se enviarán al proceso. Durante la ejecución del programa, las instrucciones son ejecutadas en serie, una tras otra. También es responsable de actualizar continuamente los temporizadores y contadores internos que hayan sido programados.
- Memoria interna: es la encargada de almacenar datos intermedios de cálculo y variables internas que no aparecen directamente sobre las salidas, así como un reflejo o imagen de los últimos estados leídos sobre las señales de entrada o enviados a las señales de salida.
- Memoria de programa: contiene la secuencia de operaciones que deben realizarse sobre las señales de entrada para obtener las señales de salida, así como los parámetros de configuración del autómata. Por ello, si hay que introducir alguna variación sobre el sistema de control basta generalmente con modificar el contenido de esta memoria.
- Las interfaces de entrada y salida: establecen la comunicación del autómata con la planta. Para ello, se conectan, por una parte, con las señales de proceso a través de los bornes previstos y, por otra, con el bus interno del autómata. La

interfaz se encarga de adaptar las señales que se manejan en el proceso a las utilizadas internamente por la máquina.

- La fuente de alimentación: proporciona a partir de una tensión exterior, las tensiones necesarias para el buen funcionamiento de los distintos circuitos electrónicos del sistema. En ocasiones, el autómatas puede disponer de una batería conectada a esta fuente de alimentación, lo que asegura el mantenimiento del programa y algunos datos en las memorias en caso de interrupción de la tensión exterior.
- Bus interno: es el conjunto de líneas y conexiones que permiten la unión eléctrica entre la unidad de control, las memorias y las interfaces de entrada y salida. Para un autómatas está conformado en un solo bus por los tres buses característicos de un sistema digital (bus de datos, bus de direcciones y bus de control).

1.3.1 Ciclo de funcionamiento y control en tiempo real

- Modos de operación

Un autómatas bajo tensión puede mantenerse en uno de los siguientes estados de funcionamiento:

- Run: el autómatas ejecuta normalmente el programa de usuario.
- Stop: la ejecución del programa se detiene por orden del usuario.
- Error: el autómatas detiene la ejecución por un error de funcionamiento y queda bloqueado hasta que se corrige el error.

Tras la puesta en tensión, el autómata pasa a modos *RUN* o *HALT/STOP*, dependiendo del modelo y de la configuración del mismo. En cualquier caso, las conmutaciones *RUN/STOP* pueden ser forzadas por el usuario desde la unidad de programación o desde los interruptores previstos a tal efecto sobre la *CPU*. Si en el intento de puesta en marcha o paso a estado *RUN* el autómata detecta algún mal funcionamiento sobre el aparato (conexiones, alimentación, etc.) o sobre el programa (sintaxis), no se mantiene el estado *RUN* y la *CPU*.

- Ciclo de funcionamiento

El funcionamiento del autómata es, salvo el proceso inicial que sigue a un *reset*, de tipo secuencial y cíclico, es decir, las operaciones tienen lugar una tras otra, y se van repitiendo continuamente mientras el autómata esté bajo tensión. El autómata antes de entrar al ciclo de operación realiza una serie de acciones comunes (*power-on sequence*) que tratan fundamentalmente de iniciar los estados del mismo y de verificar el *hardware*. El tiempo empleado en ejecutar estas rutinas es siempre menor que un segundo.

Transcurrida la secuencia de iniciación, y si no han aparecido errores, el autómata entra en el ciclo de operación, constituido por aquellas operaciones que se ejecutan continuamente. Este ciclo puede considerarse dividido en tres bloques:

- Proceso común
- Ejecución del programa de usuario
- Servicio a periféricos

En el primero de ellos se comprueba el reloj de guarda y realizan las verificaciones cíclicas de conexiones y de memoria de programa, protegiendo al sistema contra:

- Errores de *hardware*
 - Errores de sintaxis.
- Chequeos del sistema

Las rutinas que el autómata incorpora para su autodiagnóstico pueden ser:

- Iniciales, que corren únicamente tras la puesta o reanudación de la tensión
- Cíclicas, que se repiten continuamente mientras el autómata está ejecutando el programa

Las primeras se encargan de comprobar las conexiones físicas del sistema, y de identificar la configuración existente. Las rutinas cíclicas se encargan de comprobar la integridad del programa y de las conexiones E/S utilizadas en el mismo.

- Tiempo de ejecución y control en tiempo real.

El tiempo total que el autómata emplea para realizar un ciclo de operación se llama *tiempo de ejecución* de ciclo o más sencillamente tiempo de ciclo (*scan time*). Dicho tiempo depende del número de entradas / salidas involucradas, la longitud del programa de usuario, el número y tipo de periféricos conectados al autómata.

El tiempo total del ciclo es entonces la suma de los tiempos empleados en realizar las distintas operaciones del ciclo y es uno de los factores determinantes en el diseño del sistema de control cuando en éste aparezcan muy bajas constantes de tiempo (sistemas de respuesta rápida), pero no el único a considerar, ya que también la

electrónica de las interfaces introduce retardos adicionales. Dada una señal de mando (salida) función de una o varias señales de planta (entradas), se denomina *tiempo de respuesta* al que transcurre desde que un cambio en una de aquellas señales de planta es acusado por la señal de mando. Este tiempo dependerá, por tanto, de los retardos de conmutación y adaptación de señal en las interfaces de entrada y salida, $T_{INPUTdelay}$ y $T_{OUTPUTdelay}$, y el tiempo de ciclo del autómeta. Aunque el tiempo de respuesta es variable dependiendo del instante en que cambia la entrada respecto al ciclo de operación, se mueve siempre entre dos valores límite máximo y mínimo, que son:

- Valor mínimo (la señal está disponible en la interfaz justo antes de la lectura de entradas)

Ecuación 54
$$T_{RES \min} = T_{INPUTdelay} + T_{CICLO} + T_{OUTPUTdelay}$$

- Valor máximo (la señal está disponible en la interfaz justo después de la lectura de entradas)

Ecuación 55
$$T_{RES \max} = T_{INPUTdelay} + 2T_{CICLO} + T_{OUTPUTdelay}$$

El tiempo de retardo en las interfaces de entradas y salidas depende del tipo de conmutación, *ON/OFF* o bien *OFF/ON*, así que para el cálculo del tiempo de respuesta máximo habrá que tomar los mayores posibles que indique el fabricante. Los valores de tiempo de respuesta resultante, y de su inversa, la frecuencia de operación, pueden resultar despreciables frente a las constantes de tiempo de los sistemas electromecánicos, pero no lo son tanto comparados con los tiempos extremadamente cortos que intervienen en la lectura y control de elementos electrónicos, típicos en procesos de posicionamiento de motores, respuesta a alarmas, detección de móviles a alta velocidad, etc.

El autómeta es capaz de controlar en tiempo real a un proceso, si sus tiempos de respuesta o retardo resultan menores a los tiempos de reacción del mismo. Hay algunos

tipos de actividades que exigen rápidas respuestas del autómata entre las cuales se mencionan los siguientes:

- Elementos de proceso rápido
- Ejecución de subrutinas o programas a intervalos menores de los que permite el tiempo de ciclo general del autómata.
- Lectura de impulsos de entrada a alta frecuencia.
- Detección de señales de muy corta duración, menor que el tiempo de ciclo.

1.3.2 Configuración

Por configuración del autómata se entiende la estructura que adopta su sistema físico, esencialmente la unidad de control, el sistema de entradas / salidas y la memoria de la máquina, a fin de adaptarlo a las particularidades de la aplicación: número de entradas / salidas, ubicación de las mismas, potencia de cálculo, capacidad de almacenamiento, etc. Existen básicamente dos configuraciones posibles para la unidad de control:

- Unidad de control compacta.
- Unidad de control modular.

En el primer caso, una sola *CPU* o unidad central de proceso soporta varios módulos de entradas / salidas, que contienen exclusivamente interfaces E/S. Puesto que estos módulos no pueden funcionar de forma autónoma, el control queda centralizado en la *CPU* única, que elabora el programa en monoproceso.

En los sistemas de control modular o distribuido existen varios módulos con sus propias unidades de proceso, y en general, con sus propias interfaces de E/S. Estos módulos se encuentran conectados a una unidad central que gestiona de forma general el

sistema y permite el intercambio de datos entre los elementos, procesadores o interfaces, del mismo (en un instante dado, varios procesadores ejecutan distintos programas o tareas de control). Por la ubicación e interconexión de los procesadores que forman la unidad de control de un sistema modular de autómatas, se obtienen las siguientes arquitecturas posibles:

- Multiprocesadores centrales
- Procesador central + procesadores periféricos
- Procesadores conectados en red.

1.3.3 Sensores y transductores

Los términos denominados sensor y transductor no son sinónimos; el término transductor es amplio e incluye una parte sensible o captador propiamente dicho y algún tipo de circuito de acondicionamiento de la señal detectada; mientras que un sensor incluye únicamente la parte sensible. Un transductor se puede definir como “dispositivo capaz de convertir el valor de una magnitud física en una señal eléctrica codificada, ya sea en forma análoga o digital”.

Los transductores basados en fenómenos eléctricos o magnéticos, suelen tener una estructura general en la que se distinguen las siguientes partes:

- o Elemento sensor o captador: responsable de convertir las variaciones de una magnitud física en variaciones de una magnitud eléctrica o magnética, a la que se denomina señal.
- o Bloque de tratamiento de señal: utilizada para filtrar, amplificar, linealizar, y en general, modificar la señal obtenida en el captador, por regla general utilizando circuitos electrónicos.

- o Etapa de salida: comprende los amplificadores, interruptores, conversores de código, transmisores y todas aquellas partes que adaptan la señal a las necesidades de la carga exterior.

Los transductores y sensores se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Por el tipo de señal de salida-entrada: éstos pueden ser analógicos y digitales.
- Por el tipo de alimentación externa del captador: éstos pueden ser pasivos y activos.
- Según el tipo de magnitud física a detectar: Estos pueden ser transductores - sensor para medir velocidad, peso, volumen, acidez, presión, etc.

Las características generales de los sensores se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Características estáticas: son las que describen la actuación del sensor en régimen permanente o transitorio de la variable a medir.
- Rango de medida: es el rango de valores de la magnitud de entrada comprendido entre el máximo y el mínimo valor detectable por el sensor con una tolerancia de error aceptable.
- Resolución: indica la capacidad del sensor para distinguir entre valores muy próximos de la variable de entrada. Se mide por la mínima diferencia entre dos valores próximos que el sensor es capaz de distinguir y se puede indicar en términos de valor absoluto de la variable física medida o en porcentaje respecto a la escala de la salida.

- **Precisión:** define la máxima desviación entre la salida real obtenida de un sensor y el valor teórico de dicha salida que correspondería en igualdad de condiciones, según el modelo ideal especificado por el patrón. Se suele indicar en valor absoluto de la variable de entrada o en porcentaje respecto a la escala de salida.
- **Repetibilidad:** característica que indica la máxima desviación entre valores de salida obtenidos al medir varias veces un mismo valor de entrada, con el mismo sensor y en iguales condiciones. Suele expresarse en porcentaje referido a la escala y proporciona una indicación del error aleatorio del sensor.
- **Linealidad:** se dice que un transductor es lineal, si existe una constante de proporcionalidad única que relaciona los incrementos de señal de salida con los correspondientes incrementos de señal de entrada, en todo el campo de medida. La no linealidad se mide por la máxima desviación entre la respuesta real y la característica puramente lineal, referida al fondo de escala.
- **Sensibilidad:** característica que indica la mayor o menor variación de la salida por unidad de la magnitud de entrada. Un sensor es tanto más sensible cuanto mayor sea la variación de la salida producida por una determinada variación de entrada.

Ecuación 56

$$Sensibilidad = \frac{\text{Diferencia de magnitud de salida}}{\text{Diferencia de magnitud de entrada}}$$

- **Ruido:** cualquier perturbación aleatoria del propio transductor o del sistema de medida, que produce una desviación de la salida respecto al valor teórico.

- Histéresis: se dice que un transductor presenta histéresis cuando, a igualdad de la magnitud de entrada, la salida depende de si dicha entrada se alcanzó con aumentos en sentido creciente o en sentido decreciente. Suele medirse en términos de valor absoluto de la variable física o en porcentaje. La histéresis puede no ser constante en todo el campo de medida y en el caso de sensores todo-nada se denomina histéresis a la diferencia entre el valor de entrada que provoca el cambio de 0 a 1 y aquel que provoca el cambio inverso de 1 a 0.
- Características dinámicas: son las que describen la actuación del sensor en régimen transitorio.
- Velocidad de respuesta: mide la capacidad de un transductor para que la señal de salida siga sin retraso las variaciones de la señal de entrada. La forma de cuantificar este parámetro es a base de una o más constantes de tiempo, que suelen obtenerse de la respuesta al escalón. Los parámetros más relevantes empleados en la definición de la velocidad de respuesta son los siguientes:
 - Tiempo de retardo: es el tiempo transcurrido desde la aplicación del escalón de entrada hasta que la salida alcanza 10% de su valor permanente.
 - Tiempo de subida: es el tiempo transcurrido desde que la salida alcanza el 10% de su valor permanente hasta que llega por primera vez al 90% de dicho valor.
 - Tiempo de establecimiento al 99%: es el tiempo transcurrido desde la aplicación de un escalón de entrada hasta que la respuesta alcanza el régimen permanente, con una tolerancia del $\pm 1\%$

- Constante de tiempo: para un transductor con respuesta de primer orden se determina la constante de tiempo a base de medir el tiempo empleado para que la salida alcance el 63% de su valor de régimen permanente, cuando a la entrada se le aplica un cambio en escalón.
- Respuesta frecuencial: relación entre la sensibilidad y la frecuencia cuando la entrada es una señal tipo senoidal. Suele indicarse mediante gráfica de Bode.
- Estabilidad y desviación: característica que indica la desviación de salida del sensor al variar ciertos parámetros exteriores distintos del que se pretende medir, tales como condiciones ambientales, alimentación u otras perturbaciones.

1.3.4 Programación

La programación es la codificación al lenguaje de autómeta del conjunto de órdenes que conforman el mando y control deseado. Codificar significa transformar una información en otra equivalente en distinto formato. Por una parte el código de salida a obtener son los códigos binarios que entiende la *CPU* y por otra, el código de entrada que desea implementar. Generalmente la actividad de programación de un autómeta es una tarea especializada utilizando equipo periférico diseñado para esta función. De acuerdo al tipo de autómeta habrá equipo auxiliar y etapas para su programación, entre los cuales se puede mencionar.

- Representación de sistemas de control

Son símbolos útiles que interpretados adecuadamente permiten obtener toda la información acerca del sistema de control y del proceso, los cuales deben ser capaces de cumplir las condiciones siguientes:

- o Ser comunes para el emisor y receptor de la información, por cuanto sean comprensibles simultáneamente entre ambos, tales como niveles de tensión, corriente, protocolos de comunicación, etc.
 - o Ser de empleo coherente, utilizando reglas de combinación establecidas entre sí tales como sintaxis e interpretación.
- Según los símbolos utilizados en el modelo, la representación puede ser:
 - o Representación por instrucciones: consiste en la descripción del proceso y su control utilizando la enumeración literal de las acciones a desarrollar por el mismo, expuestas secuencialmente y con indicación de las condiciones de habilitación o validación de cada paso.
 - o Representación en diagrama escalera: la función algebraica de cada salida o función de mando puede obtenerse directamente a partir de las especificaciones del proceso o bien derivarse de ellas aplicando métodos de síntesis basados en el álgebra de Boole. También puede representar gráficamente las tareas de automatización mediante símbolos de contacto abierto-cerrado. La función de control obtenida dependerá de las conexiones entre los distintos contactos de los relés que intervengan.

- o Representación gráfica: se basa en el empleo de símbolos normalizados que representan funciones lógicas directas del álgebra de Boole o sistemas lógicos más complejos como biestables, registros, temporizadores, contadores, etc.

- Identificación de variables y asignación de direcciones

Identificadas y referenciadas las variables de entrada - salida, la simple observación de la ley de mando, permite identificar las variables internas empleadas, que, por la función que desempeñan en el programa, serán fundamentalmente de tres tipos:

- o Variables de usuario, accesibles desde la unidad de programación o el terminal de explotación, que servirán para introducir consignas o parámetros que el programa necesita.
- o Variables de cálculo intermedio o memoria, que el programa utiliza para identificar determinados estados internos de influencia en la secuencia de mando (por ejemplo, combinación de señales de entrada en una única variable, aparición y reconocimiento de una alarma, etc.).
- o Variables de consulta de estados, variables internas predefinidas por el fabricante (relés auxiliares o especiales), de funcionamiento independiente del programa, que guardan o generan informaciones sobre estados internos de autómata (por ejemplo, relojes de distintas frecuencias, señalizadores de error, etc.), las que pueden ser : binarias, de 1 bit o digitales, de varios bits (registros internos, temporizadores y contadores).

Luego de identificar las variables se asignan las direcciones de bornes a conectar ó de elemento de memoria donde están depositadas. Esta asignación depende, en cuanto al número de variables disponibles, del mapa de memoria del autómata empleado y en cuanto al formato o referencia de la configuración del mismo.

El mapa de memoria determina la cantidad de variables de entrada / salida o internas que se pueden utilizar, mientras que de la configuración depende que las direcciones de estas variables sean relativas o absolutas. Esta clasificación atiende, respectivamente, a si la variable en cuestión puede tener distintas direcciones, según la ubicación de módulo que la contiene, o si está forzada a mantener siempre la misma, bien porque no exista ninguna expansión, bien porque éstas estén obligadas a conectarse en un determinado orden.

- Pasos mínimos necesarios para desarrollar la programación
 - a. Identificar el proceso a automatizar.
 - b. Determinar la función de transferencia del sistema de control y el orden de los eventos.
 - i. Desarrollar algoritmos, diagramas y flujograma para facilitar el entendimiento del proceso paso a paso.
 - ii. Representar mediante un modelo el sistema de control, indicando todas las funciones que intervienen, las relaciones entre ellas, y la secuencia que deben seguir.
 - c. Identificar los componentes y periféricos tales como señales de entrada y salidas requeridas, sensores, transductores y tipo de estructura del autómata.

- i. En esta etapa se dimensiona el equipo y dispositivos a utilizar para automatizar el proceso requerido.
 - ii. Interconectar el equipo y dispositivos con el autómata programable. Esta actividad implica alambrar físicamente los dispositivos periféricos con el sistema de control y las tarjetas de entradas – salidas.
- d. Crear la tabla de asignación de variables, proporcionándoles un direccionamiento, símbolo y nombre a cada una de las variables de entradas, salidas, memoria interna y cada uno de los componentes del proceso a automatizar.
- e. Conversión del algoritmo, diagrama y tabla de asignaciones en un diagrama de contactos.
- f. Conversión del diagrama de contactos a un lenguaje de programación industrial y transferirlo a la *CPU*.
- g. De acuerdo al protocolo de puesta en marcha del autómata y del proceso, debe de verificarse el funcionamiento del programa y el proceso automatizado.

1.3.4.1 **Lenguajes de programación**

El programa se describe como el conjunto de instrucciones, mandatos y símbolos reconocibles por el autómata a través de su unidad de programación, que le permiten ejecutar la secuencia de control deseada en tiempo real. Al conjunto total de estas instrucciones, órdenes y símbolos que están disponibles para escribir un programa se le

denomina lenguaje de programación del autómeta. Generalmente hay tres formas equivalentes de desarrollar un programa y la escogencia obedece principalmente al fabricante.

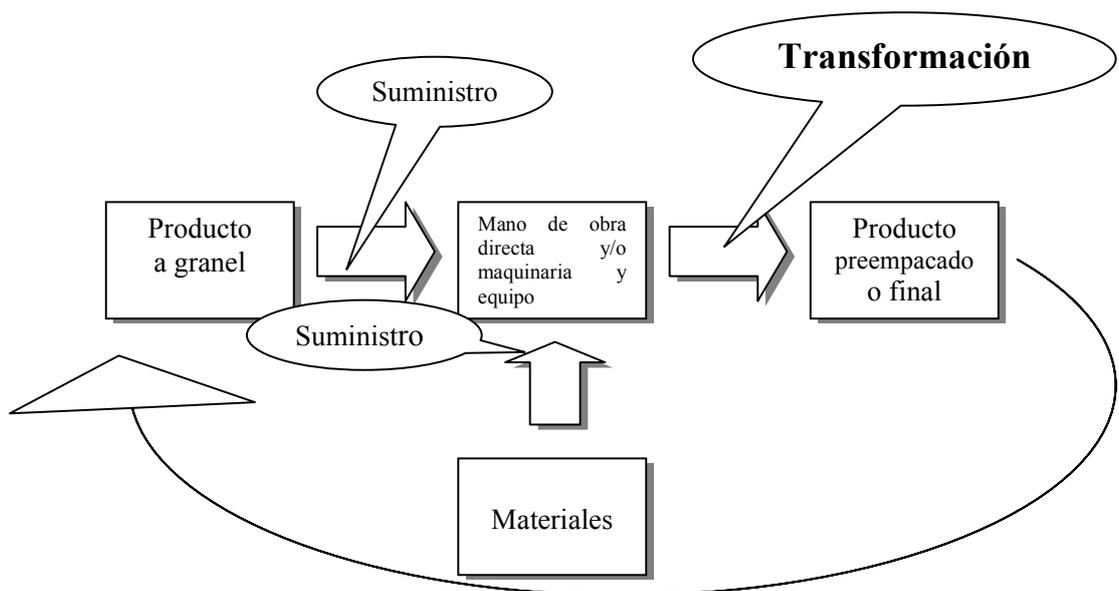
Los lenguajes de programación de autómetas industriales se basan en instrucciones paso a paso, diagramas de contactos ó escaleras y gráficos basados estos últimos en el álgebra de Boole.

1.4 Proceso de empaquetado

1.4.1 Definición

Un proceso de empaque dentro de un proceso mayor denominado generalmente como manufactura, es en términos generales un conjunto de operaciones que realiza el personal y la maquinaria para poner en pacas, paquetes o cajas un producto determinado.

Figura 5. Descripción del proceso de empaque



La ilustración anterior muestra un ciclo típico para empaquetar. Producto a granel se refiere a unidades de producto como serán utilizadas por el consumidor o a unidades de producto ya empaquetados o preempaquetados, pero que el proceso requiere niveles mayores de empaque. El ciclo puede repetirse hasta que se cumplan las especificaciones definidas para lograr el producto final. Para cada nivel de empaque normalmente se utilizan diferentes grupos de personal y/o maquinaria específica para la actividad.

1.4.2 **Condiciones básicas del proceso de empaque**

1.4.2.1 **Suministro de producto a granel**

Mientras el equipo operador-máquina estén en el ciclo de empaquetar debe mantenerse una alimentación continua de productos directos o pre-empaquetados a una razón definida por la velocidad del proceso. Por lo general, esta velocidad se calcula basada en el número de unidades por unidad de tiempo, un ejemplo sería 100 paquetes por minuto y depende de las características electro-mecánicas de diseño de la maquinaria.

1.4.2.2 **Suministro de materiales**

Mientras el equipo operador-máquina estén en el ciclo para empaquetar, debe mantenerse una alimentación continua de materiales, tales como papel, cartulina, aluminio, adhesivos, etc. dependiendo éstos del tipo del producto que se esté empaquetando. La velocidad de suministro de materiales, por lo general, va en relación directa con la velocidad del proceso para empaquetar el producto a granel, un ejemplo sería 100 etiquetas por minuto.

1.4.2.3 Transformación

Las necesidades para esta etapa del proceso de empaqueo varían según el producto y la tecnología empleada, sin embargo, por lo general, es imprescindible que se ejecuten los siguientes pasos:

- Recepción de producto a granel y materiales
- Agrupamientos de producto a granel
- Preparación de materiales para recibir grupos de producto
- Entrega de grupos de producto a materiales preparados
- Conformación del paquete
- Sellados finales

Cada uno de los pasos anteriormente descritos puede estar sujeto a diferentes puntos de control:

- Verificación de especificaciones del producto.
- Aceptación o rechazo de producto
- Dispositivos de seguridad
- Conteo de productos aceptados y rechazados que han sido entregados.

Cada una de estas actividades son ejecutadas cíclicamente con base en sincronización de tiempo por dispositivos mecánicos, electro-mecánicos y/o electrónicos.

1.4.3 Variables de proceso

Como cualquier proceso de manufactura, un proceso de empaque está sujeto a ser medido con basado en su productividad, es decir, a la relación entre los resultados (producto total aceptado) obtenidos durante un período de tiempo y los recursos consumidos para lograrlos. Anteriormente se planteó que la productividad varía según los cambios que esta relación nos sugiere, por lo tanto, las variables a controlar son aquellos factores que implican un incremento o reducción en los resultados y/o los recursos utilizados.

1.4.3.1 Variables que afectan los resultados

Cualquier proceso de manufactura tiene una capacidad de resultados, la cual está dada por la ecuación:

Ecuación 57

Capacidad de resultados = Velocidad de máquina × tiempo neto utilizado

- La velocidad de máquina, salvo los períodos de arranque cuyo efecto es despreciable respecto a los períodos de operación normal, es constante por lo que no se considera una variable dentro del proceso.
- El tiempo neto utilizado por sus siglas TNU, es una variable que está determinado por la ecuación siguiente:

Ecuación 58

$$TNU = TTD - TP$$

El tiempo total disponible por sus siglas TTD, es el tiempo estándar programado durante el cual el proceso estará en operación. El tiempo perdido por sus siglas TP, es aquel tiempo durante el cual el proceso no está logrando resultados, debido a que no está en operación, aunque está programado para hacerlo.

La capacidad máxima de resultados se dará cuando $TP= 0$ y $TNU = TTD$, es decir, el proceso estuvo en operación durante todo el tiempo para el cual fue programado, lográndose su máxima productividad.

La capacidad mínima de resultados se dará cuando $TTD = TP$, es decir, cuando el proceso no estuvo en operación durante todo el tiempo para el que fue programado. En este caso se logra su mínima productividad posible.

Debido a que el TTD es un tiempo programado está bajo control del proceso, la variable a controlar, son los TP, que pueden ser generados por tres grandes causas generales:

- Problemas electro-mecánicos de la maquinaria, en cuyo caso serán denominados tiempos perdidos mecánicos por sus siglas TPM, y consisten en todos aquellos períodos de tiempo durante el cual la maquinaria no está en operación debido a que se está realizando un mantenimiento correctivo no programado, tales como fractura de una pieza mecánica, disparo de una protección eléctrica, calibración de un sensor, etc.

- Problemas operativos, en cuyo caso serán denominados tiempos perdidos operativos por sus siglas TPO, y consiste en todos aquellos períodos de tiempo durante el cual la maquinaria no está en operación debido al incumplimiento de los procedimientos operativos y que están bajo control de la administración del proceso, tales como, falta de materiales, falta de producto, etc.
- Problemas externos, en cuyo caso serán denominados tiempos perdidos externos por sus siglas TPE, y consiste en todos aquellos períodos de tiempo durante el cual la maquinaria no está en operación debido a aspectos que están fuera del alcance de la administración del proceso, tales como terremotos, inundaciones, falta de energía eléctrica externa, etc.

1.4.3.2 **Variables que afectan los recursos y la productividad**

Tal y como fue presentado en el modelo de productividad total operativa MPTO, los recursos están divididos en H, M, C, E, X.

- Insumo humano (H): este factor tiene dos componentes constante y variable, ambos afectan directamente los recursos y los resultados que se alcanzan. La parte constante del recurso humano se refiere a los salarios o sueldo base y la parte variable a lo relacionado con pago de horas extras, premios y bonificaciones de acuerdo a la política salarial de cada empresa.

- Insumos materiales (M): el insumo material está ligado de una forma directa con las aceptaciones o rechazos del producto manufacturado y es un índice importante que controlar, pues si bien es cierto en algunos procesos manufactureros se acepta o adopta el reciclamiento de alguna parte o todo el material rechazado, el tiempo, mano de obra, equipo y los energéticos utilizados se habrán perdido y no podrán volverse a utilizar. Muchos modelos no contemplan la alternativa de reciclado como opción productiva, pues no sólo es difícil de cuantificar sino que además distrae la atención del proceso en producir producto que no llena todos los requerimientos para considerarse como producto terminado.
- Insumo capital (C): el insumo de capital se refiere principalmente a las inversiones realizadas que afectan directamente al proceso en evaluación durante el período considerado. Considérese que el factor depreciación de equipo y planta está involucrado en el insumo de capital de acuerdo a las políticas empresariales y en concordancia con las leyes fiscales y tributarias vigentes en el país. El factor insumo de capital afecta en aumento o decremento al capital fijo utilizado, de acuerdo a las inversiones realizadas, valor en libro y bajas al inventario de equipo.
- Insumo energía (E): generalmente el consumo de energéticos se supone variable en función de la producción; sin embargo, existe un componente constante, otro variable y algún otro considerado como proporcional o porcentual a las unidades producidas. El consumo de energéticos como agua, aire comprimido, vapor y energía eléctrica está entre estos rubros de acuerdo a lo que se considere conveniente involucrar, pues existen algunos que se consideran aplicados directos o indirectos a la producción en materia de consumo de energía. Debe apelarse a un criterio para

aplicar el costo de variables de energéticos al proceso en evaluación tales como iluminación interna y externa entre otros.

- Otros gastos (X): en este rubro se acumulan todos aquellos gastos y costos que por su naturaleza y definición no son aplicables claramente a cualquiera de las clasificaciones anteriores. En esta clasificación se acostumbra incluir lo relacionado con honorarios profesionales, licencias, permisos, concesiones y otros que se relaciona directa o indirectamente con el proceso productivo en cuestión.

De la revisión de variables que afectan los resultados de forma directa ó indirecta se puede asumir que las variables de insumo humano, insumo de capital y otros gastos están controladas y auditadas por la gestión administrativa y soportada en normas, leyes, políticas y procedimientos de la empresa, lo cual permite considerarlos como variables reguladas.

Los insumos de materiales e insumo de energía serán las variables a considerar en el modelo de productividad para este caso de evaluación. El insumo de materiales está relacionado con la aceptación o rechazo del producto empaquetadora durante el proceso.

Tabla III Necesidades y variables que afectan la productividad para un proceso de empaque

Necesidad	Variable de resultado	Variable de recurso
Suministro de producto	Tiempo perdido por falta de producto	No aplica
Suministro de materiales	Tiempo perdido por falta de materiales	Cantidad de unidades rechazadas por falta de materiales
Transformación	<ul style="list-style-type: none"> - Tiempo perdido por no conformidades en el proceso. - Cantidad de producto transformado en paquete. 	Cantidad de unidades rechazadas por no conformidades en el proceso.

2. ENSAYO DESARROLLADO EN LA MÁQUINA EMPAQUETADORA

2.1 Procedimiento

El procedimiento básico para el cálculo de la productividad durante todo el ensayo pretende obtener toda la información relevante relacionada con el proceso de empaquetado. Esta información es la que contiene lo relacionado con el insumo del recurso humano, materiales, capital y energía necesario para el proceso durante el período de evaluación.

La mayor cantidad de información recolectada para el presente trabajo de investigación proviene de archivos administrativos y operativos de la planta. Otra información es obtenida a partir de cálculos utilizando las fórmulas que se presentan.

2.1.1 Insumo recurso humano

El cálculo de la contribución del factor humano en el proceso productivo se resume en tres categorías resumidas en la tabla XII.

El número de personas, por función de trabajo, involucradas en lograr las unidades producidas durante el período de estudio.

El factor de participación de cada función en lograr que la máquina se mantenga produciendo, por ejemplo un operador con factor 1.0 implica que su presencia es necesaria en un 100% del tiempo de operación, mientras que un mecánico con factor 0.333 implica que es una función que divide su tiempo en la atención de tres unidades similares y su presencia se estima en un 33.33% del tiempo.

El tiempo total disponible o TTD en minutos definido como el tiempo durante el cual la máquina está programada para operar. Lo anterior implica que tiempo de máquina y el recurso humano necesario han sido asignados para tal actividad.

Los dos primeros factores son considerados fijos e iguales para ambas máquinas. La influencia de estos dos factores en cada máquina se determinará basada en el costo de poseer el equipo de trabajo durante el tiempo total de operación TTD y la cantidad de unidades producidas.

El tiempo total real de operación es registrado a diario por los coordinadores del proceso y pasará a ser el TTD real del proceso. El tiempo de operación es de un total de 14.25 horas por día, calculado basado en dos turnos de trabajo de las 07:00 hrs. a las 22:15 hrs. con dos períodos de 30 minutos de descanso.

El total salario hora-hombre por sus siglas TSHH, se calcula de la siguiente manera:

Ecuación 59

$$TSHH = \frac{\text{Total salario diario}}{\text{Total de horas por día}}$$

Ecuación 60

$$\text{Total salario diario} = NPe \times FPa \times \text{Salario diario} \times FPr$$

Donde:

NPe = Número de personas

FPa = Factor de participación en el proceso

FPr = Factor de prestaciones

El total de horas-hombre para cada máquina se calcula de la siguiente manera:

Ecuación 61

$$HH = NPe \times FPa \times TTD \quad (\text{Horas})$$

Así el consumo de recurso humano se calcula:

Ecuación 62

$$CRS = TSSH \times HH$$

Este proceso se repite para cada función de operación y administración totalizando los resultados parciales de participación.

2.1.2 Insumos materiales

Para la medición del consumo de materiales, para cada máquina, durante el período estudiado se utilizarán los datos contables de inventarios de bodega. El método utilizado es el de diferencia de inventarios.

Ecuación 63

$$\text{Material utilizado} = \text{Inventario inicial} - \text{Inventario final}$$

Para valor unitario del material se utilizarán los registros contables correspondientes que indican este valor.

2.1.3 Insumo de capital

Para el cálculo de esta variable se utilizará el valor contable aproximado para ambas máquinas al momento de iniciar el estudio. El valor de la máquina B será incrementado en el monto correspondiente a la cantidad invertida en su modernización al instalarle el autómata programable. El total será descontado mensualmente a un término de cinco años y los resultados resumidos en la tabla XV.

2.1.4 Insumo de energía

Ambas máquinas utilizan igual tipo de motor y características cuyos datos de placa revelan una corriente nominal de 15 A, 220 VAC, 60 Hz., 1750 RPM, por lo tanto la potencia eléctrica en Kw para cada motor se calcula como:

Ecuación 64

$$P = \sqrt{3} \times Voltaje \times Corriente \times Cos\Phi$$

y los kilovatios hora consumidos por cada máquina serán:

Ecuación 65

$$\text{Energía eléctrica} = \text{TTD} \times P$$

El consumo de energía eléctrica está resumido en las tablas No.16 y No.17, éste es un cálculo y aproximación del costo del consumo de las máquinas durante el ensayo de acuerdo a las tarifas vigentes de la empresa que provee en el servicio eléctrico. Sin embargo, lo recomendable para mayor precisión sobre este rubro energético es instalar un medidor de energía eléctrica en el sitio para incluir el factor de pérdidas y consumo de energía eléctrica durante todo el proceso inclusive aunque la máquina no esté produciendo, pues la fórmula anterior no considera el costo extra por demanda y pérdidas eléctricas.

2.1.5 Unidades producidas (UP)

Para realizar el conteo de las unidades producidas se hizo necesario utilizar los contadores que cada máquina tienen para tal fin. Cada máquina utiliza dos contadores, uno de ellos lleva el conteo bruto y el otro cuenta las unidades rechazadas por alguna inconformidad. Las unidades producidas se calculan por diferencia.

Ecuación 66

$$UP = \text{Total bruto de unidades producidas} - \text{Unidades rechazadas}$$

El resultado de esta operación se ingresa en los registros diarios de cada máquina por turno y por día, resumido en la tabla VIII.

2.2 Implementación del módulo piloto

Para desarrollar el estudio se hizo necesario considerar toda la infraestructura necesaria para llevar a cabo la recolección y evaluación de las diferentes variables para desarrollar los cálculos necesarios de los índices de productividad en los dos casos. Se trata de dos máquinas de fabricación inicial similar a la que a una de ellas se le ha reemplazado los relevadores y alambrados por un autómatas programable. Ambas máquinas operan bajo las mismas circunstancias y condiciones de operación.

2.2.1 Descripción de la maquinaria

Tabla IV Maquinaria en ensayo

	Modelo	Velocidad unidades/minuto	Control	Condición	Frecuencia de mantenimiento
Máquina A	HLP	2,800	Electromecánico	Reconstrucción mecánica en 1997	150 hrs.
Máquina B	HLP	2,800	Autómata programable industrial	Reconstrucción mecánica en 1997	150 hrs.

2.2.2 Descripción del proceso investigado

El proceso es el empaqueo de cigarrillos en cajas de 20 unidades de diferentes marcas, pero de condiciones físicas similares como largo, diámetro, material de empaque, humedad, consistencia, etc. El proceso se describe y resume en la siguiente tabla No. 5.

2.2.3 Sensores y variables a controlar durante el proceso

Durante el desarrollo del proceso de empaque participan una cantidad de sensores que detectan las diferentes posiciones de los dispositivos durante las etapas del proceso. Todas estas posiciones son detectadas por sensores de proximidad inductivos y fotoceldas de diferentes tipos y marca para detectar el movimiento y presencia de dispositivos mecánicos de las máquinas durante todo el proceso.

Tabla V Etapas del proceso

Etapa	Descripción	Condición normal esperada	Condición anormal esperada	Acción por condición anormal
Recepción de producto a granel	Verificar la presencia de producto para su ordenamiento	Presencia de producto y posibilidad de ordenamiento	Ausencia de producto imposibilidad de ordenamiento	Paro, aviso y control de tiempo por falta de producto
Suministro de materiales	Verifica la presencia o ausencia de materiales para empaçar producto	Presencia de materiales X, Y, Z	Ausencia de materiales X, Y, Z	Paro, aviso y control de tiempo por falta de materiales
Agrupamiento	Formación de grupos de producto	Grupos de 20 unidades de producto	Grupos de menos de 20 unidades	Marcado de grupo para rechazo posterior
Formación del paquete	Traslado de grupo para colocación de material X	<ul style="list-style-type: none"> • Presencia de material X en canal de transporte • Presencia de grupo 	<ul style="list-style-type: none"> • Ausencia de material X en canal de transporte • Ausencia de grupo 	Paro, aviso y control de tiempo por condición anormal
Formación del paquete	Traslado de grupo para colocación de material Y	<ul style="list-style-type: none"> • Presencia de material Y en canal de transporte • Presencia de grupo 	<ul style="list-style-type: none"> • Ausencia de material Y en canal de transporte • Ausencia de grupo 	Paro, aviso y control de tiempo por condición anormal
Formación del paquete	Traslado de grupo para colocación de material Z	<ul style="list-style-type: none"> • Presencia de material Z en canal de transporte • Presencia de grupo 	<ul style="list-style-type: none"> • Ausencia de material Z en canal de transporte • Ausencia de grupo 	Paro, aviso y control de tiempo por condición anormal
Formación del paquete	Conformación del paquete	Paquete formado	Paquete defectuoso	Paro, aviso y control de tiempo por condición anormal
Formación del paquete	Rechazo de unidades	<ul style="list-style-type: none"> • No rechazo 	Rechazo de unidades fuera de especificación	No aplica
Formación del paquete	Sellados finales	<ul style="list-style-type: none"> • Conteo de unidades buenas entregadas 	No aplica	No aplica

Tabla VI Descripción de sensores y funciones en el proceso

Dispositivo	Sensor	Variable
S1	<ul style="list-style-type: none"> • Omron, difuso fibra óptica 3X-A51 	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar la presencia o ausencia de producto para ser empaquetado
S2	<ul style="list-style-type: none"> • Telemecanique, inductivo XS1M12MA230 	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar la presencia o ausencia de materiales X
S3	<ul style="list-style-type: none"> • Tenor, capacitivo TR18 – 8DP 	<ul style="list-style-type: none"> • Verifica la presencia del material Y
S4	<ul style="list-style-type: none"> • Telemecanique, Inductivo XS1M12MA230 	<ul style="list-style-type: none"> • Faltante de material X en canal 1
S5	<ul style="list-style-type: none"> • Cutler-Hammer, inductivo T57MCL18T111E 	<ul style="list-style-type: none"> • Faltante de material X en canal 2
S6	<ul style="list-style-type: none"> • Telemecanique, difuso de fibra óptica XUD-H 003537 	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar la presencia o ausencia del material Y - canal 1
S7	<ul style="list-style-type: none"> • Telemecanique, difuso fibra óptica XUD-H 003537 	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar la presencia o ausencia del material Y en grupo - canal 2
S8	<ul style="list-style-type: none"> • Telemecanique, inductivo XS1M12MA230 	<ul style="list-style-type: none"> • Verifica la presencia de material Z con presencia o ausencia de grupo - canal 2
S9	<ul style="list-style-type: none"> • Telemecanique, inductivo XS1M12MA230 	<ul style="list-style-type: none"> • Detección de paquete defectuoso en canal 3
S10	<ul style="list-style-type: none"> • Telemecanique inductivo XS1M12MA230 	<ul style="list-style-type: none"> • Embrague canal 3
S11	<ul style="list-style-type: none"> • Tenor, capacitivo TR18 – 8DP 	<ul style="list-style-type: none"> • Paquete defectuoso en sellado final
S12	<ul style="list-style-type: none"> • Rechner, inductivo IAS-10-A13-S 	<ul style="list-style-type: none"> • Conteo de producto bueno en salida de sellado final
MS1	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Micro-switch</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Verifica la presencia de material Z
MS2	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Micro-switch</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Detección de grupos menores de 20 unidades
MS3	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Micro-switch</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Embrague de canal 1
MS4	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Micro-switch</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Embrague principal
MS4	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Micro-switch</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Paquete defectuoso canal 2

2.2.4 Descripción del autómata programable industrial

El autómata programable utilizado en la máquina se hizo seleccionar de acuerdo a las características del proceso y tamaño del proceso. A continuación los datos y características relevantes del autómata.

- Autómata programable industrial: Simatic S7-300
- Manufacturado por: Siemens
- Unidad central de proceso: 314 IFM
- Fuente de poder: Sitop power 5
- Módulo: 6ES7 321-1BL00-0AA0

Tabla VII Características generales del CPU 314

Memoria de programa en instrucciones/byte	8 / 24 <i>Kbytes</i>
<i>Back-up con Memory Card</i>	Sí
Tiempo de ejecución para 1024 instrucciones, binarias	0.3 milisegundos
Tiempo de ejecución para 1024 instrucciones	0.8 milisegundos
Entradas y salidas digitales, integradas	No
Entradas y salidas digitales, en configuración máxima	512
Entradas y salidas analógicas, en configuración máxima	64
Configuración	4 filas
Módulos de extensión, en configuración máxima	32 módulos
Número de marcas/marcas de datos	2,048 / máximo 190,000
Número de contadores (remanentes)	64 (64)
Número de temporizadores (remanentes)	128 (128)
Puerto MPI con 187.5 <i>Kbits/s</i>	4 estaciones activas
MPI, direccionables	32

Fuente: Siemens. Ref No. E80001-V111-A242-X-7800. Página 27

2.2.5 Programa de control

El objetivo del presente trabajo de investigación es evaluar los efectos de la automatización en la productividad de un proceso de manufactura y no la evaluación del programa de control para la operación de la maquinaria. En el presente capítulo se presentarán los bloques de control o subrutinas que están relacionados directamente con aquellos aspectos importantes que deben ser controlados para evaluar la productividad del proceso y que forman parte del programa maestro de operación.

Estos bloques o subrutinas son:

- Bloque de rutinas de paro: en este se ordena la secuencia de paro de maquinaria ante la presencia de una condición anormal esperada.
- Bloque de rutinas de aviso: en este se ordena la secuencia de aviso al operador, por medio del uso de un OP-3, ante la presencia de una condición anormal esperada.
- Bloque de rutinas de conteo de sucesos: en éste se registran los eventos que derivan en la reducción de producto aceptado.
- Bloque de rutina de tiempo efectivo de trabajo: determinar el tiempo real trabajado por la máquina.
- Bloque de control de tiempo de parada: registro de tiempo durante el cual la máquina no está produciendo.
- Bloque de manejo del tiempo: rutina de control del tiempo en horas, minutos y segundos.
- Bloque de rechazo: manejo del rechazo manual o automático.

Bloque: RUTINAS DE PARO

Fuente: Paros, Sandoval, HLP, versión 00.01

Segmento: 1	Paro forzado		
ON	E	125.1	// embrague principal
ON	E	125.3	// embrague canal1
ON	E	0.5	// embrague sellado final
S	M	1.4	
U	M	0.4	
R	M	1.4	

Segmento: 2	Paro accionado manualmente por pulsadores		
U (
ON	E	2.5	// pulsador de paro
ON	E	1.5	
ON	E	1.1	
ON	E	2.4	
M	1.4		// paro forzado
)			
S	M	0.3	
U	M	0.4	// señal de reset
R	M	0.3	
NOP	0		

Segmento: 3	Paro paquetes defectuosos		
ON	E	124.3	// canal 3
E	125.2		// canal 2
ON	E	0.4	// salida sellado final
ON	E	0.6	// sellado final
S	M	1.0	
U	M	0.4	
R	M	1.0	

Segmento : 4	Paro normal – grupo con rechazo		
M	16.1		
M	18.7		// ausencia de material "Z"
M	16.7		// ausencia en alimentación de material "Y"
M	17.5		// ausencia en alimentación de material "X"
O	M	17.7	// ausencia de grupo
O	M	93.0	// presencia de material "Z"

M	8.5		// ausencia de material "Y" en canal 2
S	M	1.1	
M	0.4		
R	M	1.1	

Segmento: 5	Señal de paro normal – grupo sin rechazo
-------------	--

U(
ON	E	124.1	// embrague canal 3
ON	E	124.3	// paquete defectuoso en canal 3
O	E	125.2	// paquete defectuoso en canal 2
ON	E	125.5	// ausencia de material "X"
ON	E	0.1	// ausencia de producto sensor 1
ON	E	0.2	// ausencia de producto sensor 2
ON	E	0.3	// ausencia de material Y
ON	E	0.6	// paquete defectuoso en sellado final
M	3.7		
)			
S	M	1.3	
U	M	0.4	
R	M	1.3	
NOP	0		

Segmento: 6	Señal de reset
-------------	----------------

E	1.3		
E	1.6		
=	M	0.4	// señal de reset

Segmento: 7	Señal de rechazo manual
-------------	-------------------------

E	1.4		
E	1.7		
=	M	0.5	

Segmento: 8	Disparo
-------------	---------

U	E	125.0	
S	M	1.7	
U	M	0.4	
R	M	1.7	
NOP	0		

Segmento: 9	Conexión variador de velocidad
-------------	--------------------------------

UN	M	1.7	
UN	M	0.3	
=	A	124.0	

Segmento: 10	Operación variador de velocidad por impulsos (JOG)	
--------------	--	--

U	E	1.0
UN	M	1.7
UN	M	0.3
UN	M	0.4
UN	M	1.0
U	E	124.1
=	A	124.4

Segmento: 11	Habilitación arranque variador de velocidad, 1ª. velocidad	
--------------	--	--

U	E	1.2
UN	M	0.4
S	M	0.2
U	M	0.3
R	M	0.2

Segmento: 12	Conexión	
--------------	----------	--

La E 124.1 impide que la máquina arranque cuando el canal 3 está desembragado.

U (
E	2.1	
ON	E	126.2
)		
U	E	1.2
UN	M	1.1
UN	M	1.3
U	E	124.1 // embrague canal 3
S	M	1.5
ON	E	124.1 // embrague canal 3
	M	1.1
	M	1.3
	M	0.3
R	M	1.5

Segmento: 13	Habilitación conexión variador de frecuencia	
--------------	--	--

U	M	1.5
=	A	124.1

Segmento: 14	Conexión 1ª velocidad – variador de frecuencia	
--------------	--	--

U	M	1.5
UN	T	1
=	A	124.2

Segmento: 15 Conexión 2ª. velocidad variador de frecuencia		
U	M	1.5
L	S5T#6S	
SE	T	1
U	T	1
=	A	124.3
Bloque: Rutinas de avisos para OP-3		
Segmento: 1 Mensaje-1, ausencia de alimentación para material "Z"		
U	M	53.0
S	M	203.0
Segmento: 2 Mensaje-2, canal 3		
UN	E	124.1
S	M	203.1
Segmento: 3 Mensaje-3, ausencia de grupo en material "Z"		
U	M	57.0
S	M	203.2
Segmento: 4 Mensaje-4, paquete defectuoso canal 3		
UN	E	124.3
S	M	203.3
Segmento: 5 Mensaje-5, transportador material "Y"		
U	M	65.0
S	M	203.4
Segmento: 6 Mensaje-6, faltante de material "Z"		
U	M	69.0
S	M	203.5
Segmento: 7 Mensaje-7, material "Y" en canal 2		
U	M	73.0
S	M	203.6
Segmento: 8 Mensaje-8, disparo protección variador de frecuencia		
U	E	125.0
S	M	203.7

Segmento: 9	Mensaje-9, ausencia de embrague principal		
UN	E	125.1	
S	M	202.0	
Segmento: 10	Mensaje-10, paquete defectuoso canal 2		
U	E	125.2	
S	M	202.1	
Segmento: 11	Mensaje-11, ausencia de embrague canal 1		
UN	E	125.3	
S	M	202.2	
Segmento: 12	Mensaje-12, faltante en transporte material "X"		
U	M	77.0	
S	M	202.3	
Segmento: 13	Mensaje-13, ausencia material "X"		
UN	E	125.5	
S	M	202.4	
Segmento: 14	Mensaje-14, faltante de grupo		
U	M	81.0	
S	M	202.5	
Segmento: 15	Mensaje-15, grupo incompleto sensor 4		
U	M	85.0	
S	M	202.6	
Segmento: 16	Mensaje-16, grupo incompleto sensor 5		
U	M	89.0	
S	M	202.7	
Segmento: 17	Mensaje-17, ausencia de producto sensor 1		
UN	E	0.1	
S	M	205.0	
Segmento: 18	Mensaje-18, ausencia de producto sensor 2		
UN	E	0.2	
S	M	205.1	

Segmento: 19	Mensaje-19, ausencia material "Y"		
UN	E	0.3	
S	M	205.2	
Segmento: 20	Mensaje-20, paquete defectuoso sellado final		
UN	E	0.4	
S	M	205.3	
Segmento: 21	Mensaje-21, ausencia embrague sellado final		
UN	E	0.5	
S	M	205.4	
Segmento: 22	Mensaje-22, bloqueo en salida sellado final		
UN	E	0.6	
S	M	205.5	
Segmento: 23	Mensaje-23, JOG		
U	E	1.0	
S	M	205.6	
Segmento: 24	Mensaje-24, paro, panel frontal		
UN	E	1.1	
S	M	205.6	
Segmento: 25	Mensaje-25, marcha, panel frontal		
U	E	1.2	
S	M	204.0	
Segmento: 26	Mensaje-26, paro, panel auxiliar		
UN	E	1.5	
S	M	204.1	
Segmento: 27	Mensaje-27, pulsador de paro de emergencia en alimentación de producto		
UN	E	2.4	
S	M	204.3	
Segmento: 28	Mensaje-28, ausencia de material "X" en canal 2		
U	M	61.0	
S	M	204.4	

Segmento: 29	Borrar avisos
--------------	---------------

U	M	0.4
FP	M	17.0
=	M	17.1
UN	M	17.1
SPB	M001	
L	0	
T	MD	202

M001: BE

Bloque: Rutina de conteo de sucesos
Conteo de unidades producidas y/o no-conformes

Fuente: Cuentas, HLP6, versión 00.01

Segmento: 1	Incremento de contador por ausencia en alimentación material "Z"
-------------	--

//Detección de un flanco+

U	M	53.0	// marca testigo del error
FP	M	101.0	// detector de flanco
=	M	101.1	
UN	M	101.1	
SPB	se2		// si no hay flanco+ no incrementa
			// incremento de contador
L	DB2.DBD	0	// carga de contador

L#1

T	DB2.DBD	0	// trans. de accul a contador
---	---------	---	-------------------------------

Segmento: 2	Incremento de contador por ausencia de grupo en material "Z"
-------------	--

// Detección de un flanco+

se2:	U	M	57.0	// marca testigo del error
	FP	M	101.2	// detector de flanco
	=	M	101.3	
	UN	M	101.3	
	SPB	se3		// si no hay flanco+ no incrementa
				// incremento de contador
L	DB2.DBD	4	// carga de contador	

L#1

T	DB2.DBD	4	// trans. de acumulador a contador
---	---------	---	------------------------------------

Segmento: 3	Incremento de contador de paquete defectuoso entrada canal 3
La condición de rebote se da debido a la naturaleza del sensor.	

// Detección de un flanco+

```

se3:  UN   E   124.3 // marca testigo del error
      UN   T    4 // anula impulsos por rebote
      FP   M  101.4 // detector de flanco
      =    M  101.5
      L    S5T#2S // anula impulsos por rebote
      SV   T    4 // anula impulsos por rebote
      UN   M  101.5
      SPB  se4 // si no hay flanco+ no incrementa

```

// Incremento de contador

```

L          DB2.DBD      8 // carga de contador
L#1  T     DB2.DBD      8 // trans. de accul a contador

```

Segmento: 4	Incremento de contador alimentación de material "Y"
-------------	---

// Detección de un flanco+

```

Segmento 4:  U    M    65.0 // marca testigo del error
            FP   M  101.6 // detector de flanco
            =    M  101.7
            UN   M  101.7
            SPB  se5 // si no hay flanco+ no incrementa

```

// incremento de contador

```

L          DB2.DBD      12 // carga de contador
L#1
      T     DB2.DBD      12 // transferencia de acumulador a contador

```

Segmento: 5	Incremento de contador por ausencia de material Z
-------------	---

// Detección de un flanco+

```

se5:  U    M    69.0 // marca testigo del error
      FP   M  102.0 // detector de flanco
      =    M  102.1
      UN   M  102.1
      SPB  se6 // si no hay flanco+ no incrementa

```

// incremento de contador

```

L          DB2.DBD      16 // carga de contador
L#1  T     DB2.DBD      16 // transferencia de acumulador a contador

```

Segmento: 6 Incremento de contador por ausencia de material "Y" en canal 2

```
// Detección de un flanco+
se6:  U    M    73.0    // marca testigo del error
      FP    M    102.2   // detector de flanco
      =    M    102.3
      UN    M    102.3
      SPB  se7                // si no hay flanco+ no incrementa
                                // incremento de contador
L      DB2.DBD    20    // carga de contador
L#1
```

Segmento: 7 Incremento de contador por paquete defectuoso canal 2

```
// Detección de un flanco+
se7:  U    E    125.2   // marca testigo del error
      FP    M    102.4   // detector de flanco
      =    M    102.5
      UN    M    102.5
      SPB  se8                // si no hay flanco+ no incrementa
                                // incremento de contador
L      DB2.DBD    24    // carga de contador
L#1
T      DB2.DBD    24    // trans. de accul a contador
```

Segmento: 8 Incremento de contador ausencia en transporte de material "X"

```
// Detección de un flanco+
se8:  U    M    77.0    // marca testigo del error
      FP    M    102.6   // detector de flanco
      =    M    102.7
      UN    M    102.7
      SPB  se9                // si no hay flanco+ no incrementa
                                // incremento de contador
L      DB2.DBD    28    // carga de contador
L#1
T      DB2.DBD    28    // trans. de accul a contador
```

Segmento: 9	Incremento de contador de ausencia de grupo
-------------	---

```
// Detección de un flanco+
se9  U    M    81.0    // marca testigo del error
      FP   M    103.0   // detector de flanco
      =    M    103.1
      UN   M    103.1
      SPB  se10           // si no hay flanco+ no incrementa
                        // incremento de contador
L     DB2.DBD  32       // carga de contador
L#1
T     DB2.DBD  32       // trans. de accul a contador
```

Segmento: 10	Incremento de contador por ausencia de ordenamiento sensor 4
--------------	--

```
// Detección de un flanco+
se10: U    M    85.0    // marca testigo del error
      FP   M    103.2   // detector de flanco
      =    M    103.3
      UN   M    103.3
      SPB  sell          // si no hay flanco+ no incrementa
                        // incremento de contador
L     DB2.DBD  36       // carga de contador
L#1
T     DB2.DBD  36       // trans. de accul a contador
```

Segmento: 11	Incremento de contador por ausencia de ordenamiento sensor 5
--------------	--

```
// Detección de un flanco+
sell:  U    M    89.0
      FP   M    103.4
      =    M    103.5
      UN   M    103.5
      SPB  se12          // si no hay flanco+ no incrementa
                        // incremento de contador
L     DB2.DBD  40       // carga de contador
L#1
T     DB2.DBD  40       // trans. de accul a contador
```

Segmento: 12 Incremento de contador de paquete defectuoso sellado final

```
// Detección de un flanco+
se12: U     E       0.4      // marca testigo del error
      FP    M       103.6    // detector de flanco
      =     M       103.7
      UN    M       103.7
      SPB   se13                // si no hay flanco+ no incrementa
                                   // incremento de contador
L     DB2.DBD    44          // carga de contador
L#1
T     DB2.DBD    44          // trans. de accul a contador
```

Segmento: 13 Incremento de contador salida sellado final

```
// Detección de un flanco+
se13: U     E       0.6      // marca testigo del error
      FP    M       104.0    // detector de flanco
      =     M       104.1
      UN    M       104.1
      SPB   se14                // si no hay flanco+ no incrementa
                                   // incremento de contador
L     DB2.DBD    48          // carga de contador
L#1
T     DB2.DBD    48          // trans. de accul a contador
```

Segmento: 14 Incremento de contador ausencia de alimentación material "X"

```
// Detección de un flanco+
se14: U     M       61.0     // marca testigo del error
      FP    M       104.2    // detector de flanco
      =     M       104.3
      UN    M       104.3
      SPB   se15                // si no hay flanco+ no incrementa
                                   // incremento de contador
L     DB2.DBD    52          // carga de contador
L#1
T     DB2.DBD    52          // trans. de accul a contador
```

Segmento: 15	Conteo total de unidades producidas
--------------	-------------------------------------

// Detección de un flanco+

se15:	U	E	124.2	// marca testigo del error
	FP	M	104.4	// detector de flanco
	=	M	104.5	
	UN	M	104.5	
	SPB	se16		// si no hay flanco+ no incrementa
				// incremento de contador
L	DB2.DBD		56	// carga de contador
L#1				
T	DB2.DBD		56	// trans. de accul a contador

Segmento: 16	reset de todos los contadores
--------------	-------------------------------

Se16:	UN	M	105.0	// marca de reset controlada por op
	SPB	se17		
L	DW#16#0			// reset de acumulación
T	DB2.DBD		0	// ausencia alimentación material Z
T	DB2.DBD		4	// material Z sin grupo
T	DB2.DBD		8	// paquete defectuoso entrada canal 3
T	DB2.DBD		12	// alimentación material "Y"
T	DB2.DBD		16	// ausencia de material "Z"
T	DB2.DBD		20	// alimentación material "Y" en canal 2
T	DB2.DBD		24	// paquete defectuoso canal 2
T	DB2.DBD		28	// alimentación material "X"
T	DB2.DBD		32	// ausencia de grupo
T	DB2.DBD		36	// ordenamiento sensor 4
T	DB2.DBD		40	// ordenamiento sensor 5
T	DB2.DBD		44	// paquete defectuoso sellado final
T	DB2.DBD		48	// salida sellado final
T	DB2.DBD		52	// ausencia de material "X" en canal 2
T	DB2.DBD		56	// producción total
T	DB2.DBD		60	// producción neta

Segmento: 17 Cálculo de producción neta

Se17:

L	DB2.DBD	56	// #total de unidades
L	DB2.DBD	4	// unidades de material "Z" vacías
D			
L	DB2.DBD	8	// paquete defectuoso canal 3
D			
L	DB2.DBD	12	// presencia material "Y"
D			
L	DB2.DBD	16	// ausencia de material "Z"
D			
L	DB2.DBD	20	// material "Y" en canal 2
D			
L	DB2.DBD	24	// paquete defectuoso canal 2
D			
L	DB2.DBD	28	// envoltura material "X"
D			
L	DB2.DBD	32	// ausencia de grupo
D			
L	DB2.DBD	36	// ordenamiento sensor 4
D			
L	DB2.DBD	40	// ordenamiento sensor 5
D			
L	DB2.DBD	44	// paquete defectuoso sellado final
D			
L	DB2.DBD	48	// salida sellado final
D			
L	DB2.DBD	52	// presencia material "X" en canal 2
D			
T	DB2.DBD	60	// producción neta

Bloque: Conteo de tiempo de trabajo efectivo

Cuenta el tiempo de operación de la máquina con base en tiempo que el motor permanece girando. La señal que indica esta condición proviene del DVDF.

Fuente: tefectiv, Alou, hlp6, versión 00.01

Segmento: 1 Cuenta de tiempo efectivo

Manejo de tiempo (cuenta y reseteo)

```

      U      E      126.3      // señal del variador de velocidad
      U      M      110.6      // impulso de 1 Hz.
      FP     M      110.0      // auxiliar para detección de flanco
      =      M      110.1      // flanco para incremento de segundos
      ZV     Z       0        // cuenta de segundos
      L      Z       0        // cuenta segundos
      L      60

==|
M      105.1      // reset
      FP     M      110.2      // auxiliar p/detección de flanco
      =      M      110.3      // flanco de incremento de minutos
      R      Z       0        // cuenta segundos
      ZV     Z       1        // cuenta minutos
      L      Z       1        // cuenta segundos
      L      60

==|
M      105.1      // reset
      FP     M      110.4      // auxiliar p/detección de flanco
      =      M      110.5      // flanco de incremento de horas
      R      Z       1        // cuenta minutos
      ZV     Z       2        // cuenta horas
      U      M      105.1
      R      Z       2
```

Bloque: Conteo de tiempos de parada

Fuente: tperro, Alou, hlp6, versión 00.01

Segmento: 1 Paro por ausencia de producto sensor 1

Controla la cuenta de tiempo de máquina parada cuando hay un paquete defectuoso en tambor de secado.

```
ON   E    0.2    // sensor PD tambor
ON   E    0.1    // ausencia de producto sensor 1
S    M    111.0  // habilita cuenta de tiempo
M    105.1      // reset enviado vía OP
E    126.3      // arranque de motor
R    M    111.0  // habilita cuenta de tiempo
CALL FC    20
ENABLE :=M111.0
RESET  :=M105.1
```

AFLANCO1:=M111.1

FLANCO1 :=M111.2

AFLANCO2:=M111.3

FLANCO2 :=M111.4

AFLANCO3:=M111.5

FLANCO3 :=M111.6

SEG :=Z20

MIN :=Z21

HR :=Z22

Segmento: 2 Ausencia de grupo

```
U    M    17.7    // sensor PD tambor
S    M    113.0  // habilita cuenta de tiempo
M    105.1      // reset enviado vía OP
E    126.3      // arranque de motor
R    M    113.0  // habilita cuenta. de tiempo
CALL FC    20
ENABLE :=M113.0
RESET  :=M105.1
```

AFLANCO1:=M113.1

FLANCO1:=M113.2

AFLANCO2:=M113.3

FLANCO2:=M113.4

AFLANCO3:=M113.5

Segmento: 3	Ausencia de alimentación de material "X"		
-------------	--	--	--

U	M	17.5	// envoltura material "X"
S	M	114.0	// habilita cuenta de tiempo
M	105.1		// reset enviado vía OP
E	126.3		// arranque de motor
R	M	114.0	// habilita cuenta de tiempo
CALL	FC	20	
ENABLE	:=M114.0		
RESET	:=M105.1		
AFLANCO1:=M114.1			
FLANCO1:=M114.2			
AFLANCO2:=M114.3			
FLANCO2:=M114.4			
AFLANCO3:=M114.5			
FLANCO3:=M114.6			
SEG	:=Z26		
MIN	:=Z27		
HR	:=Z28		

Segmento: 4	Ausencia de material "X"		
-------------	--------------------------	--	--

UN	E	125.5	// faltante de material "X"
S	M	116.0	// habilita cuenta de tiempo
M	105.1		// reset enviado vía op
E	126.3		// arranque de motor
R	M	116.0	// habilita cuenta de tiempo
CALL	FC	20	
ENABLE	:=M116.0		
RESET	:=M105.1		
AFLANCO1:=M116.1			
FLANCO1 :=M116.2			
AFLANCO2:=M116.3			
FLANCO2 :=M116.4			
AFLANCO3:= M116.5			
FLANCO3 :=M116.6			
SEG	:=Z29		
MIN	:=Z30		
HR	:=Z31		

Segmento: 5	Ausencia material "Y"		
-------------	-----------------------	--	--

UN	E	0.3	// sensor PD tambor
S	M	117.0	// habilita cuenta de tiempo

```

M    105.1          // reset enviado vía OP
E    126.3          // arranque de motor
      R    M    117.0 // habilita cuenta de tiempo
      CALL FC    20
      ENABLE :=M117.0
      RESET  :=M105.1

AFLANCO1:=M117.1
FLANCO1 :=M117.2
AFLANCO2:=M117.3
FLANCO2 :=M117.4
AFLANCO3:=M117.5
FLANCO3 :=M117.6
      SEG    :=Z32
      MIN    :=Z33
      HR     :=Z34

```

Segmento: 6	Ausencia de alimentación de material "Y"
-------------	--

```

      UN    M    16.7 // sensor PD tambor
      S    M    118.0 // habilita cuenta de tiempo
M    105.1          // reset enviado vía OP
E    126.3          // arranque de motor
      R    M    118.0 // habilita cuenta de tiempo
      CALL FC    20
      ENABLE :=M118.0
      RESET  :=M105.1

AFLANCO1:=M118.1
FLANCO1 :=M118.2
AFLANCO2:=M118.3
FLANCO2 :=M118.4
AFLANCO3:=M118.5
FLANCO3 :=M118.6
      SEG    :=Z35
      MIN    :=Z36
      HR     :=Z37

```

Segmento: 7	Ausencia material "Z"
-------------	-----------------------

```

      U    M    18.7 // sensor PD tambor
      S    M    120.0 // habilita cuenta de tiempo
M    105.1          // reset enviado vía OP
E    126.3          // arranque de motor
      R    M    120.0 // habilita cuenta de tiempo

```

```

CALL FC 20
ENABLE :=M120.0
RESET :=M105.1
AFLANCO1:=M120.1
FLANCO1 :=M120.2
AFLANCO2:=M120.3
FLANCO2 :=M120.4
AFLANCO3:=M120.5
FLANCO3 :=M120.6
SEG :=Z38
MIN :=Z39
HR :=Z40

```

Segmento: 8	Paquete defectuoso canal 2
-------------	----------------------------

```

U E 125.2 // sensor PD tambor
S M 121.0 // habilita cuenta de tiempo
M 105.1 // reset enviado vía OP
E 126.3 // arranque de motor
R M 121.0 // habilita cuenta de tiempo
CALL FC 20
ENABLE :=M121.0
RESET :=M105.1
AFLANCO1:=M121.1
FLANCO1 :=M121.2
AFLANCO2:=M121.3
FLANCO2 :=M121.4
AFLANCO3:=M121.5
FLANCO3 :=M121.6
SEG :=Z41
MIN :=Z42
HR :=Z43

```

Segmento: 9	Paquete defectuoso en canal 3
-------------	-------------------------------

```

UN E 124.3 // sensor PD tambor
S M 122.0 // habilita cuenta de tiempo
M 105.1 // reset enviado vía OP
E 126.3 // arranque de motor
R M 122.0 // habilita cuenta de tiempo
CALL FC 20
ENABLE :=M122.0
RESET :=M105.1

```

AFLANCO1:=M122.1

FLANCO1 :=M122.2

AFLANCO2:=M122.3

FLANCO2 :=M122.4

AFLANCO3:=M122.5

FLANCO3 :=M122.6

SEG :=Z44

MIN :=Z45

HR :=Z46

Segmento: 10	Paquete defectuoso salida sellado final
--------------	---

UN	E	0.6	// sensor PD tambor
S	M	124.0	// habilita cuenta de tiempo
M	105.1		// reset enviado vía OP
E	126.3		// arranque de motor
R	M	124.0	// habilita cuenta de tiempo
CALL	FC	20	
ENABLE		:=M124.0	
RESET		:=M105.1	

AFLANCO1:=M124.1

FLANCO1 :=M124.2

AFLANCO2:=M124.3

FLANCO2 :=M124.4

AFLANCO3:=M124.5

FLANCO3 :=M124.6

SEG :=Z50

MIN :=Z51

HR :=Z52

Bloque: Conteo de tiempo

Conteo de tiempo en horas, minutos y segundos para contabilizar tiempo en el que la máquina está parada.
--

Fuente: tperrore, Alou, hlp6, versión 00.01

Segmento: 1	Conteo de tiempo
-------------	------------------

Manejo de conteo en horas, minutos, segundos y reset de cuenta
--

U	#ENABLE		// señal de habilitación
U	M	110.6	// impulso de 1 Hz
FP	#AFLANCO1		// auxiliar para detección de flanco
=	#FLANCO1		// flanco para incremento de segundos
ZV	#SEG		// cuenta de segundos

```

L      #SEG          // cuenta segundos
L      60
==|
FP     #AFLANCO2    // auxiliar p/detección de flanco
=     #FLANCO2      // flanco de incremento de minutos
R     #SEG          // cuenta segundos
ZV    #MIN          // cuenta minutos
L     #MIN          // cuenta segundos
L     60
==|
FP     #AFLANCO3    // auxiliar p/detección de flanco
=     #FLANCO3      // flanco de incremento de horas
R     #MIN          // cuenta minutos
ZV    #HR           // cuenta horas
U     #RESET
R     #HR
R     #MIN
R     #SEG

```

Bloque: Rechazo

Fuente: HLP, Sandoval, PROC-SEC, Versión 00.01

Segmento: 1	Rechazo manual
-------------	----------------

```

E      1.4
E      1.7
=      M      0.5

```

Segmento: 2	Sincronización rechazo
-------------	------------------------

```

U      M      14.0
U      M      14.1
=      A      14.2

```

Segmento: 3	Rechazo automático
-------------	--------------------

```

U      M      0.5
S      M      14.7
U      A      125.0
R      M      14.3

```

3. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Análisis sobre las variables controladas

3.1.1 Unidades producidas

En la tabla No.8 se presentan los datos registrados para ambas máquinas en lo correspondiente a las unidades producidas durante el período estudiado y al tiempo total disponible de cada una de ellas.

De los datos se determina que la máquina B produjo a razón de 1,278 unidades por minuto disponible versus las 1,128 unidades por minuto disponible producidas por la máquina A. Esto representa una producción de 150 unidades por minuto más en la máquina B con respecto a la máquina A durante el tiempo que ambas estuvieron disponibles para producir. La razón se consigue de dividir el número total de unidades entre el número total de minutos para cada máquina.

Tabla VIII Unidades producidas

Mes	Máquina A		Máquina B	
	Resultados Unidades	TTD minutos	Resultados unidades	TTD minutos
Diciembre	13,580,827	13,140	17,654,948	13,995
Enero	4,201,683	5,197	17,141,480	14,552
Febrero	18,921,400	18,208	20,974,857	18,208
Marzo	17,288,500	16,150	22,895,733	16,540
Abril	26,352,800	18,530	25,872,903	18,530
Totales	80,345,210	71,225	104,539,921	81,825
Razón	1,128		1,278	
%	100%		130%	

3.1.2 Tiempos perdidos

En la tabla No.9 se presentan los datos registrados respecto a los tiempos perdidos operativos y mecánicos incurridos en ambas máquinas. Se efectúa una comparación porcentual de cada uno de ellos respecto al tiempo total disponible y respecto al total de tiempos perdidos por cada una.

De los datos se determina que la máquina B perdió un 4.8 % menos tiempo que la máquina A, además se observa que a pesar de que el mayor porcentaje del tiempo perdido, para ambas máquinas, corresponde a problemas electro-mecánicos, el porcentaje de éstos en la máquina B es inferior en un 6.5 % que los generados en la máquina A y que, en contraposición, los tiempos operativos generados en la máquina B son superiores en un 6.5% a los presentados en la máquina A.

Según los datos registrados y presentados en la tabla No. 10, la falta de producto, tiempo que la máquina está disponible para producir y no lo hace por no tener unidades para procesar, corresponde a un 70% del tiempo perdido operativo en la máquina B y un 63 % en la máquina A, es decir que existe una diferencia del 7 % entre ambas máquinas por esta causa. El tiempo perdido por falta de producto aunque afecta la productividad de la máquina, no es causa imputable a la operación y habilitación de ésta.

Tabla IX Tiempos perdidos

MÁQUINA A							
Descripción	Diciembre minutos	Enero minutos	Febrero minutos	Marzo minutos	Abril minutos	Totales minutos	Promedio minutos
TTD	13,140	5,197	18,208	16,150	18,530	71,225	14,245
TPO	2,848	780	4,493	2,766	3,688	14,575	2,915
TPM	5,606	2,970	8,725	5,480	5,429	28,210	5,642
TTP	8,454	3,750	13,218	8,246	9,117	42,785	8,557
%TP	64.3%	72.2%	72.6%	51.1%	49.2%	60.1%	60.1%
%TPO vs. TTD	21.7%	15.0%	24.7%	17.1%	19.9%	20.5%	20.5%
%TPM vs. TTD	42.7%	57.1%	47.9%	33.9%	29.3%	39.6%	39.6%
%TPO vs. TP	33.7%	20.8%	34.0%	33.5%	40.5%	34.1%	34.1%
%TPM vs. TP	66.3%	79.2%	66.0%	66.5%	59.5%	65.9%	65.9%
MÁQUINA B							
Descripción	Diciembre minutos	Enero minutos	Febrero minutos	Marzo minutos	Abril minutos	Totales minutos	Promedio minutos
TTD	13,995	14,552	18,208	16,540	18,530	81,825	16,365
TPO	3,070	3,200	4,873	3,528	3,738	18,409	3,682
TPM	4,771	5,371	6,062	5,046	5,630	26,880	5,376
TTP	7,841	8,571	10,935	8,574	9,368	45,289	9,058
%TP	56.0%	58.9%	60.1%	51.8%	50.6%	55.3%	55.3%
%TPO vs. TTD	21.9%	22.0%	26.8%	21.3%	20.2%	22.5%	22.5%
%TPM vs. TTD	34.1%	36.9%	33.3%	30.5%	30.4%	32.9%	32.9%
%TPO vs. TP	39.2%	37.3%	44.6%	41.1%	39.9%	40.6%	40.6%
%TPM vs. TP	60.8%	62.7%	55.4%	58.9%	60.1%	59.4%	59.4%

Tabla X Tiempos perdidos operativos

CAUSAS	MÁQUINA A						
	Distribución mensual de tiempo perdido operativo (minutos)						Promedio
	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Media	Horas
Falta de producto	1,799	391	3,375	1,557	2,182	1,861	31
Arranque	490	296	660	603	735	557	9
Cambios de configuración	229	83	303	403	527	309	5
Falta de personal	258	0	155	53	161	125	2
Limpieza	52	10	0	55	83	40	1
Diseño de productos	15	0	0	95	0	22	0
Falta de suministros	5	0	0	0	0	1	0
Suministro eléctrico interno	0	0	0	0	0	0	0
Total	2,848	780	4,493	2,766	3,688	2,915	49
CAUSAS	MÁQUINA B						
	Distribución mensual de tiempo perdido operativo (minutos)						Promedio
	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Media	horas
Falta de producto	2,173	2,269	3,632	2,399	2,084	2,511	42
Arranque	580	633	690	630	833	673	11
Cambios de configuración	233	243	356	416	516	353	6
Falta de personal	73	30	175	20	251	110	2
Limpieza	0	25	20	63	39	29	0
Diseño de productos	0	0	0	0	15	3	0
Suministro eléctrico interno	11	0	0	0	0	2	0
Falta de suministros	0	0	0	0	0	0	0
Total	3,070	3,200	4,873	3,528	3,738	3,682	61

3.1.3 Producto aceptado y/o rechazado

En la tabla No. 11 se presentan los datos registrados con respecto al producto aceptado y/o rechazado por cada máquina logrando observarse que en la máquina B se rechazó un 1 % menos de producto, es decir que encontró menos producto no-conforme o no aceptado, representando un menor desperdicio, dentro del proceso, de la máquina B comparado con la máquina A.

Tabla XI Producto aceptado

Mes	Máquina A				
	Unidades Producidas	Unidades aceptada	Unidades rechazada	Aceptación %	Rechazo %
Diciembre	13,580,827	13,118,780	462,047	97%	3%
Enero	4,201,683	4,048,699	152,984	96%	4%
Febrero	18,921,400	18,323,970	597,430	97%	3%
Marzo	17,288,500	16,741,999	546,501	97%	3%
Abril	26,352,800	25,461,696	891,104	97%	3%
Totales	80,345,210	77,695,144	2,650,066	97%	3%
Promedio	16,069,042	15,539,029	530,013	97%	3%
Mes	Máquina B				
	Producción Total	Producción aceptada	Producción rechazada	Aceptación %	Rechazo %
Diciembre	17,654,948	17,235,400	419,548	98%	2%
Enero	17,141,480	16,746,920	394,560	98%	2%
Febrero	20,974,857	20,369,840	605,017	97%	3%
Marzo	22,895,733	22,303,940	591,793	97%	3%
Abril	25,872,903	25,652,860	220,043	99%	1%
Totales	104,539,921	102,308,960	2,230,961	98%	2%
Promedio	20,907,984	20,461,792	446,192	98%	2%

3.1.4 Consumo de recurso humano

En la tabla No.12 se presenta la información correspondiente al costo necesario para cubrir la operación de ambas máquinas, durante el tiempo disponible para producir, por concepto de pago de salarios y prestaciones para el personal operativo y administrativo involucrados en la operación.

Se indica el número de personas necesarias para la operación de la maquinaria, la proporción de tiempo (factor) involucrados directamente con las máquinas y su salario diario. Con esta información se calcula el salario promedio ponderado por hora-hombre. Para cada máquina se presenta el cálculo de las horas-hombres utilizadas tomando como

base el tiempo total disponible registrado para cada una de ellas así como el factor de participación por función y el número de personas involucradas.

De las unidades producidas, indicadas en la tabla No.8 y de las horas-hombre utilizadas en cada máquina para producirlas, se determina que la máquina A produjo 10,686.78 unidades por hora-hombre y la máquina B produjo 12,103.62 unidades por hora-hombre, lo cual indica una diferencia de 1,416.84 unidades por hora-hombre a favor de la máquina B.

En las últimas dos columnas de la tabla No.12 se presenta el costo total incurrido por concepto de salarios y prestaciones del personal operativo y administrativo, valor que está relacionado con el salario promedio ponderado por horas-hombre y las horas-hombre requeridas por cada máquina.

3.1.5 Consumo de materiales

En la tabla No. 13 se presenta la información registrada con respecto al consumo de los materiales X, Y, Z en sus respectivas unidades de medida, utilizados por las máquinas, para producir las unidades reportadas en la tabla No. 8.

Al comparar esta información con la obtenida del reporte de rechazos de la tabla No. 11, puede generarse confusión entre la información contenida en ambas tablas; sin embargo, la diferencia radica en que la tabla No. 13 reporta todo el material puesto en máquina, pues la disminución de los rechazos únicamente podrán ahorrar material respecto al material suministrado, es decir, no todo el material disponible para la máquina recorre el proceso pues el material es sometido a un proceso de revisión y el material fuera de especificaciones es rechazado.

Tabla XII Recurso humano total incurrido en el ensayo

Función operación	No.	factor	Total salario diario US\$	Total salario hora-hombre	Máquina A		Máquina B		Insumo RH	
					TTD horas	Hora hombre	TTD horas	Hora hombre	Máquina A US \$	Máquina B US \$
Mecánico	2	0.333	24.84	1.74	1,187.08	791.39	1,363.75	909.17		
Operador 1	2	1.000	68.70	4.82	1,187.08	2,374.17	1,363.75	2,727.50		
Operador 2	2	0.500	27.66	1.94	1,187.08	1,187.08	1,363.75	1,363.75		
Electrónico	2	0.042	3.11	0.22	1,187.08	98.92	1,363.75	113.65		
Encargado materiales	2	0.042	2.44	0.17	1,187.08	98.92	1,363.75	113.65		
Ayudante 1	2	0.083	4.84	0.34	1,187.08	197.85	1,363.75	227.29		
Ayudante 2	2	0.167	6.02	0.42	1,187.08	395.69	1,363.75	454.58		
Oficios varios	2	0.500	12.50	0.88	1,187.08	1,187.08	1,363.75	1,363.75		
Inspector calidad	2	0.250	13.83	0.97	1,187.08	593.54	1,363.75	681.88		
Subtotales			163.94	11.50		6,924.65		7,955.21	79,663.96	91,519.88

Factor de prestaciones 1.8

Función administración	No.	factor	Total salario diario US\$	Total salario Hora Hombre	Máquina A		Máquina B		Insumo RH	
					TTD hora	hora hombre	TTD hora	hora hombre	Máquina A US \$	Máquina B US \$
Coordinadores	2	0.042	4.22	0.30	1187.08	98.92	1363.75	113.65		
Supervisor producción	4	0.083	11.93	0.84	1187.08	395.69	1363.75	454.58		
Supervisor calidad	2	0.042	2.98	0.21	1187.08	98.92	1363.75	113.65		
Subtotales			19.13	1.34		593.54		681.88	796.72	915.29
Totales RH			183.07	12.85		7,518.19		8,637.08	80,460.68	92,435.17

Factor de prestaciones = 1.6

En la tabla No.14 se presenta la distribución del material utilizado por cada máquina durante el período estudiado, el valor en quetzales por cada unidad de material y los datos calculados del consumo, en quetzales, por material y del global, del rubro recurso materiales, por máquina para toda la producción realizada. Es obvio que la máquina B consumiera más recursos que la máquina A. Esto es debido a que el volumen producido por la máquina B fue superior al producido por la máquina A.

Tabla XIII Consumo de materiales

Mes	Máquina A			Máquina B		
	Material X Kgs.	Material Y Kgs.	Material Z unidades	Material X Kgs.	Material Y Kgs.	Material Z unidades
Diciembre	853.46	636.74	680,692	1,109.50	827.75	884,894
Enero	292.31	218.20	212,315	1,192.51	890.18	866,176
Febrero	1,122.21	780.59	942,092	1,244.00	865.31	1,044,334
Marzo	1,200.71	635.08	868,939	1,590.15	841.05	1,150,764
Abril	1,601.14	845.23	1,321,147	1,571.99	829.83	1,297,088
Total	5,069.84	3,115.83	4,025,185	6,708.14	4,254.13	5,243,256

Tabla XIV Consumo de materiales en moneda US \$

MÁQUINA A

Mes	Material X			Material Y			Material Z			Total US \$
	Kg	Costo U US \$	Consumo US \$	Kg	Costo U US \$	Consumo US \$	Unidad	Costo U US \$	Consumo US \$	
Diciembre	853	2.96	2,523	637	1.39	885	680692	0.01	9478	12886
Enero	292	2.96	864	218	1.39	303	212315	0.01	3050	4217
Febrero	1,122	2.96	3,317	781	1.39	1,085	942092	0.01	13522	17924
Marzo	1,201	2.96	3,549	635	1.39	883	868939	0.01	12459	16891
Abril	1,601	2.96	4,733	845	1.39	1,175	1321147	0.01	18977	24884
Totales	5,070		14,985	3,116		4,331	4025185		57487	76803

MÁQUINA B

Mes	Material X			Material Y			Material Z			Total US \$
	Kg	Costo U US \$	Consumo Quetzales	Kg	Costo U US \$	Consumo US \$	Unidad	Costo U US \$	Consumo US \$	
Diciembre	1110	2.96	3279	828	1.39	1150	884894	0.01	12321	16751
Enero	1193	2.96	3525	890	1.39	1237	866176	0.01	12444	17205
Febrero	1244	2.96	3677	865	1.39	1203	1044334	0.01	14990	19869
Marzo	1590	2.96	4700	841	1.39	1169	1150764	0.01	16500	22369
Abril	1572	2.96	4646	830	1.39	1153	1297088	0.01	18632	24431
Totales	6708		19827	4254		5913	5243256		74887	100627

3.1.6 Consumo de capital

En la tabla No. 15 se presenta el impacto de agregar a la máquina B el equipo de automatización utilizando el método de depreciación anual, con base en una depreciación a 5 años, llevado a 5 meses de uso del equipo electrónico utilizado. Esto representa un 61 % de diferencia de este costo en la máquina B que en la máquina A.

Tabla XV Consumo de capital

	Máquina A	Máquina B
Valor actual máquina	63,291.14	63,291.14
Automatización :		
• Tablero		16,190.91
• Sensores		14,957.24
• Montaje		7,479.86
Subtotal		38,628.01
Total	63,291.14	101,919.15
Costo en el año base del activo	63,291.14	101,919.15
Depreciación mensual	1,054.85	1,698.65
Depreciación aplicada al ensayo	5,274.25	8,493.25
Moneda expresada en 1 US \$= Q7.90		

El método de depreciación utilizado por la empresa es el denominado método de la línea recta, el cual divide el monto invertido en activos depreciables en partes iguales en periodos iguales a lo largo de cinco años a partir del cierre contable anual. Para el caso de cinco años implica sesenta meses de descuento por depreciación. Es posible aplicar la depreciación de forma inmediata y calcular lo depreciado durante cinco meses de evaluación.

3.1.7 Consumo de energía

En la tabla No.16 se presenta el consumo de energía eléctrica basado en horas trabajadas por máquina. Ambas máquinas son iguales y consumen energía en operación. Así se calcula el costo por consumo de energía eléctrica, indicándose en la tabla No. 17 los resultados obtenidos.

Tabla XVI Energía eléctrica consumida

Mes	Máquina A			Máquina B		
	Tiempo hora	Potencia vatio	Energía kilovatio-hora	Tiempo horas	Potencia kilovatio	Energía kilovatio-hora
Diciembre	219.00	5,144.19	1,126.58	233.25	5,144.19	1,199.88
Enero	86.62	5,144.19	445.57	242.53	5,144.19	1,247.64
Febrero	303.47	5,144.19	1,561.09	303.47	5,144.19	1,561.09
Marzo	269.17	5,144.19	1,384.64	275.67	5,144.19	1,418.08
Abril	308.83	5,144.19	1,588.70	308.83	5,144.19	1,588.70
Total	1,187.08	5,144.19	6,106.58	1,363.75	5,144.19	7,015.39

Tabla XVII Costo por consumo de energía eléctrica

Mes	Máquina A			Máquina B		
	Consumo kilovatio-hora	Costo kilovatio US\$	Costo total Q.	Consumo Kilovatio-hora	Costo kilovatio US\$	Costo total
Diciembre	1,126.58	0.13	144.60	1,199.80	0.13	154.00
Enero	445.57	0.13	57.19	1,247.64	0.13	160.14
Febrero	1,561.09	0.13	200.37	1,561.09	0.13	200.37
Marzo	1,384.64	0.13	177.72	1,418.08	0.13	182.02
Abril	1,588.70	0.13	203.92	1,588.70	0.13	203.92
Total	6,106.58		783.81	7,015.31		900.45
Moneda expresada en 1 US \$ = Q 7.90						

3.1.8 Análisis sobre la productividad

Considerando el modelo de productividad total operativa (MPTO) descrito en el presente trabajo de investigación se desarrolló la tabla No.18, la cual presenta el resumen de las productividades parciales y total de ambas máquinas.

Tabla XVIII Productividad total

Elementos de producción tangibles	Máquina A	Máquina B	Diferencias
Unidades producidas (unidades)	80,345,210	104,539,921	24,194,711
Valor venta por unidad (US\$/unidad)	0.012658227	0.012658227	-
Valor de las unidades terminadas (US\$)	1,017,027.97	1,323,290.14	306,262.16
Elementos de insumo tangibles			
Insumo humano (US \$)	80,460.68	92,435.17	11,974.49
Insumo materiales (US \$)	76,802.70	100,626.82	23,824.12
Insumo de capital (US \$)	5,274.26	8,493.26	3,219.00
Insumo de energía (US \$)	783.81	900.45	116.64
Total de insumos en US \$	163,321.45	202,455.7	39,134.25
Productividades parciales			
Insumo humano (US \$ / US \$)	12.64	14.32	1.68
Índice de productividad humana	1.00	1.13	0.13
Insumo materiales (US \$ / US \$)	13.24	13.15	(0.09)
Índice de productividad de materiales	1.00	1.01	0.01
Insumo de capital (US \$ / US \$)	192.83	155.80	(37.02)
Índice de productividad de capital	1.00	0.81	(0.19)
Insumo de energía (US \$ / US \$)	1,297.55	1,469.59	172.04
Índice de productividad de energía	1.00	1.13	0.13
Productividad total (US \$ / US \$)	6.2272	6.5362	0.3090
Índice de productividad total	1.0000	1.0496	0.0496
Volumen anual	192,828,504.00	250,895,810.40	58,067,306.40
Ganancia en operación (US \$/unidad)			0.004
Ganancia en un año			227,154.04
Inversión (US \$)			38,628.01
Recuperación de inversión (años)			0.17
Recuperación de inversión (meses)			2.04
Moneda expresada en 1 US \$ = Q 7.90			

1. La tabla No. 18 muestra todos los insumos involucrados en el ensayo, así como sus productividades parciales y total de la planta.
2. Aunque en las productividades parciales comparadas entre la máquina B y la máquina A es baja en la productividad por insumo de capital, el resumen y análisis muestra que la productividad total es mayor. Lo anterior se refleja en el análisis proyectado anual sobre el volumen de unidades, ganancia por este incremento de productividad al sostener la productividad que muestra la máquina en evolución.
3. Se incluye un análisis de recuperación de capital considerando las variables involucradas. Según los cálculos la inversión se recupera en un período de dos meses calendario.
4. En un análisis de productividad es necesario incluir los aspectos relacionados con la calidad del producto. Si bien es cierto algunos factores principalmente externos afectan la calidad del producto, durante el período de evaluación no hubo evidencia de afectarse la calidad del producto significativamente, lo cual puede observarse en la tabla de rechazos de producto; obsérvese una diferencia de 1% a favor de la máquina B.

3.1.9 Productividades parciales

1. Insumo humano: la máquina B produce más por unidad monetaria invertida en salarios y prestaciones comparadas con la máquina A. Lo anterior puede verificarse en la tabla anterior, pues se está usando la misma cantidad de personal para realizar la actividad productiva en ambas máquinas.
2. Insumo de materiales: ambas máquinas muestran la misma productividad, con alguna ligera inclinación para la máquina B; sin embargo, no es relevante, pues los desperdicios de material tienen una diferencia del orden del 1% a favor de la máquina B.
3. Insumo de capital: durante el ensayo la máquina B mostró una productividad inferior en esta categoría. Esto es debido a la inversión que debió practicarse al inicio y que es producto de análisis; sin embargo, el insumo de capital se compensará al final del ejercicio y durante su período de depreciación de tal forma que a mediano y largo plazo su productividad aumentará.
4. Insumo de energía: la máquina B muestra un incremento de productividad en esta categoría, debido a que consume menos energía eléctrica por cada unidad que se produce. Es una coincidencia que las productividades parciales del insumo de energía y humano sean similares o parecidas.

CONCLUSIONES

1. La sustitución de un sistema de control, en lazo cerrado, por un sistema con autómatas programables industriales, también en lazo cerrado, incrementó la productividad del proceso de manufactura estudiado y a un costo que hace que la inversión se recupere en un plazo aproximado de dos meses.
2. La máquina B fue reconstruida utilizando un autómata programable, mientras que la máquina A conservó su lógica eléctrica inicial. De acuerdo a las tablas y resultados obtenidos durante el período de evaluación de cinco meses consecutivos, la máquina B mostró mejores resultados.
3. El ensayo se realizó en un proceso de manufactura de alto volumen de producción y consumo masivo, lo cual permite que las velocidades de producción sean elevadas. Este ensayo es particular a este caso y no se puede generalizar, pues para cada caso habrá que hacer un análisis particular; sin embargo, el método utilizado es de aplicación general.
4. Se considera que la base fundamental del incremento de la productividad del proceso estudiado corresponde al efecto positivo de la reducción de los tiempos perdidos mecánicos y de proceso, debido a que el autómata programable y sus periféricos proporcionan lectura e información al operador, un elemento importante para la evaluación de la falla. El autómata programable posee ayuda de interpretación y análisis para la evaluación de una falla.

RECOMENDACIONES

1. Desarrollar un estudio de impacto de la tecnología en el comportamiento humano, pues es importante, considerar los factores humanos que inciden directamente en la productividad de un proceso tales como motivación, habilidad, disponibilidad, responsabilidad y cooperación.
2. Algunos de los factores antes mencionados tienen relación con la inversión en recurso humano principalmente en lo relacionado con capacitación y condiciones de trabajo, el cual les permite laborar en un ambiente organizacional adecuado para que las variables del análisis de la productividad tengan siempre un comportamiento positivo.
3. El mantenimiento adecuado de los equipos detiene o evita el envejecimiento prematuro. Este trabajo de investigación no lo incluye; sin embargo, es un rubro que debe ser motivo de un análisis individual.
4. El uso de autómatas programables en las máquinas de un proceso industrial ayudan en el incremento de la productividad; sin embargo, debe de considerarse que el mismo está sujeto a la eficiencia y lógica con que el programa ejecuta todas las instrucciones del proceso, por lo que será necesario verificar que el programa opere de acuerdo al proceso.

5. Un estudio de estabilidad de proceso será importante realizar para verificar que todos los datos obtenidos durante el ensayo y la evaluación son estables y pueden predecirse en el largo plazo. Lo anterior es importante para crear o sugerir mecanismos que eviten que la productividad disminuya y la respuesta en el largo plazo sea contradictoria.

BIBLIOGRAFÍA

1. Baca Urbina, Gabriel. **Evaluación de Proyectos: Análisis y Administración del Riesgo**. 2ª ed. México: Mc Graw Hill, 1990. 284 pp.
2. Balcells, Josep y José Luis Romeral. **Autómatas Programables**. México: Alfaomega Grupo Editor S.A., 1998. 439 pp.
3. Belcher, John. **Productividad Total**. Argentina: Editorial Juan Granica S.A., 1987. 384 pp.
4. Bittel, Lester y John Newstrom. **Lo que todo supervisor debe saber**. 4ª ed. México: Mc Graw Hill, 1993. 534 pp.
5. García de la Fuente, Olegario. **Metodología de la investigación científica, cómo hacer una tesis en la era de la informática**. España: Ediciones CEES, 1994. 323 pp.
6. Koontz, Harold y Heinz Weihrich. **Administración: una perspectiva global**. 10ª ed. México: Mc Graw Hill, 1994. 745 pp.
7. Méndez Ordoñez, Luis Arturo. Modificación de una máquina de inyección de plásticos con control electromagnético a control electrónico programable. Tesis Ing. Eléctrica. Guatemala, universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1991. 120 pp.

8. Ojeda Cherta, Francisco. **Problemas de diseño de automatismos**. 2ª ed. España: Editorial Paraninfo, 2000. 584 pp.
9. Roldán Vilorio, José. **Automatismos y cuadros eléctricos**. España: Editoriales Paraninfo, 1998. 309 pp.
10. Siemens. “Simatic S7-300” **Catálogo de producto**. (Alemania): s.a.
11. Siemens. “Simatic software: autómeta programable S7-300 Iniciación a la configuración y programación, ABC de la programación” **Revista Siemens AG**. (Alemania):82.1996.
12. Siemens. “Simatic software: software estándar para Simatic S7 y M7 Step 7” **Manual del usuario**. (Alemana): 316.1996.
13. Siemens. “Simatic software: Software de sistema para Simatic S7-300/400, diseño de programas” **Manual de programación**. (Alemania): 234. 1996.
14. Sumanth, David. **Ingeniería y administración de la productividad**. México: Mc Graw Hill,1990. 547 pp.
15. Taylor, George. **Ingeniería económica**. México: Editorial Limusa, 1985.