

Treball de Fi de Màster

Màster Universitari en Enginyeria Industrial

Transformación de una línea de fabricación a la Industria 4.0

MEMORIA

Autor: David Fernández de Quincoces García
Director: Manuel Moreno Eguílaz
Convocatoria: Julio 2023



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

El món ha patit canvis al llarg dels anys. Les revolucions industrials han marcat un abans i un després en la societat, l'economia, la política i, sobretot, en la manera de fabricar.

Encara i que són poques les persones que siguin coneixedores d'això, actualment s'està vivint la transició de la tercera revolució industrial a la quarta o, també anomenada, la Indústria 4.0. Gràcies als avenços tecnològics, cada vegada són més els dispositius connectats a internet i interconnectats entre ells, que milloren la productivitat i optimitzen la fabricació. L'automatització i la digitalització estan adquirint cada vegada més pes en el present segle XXI, portant la fabricació a un següent nivell.

Encara que aquesta Indústria 4.0 està sent analitzada i estudiada en el camp teòric, en l'actualitat, són poques les empreses que fan el pas de començar a aplicar-la, ja que, entre altres coses, requereix una gran inversió inicial.

Amb aquest projecte es pretén posar en pràctica els conceptes teòrics de la Indústria 4.0. Per això, se seleccionarà una línia de fabricació real, s'estudiaran les innovacions de la quarta revolució industrial i s'aplicaran en aquesta línia de producció. Amb això es vol demostrar l'impacte econòmic que comporta, així com les seves múltiples aplicacions que tenen lloc gràcies a l'avanç de la tecnologia. I, sobretot, es pretén respondre a la següent pregunta: és econòmicament rendible la Indústria 4.0?

Resumen

El mundo ha sufrido cambios a lo largo de los años. Las revoluciones industriales han marcado un antes y un después en la sociedad, la economía, la política y, sobre todo, en la manera de fabricar.

Aunque pocas personas sean conocedoras de ello, actualmente se está viviendo la transición de la tercera revolución industrial a la cuarta o, también llamada, la Industria 4.0. Gracias a los avances tecnológicos, cada vez son más los dispositivos conectados a internet e interconectados entre ellos, que mejoran la productividad y optimizan la fabricación. La automatización y la digitalización están adquiriendo cada vez un peso mayor en el presente siglo XXI, llevando la fabricación a un siguiente nivel.

Pese a que esta Industria 4.0 está siendo analizada y estudiada en el campo teórico, actualmente, son pocas las empresas que dan el paso de comenzar a aplicarla, ya que, entre otras cosas, requiere de una gran inversión inicial.

Con este proyecto se pretende llevar a la práctica los conceptos teóricos de la Industria 4.0. Por ello, se va a seleccionar una línea de fabricación real, se va a estudiar las innovaciones de la cuarta revolución industrial y se van a aplicar en dicha línea de producción. Con ello se quiere demostrar el impacto económico que conlleva, así como sus múltiples aplicaciones que tienen lugar gracias al avance de la tecnología. Y, sobre todo, se pretende responder a la siguiente pregunta: ¿es económicamente rentable la Industria 4.0?

Abstract

During the past few years, the world has suffered changes. The industrial revolutions have been deflecting society, economy, politics, and, especially, the way of producing.

Even though few people are aware, nowadays, we are living in the transition between the third and the fourth industrial revolution, which is also called, Industry 4.0. Thanks to technological advances, every day there are more devices connected to the internet and interconnected between them. Automatization and digitalization are increasing its importance in the current 21st Century, upgrading production to the next level.

Although Industry 4.0 is being analyzed and studied on the theoretical surface, nowadays, only a few companies take the step forward its application, due to the fact that, apart from other reasons, it requires a huge initial investment.

The main goal of this project is taking into practice the theoretical concepts of Industry 4.0. Thus, it is going to be selected a real manufacturing line, innovations of the fourth industrial revolution are going to be studied, and they are going to be applied in the mentioned manufacturing line. What it is pretended to be demonstrated is the economic impact that it has, apart from the multiple applications that can take place thanks to technological advances. And, especially, the next question is pretended to be responded: is Industry 4.0 economically profitable?

Sumario

SUMARIO	7
1. GLOSARIO Y NOMENCLATURA	9
2. LISTADO DE FIGURAS	10
3. LISTADO DE TABLAS	14
4. PREFACIO	16
4.1. Origen del proyecto	16
4.2. Motivación	16
5. INTRODUCCIÓN	17
5.1. Objetivos del proyecto	17
5.2. Alcance del proyecto	17
6. ESTADO DEL ARTE	18
7. INTRODUCCIÓN TEÓRICA	19
7.1. Primera revolución industrial	19
7.2. Segunda revolución industrial	20
7.3. Tercera revolución industrial	20
8. CUARTA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL	21
8.1. Pilares.....	21
8.2. Beneficios.....	23
8.3. Limitaciones.....	24
9. LÍNEA DE FABRICACIÓN	26
9.1. Celda 1	32
9.2. Celda 2	33
9.3. Celda 3	35
9.4. Celda 4	36
9.5. Celda 5	37
9.6. Celda 6	38
9.7. Celda 7	39
10. APLICACIÓN DE LA INDUSTRIA 4.0	44
10.1. Producción bajo demanda.....	46
10.1.1. Datos de demanda.....	47

10.1.2. Implementación de la herramienta.....	48
10.1.3. Protocolo de comunicación.....	49
10.1.4. Desventaja.....	51
10.1.5. Costes de inversión.....	52
10.2. Mantenimiento preventivo y diagnosis.....	53
10.2.1. Neumática.....	54
10.2.1.1. Desgaste de elementos.....	54
10.2.1.2. Fugas de aire.....	65
10.2.2. Electrónica.....	73
10.2.2.1. Fallos eléctricos.....	73
10.2.2.2. Desgaste de elementos.....	84
10.2.3. Automatización de las compras.....	86
10.3. Aumento de productividad.....	90
10.3.1. Colocación de elementos en la cinta transportadora.....	91
10.3.1.1. Tapones.....	91
10.3.1.2. Sujeciones.....	94
10.3.1.3. Recipientes.....	103
10.3.1.4. Relleno jabón.....	110
10.3.2. Sustitución de cajas.....	122
10.4. Control de la calidad.....	128
10.4.1. Redistribución de las celdas.....	129
10.4.2. Reúso de los productos defectuosos.....	130
10.4.3. Instalación de un caudalímetro.....	130
11. VIABILIDAD ECONÓMICA	136
12. PLANIFICACIÓN	138
13. ESTUDIO ECONÓMICO	140
14. ESTUDIO AMBIENTAL	141
15. ESTUDIO SOCIAL Y DE IGUALDAD DE GÉNERO	142
CONCLUSIONES	143
BIBLIOGRAFÍA	144

1. Glosario y Nomenclatura

CRUD: siglas referidas a “Create, Read, Update and Delete”. Todas ellas son las funciones básicas en bases de datos.

Cobot: robot colaborativo diseñado para trabajar de manera segura en entornos compartidos con humanos e incluso interactuar con ellos.

Gateway: aparato capaz de transformar protocolos de comunicación y permitir así la transmisión de datos entre diferentes dispositivos.

HTML: siglas referidas a “HyperText Markup Language”. Es un código de programación exclusivo para la creación de páginas web.

IP: siglas referidas a “Ingress Protection”. Es un parámetro que mide el grado de protección, tanto al polvo como al agua.

JSON: acrónimo de “JavaScript Object Notation”. Es un código de programación enfocado a internet y servicios web alternativo a XML.

MTTF: siglas referidas a “Mean Time To Failure” o tiempo medio hasta el fallo. Es un parámetro que estima la vida útil de los elementos.

Pick and Place: concepto que consiste en coger y soltar algo. En el mundo industrial suele realizarse con cinemáticas de barras, robots cartesianos o brazos robóticos.

PLC: siglas referidas a “Programmable Logic Controller” o controlador lógico programable. Es la máquina encargada de transformar entradas de información en salidas para gestionar y sincronizar las líneas de fabricación.

Software: conjunto de programas que permiten a un ordenador o dispositivo electrónico realizar diferentes acciones.

Stopper: mecanismo para parar o restringir el movimiento de ciertos elementos en una línea de fabricación.

XML: siglas referidas a “Extensible Markup Language”. Es un código de programación enfocado a internet y servicios web.

2. Listado de figuras

Figura 9.1. Dimensiones de los recipientes de jabón utilizados

Figura 9.2 Esquema neumático de la instalación

Figura 9.3 Esquema eléctrico de la instalación

Figura 9.4 Representación general de la línea de fabricación

Figura 9.5 Representación de la primera celda

Figura 9.6 Representación de la segunda celda

Figura 9.7 Representación de la tercera celda

Figura 9.8 Representación de la cuarta celda

Figura 9.9 Representación de la quinta celda

Figura 9.10 Representación de la sexta celda

Figura 9.11 Representación de la séptima celda

Figura 10.1 Representación de la transmisión de datos

Figura 10.2 Representación del sensor activo

Figura 10.3 Representación del sensor inactivo

Figura 10.4 Representación del sensor tipo reed

Figura 10.5 Transistor

Figura 10.6 Ventana de detección del sensor ON

Figura 10.7 Ventana de detección del sensor OFF

Figura 10.8 Ventana de detección del sensor ON

Figura 10.9 Ventana de detección del sensor OFF

Figura 10.10 Sensor SDBT-MSX

Figura 10.11 Sensor D-Y7K

Figura 10.12 Sensor MR0100

Figura 10.13 Representación de la línea neumática de una celda

Figura 10.14 Representación de la instalación de presostatos

Figura 10.15 Representación de una fuga de aire en la línea neumática

Figura 10.16 Presostato SDE5

Figura 10.17 Presostato IS10

Figura 10.18 Presostato PR03

Figura 10.19 Amperímetro MCR-SL-CUC-100-U

Figura 10.20 Amperímetro I7R213

Figura 10.21 Amperímetro 5SV8507-0KK

Figura 10.22 Sensor TF45

Figura 10.23 373-0372

Figura 10.24 Sensor TS100

Figura 10.25 Driver CMMT-AS-C4

Figura 10.26 Driver LMX32SU90M2

Figura 10.27 Driver R88D-1SN08H-ECT

Figura 10.28 Representación de la transmisión de datos

Figura 10.29 Ejemplo de un alimentador vibrador industrial circular

Figura 10.30 Representación de la distribución de las celdas

Figura 10.31 Representación de las distancias de trabajo del operario/a

Figura 10.32 Representación del cálculo de distancias

Figura 10.33 Datos requeridos por la aplicación Festo

Figura 10.34 Mensaje de error para el cálculo del robot cartesiano

Figura 10.35 Brazo robótico LR Mate

Figura 10.36 Brazo robótico YuMi IRB

Figura 10.37 Brazo robótico UR3e

Figura 10.38 Empaquetado de los recipientes del proveedor

Figura 10.39 Representación de las distancias máximas para el operario/a

Figura 10.40 Datos requeridos por la aplicación Festo

Figura 10.41 Mensaje de error para el cálculo del robot cartesiano

Figura 10.42 Brazo robótico IRB 1520ID

Figura 10.43 Brazo robótico UR20

Figura 10.44 Brazo robótico ACR Mate 120iD

Figura 10.45 Representación del flujo de jabón líquido

Figura 10.46 Diagrama de Moody

Figura 10.47 Bomba hidráulica WPJET220

Figura 10.48 Bomba hidráulica e-HMP

Figura 10.49 Bomba hidráulica CS 40-160A

Figura 10.50 Representación de los diferentes niveles de jabón en el depósito

Figura 10.51 Sensor SL1FA

Figura 10.51 MIC+130

Figura 10.52 Representación de las distancias máximas para el operario/a

Figura 10.53 Gráfico de la evolución de los lotes en función del tiempo

Figura 10.54 Brazo robótico CRX-25iA

Figura 10.55 Brazo robótico UR20

Figura 10.56 Brazo robótico HC20DTP

Figura 10.57 Configuración actual de celdas

Figura 10.58 Configuración de celdas propuesta

Figura 10.59 Caudalímetro ALGPD

Figura 10.60 Caudalímetro DFX

Figura 10.61 Caudalímetro PWM

3. Listado de tablas

Tabla 9.1 Componentes necesarios para la producción

Tabla 9.2 Análisis del consumo de aire comprimido en la instalación

Tabla 9.3 Análisis de la potencia eléctrica instalada

Tabla 9.4 Análisis de costes totales de la línea de fabricación

Tabla 10.1 Análisis de sueldos brutos anuales por tipo de trabajador/a

Tabla 10.2 Sueldos anuales medios por tipo de trabajador/a

Tabla 10.3 Sueldos horarios medios por tipo de trabajador/a

Tabla 10.4 Ejemplo de los datos obtenidos de la demanda

Tabla 10.5 Ejemplos de tipos de demandas semanales

Tabla 10.6 Análisis de costes de la aplicación

Tabla 10.7 Cálculo del número total de sensores

Tabla 10.8 Cálculo del coste económico de un fallo sin sensores

Tabla 10.9 Cálculo del coste económico de un fallo con sensores

Tabla 10.10 Coste económico de la aplicación

Tabla 10.11 Cálculo del coste económico de la aplicación

Tabla 10.12 Cálculo del coste económico de un fallo eléctrico

Tabla 10.13 Cálculo del coste económico de la aplicación

Tabla 10.14 Cálculo económico del coste de la aplicación

Tabla 10.15 Cálculo del coste económico de un fallo eléctrico

Tabla 10.16 Cálculo del número de sensores totales necesarios

Tabla 10.17 Cálculo del coste económico de la aplicación

Tabla 10.18 Cálculo del coste económico de la inversión

Tabla 10.19 Distribución de los operarios y operarias por tarea

Tabla 10.20 Coste económico que suponen todos los operarios y operarias anualmente

Tabla 10.21 Cálculo del coste económico de la aplicación

Tabla 10.22 Cálculo del coste económico de la aplicación

Tabla 10.22 Cálculo del coste económico de la aplicación

Tabla 10.23 Cálculo del coste económico de la aplicación

Tabla 10.24 Cálculo del coste económico de la aplicación

Tabla 10.25 Pérdidas totales anuales por problemas de calidad

Tabla 10.26 Ejemplo del estado de la válvula en función del caudal

Tabla 10.27 Cálculo del coste económico de la aplicación

Tabla 11.1 Estudio económico del proyecto

Tabla 12.1 Planificación del diagrama Gantt

4. Prefacio

4.1. Origen del proyecto

La Industria 4.0 es un concepto muy moderno y que está en pleno desarrollo. Su implementación en la industria actual está siendo muy progresiva y lenta. Cada vez surgen nuevos avances en el campo teórico y práctico, pero pocos de ellos se ven implementados en las líneas de fabricación.

A causa de ello, el origen del proyecto se ve motivado por la carencia de aplicaciones reales de la Industria 4.0 en las fábricas. Hay muy poca información relacionada con ello y, por lo tanto, se ve la necesidad de elaborar un estudio con ejemplos que sean lo más parecidos a la realidad posible, para mostrar cómo aplicar algunos de los conceptos en las líneas de fabricación, así como ver si realmente es económicamente beneficioso.

4.2. Motivación

La motivación para la realización de este proyecto surge a raíz de la actividad laboral que estoy desempeñando actualmente. Gracias a trabajar en una compañía de automatización industrial como Festo, puedo ver ejemplos de primera mano de líneas de fabricación y, consecuentemente, detectar posibles mejoras y cambios para optimizarlas. Debido a estar en contacto con estos sectores en el día a día, veo la falta de digitalización y automatización. Todo ello, es lo que me motiva a realizar este proyecto, para extraer nuevas conclusiones.

5. Introducción

5.1. Objetivos del proyecto

Con este proyecto se pretende realizar el estudio de una línea de fabricación adaptada a la Industria 3.0 para, posteriormente, a través de la tecnología actual, aplicar los cambios necesarios y transformarla a la Industria 4.0.

Por ello, el objetivo de este trabajo es analizar la viabilidad económica y productiva de la transformación de una cadena de valor a la Industria 4.0. En otras palabras, estudiar la rentabilidad del proyecto para analizar si realmente esta nueva revolución industrial supone una reducción de costes y aumento de la producción para la industria actual.

Debido a que la Industria 4.0 la conforman muchas herramientas, se seleccionarán unas pocas para poder profundizar y elaborar un documento más concreto sobre ellas.

5.2. Alcance del proyecto

El alcance de este proyecto se limita al estudio y al análisis de una línea de fabricación para, posteriormente, implementar de manera práctica los componentes que permitan su transformación a la Industria 4.0. Con ello, se realizará un análisis de la rentabilidad económica y productiva del proyecto. Finalmente, se compararán ambas líneas.

Por lo tanto, el proyecto se enfoca a la aplicación de algunas de las tecnologías de la Industria 4.0 en un ámbito práctico y teórico.

6. Estado del arte

En este apartado se muestra un resumen de la investigación realizada, previa al desarrollo del proyecto, acerca de la Industria 4.0 y sus aplicaciones. Con ello, se pretende situar el estado y desarrollo del tema del proyecto.

El término “Industria 4.0” fue introducido por primera vez en la feria de Hannover (Alemania) [1] en 1999, pero no fue hasta el 2011 cuando, gracias a la publicación “Informe de la Industria 4.0”, desarrollada también en Alemania por un grupo de ingenieros expertos liderados por Henning Kagermann, se empezó a tratar el concepto. El informe, con el objetivo de mantener la competitividad de la industria alemana, propone el desarrollo de fábricas inteligentes con componentes conectados que son capaces de colaborar entre ellos.

En 2015, la Unión Europea decidió lanzarse a la transformación digital de sus países y, a partir de esa fecha, el mundo empezó a trabajar en ello: estandarizaciones ISO, la cumbre de China, etc.

El estado actual de la Industria 4.0 estudia principios como la automatización, la digitalización, la personalización, la ciberseguridad, etc. Todos ellos están en pleno desarrollo, ya que cada breve periodo de tiempo, se obtienen nuevos avances que facilitan o mejoran la implementación de la Industria 4.0.

En términos de aplicaciones reales, la industria actual (sobre todo la pequeña y mediana) aún es reacia a este concepto. Esto es debido, en su mayor parte, a la gran inversión económica que supone la transformación de los procesos productivos de los que disponen. Este factor es un limitante muy importante de la Industria 4.0 y excluye, de manera fulminante, a gran cantidad de empresas en sus aplicaciones.

Teniendo en cuenta toda esta información recopilada, se llega a la conclusión de que la Industria 4.0 es un concepto relativamente joven y en vía de expansión. Toda la documentación elaborada está enfocada en el marco teórico, donde las herramientas son poco específicas y nadie se ha encargado de llevarlo a la práctica, es decir, a la implementación en una fábrica operativa.

7. Introducción teórica

La industria y la manera de fabricar ha ido cambiando a lo largo de los años. Las revoluciones industriales han marcado un antes y un después no solo en la fabricación, sino en la sociedad y la economía.

Antes del siglo XVIII, la población mundial se dedicaba, mayoritariamente, a las labores del campo. Todas las tareas se realizaban de manera manual, con la ayuda de animales o mediante el uso de herramientas simples. La economía estaba basada, principalmente, en mantener los cultivos e intentar generar nuevos. Por lo tanto, la producción estaba limitada a las personas.

7.1. Primera revolución industrial

Gran Bretaña, a mediados del siglo XVIII, revolucionó la economía y la vida de las personas a nivel mundial [2].

Este país, gracias al grado de humedad ambiental, es muy propenso a la cría de ovejas. Por ello, el negocio textil (principalmente lana) era, en su tiempo, el que lideraba el mercado inglés. Gracias a la invención de diferentes máquinas como la hiladora o el telar mecánico, todo el proceso del tejido se logró mecanizar, simplificándolo y, por lo tanto, reduciendo el tiempo y el coste de fabricación. Al mismo tiempo que se fabricaba un producto de manera manual, se conseguían fabricar ocho de manera mecanizada.

Con ello, empezaron a surgir grandes fábricas textiles que permitían producir un gran número de unidades extendiéndose así por el territorio nacional.

A finales del siglo XVIII apareció el primer motor de vapor con carbón. Esto permitió automatizar ciertas máquinas, evitando así el uso del esfuerzo humano de forma parcial. Gracias a ello, la invención del tren y el barco a vapor revolucionó también el transporte, tanto de personas como de materiales. Con eso se consiguió, entre otras cosas, exportar productos locales hacia otros territorios.

Todos estos avances generaron lo que se conoce como la revolución industrial o la primera revolución industrial. Aunque Gran Bretaña trató de mantener el secreto de la fabricación de sus máquinas y nuevas formas de mecanizado, Europa consiguió contagiarse de todo ello. Finalmente, la corriente llegó hasta Estados Unidos.

7.2. Segunda revolución industrial

Conocida también como la revolución tecnológica, comprende el periodo entre finales del siglo XIX y la primera guerra mundial [3].

Esta revolución industrial se ve liderada por la producción masiva de energía eléctrica. Se deja de lado la producción de vapor con carbón para electrificar las máquinas de fabricación. Además, en 1879, Thomas Alva Edison inventó la bombilla eléctrica.

Mediante la energía eléctrica se consiguió aumentar la eficiencia en la fabricación, así como reducir sus costes, aumentando el tamaño de las fábricas y aumentando la producción.

Por otro lado, la fabricación de hierro ayudó a generar estructuras y elementos mucho más resistentes y duraderos que los anteriores. La fabricación de plástico, por su parte, permitió reducir los costes de ciertos productos de manera drástica.

La invención del motor de combustión interna con gasolina permitió la fabricación de los primeros automóviles y aviones, revolucionando así el transporte tal y como se conocía. Así se reducía el tiempo y el consumo de combustible.

La invención del teléfono y la radio facilitó en gran medida la comunicación con las personas.

7.3. Tercera revolución industrial

A mediados del siglo XX se desata la llamada “Sociedad de la información” [4]. Esta nueva revolución industrial asienta sus bases sobre la informática (internet) y las energías renovables, ya que se ve impulsada por el rechazo al uso de combustibles fósiles dañinos para el medio ambiente (por producción de partículas contaminantes).

Gracias a los avances tecnológicos desarrollados durante la época, se explota el uso de la energía eólica, solar e hidráulica, además de procesos para el almacenaje de esta energía mediante baterías eléctricas [5]. Por otra parte, se busca la optimización de procesos industriales mediante la transmisión de información de las máquinas con un programa generalmente centralizado.

También se realiza un desarrollo en el transporte, sustituyendo vehículos de combustión por eléctricos o híbridos.

Todo ello genera una corriente ecologista que presiona a los diferentes gobiernos centrales a actuar contra la contaminación y la destrucción del medio ambiente.

8. Cuarta revolución industrial

También conocida como la Industria 4.0, es la revolución industrial que se está llevando a cabo en esta época. Esta revolución está definida, principalmente, por la conectividad, ya que todos los elementos de las líneas de fabricación son capaces de establecer una comunicación entre ellos para configurarse de una determinada manera y colaborar entre sí. Con ello, la Industria 4.0 realiza un enlace entre el mundo físico y el virtual (internet).

8.1. Pilares

Los 9 principales pilares de la Industria 4.0 son los siguientes [6]:

Internet of Things (IoT)

Este concepto consiste en conectar los elementos integrantes de una línea de fabricación al mundo virtual, es decir, a internet. Esto se realiza mediante la implementación de sensores que miden todos los parámetros necesarios para conocer el estado de los elementos.

Con esto, se consigue obtener datos que pueden ser útiles para la optimización de la fabricación como, por ejemplo, el mantenimiento predictivo.

Inteligencia Artificial (IA) y Big Data

Gracias a la aplicación de sensores mediante el Internet of Things, se consigue recopilar una gran cantidad de datos de las máquinas en un tiempo muy reducido. Debido a que la computación actual no es capaz de procesarlos todos, surge este nuevo concepto, el Big data, con el que se consigue extraer la información necesaria para estudiar los elementos y optimizar la fabricación en tiempo real.

Por otro lado, con la información obtenida, se pueden predecir datos sobre el comportamiento de los elementos y favorecer a su mejora en tiempo real. De nuevo, esto permite optimizar la fabricación y aumentar el rendimiento.

Simulación o gemelos virtuales

Este concepto revoluciona la industria gracias a la digitalización de las líneas de fabricación. Esto consiste en la simulación virtual de todos los elementos integrantes obteniendo un modelo con el mismo comportamiento que en el mundo físico: máquinas, personas, materiales, etc.

A la hora de realizar un cambio en la línea de fabricación, por ejemplo, esta tecnología

permite evitar pruebas de funcionalidad en la misma, sustituyéndolo por el mundo virtual ahorrando costes en prototipos, paradas de máquina, etc.

Ciberseguridad

Con el aumento del uso de herramientas virtuales, como el caso de internet, la ciberseguridad debe estar muy presente en esta nueva revolución industrial.

Toda la cantidad de datos que se generan y se tratan son altamente vulnerables a malversaciones del exterior y, por lo tanto, esta herramienta es indispensable para compaginar e integrar toda la nueva tecnología.

Robótica autónoma

Con la Industria 4.0, se pretende automatizar los robots industriales, permitiendo así la conectividad y comunicación entre ellos. Además, se potencia la cooperación con los seres humanos (*cobots*), pudiendo trabajar en un mismo entorno e incluso facilitando tareas.

Integración de sistemas

El proveedor, el fabricante y el cliente final están conectados, de manera que se facilita la automatización en toda la cadena de valor de un producto. Todo esto permite mejorar la productividad y eficacia del proceso reduciendo, en un final, los costes.

Realidad aumentada

De la misma manera que en la elaboración de gemelos virtuales, la realidad aumentada consigue fusionar el mundo físico con el virtual. Gracias a esta tecnología, las operaciones de trabajo o simulaciones de productos se pueden elaborar de manera virtual previamente a su aplicación en el mundo físico.

Además, esta herramienta permite realizar tareas físicas de manera remota, sin necesidad de asistir al mismo lugar de trabajo.

Fabricación aditiva

Este tipo de fabricación, ya usada actualmente para la producción de prototipos o pequeñas muestras de producto, pasa a tener importancia al enfocarse a la elaboración de productos finales.

El uso de impresoras de tres dimensiones toma protagonismo, debido a su rapidez y versatilidad a la hora de elaborar un nuevo producto.

Computación en la nube

El *cloud* o la nube tiene un papel muy importante en la Industria 4.0. Debido a la alta interconectividad de los equipos y sus respuestas en tiempo real, este espacio debe de estar cada vez más optimizado para mejorar el tiempo de respuesta y almacenamiento, entre otras cosas.

8.2. Beneficios

Esta revolución tiene los siguientes beneficios:

Fabricación ajustada al consumo

Gracias a la masiva obtención de datos de todo tipo, se conoce la demanda exacta de producto por parte de los clientes y, por lo tanto, se fija una planificación en la producción. Con ello, se evita una sobreproducción con artículos en *stock* y, por otra parte, también se evita una falta de fabricación que no satisface la demanda.

Reducción del uso de energía eléctrica

Gracias a los datos que se obtienen al aplicar sensores en todas las máquinas, se puede analizar el uso de energía eléctrica de cada una. Así se puede interrumpir su actividad si no se está realizando ninguna tarea e iniciarla cuando sea necesario.

Además, la invención de nuevas tecnologías permite el desarrollo de elementos con una demanda de energía eléctrica cada vez más reducida.

Descentralización

Como todas las máquinas y componentes de la fábrica están interconectados entre sí y, a la vez, a internet, la gestión y la supervisión de estos no implica estar físicamente en el lugar. Con ello se consigue el control desde cualquier lugar sin necesidad de desplazamiento por parte de los empleados.

Mantenimiento predictivo

Gracias al control continuo del estado de todos los elementos integrantes de la fábrica, se pueden analizar los datos obtenidos para la gestión del mantenimiento. Con ellos, se puede llegar a predecir la avería de un elemento, solucionándola antes de tiempo para evitar, por ejemplo, un paro de la fabricación.

Como se puede observar, todas las ventajas, al igual que en las revoluciones industriales anteriores, tienen como objetivo el incremento de la productividad y la eficiencia, logrando así una reducción de costes en la producción. Todo esto implica, por tanto, un aumento del beneficio económico para las empresas.

8.3. Limitaciones

En este apartado se pretende exponer algunas de las limitaciones más importantes de la Industria 4.0 y su implementación, ya que, pese a que es un gran avance tecnológico y social, mucha parte de la industria se ve restringida en su uso por diferentes motivos:

Económica

Como se ha comentado anteriormente, el objetivo del proyecto es evaluar la rentabilidad económica de la Industria 4.0 cuando se ve aplicada en una línea de fabricación real.

Pese a que la implementación de las nuevas tecnologías puede ser viable y beneficiosa, no hay duda de que se debe realizar una gran inversión inicial para ello.

Este es un factor limitante para una gran parte de la industria, en especial la pequeña y mediana, ya que no permite adentrarse en la industria 4.0 y eso puede provocar la pérdida de mercado frente a otras fábricas más avanzadas.

Intelectual

Para que la implementación de la Industria 4.0 se lleve a cabo de manera satisfactoria en una línea de producción, así como su mantenimiento posterior, se requiere de personal técnico muy cualificado. Los empleados deben tener conocimientos de todas las tecnologías implementadas, pero al ser estas tan novedosas, puede ser complicado la contratación de dicho personal.

Seguridad

El principal peligro de mantener los elementos integrantes de una fábrica interconectados entre sí es la seguridad o, más concretamente, la ciberseguridad. La conexión a la red de componentes industriales los expone a un mayor riesgo de ciberataques y, por lo tanto, la información sensible o confidencial debe tratarse de mejor manera para evitar su exposición.

Social

La automatización de fábricas mediante robots o máquinas autónomas va a producir una disminución de los puestos de trabajo rutinarios. El debate social acerca de este problema cada vez genera más conflicto con aquellas personas que van a ser sustituidas por autómatas.

9. Línea de fabricación

Para este proyecto se ha decidido seleccionar una línea de fabricación que integra todos los elementos mecánicos de la marca Festo. Como se ha comentado en el apartado de la motivación, el trabajar actualmente en esta empresa es lo que me ha empujado a desarrollar este trabajo y, por lo tanto, se ha decidido usar elementos de esta marca.

Esta línea [7] desarrolla el proceso de embotellado y empaquetado de recipientes de jabón, obteniendo así un producto acabado y comercializable a nivel de usuario.

La producción está dividida en 7 celdas y consta de dos tipos distintos de recipientes y tapones, aunque el contenido que se deposita en el interior y su volumen (400 ml) es el mismo.

Cada recipiente tiene un peso aproximado de 0,1 kg y las medidas y forma de cada uno de estos son las siguientes:

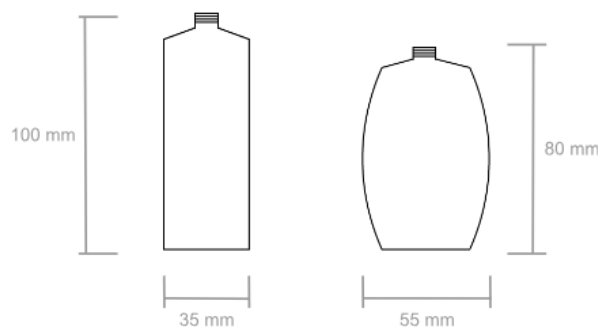


Fig. 9.1. Dimensiones de los recipientes de jabón utilizados [7]

La línea fabrica lotes de recipientes por cajas. Cada una debe contener 8 jabones de un solo tipo.

La empresa trabaja 270 días al año, a dos turnos de 8 horas por día, y es capaz de producir, sin tener en cuenta los recipientes defectuosos, 300 cajas de jabón (150 de cada tipo) cada hora. Por lo tanto, se calcula que la producción ideal se sitúa en 4.800 cajas al día y 1.296.000 al año.

Pero, tal y como sucede en todas las líneas de fabricación, la producción no es perfecta y, por lo tanto, hay algunos recipientes que son desechados por culpa de no contener la cantidad adecuada de jabón en el interior. Para ser exactos, 1 de cada 14 recipientes son

defectuosos, es decir, el 7% de la producción. Por lo tanto, teniendo en cuenta este dato, la producción real de cajas de jabones se sitúa en 4.460 al día y 1.205.000 al año, aproximadamente.

Las celdas de trabajo que integran la línea de fabricación están compuestas por dos partes: la superior, que incluye todos los actuadores, donde se realizan los movimientos y manipulaciones a los productos; y la inferior, donde se colocan todos los elementos de control y distribución para gestionar el uso de los actuadores.

Las tecnologías usadas en esta fábrica son las siguientes:

Neumática

La neumática es una tecnología que consiste en el movimiento de elementos mecánicos mediante aire comprimido.

Esta tecnología utiliza compresores de aire, unidades de mantenimiento para su tratamiento (eliminación de agua, aceite e impurezas), válvulas para el direccionamiento y actuadores para efectuar un movimiento concreto.

Las características de esta tecnología son, principalmente, la seguridad, el bajo coste y la alta eficiencia. Se utiliza para movimientos o acciones que no requieren grandes fuerzas de compresión y son constantes o repetitivas. No es recomendable, debido a la complejidad que eso implica, su uso para movimientos posicionados o que requieran de gran precisión.

Es de los métodos de automatización más antiguos y que, a día de hoy, sigue muy presente en el mercado y en las industrias.

La fábrica que se trata en este trabajo dispone de un compresor capaz de generar aire comprimido a 8 bar de presión, suficiente para abastecer a todos los elementos. Este aire, antes de su distribución por toda la línea, se ajusta a la presión de uso (6 bar) y es tratado en una unidad de mantenimiento que elimina una parte de agua y aceite. Además, lo filtra hasta 40 μm , eliminando grandes partículas sólidas que podrían interferir en el uso de las válvulas o los actuadores, entre otras cosas. También dispone de una llave de corte general que, en caso de problema o avería, permite bloquear el paso de aire e interrumpir toda la fabricación neumática.

Posteriormente, se coloca una derivación para abastecer a aquellas celdas que lo necesiten y se sitúa otra unidad de mantenimiento en cada una de ellas que filtra el aire a 5 μm y permite, con una llave de corte local, interrumpir únicamente el aire de la celda.

Cada celda dispone de electroválvulas que direccionan el aire hacia diferentes actuadores

neumáticos que realizan una tarea en concreto.

El esquema neumático de la instalación es el siguiente:

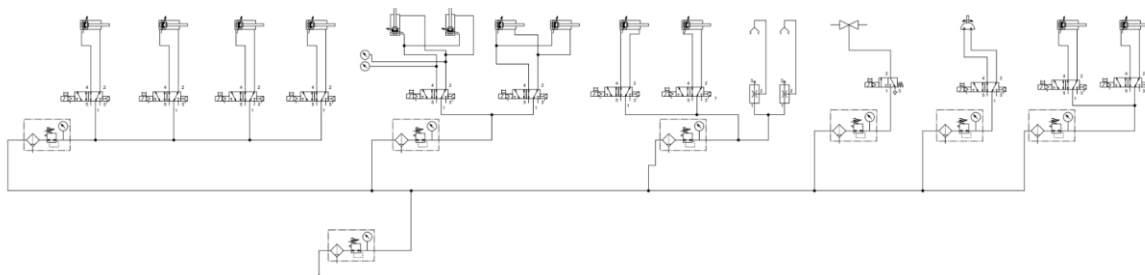


Fig. 9.2. Esquema neumático de la instalación

Es conocido que, debido a los desgastes internos de los elementos mecánicos y los desgastes superficiales, los actuadores neumáticos fallan 1 vez cada 20 días aproximadamente. Por lo tanto, la línea neumática tiene la siguiente tasa de fallo:

$$\lambda_{\text{Actuadores neumáticos}} = 0,00312 \text{ fallos/hora} \quad (\text{Ec. 9.1})$$

Electrónica

Por otra parte, la tecnología eléctrica o electrónica consiste en el movimiento de elementos mecánicos mediante electricidad.

Por lo general, su uso se compone de motores eléctricos (paso a paso o servomotores), controladoras y actuadores eléctricos (de husillo o correa dentada).

Esta tecnología es más compleja que la neumática, pero permite realizar, aparte de lo mismo que la neumática, posicionamientos muy exactos y más fuerza de compresión.

Anteriormente, todos los movimientos eléctricos requerían de elementos muy costosos y, por lo tanto, era una tecnología muy poco usada. Actualmente, el precio de estos componentes está disminuyendo considerablemente, ya que se dispone de los medios necesarios para abaratarlos. Esto está produciendo una transición (lenta) de las líneas de fabricación neumática a las eléctricas. Además, el coste de generar aire comprimido es mayor que el uso de energía eléctrica.

Algunas de las celdas de la línea de fabricación que se está tomando de ejemplo en este proyecto integran movimientos con actuadores eléctricos. Tal y como se ha explicado, todos

ellos son más precisos o requieren de posicionamientos exactos.

Además, esta tecnología también incluye todos aquellos elementos de control programado encargados de gestionar los movimientos eléctricos de estos actuadores. El componente más importante de las líneas de fabricación automatizadas es el PLC.

El PLC es un dispositivo electrónico programable capaz de transformar unas entradas de información en salidas para generar, en este caso, movimientos coordinados entre actuadores. Mediante una programación específica realizada sobre el mismo elemento, se analizan unas entradas de información analógicas o digitales y se realizan ciertas acciones en forma de salidas eléctricas. La información entrante y saliente se puede enviar mediante dos tecnologías: el punto a punto, que consiste en conectar cada elemento individualmente mediante un cable al PLC; y el cable bus, que unifica todas las conexiones de los elementos mediante un único cable.

Cuando se dispone de una línea de fabricación compleja, pueden instalarse más de un PLC. En estos casos, se suele disponer de uno encargado de toda la fabricación (el maestro) que gestiona otros (los esclavos), enfocados a realizar tareas más específicas como, por ejemplo, los movimientos de una sola celda. Con esto, se consigue rebajar la carga de trabajo del PLC maestro, además de agilizar las programaciones. Además, en las etapas del diseño de la maquinaria, permite descentralizar las celdas y sus movimientos de manera individualizada.

En el caso de la línea de producción escogida como ejemplo, se dispone de un PLC maestro que controla 3 PLC esclavos conectados mediante cable bus. Todos ellos se encargan de realizar, tal y como se ha explicado anteriormente, la coordinación de todos los elementos de la línea de fabricación para producir recipientes de jabón.

El esquema eléctrico de la línea de fabricación es el siguiente:

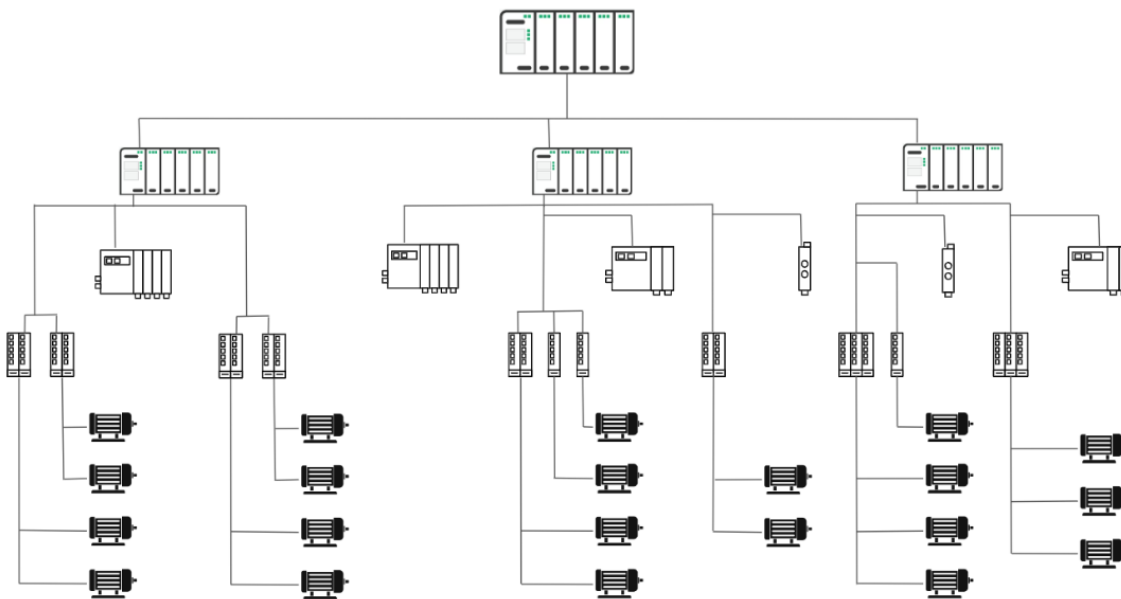


Fig. 9.3. Esquema eléctrico de la instalación

Para este caso, también es conocido que, debido a los desgastes internos de los elementos mecánicos y los desgastes superficiales, los actuadores eléctricos fallan 1 vez cada 20 días aproximadamente. Por lo tanto, tienen la siguiente tasa de fallo:

$$\lambda_{\text{Actuadores eléctricos}} = 0,00312 \text{ fallos/hora} \quad (\text{Ec. 9.2})$$

Por otra parte, los motores eléctricos también están expuestos a fallos mecánicos y eléctricos como sobretensiones. En este caso, estos elementos fallan 1 vez cada 40 días aproximadamente. Su tasa de fallo es la siguiente:

$$\lambda_{\text{Motores eléctricos}} = 0,00156 \text{ fallos/hora} \quad (\text{Ec. 9.3})$$

La línea de fabricación, tal y como se ha comentado, dispone de 7 celdas de producción. Cada una de ellas realiza una tarea en concreto sobre el producto. Su distribución es la siguiente:

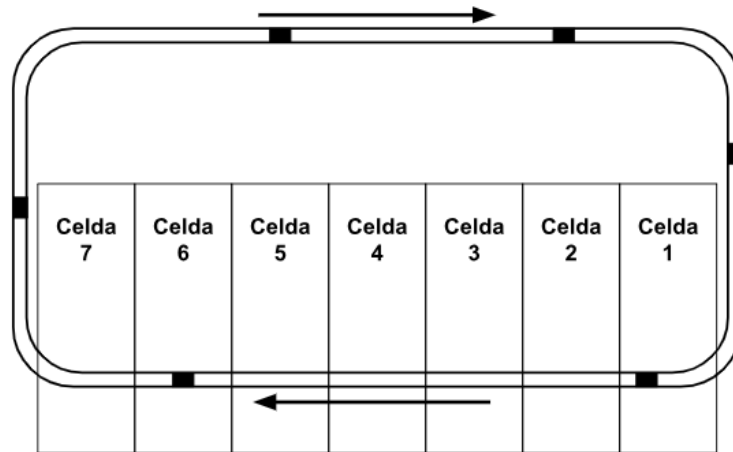


Fig. 9.4. Representación general de la línea de fabricación [7]

Como se puede observar en el dibujo, las celdas de fabricación están juntas y realizan tareas consecutivas. Para actuar sobre los productos secundarios o el producto final, se dispone de una cinta transportadora, por la cual se desplazan unos transportines encargados de transportar los productos entre las celdas.

Cuando el recipiente ya está totalmente elaborado, es decir, finaliza la celda número 7, el transportín vuelve a la primera celda para repetir el proceso.

A continuación, se procede a detallar el proceso y los elementos constituyentes de cada una de las celdas:

9.1. Celda 1



Fig. 9.5 Representación de la primera celda [7]

La primera celda consiste en la colocación de las diferentes sujeciones en cada uno de los transportines ya mencionados. En la imagen se distinguen dos tipos de sujeciones: unas de color negro y otras de color gris. Cada una corresponde a un tipo concreto de producto.

La configuración actual de la fabricación desarrolla los productos en grupos de 5 unidades y, por lo tanto, se van alternando los tipos de transportines cada 5 consecuciones.

Estas sujeciones son colocadas en la cinta transportadora de manera manual, es decir, mediante un operario u operaria. Cada cinta contiene las de un color y, cuando llegan al final, el actuador eléctrico se encarga de montarlas en orden sobre los transportines. La velocidad de la cinta está sincronizada con el movimiento del actuador, permitiendo así pararse cuando sea necesario.

Para evitar que los transportines circulen sin control por la unidad transportadora, se bloquean con un actuador neumático. Este movimiento está sincronizado con la cinemática de barras para liberar los transportines en el momento adecuado.

El tiempo de ciclo de esta estación, desde que se desbloquea un transportín vacío hasta que sale con la sujeción, es de 2,5 segundos.

Los elementos mecánicos integrados en esta primera celda son los siguientes:

- *Pick and place*

Es una cinemática de barras eléctrica encargada de coger y colocar las sujeciones en los

transportines. Está compuesto por 3 actuadores eléctricos con un servomotor cada uno que permite el movimiento en los 3 ejes principales (x, y, z).

Cada servomotor está controlado por un regulador o *driver* y, todo el conjunto, por un único PLC que manda las señales adecuadas en cada momento para realizar la actividad de manera correcta.

- Pinzas

El *pick and place* mencionado anteriormente monta unas pinzas neumáticas, que son las encargadas de coger y soltar las sujeciones en sus respectivos transportines. Tal y como se puede observar en el vídeo referenciado [7], las garras de la pinza agarran las sujeciones por el interior, haciendo la fuerza en la apertura. Estas no disponen de ningún tipo de sensor que determine la posición de los dedos.

- *Stopper* transportines

Es el elemento encargado de frenar y sujetar los transportines antes de que estos entren en la cadena de fabricación es un cilindro neumático guiado de doble efecto. Al activarse, presiona el transportín contra una sujeción para evitar que entre en la cadena de fabricación.

9.2. Celda 2



Fig. 9.6 Representación de la segunda celda [7]

La segunda celda es la encargada de colocar los diferentes tipos de recipientes en sus respectivas sujeciones. Concretamente, los recipientes azules van montados en las de color gris y los recipientes blancos, en las de color negro.

Tal y como se ha comentado en el apartado anterior, se colocan los recipientes en grupos de 5 unidades y, hasta que no está listo todo el lote, los transportines no avanzan.

En este caso, los recipientes vacíos son colocados manualmente en una única cinta transportadora, independientemente de su color y forma. Además, la cinta se mueve con una velocidad constante que no depende del movimiento de la cinemática de barras. Por ello, los recipientes, si no han sido seleccionados, caen cuando llegan al final. Estos se recogen y se reintroducen en la cinta posteriormente.

El tiempo de ciclo de esta celda (por lote), desde que entran los 5 transportines hasta que salen con el recipiente, es de 3,5 segundos

Los elementos que integran esta segunda celda son los siguientes:

- *Pick and place*

Al igual que en la celda anterior, esta está compuesta por un *pick and place* encargado de coger y colocar las botellas en sus respectivas sujeciones. En este caso, el elemento es exactamente el mismo que en la anterior, es decir, una cinemática de barras eléctrica.

- Actuador giratorio

En este caso, el *pick and place* integra un actuador giratorio eléctrico que permite el movimiento de las ventosas que sujetan los recipientes.

9.3. Celda 3

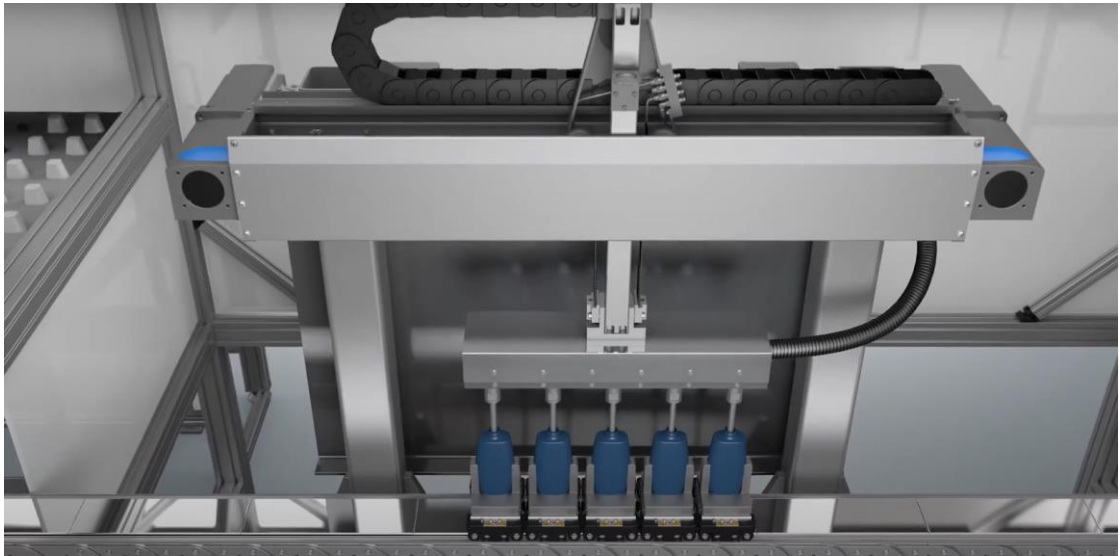


Fig. 9.7 Representación de la tercera celda [7]

En esta celda se realiza el llenado de los recipientes con jabón. Como se ha comentado al principio, ambos tipos de recipientes se rellenan con el mismo tipo de producto. Esta operación se realiza en lotes de 5 unidades.

Los movimientos de todos los elementos mecánicos de la celda están sincronizados para realizar el llenado de los recipientes en movimiento.

El jabón está almacenado en altura en un recipiente de 1.000 litros de capacidad que se rellena continuamente de manera manual (por un operario u operaria). Este fluye de manera regulada por una válvula de proceso hacia las pipetas de inyección.

El tiempo de ciclo, desde que entra el lote con los recipientes vacíos hasta que sale con los recipientes llenos, es de 6 segundos.

Los elementos que integran esta segunda celda son los siguientes:

- Actuador horizontal

Este actuador eléctrico permite el movimiento del grupo de 5 pipetas que introducen el jabón en los recipientes. Como se ha comentado, es un elemento clave para realizar esta acción en movimiento.

- Válvula de proceso

Para controlar el jabón que circula por las pipetas se requiere de una válvula servopilotada encargada de regularlo y aplicarlo en el momento exacto.

9.4. Celda 4

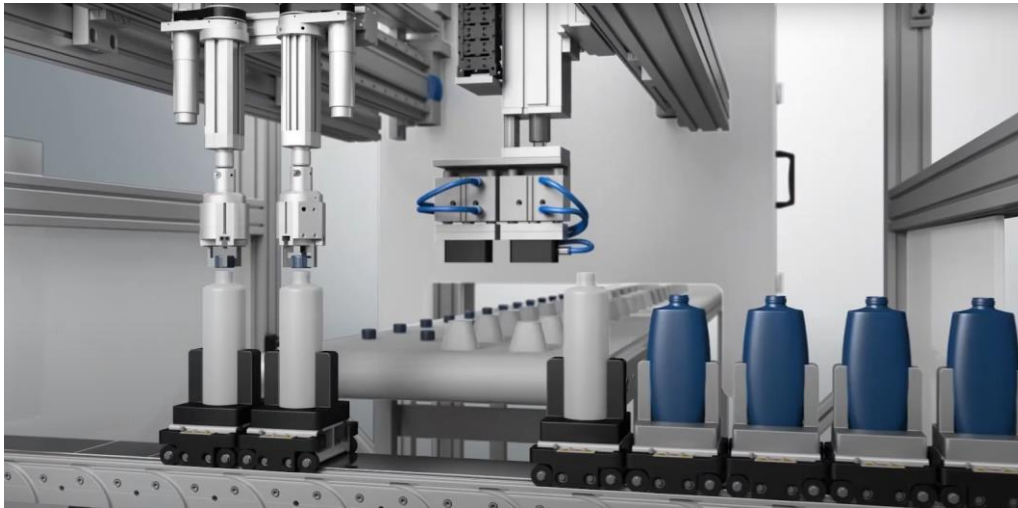


Fig. 9.8 Representación de la cuarta celda [7]

La cuarta estación de la línea de fabricación consiste en la colocación de los diferentes tapones en los recipientes. Cada botella (la azul y la gris) tienen su respectivo tapón y manera de colocarlo. La botella gris está formada por un tapón cilíndrico que debe roscarse. En cambio, la botella azul, tiene un tapón de forma cónica que se introduce a presión.

La celda dispone de una cinta transportadora por la que se mueven los diferentes tapones. Estos están colocados de una manera concreta por un operario u operaria para facilitar la tarea de los elementos mecánicos. La cinta se mueve a una velocidad constante, que produce la caída de tapones cuando llegan a su fin y no son seleccionados. Aun así, se recogen y se reintroducen en la cadena más tarde.

La introducción de los tapones en los recipientes se realiza en lotes de 2 y mediante una combinación de actuadores neumáticos y eléctricos.

El tiempo de ciclo de la estación, desde que se sitúan dos recipientes hasta que salen con los tapones, es de 2,5 segundos.

Los elementos que integran esta segunda celda son los siguientes:

- Actuadores horizontales y verticales

Son los encargados de permitir el movimiento horizontal y vertical de los grupos que introducen los tapones.

- Actuadores neumáticos de vacío

Son los que introducen los tapones cónicos en los recipientes azules. Los cogen mediante vacío y los colocan a presión.

- Actuadores de roscado

Son los que introducen los tapones cilíndricos en los recipientes blancos. Disponen de unas pinzas rotativas que permiten enroscar los tapones.

9.5. Celda 5



Fig. 9.9 Representación de la quinta celda [7]

La quinta celda representa el apartado de calidad del producto. Se calcula el peso de los recipientes para así conocer la cantidad de jabón que se ha introducido. Para dar por correcto un recipiente debe de contener 400 ml de jabón. Si ese valor está por encima o por debajo, el producto será considerado defectuoso y, por lo tanto, descartado.

Esta medición se realiza simultáneamente en lotes de 2 recipientes.

El tiempo de ciclo para el lote, desde que entra en la estación hasta que sale, es de 3 segundos.

Los elementos que integran esta segunda celda son los siguientes:

- Actuadores verticales

Son los encargados de elevar los recipientes. Al ser neumáticos, tienen un sensor de presión que permite calcular el peso de los productos con el diferencial de presión.

- Pinzas

Encargadas de coger y soltar los recipientes.

- Visualización

Pantalla de visualización del peso de los productos.

9.6. Celda 6



Fig. 9.10 Representación de la sexta celda [7]

La sexta celda contiene los elementos necesarios para el etiquetado de los envases. Al tener unos recipientes con diferente forma, se requiere de dos etiquetadoras diferentes para este proceso: la primera para los botes grises y la segunda para los azules.

Si alguno de los envases no cumple con el volumen requerido y calculado en la celda anterior, no se etiqueta.

El tiempo de ciclo, desde que entra un envase hasta que sale de la estación con la etiqueta, es de 1 segundo.

Los elementos que integran esta segunda celda son los siguientes

- Etiquetadoras eléctricas

Son ajustables al tamaño del recipiente evitando así etiquetar el indebido.

9.7. Celda 7

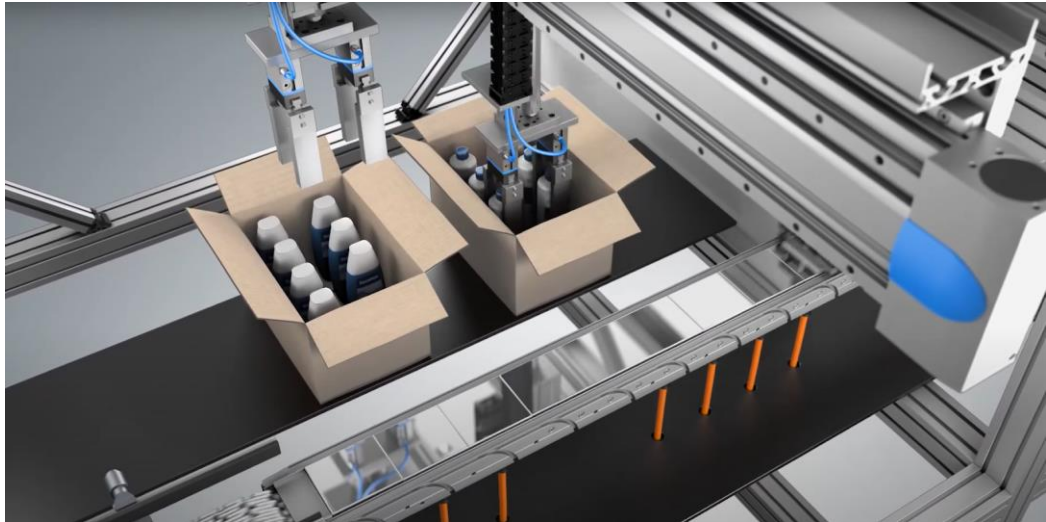


Fig. 9.11 Representación de la séptima celda [7]

La última estación de esta línea de fabricación consiste en el empaquetado de los recipientes. Cada tipo de envase se coloca en una caja de cartón diferente hasta lograr acumular 8 iguales. Cuando eso se consigue, se da por completado el lote y se realiza el siguiente.

Las cajas son introducidas de manera manual en los soportes por un operario u operaria. Cuando se completa un lote, se retira y se coloca una caja vacía en la misma posición.

En este punto, si algún recipiente no contiene la cantidad de jabón suficiente (400 ml), se desecha y no se incluye en el paquete.

El tiempo de ciclo, desde que se coge el jabón hasta que se coloca en la caja, es de 3 segundos.

Los elementos que integran esta segunda celda son los siguientes:

- Pórtico de 2 ejes

La celda está compuesta por dos pórticos de 2 ejes cada uno. Estos permiten el movimiento

vertical y horizontal de las pinzas a través de toda la estación.

- Pinzas

Cada pórtico monta 2 pinzas neumáticas encargadas de coger y soltar los jabones de la línea.

La empresa distribuye los lotes de jabones a un precio de 16 €, es decir, la unidad se vende a 1,20 €.

Todos los elementos que constituyen el recipiente con jabón son comprados a empresas externas. El jabón líquido lo adquieren a un precio de 2 € el litro, el recipiente de plástico a 0,10 € la unidad, el tapón a 0,02 € la unidad y las etiquetas a 0,01 € cada par. Por otra parte, para realizar los lotes de 8 productos, compran cajas de cartón a un precio de 0,30 € la unidad.

Pese a que la empresa adquiere todos estos artículos en grandes cantidades, se ha especificado el precio por unidad para clarificar los gastos que se indicarán más abajo.

Tipo	Coste unitario
Recipiente	0,10 €/unidad
Tapón	0,02 €/unidad
Etiquetas	0,01 €/unidad
Caja de cartón	0,30 €/unidad
Jabón	2,00 €/litro

Tabla 9.1 Componentes necesarios para la producción

Aparte de los gastos de material, también se deben tener en cuenta los gastos de suministro eléctrico y de aire comprimido, así como el coste de los operarios y operarias que trabajan en la línea.

A continuación, se especifica el consumo de aire aproximado para la línea de fabricación teniendo en cuenta los elementos que la integran, su volumen y los ciclos que realizan:

Celda	Actuador	Unidades	Volumen [m ³]	Ciclos [ciclos/s]	Consumo anual [m ³ /año]
1	Stopper	1	3,14 e-6	4	200
1	Pinzas	1	3,14 e-6	1	50
4	Generador de vacío	2	1 e-6	1	30
5	Pinzas	2	3,14 e-6	2	200
5	Actuador vertical	2	125,66 e-6	1	3.900
7	Pinzas	4	6,28 e-6	0,5	200
Total					4.580

Tabla_9.2_ Análisis del consumo de aire comprimido en la instalación [8]

Para generar toda esta cantidad de aire comprimido, se requiere de un compresor adecuado para ello. Tal y como se ha comentado anteriormente, la línea recibe el aire a una presión de 8 bar inicialmente. Además, teniendo en cuenta que el consumo de aire calculado es de, aproximadamente, 4.580 m³/año y que la empresa trabaja 16 horas al día durante 270 días al año, se obtiene que el caudal necesario es de 1,06 m³/h o 0,02 m³/min. Con estos datos, se puede calcular la potencia necesaria del compresor de la siguiente manera:

$$P = 8 \text{ bar} \quad (\text{Ec. 9.4})$$

$$Q = 0,02 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \quad (\text{Ec. 9.5})$$

$$\eta = 0,7 \quad (\text{Ec. 9.6})$$

$$Pot = \frac{Q \cdot P}{\eta} = 0,22 \text{ kW} \quad (\text{Ec. 9.7})$$

Para este cálculo se ha tenido en cuenta una eficiencia η del compresor de 0,7.

La potencia requerida por el compresor es de 0,22 kW. Aun así, para asegurar que este funciona de una manera correcta y, en el caso de modificaciones en la línea que requieran de más caudal, se selecciona uno de 0,5 kW.

A continuación, se analiza el consumo eléctrico aproximado teniendo en cuenta la potencia y el tiempo de uso de todos los elementos que integran la línea de fabricación:

Elemento	Unidades	Potencia unitaria (kW)	Potencia total (kW)
Compresor	1	0,500	0,500
Terminal de válvulas	4	0,005	0,020
Válvula neumática	2	0,001	0,002
Driver/Controladora	21	0,600	12,600
Motor eléctrico	21	0,300	6,300
PLC	4	0,020	0,080
Total			19,502

Tabla_9.3_ Análisis de la potencia eléctrica instalada [8]

Como se puede observar, se ha considerado que todos los elementos iguales tienen un mismo consumo. Aunque esto no sea real, ya que hay algunos mecanismos o elementos que consuman más que otros, este estudio pretende obtener un consumo aproximado para establecer la rentabilidad económica de la empresa.

Finalmente, se concluye que el consumo eléctrico de la instalación es de, aproximadamente, 19,50 kW. Si se tiene en cuenta las horas de funcionamiento anuales, se obtiene un valor de consumo de 84.240 kWh.

Suponiendo que el precio de la electricidad está situado en 0,15 €/kWh [12], esto supone un coste anual de 12.636 €.

Cada turno cuenta con 5 operarios y operarias de trabajo: 3 de ellos colocan diferentes productos en las cintas transportadoras de las celdas 1, 2 y 4; otro añade jabón al tanque cuando es necesario y el último, coloca las cajas de cartón en la última celda. Para simplificar el cálculo, se supone que todos ellos cobran una media aproximada de 20.000 € anuales.

Por lo tanto, se requiere el trabajo de 10 operarios y operarias al día en la línea de producción. Eso genera un coste de 740 € diarios.

Una vez calculados de forma aproximada todos los costes a los que se enfrenta la empresa para elaborar sus productos, se calcula el coste total de toda la fabricación anual:

Tipo	Coste unitario	Unidades anuales	Coste total
Recipientes	0,10 €/unidad	10.368.000 unidades/año	1.036.800 €/año
Tapones	0,02 €/unidad	10.368.000 unidades/año	207.360 €/año
Etiquetas	0,01 €/unidad	10.368.000 unidades/año	103.680 €/año
Cajas de cartón	0,30 €/unidad	1.296.000 unidades/año	388.800 €/año
Jabón	2,00 €/litro	4.147.200 litros/año	8.294.400 €/año
Consumo eléctrico	-	-	12.636 €/año
Operarios y operarias	20.000 €/operario/a	10 operarios/año	200.000 €/año
Total			10.243.676 €/año

Tabla_9.4 __Análisis de costes totales de la línea de fabricación

Con el coste total anual que supone la fabricación de todos los recipientes con jabón, el coste unitario de estos es de 0,99 €/unidad. Por lo tanto, por cada jabón vendido se genera un beneficio de, exactamente, 21 céntimos de euro.

En conclusión, sin tener en cuenta importantes conceptos como el coste de la nave industrial o los trabajadores y trabajadoras de oficina, entre otras cosas, el beneficio anual de la empresa es de 2.024.400 €.

10. Aplicación de la Industria 4.0

Una vez analizada y estudiada la línea de producción que se toma de ejemplo para este proyecto, se procede a aplicar, en la medida de lo posible, todo aquello relacionado con la Industria 4.0. Con ello, se pretenden incrementar los beneficios económicos de la empresa.

Como se ha indicado al inicio del proyecto, no se pretende desarrollar ni implementar de manera física ninguna de las herramientas que se exponen. Por ello, se tomarán unas características y unos costes que reflejen la realidad, en la medida de lo posible.

Costes

Para los estudios que se van a realizar a continuación, se van a especificar ciertos costes que deben ser justificados. Todos ellos son los referidos a la acción de operarios o personal profesional contratado y a los costes energéticos.

Los tres perfiles de trabajadores y trabajadoras que van a ser contemplados para las diferentes aplicaciones serán: operarios u operarias de producción para el montaje y desmontaje de ciertos elementos, operarios u operarias de mantenimiento y programadores de PLC.

Los costes que se van a aplicar por tipo de trabajador y trabajadora estarán basados en España y contemplados por unidad horaria para simplificar los cálculos. Para obtener el valor más preciso, se va a realizar una media de diferentes fuentes de información.

	Fuente 1: Indeed [9]	Fuente 2: Jobted [10]	Fuente 3: Glassdoor [11]	Media de las fuentes
Operario/a de producción	16.593 €/año	19.700 €/año	15.464 €/año	17.252 €/año
Operario/a de mantenimiento	20.034 €/año	19.838 €/año	22.344 €/año	20.738 €/año
Programador de PLC	38.694 €/año	28.900 €/año	30.000 €/año	32.531 €/año
Desarrollador web	24.872 €/año	31.600 €/año	26.518 €/año	27.663 €/año

Tabla_10.1_ Análisis de sueldos brutos anuales por tipo de trabajador/a

Las fuentes consultadas son portales online de ofertas de trabajo. Para calcular los sueldos anuales de ciertos perfiles de trabajo, se obtiene una media de todas las vacantes publicadas en su plataforma y, por ello, pueden existir diferencias entre sí. Cada portal puede presentar un tipo de ofertas según las empresas que colaboren con ellos, dando lugar a posibles variaciones en los salarios.

A estos sueldos brutos anuales hay que sumarle el coste adicional de la Seguridad Social, que debe pagar la empresa y, por lo tanto, hace aumentar el gasto en contratación. Contemplando la cotización por contingencias comunes (23,60%), por desempleo (5,50%), por accidentes de trabajo y enfermedades profesionales (1,00%), por formación profesional (0,60%) y por el Fondo de Garantía Salarial (0,20%), supone un total del 30,9% del sueldo bruto del trabajador/a. Por lo tanto, el coste anual para la empresa de tener contratados a estos tipos de trabajadores y trabajadoras es el siguiente:

	Operario/a de producción	Operario/a de mantenimiento	Programador de PLC	Desarrollador web
Coste anual	22.583 €/año	27.146 €/año	42.583 €/año	36.211 €/año

Tabla_10.2_ Sueldos anuales medios por tipo de trabajador/a

Finalmente, los costes horarios resultan de la división del coste anual entre 12 meses que corresponden a un año y 160 horas que corresponden a un mes (teniendo en cuenta que se trabajan 8 horas al día durante 5 días a la semana y 4 semanas al mes):

	Operario/a de producción	Operario/a de mantenimiento	Programador de PLC	Desarrollador web
Coste horario	11,8 €/h	14,1 €/h	22,2 €/h	18,9 €/h

Tabla_10.3_ Sueldos horarios medios por tipo de trabajador/a

Por otra parte, la mayor parte de los elementos que van a instalarse en la fábrica para mejorar su productividad van a consumir una cierta cantidad de electricidad durante su uso. Como este es un gasto que hay que tener en cuenta a la hora de realizar el estudio de la viabilidad económica del proyecto, debe fijarse un precio para la electricidad.

Es conocido que la electricidad tiene un coste susceptible a rápidos cambios dependiendo de muchos factores, como la economía nacional, el entorno político, etc. Este coste, por lo

tanto, es muy variable. Aun así, para realizar los cálculos en este proyecto se va a tomar un valor medio del mismo que lo represente.

Según una fuente de información fiable [12], el precio por kWh puede considerarse de 0,15 €/kWh.

Una vez especificados los costes que se van a emplear a la hora de realizar los estudios económicos de cada aplicación, se procede a detallar todas las herramientas que van a aplicarse en la línea de producción seleccionada:

10.1. Producción bajo demanda

Como se ha expuesto en los apartados anteriores, la empresa poseedora de la línea de producción tiene una fabricación fija de lotes de jabones. Al trabajar a dos turnos diarios, es decir, 16 horas seguidas elaborando 180 cajas con jabones azules y 180 cajas con jabones blancos la hora, produce una cantidad constante diaria de 4.800 cajas.

Al igual que en muchos otros sectores industriales, esta fábrica no tiene una demanda fija diaria de estas cajas. Esto puede llevar a dos posibles problemas:

- Sobreproducción de jabones en los momentos de baja demanda, generando *stock* con los productos que no se venden
- Infra producción de jabones en los momentos de alta demanda, impidiendo satisfacer el mercado en su totalidad

Pese a que se realice un estudio para obtener la media diaria de la demanda, el mercado siempre puede variar, generando ambos problemas que concluyen, finalmente, en una pérdida de beneficio para la empresa.

Para solucionar este problema se puede emplear la fabricación bajo demanda, que consiste en elaborar la cantidad de productos exactos que requiere el mercado en ese momento en concreto. Con ello, se evitan los problemas de infra producción y sobreproducción de productos. Por lo tanto, si se conoce la demanda actual del mercado, se puede producir la cantidad exacta de producto que la satisfaga.

Actualmente, muchas de las grandes empresas como, por ejemplo, Seat o HP, ya fabrican únicamente bajo demanda. Esto es debido a la exhaustiva y creciente personalización de los productos que generan. No pueden permitirse fabricar para *stock*, ya que es muy complicado satisfacer a la mayoría de los clientes con productos tan específicos, además de que, como se ha comentado anteriormente, se evitan pérdidas de beneficios.

10.1.1. Datos de demanda

El primer paso para poder implementar esta herramienta es conocer la demanda exacta del mercado en todo momento. Con este dato se podrá fabricar el producto justo para satisfacer a todos los clientes y no generar más de lo necesario.

Para facilitar esta tarea, la opción más práctica es la creación y el desarrollo de una tienda virtual.

Las tiendas virtuales son páginas web en la que una empresa ofrece sus productos y permite al cliente realizar la compra de estos de manera remota, sin necesidad de ir físicamente a un establecimiento. Con esta herramienta bien desarrollada, se pueden obtener datos instantáneos de la demanda a lo largo del tiempo y planificar la producción de manera que la satisfaga.

Una vez la tienda virtual está desarrollada e implementada, los clientes pueden empezar a realizar sus pedidos. La empresa tendrá que transmitir esos datos a la línea de fabricación para poder producir lo indicado.

A modo de ejemplo, los datos que se obtienen de la compra de los clientes pueden aparecer de manera similar a la siguiente:

Número de cliente	Fecha del pedido	Número de lotes con jabones azules	Número de lotes con jabones blancos	Fecha de entrega	Cantidad abonada
132	12/04/23 11:03	2.000	1.000	15/04/23	48.000 €
133	12/04/23 15:38	1.200	0	20/04/23	19.200 €
134	13/04/23 9:55	0	3.400	16/04/23	54.400 €

Tabla_10.4 _Ejemplo de los datos obtenidos de la demanda

Para poder compartir estos datos con otros sistemas que, en este caso, es el PLC maestro, se debe crear un protocolo o herramienta de comunicación con la web.

API

Las API son las siglas, en inglés, de “Application Programming Interface” [13]. Estas son mecanismos que permiten la comunicación entre *softwares* mediante un protocolo específico. Para esta herramienta se definen dos conceptos: el cliente como encargado de pedir un dato y el servidor como responsable de responder a las peticiones.

En este caso, el cliente será el software que se comunicará con el PLC y, el servidor, la tienda virtual. Por lo tanto, gracias a la API, cuando el cliente necesite los datos de demanda

en ese instante, el servidor responderá con los mismos.

Existen diferentes tipos de API como la SOAP, RPC, etc., pero, la más utilizada actualmente es la REST debido a su gran flexibilidad.

Para este tipo de API, el cliente envía la solicitud al servidor en forma de datos y este lo procesa con diferentes funciones internas para devolver la información demandada. La comunicación se establece mediante el protocolo HTTP y, por lo tanto, mediante URLs.

Como este tipo de API es la más sencilla y la más común será la utilizada para la implementación de la aplicación.

Por lo tanto, para poder implementar la fabricación bajo demanda, se requiere que la tienda online disponga de una API. Con ella, se podrá establecer una comunicación con la web y obtener los datos deseados que, en este caso, son los de la demanda requerida.

Esta herramienta facilitará todo el proceso de conexión con la línea de fabricación y permitirá fabricar productos en función de los datos obtenidos.

10.1.2. Implementación de la herramienta

El nexo principal entre la tienda online y la línea de fabricación es el PLC. Este será el encargado de recibir la información de los pedidos generados en la página web y transmitirla a los elementos de la línea de producción para que generen la cantidad y el tipo de producto deseado.

Para que esto suceda, el PLC debe estar conectado constantemente al ordenador encargado de su programación que le proporcionará los datos en tiempo real. Una vez allí, los datos podrán tratarse y elaborar una programación concreta de la fabricación.

Como se ha mencionado anteriormente, la línea de fabricación actualmente dispone de un PLC maestro que, gracias a la conexión mediante cable bus, es capaz de gestionar varios PLC esclavos. El PLC maestro será el encargado de recibir los datos de la demanda para poder ajustar la fabricación de los lotes. Para que ello funcione se debe disponer de la tecnología adecuada.

Suponiendo que se dispondrá de una tienda virtual adecuada, así como de una API que facilite la comunicación de datos con la misma, el PLC tendrá que mandar una señal a esta para obtener la información deseada. Esto se deberá desarrollar en un entorno compatible tanto para el PLC como para la API.

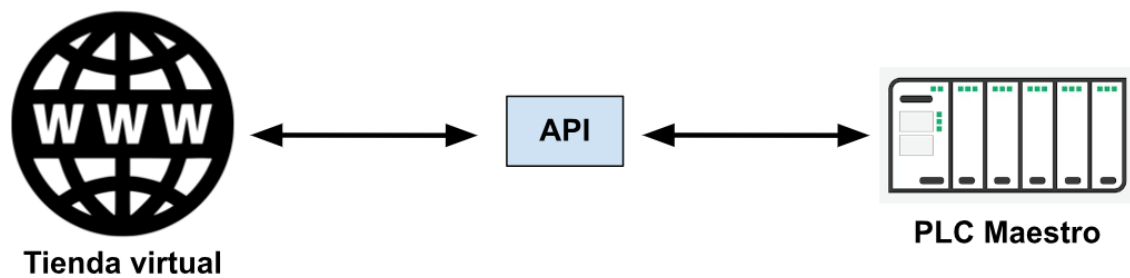


Fig. 10.1 Representación de la transmisión de datos

Para poder comunicar el PLC con la API y enviar datos entre ambos es necesario un protocolo de comunicación.

10.1.3. Protocolo de comunicación

Un protocolo de comunicación [14] es un conjunto de reglas que permite establecer una comunicación entre dos o más dispositivos conectados. Para poder usarlo, ambos deben tener en común el mismo protocolo. En caso contrario, los dispositivos no pueden compartir información de manera satisfactoria.

Los protocolos definen todo tipo de parámetros: cómo deben conectarse los dispositivos, cómo deben intercambiar los datos, cómo deben responder o enviar solicitudes, etc. Todo ello se realiza con una seguridad concreta.

Si dos dispositivos o sistemas de software no tienen el mismo protocolo de comunicación, pueden conectarse entre ellos mediante una *gateway*. Este es un dispositivo encargado de traducir las comunicaciones entre dispositivos para poder establecer una comunicación entre ellos.

Hay muchos tipos de protocolos de comunicación. Algunos de ellos están más enfocados a dispositivos industriales, otros a servicios web, *bluetooth*, etc. Para la aplicación que se quiere implementar, se requiere un protocolo de comunicación entre un dispositivo industrial (PLC) y una interfaz web. Para ello, puede utilizarse alguno de los siguientes:

OPC

El protocolo de comunicación *OLE for Process Control* (OPC) [15] es muy conocido y utilizado en comunicaciones entre PLC y servicios web, como puede ser una API. Este es capaz de conectar e intercambiar datos entre dispositivos industriales y sistemas de *software*.

Una característica de OPC es que utiliza el modelo de objetos COM/DCOM, que permite

interpolan entre los dispositivos industriales y el *software*.

Una de las ventajas de este protocolo de comunicación es que, como se ha comentado anteriormente, es muy común en la industria. Esto motiva al mercado a desarrollar productos compatibles con el mismo y, por lo tanto, tener más proveedores disponibles. Es un protocolo estandarizado y fácil de integrar entre el PLC y la API, ya que no requiere desarrollar un programa exclusivo para ellos.

Un inconveniente de esta herramienta es que está limitado al entorno Windows. Por lo tanto, si no se cuenta con este sistema operativo, no se puede establecer una conexión entre aplicativos. Además, la API debe ser compatible con este protocolo y, en caso contrario, se tendrá que utilizar *gateway* para establecer una comunicación adecuada.

MQTT

El protocolo *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) [16] es un estándar de comunicación comúnmente utilizado para aplicaciones que impliquen la conexión entre máquinas o entre máquinas y *software*, ya que es ligero y eficiente.

El modo de funcionamiento está basado en la publicación y la suscripción, donde un cliente (un PLC, por ejemplo) se suscribe a un bróker MQTT central de donde recibe los datos, en este caso, enviados por la API.

La principal ventaja de este protocolo de comunicación es su eficiencia y bajo consumo tanto energético como de procesamiento. Además, permite la interconexión entre más de dos dispositivos gracias al modelo de suscripción y publicación.

Por otra parte, para poder establecer un correcto intercambio de datos se depende completamente de un único bróker MQTT. La seguridad del protocolo está limitada en el envío de datos y la sencillez de los mensajes puede provocar una limitación en la interpretación de estos.

RESTful

El protocolo de comunicación *Representational State Trans* (RESTful) [17] está basado en el protocolo HTTP y, por lo tanto, tiene un alto uso de lenguaje como URL. Este es un modelo de comunicación más enfocado a servicios web, con el soporte de recursos como XML, CRUD (*Create, Read, Update, Delete*) y JSON.

La principal ventaja de este protocolo es que, al estar basado en HTTP, el envío y la interpretación de mensajes es sencillo. Esto quiere decir que no está ligado a ninguna plataforma ni lenguaje en concreto. Además, gracias a su sencillez, permite la escalabilidad

de las acciones pudiendo formar programas complejos.

Por otra parte, al estar basado en HTTP, limita el uso de operaciones y de creación de ciertas acciones. Además, este protocolo no proporciona un esquema formal para entender exactamente la estructura de los datos transmitidos. Esto puede conllevar problemas de compatibilidad entre, por ejemplo, el PLC y la API.

Una vez mostradas las diferentes opciones disponibles, se debe seleccionar la más adecuada para la aplicación.

El protocolo OPC es sólo útil y viable si el PLC y la API son compatibles con él. Como no se especifica la compatibilidad del PLC con este estándar, se va a suponer que no lo es. Por ese motivo, pese a ser una buena opción si fuera viable, queda descartado para su implementación.

Por otra parte, el protocolo MQTT es una muy buena alternativa, ya que permite la comunicación en tiempo real de manera sencilla y con un gran ahorro tanto energético como de datos. Aún así, se requiere un broker MQTT y está más enfocado para dispositivos que carecen de recursos. Como este no es el caso, también queda descartada esta opción.

Como conclusión, el estándar RESTful cumple con todos los requisitos exigidos por la aplicación. Como, tanto este protocolo como la API están basados en HTML, se facilita la conexión con el PLC. Por lo tanto, dado que cumple con las características y, además, tiene un uso simple, se selecciona para su aplicación.

10.1.4. Desventaja

La fabricación bajo demanda es una herramienta muy útil y eficaz para todas aquellas empresas que disponen de una demanda regular, ya que, en ese caso, la línea de fabricación está produciendo gran parte del tiempo.

Por contra, si la demanda de una empresa es muy irregular, la fabricación bajo demanda supondría graves problemas para satisfacerla. En este caso, la línea de producción tendría un uso muy irregular, con algunos periodos de tiempo inactiva y, por lo tanto, la fabricación uniforme generadora de *stock* sería lo más conveniente.

Para clarificar este punto, se van a suponer los siguientes dos casos:

Demanda diaria de lotes	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Caso 1	4.000	3.800	4.900	4.200	3.900
Caso 2	1000	0	0	10.000	2.000

Tabla_10.5_Ejemplos de tipos de demandas semanales

En el primer caso, la demanda diaria es muy constante. Teniendo en cuenta que la línea es capaz de elaborar 4.800 lotes de jabones al día, si se implementara la producción bajo demanda, la fábrica estaría en uso la gran mayoría del tiempo. El miércoles no sería capaz de producir los 100 lotes sobrantes, pero se añadirían a la producción del día siguiente.

Si se utilizara la producción constante, al final de la semana se generaría un *stock* de 3.200 lotes que no podrían venderse y, con altas probabilidades, aumentaría con el paso de la siguiente semana.

En el segundo caso, la demanda diaria es muy variable. Si se implementara la producción bajo demanda, los tres primeros días de la semana la fábrica estaría prácticamente inutilizada. En cambio, el jueves no podría absorber toda la demanda y se retrasarían los pedidos.

Si se utilizara la fabricación constante, los días en que la demanda es nula o muy baja, la línea de producción estaría fabricando *stock* para poder compensar la alta demanda de otros días de la semana como, por ejemplo, el jueves. En este caso, al final de la semana se dispondría de un *stock* de 11.000 lotes de jabones que ayudarían a satisfacer la demanda de los próximos días.

Por lo tanto, como se ha observado en el ejemplo, si una empresa dispone de una demanda relativamente constante, esta herramienta será altamente efectiva y reducirá los costes de *stock* y producto aumentando el beneficio. Por contra, si la demanda es muy variable, la producción constante puede ofrecer mayores beneficios.

10.1.5. Costes de inversión

Para poder estudiar la viabilidad económica de la aplicación, en primera instancia, se desarrolla una tabla con los costes que supondría la inversión con todos los componentes y la mano de obra:

Tipo	Cantidad	Coste unitario	Coste total
Desarrollo de web	500 h	22,2 €/h	11.100 €
Desarrollo de API	50 h	22,2 €/h	1.110 €
Programación PLC	20 h	22,2 €/h	444 €
Total:			12.654 €

Tabla_10.6_ Análisis de costes de la aplicación

Como se puede observar, el coste de la inversión inicial a realizar es de 12.654 €. Para poder analizar la rentabilidad de la herramienta, se debería conocer los resultados diarios de la demanda real. Con eso y sabiendo la capacidad de fabricación de la línea, se puede conocer la cantidad de *stock* generado o la falta de cobertura a clientes para evaluar el impacto económico que supone.

Si se genera un *stock* por el hecho de que la fabricación es superior a la demanda, se requiere de un almacén. Por otro lado, si se genera menos que lo que requiere el mercado, no se satisface a los clientes y no se generan los ingresos que se podría. Por ello, ante ambos escenarios se contempla siempre una pérdida económica.

Si se aplica la herramienta y se consigue fabricar bajo demanda, ambos problemas se verían resueltos: no sería necesario adquirir un almacén, ni se perdería potencial de mercado. Por lo tanto, la aplicación siempre será rentable.

10.2. Mantenimiento preventivo y diagnosis

Todos los elementos mecánicos de una fábrica requieren de un mantenimiento para que trabajen en unas condiciones óptimas. Existen de 3 tipos:

- Mantenimiento correctivo

Son las tareas de reparación que se realizan cuando un elemento ya no funciona. Este tipo de mantenimiento es el más crítico produciendo unos costes muy elevados, debido a que, generalmente, la línea de fabricación debe pararse evitando así la generación de productos. Además, los trabajos suelen ser más complicados y costosos.

- Mantenimiento preventivo

Son tareas que se realizan antes de que un elemento deje de funcionar. Se realizan de manera preventiva, es decir, cada cierto tiempo fijo determinado por el fabricante.

Estos trabajos evitan la parada de línea, pero pueden implicar manipulaciones innecesarias a elementos que trabajan de manera correcta. Además, estas acciones no aseguran completamente el correcto funcionamiento de todos los elementos.

- Mantenimiento predictivo

Este tipo de mantenimiento se distingue de los otros dos, ya que consiste en estudiar la actividad de los elementos para predecir posibles fallos en un futuro y así poder evitarlos. Por lo tanto, solo se realizan trabajos cuando realmente se observan cambios en sus movimientos usuales, es decir, cuando es necesario.

Aun así, este tipo de mantenimiento tampoco asegura el correcto funcionamiento de los elementos.

Para mejorar el rendimiento y productividad de la fábrica, se tratará de adaptar la línea en la mayor medida de lo posible para maximizar el uso del mantenimiento predictivo y reducir tanto el correctivo como el preventivo. Todo ello implica facilitar y simplificar la diagnosis de los elementos que intervienen en la cadena de fabricación.

Para ello, se requiere observar, mediante sensores, todos los elementos de la cadena de producción y comparar su actividad actual con la que debería tener si estuviera en buen estado. Todo esto se realiza mediante la instalación de sensores que permiten obtener datos de posición y tiempo.

10.2.1. Neumática

La tecnología neumática es muy simple, debido a que únicamente integra elementos mecánicos y aire comprimido. A continuación, se detallan los fallos más comunes que pueden ocurrir en la instalación y cómo realizar un mantenimiento predictivo adecuado:

10.2.1.1. Desgaste de elementos

Los elementos neumáticos son componentes mecánicos que, durante los movimientos y pese a estar lubricados con aceites especiales, están expuestos a rozamientos y, en algunos casos, a impactos. Todo esto, con el tiempo, supone un desgaste de los elementos integrantes que pueden provocar un mal funcionamiento del conjunto, llegando a interrumpir su actividad durante un tiempo indefinido.

La gran mayoría de actuadores neumáticos con movimiento permiten la instalación de sensores de proximidad. Esto es debido a que los componentes móviles de estos elementos incorporan materiales magnéticos capaces de generar una corriente en el sensor que puede ser transportada en forma de señal al PLC.

En las Figs. 10.2 y 10.3 se puede observar de manera ilustrativa la función del sensor magnético para componentes neumáticos. En este caso, se ha decidido usar un cilindro para clarificar el concepto.

Cuando el vástago del cilindro está recogido, el émbolo magnético se alinea con el sensor y genera una corriente eléctrica.

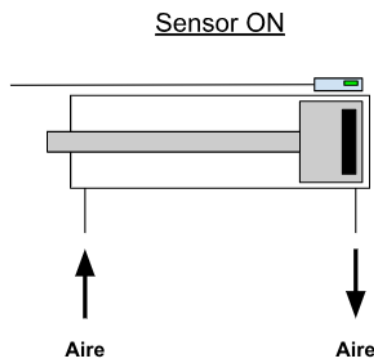


Fig. 10.2 Representación del sensor activo

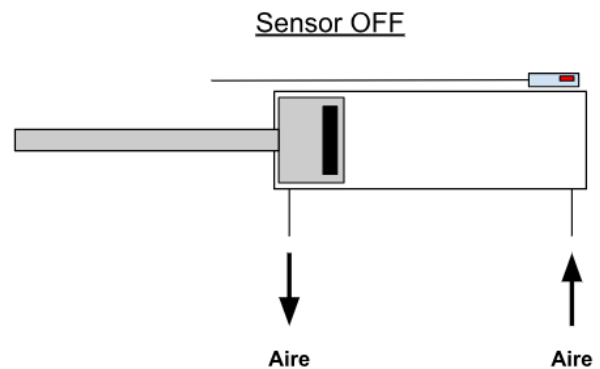


Fig. 10.3 Representación del sensor inactivo

Inmediatamente después de que el cilindro abandone la posición anterior, el émbolo deja de estar alineado con el sensor y, por lo tanto, ya no se genera corriente eléctrica.

Este mecanismo es de gran ayuda para la programación de la automatización de la línea, ya que se pueden obtener datos de la posición de los elementos en cada momento. Se pueden instalar varios sensores en un mismo cilindro para, por ejemplo, asegurarse de que el vástago está en su máxima o mínima posición.

Además, estos sensores tienen una tolerancia ajustable de detección. Con ello se puede conseguir detectar el émbolo antes de que llegue a la posición, estableciendo una gran ventana de detección; o buscar la máxima precisión configurándolo con un margen muy ajustado.

Existen, principalmente, dos tipos de detectores magnéticos:

- Tipo *reed*

Los detectores magnéticos de tipo *reed* están compuestos por dos contactos ferromagnéticos de níquel y hierro dentro de una cápsula de vidrio llena de gas nitrógeno. Este mecanismo actúa, básicamente, como un interruptor normalmente abierto. Es decir, cuando las láminas ferromagnéticas se exponen a un campo magnético como el que genera el actuador neumático, se producen dos polos de polaridad opuesta que unen los contactos cerrando el circuito eléctrico y, por tanto, permiten el paso de corriente que puede ser

interpretado como una señal eléctrica.

En el caso de que no se encuentren expuestos ante ningún campo magnético, las láminas se encontrarán separadas.

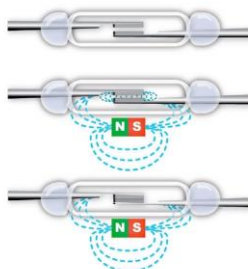


Fig. 10.4 Representación del sensor tipo reed [18]

Este tipo de detectores tienen mucho desgaste debido al movimiento continuo de las láminas ferromagnéticas. Esto provoca que la vida útil o el MTTF (*Mean Time To Failure*) sean relativamente pequeños. Se estima que estos detectores tienen un uso de entre 100 y 120 años (MTTF) en los mejores casos.

- Tipo *hall* o transistorizados

Los detectores magnéticos de tipo *hall* o transistorizados están compuestos por un transistor y su detección se basa en el efecto Hall.

El efecto Hall se produce cuando se somete un cable eléctrico por el cual circula corriente a un campo magnético transversal al mismo. Gracias a la fuerza de Lorentz, las cargas eléctricas que circulan por el conductor se ven alteradas en presencia del campo magnético y, por lo tanto, son desviados hacia un lado del conductor. Por lo tanto, se genera una diferencia de electrones dentro del mismo que produce un voltaje perpendicular a la corriente (voltaje de Hall). Con ello, se puede medir la intensidad del mismo para generar una salida eléctrica.



Fig. 10.5 Transistor [19]

En este caso, al no existir movimientos mecánicos, el MTTF de este tipo de sensores se puede estimar en más de 1.000 años.

Con lo que respecta al mantenimiento predictivo, con estos sensores se puede conseguir medir el desgaste de los actuadores y, consecuentemente, el mal funcionamiento de estos. Cuando un cilindro, en este caso, realiza muchos ciclos o si son muy forzados, el émbolo o el vástago pueden desgastarse y afectar a su funcionamiento. Si se instala un sensor con una ventana de medición muy precisa, se pueden analizar estas variaciones, ya que se observarán valores de detección muy escasos en tiempo.

Para este proyecto, se van a instalar dos sensores en cada elemento neumático: uno para detectar el final de carrera y otro para el inicio. Con ello, se obtienen datos más fiables de la posición del cilindro y, consecuentemente, se puede realizar un análisis del deterioro más preciso.

A continuación, se muestra una tabla con la cantidad de sensores a instalar por cada celda:

Celda	Nº actuadores neumáticos	Nº total de sensores
1	2	4
2	0	0
3	1	2
4	2	4
5	4	8
6	0	0
7	4	8
Total: 26 sensores		

Tabla 10.7 _Cálculo del número total de sensores

Para este caso, se deberán instalar un total de 26 sensores de proximidad en los actuadores neumáticos. Todos ellos deberán conectarse e identificarse directamente en el PLC correspondiente. Con ello, se conseguirá tener una monitorización constante del estado de todos los actuadores neumáticos y, cuando exista un defecto, podrá identificarse el elemento defectuoso.

Para poder evaluar la rentabilidad económica de la instalación de estos sensores, se va a analizar, a continuación, los dos posibles estados:

Actuadores sin sensores

Si los actuadores neumáticos no están dotados de sensores, no se puede conocer el estado de estos. Además, la programación de los PLC de la línea de producción será más compleja y menos precisa.

En el caso de que uno de estos elementos falle, es decir, se rompa, se desgaste o se atasque, la línea de fabricación empezará a producir de forma defectuosa y se deberá poner en marcha el mantenimiento correctivo. Si este fallo se detecta a tiempo, se podrá parar la instalación y averiguar el error.

Como los actuadores neumáticos no están controlados, encontrar el error en la producción será más complicado y requerirá de un test de todos los elementos para comprobar su estado. Una vez se averigüe dónde ha ocurrido el fallo, se sustituirá el actuador y se volverá a poner en marcha la instalación.

Para poder evaluar el impacto económico que este hecho supone, se estima que, cuando se produce el error, se tarda 5 minutos en percibirlo y, sabiendo que la producción de lotes de 8 jabones se sitúa en 4 lotes/min, la pérdida será de 20 lotes aproximadamente.

Una vez se detecta el fallo y se para la línea, se va a suponer que, teniendo en cuenta la cantidad de actuadores neumáticos de la instalación, se tarda 20 minutos en encontrar el defectuoso. Una vez detectado, se estima un tiempo de 20 minutos en sustituirlo por uno nuevo.

Durante los 40 minutos en el que la línea ha estado parada, se han dejado de fabricar, aproximadamente, 160 lotes de 8 jabones cada uno.

Por lo tanto, el coste económico de un error en actuador neumático cuando no tienen instalados sensores es de:

Factor	Cantidad	Coste unitario	Coste total
Lotes de jabón perdidos	20 lotes	16 €/lote	320 €
Operario/a de mantenimiento	0,66 h	14,1 €/h	9 €
Lotes de jabón dejados de fabricar	400 lotes	16 €/lote	6.400 €
Total:			6.729 €

Tabla 10.8_ Cálculo del coste económico de un fallo sin sensores

El coste unitario de los lotes perdidos o dejados de fabricar hace referencia al coste de venta, ya que, si la línea no hubiera parado, la empresa los habría vendido.

Como se puede observar, la pérdida económica para este caso cuando los actuadores no tienen sensores instalados se sitúa en 6.728 €. Los costes más relevantes son los de la pérdida de ventas o de material.

Teniendo en cuenta que la tasa de fallos para los actuadores neumáticos se sitúa en:

$$\lambda_{\text{Actuadores neumáticos}} = 0,00312 \text{ fallos/hora} \quad (\text{Ec. 10.1})$$

Y que, actualmente, cada vez que hay un fallo en algún elemento, se produce una parada en la línea de producción, el coste total anual será de:

$$\text{Fallos al año} = \lambda_{\text{Actuadores neumáticos}} \cdot \frac{4.320 \text{ horas}}{1 \text{ año}} = 13 \text{ fallos/año} \quad (\text{Ec. 10.2})$$

$$\text{Coste total anual} = \text{Fallos al año} \cdot \text{Coste por fallo} = 87.477 \text{ €} \quad (\text{Ec. 10.3})$$

Por lo tanto, los fallos mecánicos suponen un coste anual de 87.477 €.

Actuadores con sensores

Tal y como se ha explicado anteriormente, si se instalan dos sensores por cada actuador neumático, se puede conocer su estado en tiempo real. Además, la programación en el PLC es mucho más sencilla y práctica.

El fallo de los actuadores puede ser predecible si la medición de los sensores se ajusta a un rango muy reducido. Así, se pueden detectar desgastes o roturas sin necesidad de que la producción se vea afectada.

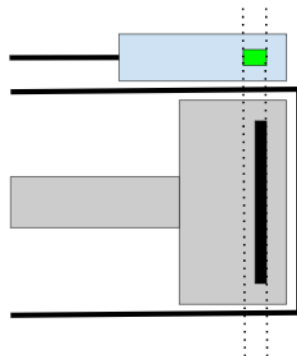


Fig. 10.6 ___ Ventana de detección del sensor ON

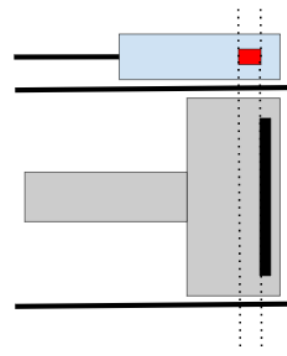


Fig. 10.7 ___ Ventana de detección del sensor OFF

Como se puede observar en las Figs. 10.6 y 10.7, si el sensor se configura con un rango de detección muy estrecho, a la mínima que el cilindro tenga desgaste, se detectará. Además, probablemente, la línea de producción siga funcionando con total normalidad pese a ello.

En cambio, si el sensor se configura con un gran rango de detección, será más difícil detectar el desgaste y puede que se produzcan productos defectuosos durante su uso.

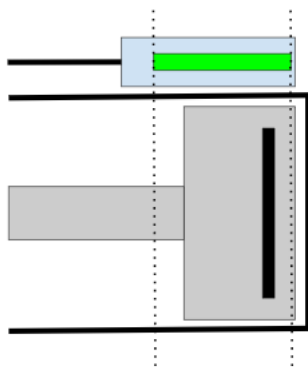


Fig. 10.8 ___ Ventana de detección del sensor ON

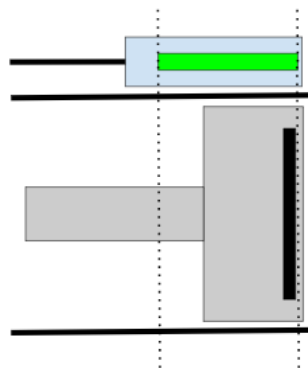


Fig. 10.9 ___ Ventana de detección del sensor ON

Como se puede observar en las figuras 8.2.1.1.7 y 8.2.1.1.8, la banda magnética del cabezal del actuador no consigue salir del rango de detección cuando está desgastada y, por ello, no se detecta el error.

Por lo tanto, tal y como se ha mencionado, si los sensores se configuran con un rango muy reducido, pueden evitarse los fallos y, consecuentemente, la producción defectuosa, así como las paradas de línea no planeadas.

Entonces, si se detecta que algún sensor no recibe correctamente la señal del actuador, pero la línea de fabricación continúa produciendo con total normalidad, se esperará a finalizar el turno para realizar el cambio del componente. Así se evitará parar la línea de producción y perder la fabricación de producto. Por lo tanto, el único coste será el del cambio del actuador que, al igual que en el apartado anterior, será de 20 minutos.

Por otro lado, los actuadores neumáticos pueden romperse o dejar de funcionar sin previa detección y, por lo tanto, tener que aplicar el mantenimiento correctivo. Aun así, este será mucho más rápido y eficaz que en el caso anterior.

Si esto sucede, se podrá detectar inmediatamente el fallo del actuador en cuestión ya que se recibirá una información de él diferente de lo normal. Por lo tanto, no se producirán productos defectuosos y se parará la línea de producción. A continuación, como se conoce cuál es el actuador que falla, se podrá proceder al cambio del mismo al instante invirtiendo únicamente 20 minutos y 80 lotes dejados de vender.

Todo ello supone el siguiente coste económico:

Factor	Cantidad	Coste unitario	Coste total
Lotes de jabón perdidos	0 lotes	16 €/lote	0 €
Operario/a de mantenimiento	0,33 h	14,1 €/h	5 €
Lotes de jabón dejados de fabricar	80 lotes	16 €/lote	1.280 €
Total:			1.285 €

Tabla 10.9. Cálculo del coste económico de un fallo con sensores

Como se puede observar, el coste económico que implica un defecto en un actuador neumático es de 1.284 €.

Al igual que en el anterior caso y teniendo en cuenta que la tasa de fallos es de:

$$\lambda_{\text{Actuadores neumáticos}} = 0,00312 \text{ fallos/hora} \quad (\text{Ec. 10.4})$$

El coste anual total de fallos mecánicos en los elementos neumáticos que producen una parada de línea se sitúa en:

$$\text{Fallos al año} = \lambda_{\text{Actuadores neumáticos}} \cdot \frac{4.320 \text{ horas}}{1 \text{ año}} = 13 \text{ fallos/año} \quad (\text{Ec. 10.5})$$

$$\text{Coste total anual} = \text{Fallos al año} \cdot \text{Coste por fallo} = 16.705 \text{ €} \quad (\text{Ec. 10.6})$$

Aun así, este coste no es totalmente verídico, ya que, como se ha comentado, la instalación de sensores permite detectar el fallo próximo, evitando que los elementos neumáticos produzcan una parada en la línea de producción y, consecuentemente, una pérdida de material. Por esta razón, al realizar esta aplicación, la tasa de fallos se vería disminuida considerablemente.

Para comprobar la viabilidad económica de esta aplicación se debe seleccionar un sensor en concreto para instalar en estos actuadores. Para ello, se procede a mostrar una serie de alternativas y, posteriormente, en función de sus características, seleccionar la más adecuada:

SDBT-MSX

El sensor SDBT-MSX de la marca Festo.

Sus características técnicas son las siguientes:

- Principio de medición: magnético *hall*

- Temperatura ambiente: de -40 °C hasta 85 °C
- Velocidad de desplazamiento máxima del cilindro: 3 m/s
- Precisión: 0,1 mm
- Potencia: 2,8 W
- Precio: 37,68 €



Fig. 10.10__Sensor SDBT-MSX [20]

D-Y7K

El sensor D-Y7K de la marca SMC.

Las características técnicas de este detector son las siguientes:

- Principio de medición: magnético *Hall*
- Temperatura ambiente: de -10 °C hasta 60 °C
- Velocidad de desplazamiento máxima del cilindro: 3 m/s
- Precisión: 0,5 mm
- Potencia: 3,2 W
- Precio: 30,10 €



Fig. 10.11 __Sensor D-Y7K [21]

MR0100

Sensor MR0100 de la marca IFM.

Sus características técnicas son las siguientes:

- Principio de medición: magnético *reed*
- Temperatura ambiente: de -25 °C hasta 70 °C
- Velocidad de desplazamiento máxima del cilindro: 10 m/s
- Precisión: 1 mm
- Potencia: 5 W
- Precio: 24,80 €



Fig. 10.12 __Sensor MR0100 [22]

Una vez expuestos y analizados algunos de los sensores que ofrece el mercado, se procede a la selección del más adecuado. Como se puede observar, tanto el de Festo como el de SMC son de tipo magnético *Hall*. En cambio, el de IF es de tipo *reed*. Si se quiere realizar una compra adecuada, pese a que el precio es algo mayor, se debe seleccionar el de tipo *hall* por su gran MTTF. Así, se asegura que estos sensores tienen una gran vida útil.

Por lo tanto, el sensor MR0100 de IF queda descartado.

Por otra parte, las diferencias técnicas entre el sensor de Festo y el de SMC son mínimas, excepto el rango mínimo de detección, que es de 0,1 mm y 0,5 mm, respectivamente. Para este caso, cuanto menor sea el rango mínimo de detección, mejor será el resultado de la aplicación y se detectará con más antelación el desgaste mecánico. Por lo tanto, entre ambas opciones, se selecciona la alternativa de Festo.

Finalmente, para evaluar la rentabilidad económica del proyecto, se procede a realizar un desglose de los costes de inversión de esta herramienta:

Elemento	Coste unitario	Unidades	Coste total
Sensor	37,68 €/u	26 u	980 €
Instalación de los elementos	11.8 €/h	1 h	12 €
Programación PLC	17 €/h	8 h	136 €
Total:			1.128 €

Tabla 10.10_ Coste económico de la aplicación

Los costes de inversión del material, así como la instalación y su programación suman un total de 1.128 €.

Tal y como se ha estudiado anteriormente, si los actuadores neumáticos no disponen de sensores el coste anual de fallos mecánico supone 87.477 €. En cambio, si se instalan estos sensores, el coste de un fallo mecánico será de 16.705 € y, además, tal y como se ha explicado, la probabilidad de parada de línea será mucho inferior. Por lo tanto, la ganancia económica anual es de 70.772 €/año.

Por otro lado, pese a que el consumo de estos sensores sea muy bajo, debe contemplarse el gasto eléctrico que suponen anualmente. Con una potencia de 2,8 W y trabajando continuamente durante los dos turnos diarios, el consumo total anual de 1 sensor será de 12,096 kWh. Por lo tanto, el consumo total anual de los 26 sensores será de 314,496 kWh.

Sabiendo que el precio de la electricidad es de 0,15 €/kWh, el coste total que supone el uso de estos sensores será de 47 €/año.

Por lo tanto, la inversión inicial calculada tendrá el siguiente periodo de retorno:

$$\text{Periodo de retorno} = \frac{\text{Inversión a realizar}}{\text{Ganancias anuales} - \text{Consumo eléctrico}} = 0,016 \text{ años} = 5 \text{ días} \quad (\text{Ec. 10.7})$$

10.2.1.2. Fugas de aire

Por otra parte, uno de los problemas más graves de las instalaciones neumáticas son las fugas de aire comprimido. Es conocido que la media de pérdidas de aire comprimido en las fábricas se sitúa en un 30% del generado.

Este es un problema muy común, porque las pérdidas suelen ser provocadas por pequeños agujeros por los que se escapa el aire de una manera muy silenciosa y poco visible. Por ello, si se añade que una línea de fabricación suele ser ruidosa de por sí, las pérdidas son prácticamente imperceptibles.

Una manera eficaz de prever estas fugas es mediante la instalación de presostatos electrónicos o sensores de presión en varios puntos de la línea neumática. Solo así, se puede realizar un análisis a tiempo real de la presión de aire en esos puntos y compararla con la que debería tener. En el caso de que estos valores difieran, existirá alguna pérdida.

También es importante añadir un módulo de detección de presión en los conjuntos de preparación del aire comprimido (filtros, reguladores, válvulas de corte...) para poder evaluar el cambio de filtro de los filtros de agua, aceite y partículas. Cuando estos se obstruyen, impiden el paso completo del aire y, consecuentemente, la presión en la salida disminuye. Por lo tanto, si se instala un módulo de sensor de presión en la salida, pueden renovarse los filtros en el momento en el que se observe una caída de presión.

Para ejemplificar este caso, se ha realizado un dibujo esquemático de la línea de alimentación de aire comprimido de una celda ejemplar:

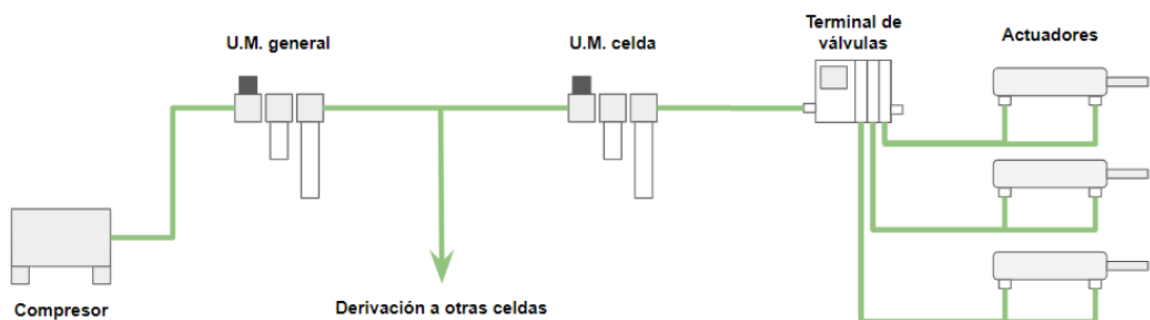


Fig. 10.13 Representación de la línea neumática de una celda

Como se puede observar, la línea consta de compresor que alimenta una unidad de mantenimiento (U.M.) general encargada de eliminar las partículas y la humedad del aire, así como capaz de cortar la alimentación de la línea entera. De ahí, se distribuye el aire a todas las celdas. Cada celda dispone de su propia unidad de mantenimiento y distribuye el aire, en este caso, a un terminal de válvulas. Este gestiona y dirige el aire a los actuadores en función de las acciones que se deban realizar.

En esta línea, si aparece alguna fuga en alguna conexión entre elementos, será imperceptible y generará un sobrecoste en la instalación.

Se supone que la línea dispone de dos fugas en los tubos de conexión: la primera de un diámetro de 1 mm y la segunda de 3 mm.

Si la línea trabaja a 6 bar, las pérdidas de aire para el orificio de 1 mm de diámetro serán las siguientes:

- Densidad del aire

$$\rho = 1,2 \frac{kg}{m^3} \quad (\text{Ec. 10.8})$$

- Presión inicial

$$P_1 = 6 \text{ bar} = 600 \text{ kPa} \quad (\text{Ec. 10.9})$$

- Presión final

$$P_2 = 1 \text{ atm} = 101,300 \text{ kPa} \quad (\text{Ec. 10.10})$$

- Velocidad del aire

$$\frac{1}{2} \rho v^2 = P_1 - P_2 \quad (\text{Ec. 10.11})$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_1 - P_2)}{\rho}} = 911,680 \frac{m}{s} \quad (\text{Ec. 10.12})$$

- Área de la sección

$$A = \pi r^2 = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 7,854 \cdot 10^{-7} m^2 \quad (\text{Ec. 10.13})$$

- Caudal de aire que fluye por la fuga

$$Q = v \cdot A = 7,160 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{s} \quad (\text{Ec. 10.14})$$

Sabiendo que la fábrica opera 16 horas al día y 270 días al año, el volumen de aire comprimido perdido anualmente será el siguiente:

$$V_{\text{perdido}} = Q \cdot t = 11.135,232 \frac{m^3}{\text{año}} \quad (\text{Ec. 10.15})$$

Si, el precio del metro cúbico [23] de aire comprimido se sitúa en 2 céntimos de euro, las pérdidas económicas de esta fuga serán de:

$$\text{Pérdidas económicas} = V_{\text{perdido}} \cdot \text{Precio unitario} = 222,704 \frac{\text{€}}{\text{año}} \quad (\text{Ec. 10.16})$$

Para el caso de la segunda fuga de diámetro 3 mm, se repite el cálculo y se obtienen unas pérdidas volumétricas de 100.221,538 m³/año, lo que supone una pérdida económica de 2.004,430 €/año.

Por lo tanto, esta empresa estaría perdiendo un total de:

$$\text{Pérdidas económicas totales} = 2.227,134 \frac{\text{€}}{\text{año}} = 185,594 \frac{\text{€}}{\text{mes}} \quad (\text{Ec. 10.17})$$

Tal y como se ha mencionado, una manera de solventar este problema es la instalación de presostatos electrónicos o sensores de presión en varios puntos de la línea, concretamente en las conexiones tubulares entre elementos neumáticos. Con ello, se puede detectar cambios de presión en la línea y focalizar el área afectada.

Para ello, siguiendo la línea de fabricación que se ha tomado como ejemplo, se procede a la instalación de los presostatos:

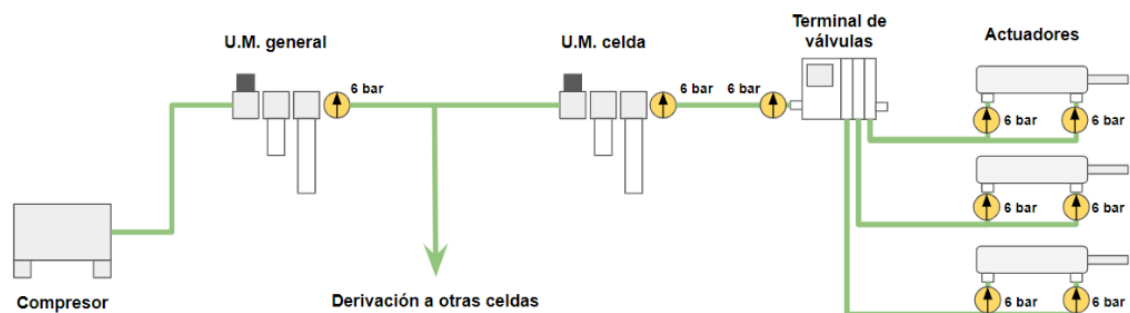


Fig. 10.14 __Representación de la instalación de presostatos

Como se puede observar, se han colocado sensores de presión en todas las conexiones entre elementos. En el caso de que la línea funcione bien y no tenga fugas, todos los presostatos instalados deben marcar la presión de operación que, en este caso, es de 6 bar.

Si se produce una fuga, todos los presostatos aguas abajo de la instalación marcarán una presión diferente a la de operación. Por ejemplo, según la siguiente imagen:

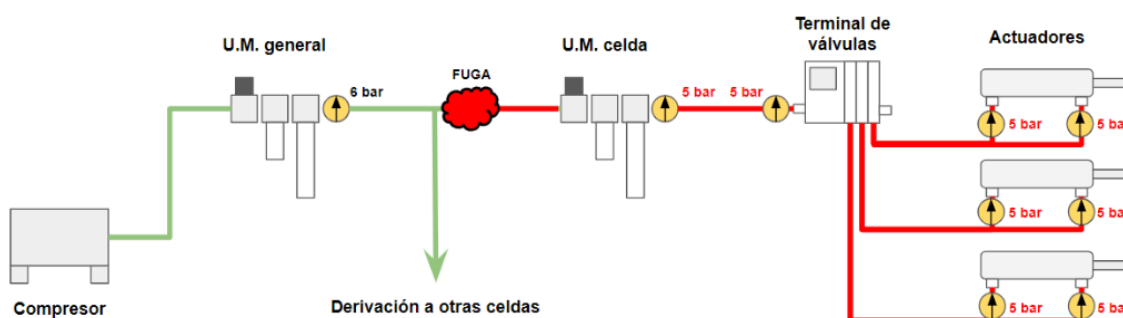


Fig. 10.15 ___ Representación de una fuga de aire en la línea neumática

Si se ha producido una fuga en el enlace entre la unidad de mantenimiento general y la de la celda, todos los sensores de presión situados a continuación de la misma marcarán una presión diferente a la habitual que, en este caso, es de 5 bar. Para poder detectar el punto de fuga, se debe buscar el enlace anterior al primer presostato que marca una presión fuera de lo habitual.

Existen diferentes tipos de tecnologías para la elaboración de presostatos. A continuación se muestran las más comunes:

- Tipo *reed*

Al igual que en el apartado anterior para los sensores magnéticos, esta tecnología se basa en un interruptor normalmente abierto. Consta de dos láminas ferromagnéticas que se juntan en presencia de un campo magnético. El presostato integra una varilla con un pequeño imán en su interior y esta se desplaza en función de la presión del aire.

Este tipo de presostatos no son capaces de leer la presión en cada momento. En vez de eso, pueden detectar una presión concreta y enviar una señal eléctrica cuando se alcanza. Es decir, cuando la varilla alcanza una determinada altura, el campo magnético cierra las

láminas ferromagnéticas y emite una señal eléctrica. Por lo tanto, para su funcionamiento se debe fijar una presión objetivo de manera manual.

- Tipo membrana

Los sensores de tipo membrana [24] integran una fina lámina metálica en su interior que es capaz de deformarse en función de la presión de aire ejercida. Dentro del presostato se detecta la deformación de esta membrana y se indica mediante un impulso eléctrico. Por lo tanto, este tipo de sensores de presión sí que son capaces de informar de la presión actual de aire en cada momento.

- Tipo piezoeléctrico

Este tipo de presostatos están formados por material piezoeléctrico [25]. Este puede generar una carga eléctrica cuando se le aplica una fuerza mecánica como puede ser, en este caso, la presión de aire. Cuando esto sucede, el material se deforma y genera un cambio en la estructura atómica del mismo que produce una acumulación de carga eléctrica en la superficie del material

Una de las características más importantes de esta tecnología es que tiene un consumo eléctrico prácticamente nulo.

Al igual que en el presostato de tipo membrana, este tipo de sensor de presión también puede informar constantemente de la presión de aire.

Para poder aplicar de manera correcta esta herramienta y estudiar su viabilidad económica, se debe buscar el modelo de presostato más adecuado para ello. A continuación, se exponen tres alternativas teniendo en cuenta las especificaciones impuestas:

SDE5

El sensor de presión SDE5 de la marca Festo.

Las características técnicas de este elemento son las siguientes:

- Rango de detección: de 0 hasta 10 bar
- Temperatura admisible: de 0 a 50 °C
- Tecnología: piezoeléctrica
- Potencia: 0,1 W
- Precio: 83,60 €



Fig. 10.16__Presostato SDE5 [26]

IS10

El sensor de presión IS10 de la marca SMC.

Las características técnicas de este elemento son las siguientes:

- Rango de detección: de 0 hasta 7 bar
- Temperatura admisible: de -5 °C a 60 °C
- Tecnología: *reed*
- Potencia: 1 W
- Precio: 61,59 €



Fig. 10.17__Presostato IS10 [27]

PR03

El sensor de presión PR03 de la marca Aignep.

Las características técnicas de este elemento son las siguientes:

- Rango de detección: de 0,9 hasta 8 bar
- Temperatura admisible: de 15 °C a 50 °C
- Tecnología: membrana
- Potencia: 0.8 W
- Precio: 75,20 €



Fig. 10.18 __Presostato PR03 [28]

Como se puede observar en las alternativas que se han proporcionado, los tres están formados por una tecnología diferente.

El de SMC es de tipo *reed*. Para esta aplicación, esta tecnología puede no ser la más adecuada, debido a que es muy difícil concretar una presión a la cual se considere que la línea de aire tiene fugas. En algunos casos, dependiendo de los actuadores y la acción, las líneas de aire comprimido pueden sufrir alteraciones de presión internas. Por ello, para este caso, fijar una presión concreta podría generar datos erróneos.

Tanto el de Aignep como el de Festo son dos presostatos completamente útiles, ya que son capaces de leer constantemente la presión en la red e informar de ello al PLC. Así se puede configurar y detectar posibles fugas.

El presostato de Aignep tiene la desventaja de no poder trabajar con normalidad en ambientes con una temperatura inferior a los 15 °C. Esto puede suponer un problema para la aplicación porque puede que, en temporadas más frías, la fábrica alcance temperaturas inferiores y, por lo tanto, se daría un mal funcionamiento en el sensor.

Finalmente, la elección del mejor presostato indicado es la de Festo, ya que cumple con todas las especificaciones impuestas.

A continuación, se realiza una tabla con el coste total de la inversión a realizar para la puesta en marcha de los presostatos para esta instalación en concreto:

Elemento	Coste unitario	Unidades	Coste total
Presostato	83,6 €/u	9 u	753 €
Instalación de los elementos	11,8 €/h	3 h	35 €
Programación PLC	17 €/h	9 h	153 €
Total:			941 €

Tabla 10.11_ Cálculo del coste económico de la aplicación

Como se puede observar en el cálculo, el precio total de la adquisición de los sensores de presión, su instalación y programación tienen un precio total de 941 €. Se considera que, si se realiza esta tarea, el número de fugas será nulo, así como la pérdida de beneficios y, por lo tanto, la ganancia económica anual sería de 2.227 € aproximadamente.

Por otra parte, también se debe considerar el gasto económico que supone el uso de estos presostatos anualmente por su consumo eléctrico. Sabiendo que 1 presostato consume 0,1 W y trabaja durante todas las horas de todos los turnos del año, su consumo es de 0,432 kWh. Por lo tanto, el consumo total de las 9 unidades será de 3,88 kWh. Si la electricidad está valorada en 0,15 €/kWh, el gasto económico anual será de 0,582 €/año.

Por lo tanto, teniendo en cuenta las ganancias anuales por eximir las fugas y con la inversión a realizar, el periodo de retorno será de:

$$\text{Periodo de retorno} = \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Ganancias mensuales} - \text{Consumo eléctrico}} = 7 \text{ meses} \quad (\text{Ec. 10.18})$$

Todos estos cálculos han sido referidos a la línea ejemplar de la Figura 10.13. Para seguir con la línea de fabricación embotelladora de gel seleccionada en este proyecto, se va a realizar también la inversión inicial a realizar.

Tal y como se ha observado en el esquema neumático de la Figura 9.2, se dispone de 13 cilindros neumáticos de doble efecto, 2 elementos de vacío, 14 válvulas de direccionamiento y 7 unidades de mantenimiento. Todo ello suma un total de 49 presostatos necesarios para detectar posibles fugas en el sistema. Por ello, siguiendo los costes anteriores, la inversión inicial será de 4.284 €.

Además el consumo energético debido al uso de los componentes durante los dos turnos todos los días del año será de 3,16 €/año.

Si se contemplan las mismas fugas que las estudiadas, la ganancia económica anual será de 2.227 € y, el periodo de retorno de la inversión será el siguiente:

$$\text{Periodo de retorno} = \frac{\text{Inversión a realizar}}{\text{Ganancias anuales} - \text{Consumo eléctrico}} = 23 \text{ meses} \quad (\text{Ec. 10.19})$$

10.2.2. Electrónica

A lo que a los elementos electrónicos respecta, la mayor parte del mantenimiento predictivo se va a enfocar en los motores eléctricos, ya que son los encargados de generar los movimientos y, por lo tanto, las piezas que pueden dar más problemas. Aun así, al tener actuadores eléctricos totalmente mecánicos, también se van a observar fallos por desgaste o rozamiento que deben tratarse.

10.2.2.1. Fallos eléctricos

La sobrecarga es uno de los problemas más comunes que pueden sufrir los motores eléctricos. Esto se debe a que está actuando por encima de su capacidad, en concreto, de su capacidad nominal. Cuando esto ocurre, los dos síntomas más frecuentes son: gran consumo de corriente y sobrecalentamiento.

Estos problemas pueden ocasionar desde problemas leves en los motores hasta problemas irreversibles que los dejan inutilizables.

Según lo indicado anteriormente, los motores de la línea de fabricación tienen la siguiente tasa de fallos:

$$\lambda = 0,00156 \text{ fallos/hora} \quad (\text{Ec. 10.20})$$

Por lo tanto, anualmente se producen un total de 6 fallos en motores eléctricos.

Teniendo en cuenta los mismos datos considerados para los elementos neumáticos, es decir, que cuando se produce un fallo se tarda 5 minutos en detectarlo y se realizan 20 lotes defectuosos como consecuencia, se invierten 20 minutos en encontrar el motor defectuoso y otros 20 minutos en sustituirlo (con la línea parada y perdiendo la producción de 160 lotes, el coste económico de 1 fallo es de:

Factor	Cantidad	Coste unitario	Coste total
Lotes de jabón perdidos	20 lotes	16 €/lote	320 €
Operario/a de mantenimiento	0,66 h	14,1 €/h	9 €
Lotes de jabón dejados de fabricar	400 lotes	16 €/lote	6.400 €
Total:			6.729 €

Tabla 10.12_ Cálculo del coste económico de un fallo eléctrico

Por lo tanto, los fallos eléctricos suponen una pérdida económica anual de 40.374 €.

Para detectar este fallo que puede llegar a estropear el motor, se puede realizar de dos maneras diferentes:

Mediante la instalación de sensores

Para ello, se dota a los motores de dos sensores: un amperímetro para poder tener un dato de consumo de corriente y un sensor de temperatura para analizar si se está produciendo un sobrecalentamiento. Ambos, por supuesto electrónicos, irán conectados al PLC donde se realizará el análisis de los datos y se tomarán decisiones.

La línea de fabricación que se ha tomado como ejemplo dispone de 21 motores eléctricos. Esto implica un total de 21 amperímetros y 21 sensores de temperatura a instalar, conectar y configurar en el PLC.

A continuación, se procede a analizar las opciones que ofrece el mercado respecto a los amperímetros y los sensores de temperatura:

- Amperímetros

MCR-SL-CUC-100-U

Sensor de corriente de la marca Phoenix contact.

Las características técnicas son las siguientes:

- Rango de corriente: de 0 a 100 A
- Frecuencia de medición: hasta 6000 Hz
- Salida: 0-10 V

- Temperatura de operación: de -40 °C hasta 65 °C
- Protección: IP20
- Precio: 224,12 €



Fig. 10.19 __Amperímetro MCR-SL-CUC-100-U [29]

I7R213

Amperímetro de la marca IFM.

Las características técnicas son las siguientes:

- Rango de corriente: de 0 a 200 A
- Frecuencia de medición: hasta 100 Hz
- Salida: 0-10 V
- Temperatura de operación: de -25 °C hasta 70 °C
- Protección: IP67
- Precio: 130,20 €



Fig. 10.20 __Amperímetro I7R213 [30]

5SV8705-0KK

Sensor de corriente de la marca Siemens.

Sus características técnicas son las siguientes:

- Rango de corriente: de 0 a 3.000 A
- Frecuencia de medición: hasta 60 Hz
- Salida: 0-10 V
- Temperatura de operación: de -10 °C hasta 50 °C
- Protección: IP20
- Precio: 266,92 €



Fig. 10.21 __Amperímetro 5SV8507-0KK [31]

Una vez mostradas las 3 alternativas seleccionadas, se procede a la comparación.

Los motores eléctricos empleados en esta línea de fabricación tienen un consumo de corriente muy bajo. Por este motivo, el sensor de corriente Siemens sería una opción sobredimensionada, teniendo en cuenta que es capaz de medir hasta 3.000 A. Por lo tanto,

esta opción queda descartada.

Entre las opciones de Phoenix e IFM, el primero tiene una protección IP excesivamente baja. Esto quiere decir que no podría estar en contacto con líquidos ni con humedad. Aparte, no es muy resistente al contacto con el polvo. Esto puede suponer un problema para la funcionalidad del mismo porque, al estar en un entorno industrial que puede estar sometido a polvo y humedad, estos elementos deberían estar protegidos en una caja hermética, por ejemplo. Por lo tanto, teniendo en cuenta además que el sensor de IFM tiene un coste mucho menor, se escoge esta opción.

- Sensores de temperatura

Hay una gran variedad de tipos de sensores de temperatura. Los más destacados son los termopares y los RTD.

Los sensores de temperatura termopares están formados por dos hilos metálicos de diferentes materiales y unidos por solo 1 extremo. Como el otro extremo está libre, la diferencia de temperatura entre ambos genera un diferencial de tensión que se puede transmitir como una señal eléctrica. Este tipo de sensores pueden medir temperaturas desde -200 °C hasta casi los 1.800 °C.

Por otra parte, los sensores de temperatura de tipo RTD están formados por un material en el cual se mide su resistencia a la temperatura. Suelen ser de vidrio, cerámica, platino y níquel. Estos pueden medir desde los -200 °C hasta casi los 900 °C y son muy adecuados para el ambiente industrial, ya que prácticamente no les afecta el ruido eléctrico.

Debido a que los sensores RTD son más comunes y prácticos en entornos industriales que no los termopares, se va a mostrar 3 alternativas de mercado de estos sensores y se seleccionará la más adecuada:

TF45

Sensor TF45 de la marca Wika.

Sus características técnicas son las siguientes:

- Tipo de sensor: RTD
- Protección: IP65
- Rango de temperaturas: de -50 °C hasta 260 °C
- Precio: 15,25 €



Fig. 10.22__Sensor TF45 [32]

373-0372

Sensor de temperatura 373-0372 de la marca RS-PRO.

Las características técnicas son las siguientes:

- Tipo de sensor: RTD
- Protección: IP68
- Rango de temperaturas: de -50 °C hasta 200 °C
- Precio: 31,59 €



Fig. 10.23__Sensor 373-0372 [33]

Sitrans TS100

Sensor de temperatura Sitrans TS100 de la marca Siemens.

Las características técnicas son las siguientes:

- Tipo de sensor: RTD
- Protección: IP54

- Rango de temperaturas: de -30 °C hasta 400 °C
- Precio: 279,24 €



Fig. 10.24 __Sensor TS100 [34]

Como se puede observar, el mercado ofrece una gran variedad de sensores de temperatura RTD. Todos los mostrados cumplen con los requisitos impuestos por la aplicación.

El sensor de Siemens tiene un coste mucho mayor que los otros dos. Esto es debido a que tiene un aislamiento mineral que incrementa su precio. Pese a que es el que tiene un mayor rango de detección de temperatura, queda descartado por el coste económico.

Respecto al de RS-PRO y al de Wika, ambos ofrecen unas características similares. El de Wika tiene un rango de detección un poco más amplio, pero el de RS-PRO está mejor protegido frente al agua. En el caso de este proyecto, los motores eléctricos no están expuestos al agua ni a ningún líquido, por lo tanto, no se requiere una protección IP demasiado elevada.

Finalmente, la opción seleccionada es el sensor de temperatura TF45 de Wika.

A continuación, se calcula el gasto económico que supone la inversión inicial para implementar esta herramienta:

Elemento	Coste unitario	Unidades	Coste total
Amperímetro	130,20 €/u	21 u	2.735 €
Sensor de temperatura	15,25 €/u	21 u	321 €
Instalación de los elementos	11,8 €/h	18 h	213 €
Programación PLC	22,2 €/h	24 h	533 €
Total:			3.802 €

Tabla 10.13_Cálculo del coste económico de la aplicación

Como se puede observar en la tabla, si se realiza el estudio de los parámetros de los motores eléctricos mediante la instalación de sensores en ellos, el coste total de la inversión inicial se sitúa en 3.802 €.

En este caso, los amperímetros no tienen un consumo eléctrico y los sensores de temperatura tienen una potencia tan escasa que carece de sentido realizar un cálculo del gasto energético que supone su uso.

Mediante *drivers* con capacidad de análisis integrada

Actualmente, hay desarrollados modelos de *drivers* para motores eléctricos capaces de realizar un análisis de su estado actual proporcionando datos como la corriente, el voltaje, la temperatura o la humedad. Todos estos datos pueden ser enviados al PLC y así realizar una supervisión en tiempo real de los motores eléctricos de la instalación. Además, se puede ahorrar toda la instalación de sensores que se ha visto en el apartado anterior.

La línea de producción que se ha tomado como ejemplo monta unas controladoras de motor capaces de gestionar la velocidad y la posición de los motores eléctricos, pero no disponen de un análisis integrado.

Para simplificar el caso, se va a suponer que todos los motores eléctricos de la instalación requieren de una reguladora de corriente nominal 4 A.

A continuación, se muestran las diferentes opciones del mercado con capacidad de análisis integrada:

CMMT-AS-C4

Driver CMMT-AS-C4 con capacidad de análisis integrada de la marca Festo.

En este caso, el *driver* CMMT-AS-C4 dispone de las siguientes características:

- Corriente nominal: 4 A
- Tensión nominal: monofásica
- Potencia nominal: 0,7 kW
- Precio: 1.177 €



Fig 10.25 Driver CMMT-AS-C4 [35]

LXM32SU90M2

Controladora LXM32SU90M2 de la marca Schneider Electric.

Sus características principales son las siguientes:

- Corriente nominal: 3 A
- Tensión nominal: monofásica
- Potencia nominal: 0,5 kW
- Precio: 880 €



Fig. 10.26 __Driver LMX32SU90M2 [36]

R88D-1SN08H-ECT

Controladora R88D-1SN08H-ECT de la marca OMRON.

Las características técnicas son las siguientes:

- Corriente nominal: 4 A
- Tensión nominal: monofásica
- Potencia nominal: 0,75 kW
- Precio: 980 €



Fig. 10.27 __Driver R88D-1SN08H-ECT [37]

Una vez analizadas las tres opciones, se procede a realizar la elección de la más adecuada para la aplicación. Como ya se ha comentado, los motores eléctricos requieren de un *driver* con 4 A de corriente nominal. En el caso del de Schneider, se puede observar que tiene un corriente nominal de 3 A y, por lo tanto, queda por debajo de lo especificado. En este caso,

no va a seleccionarse esta opción, pero si realmente se estudiara la aplicación y los esfuerzos a los cuales están sometidos los motores eléctricos, quizá podría plantearse esta alternativa.

Por otra parte, el de Omron y el de Festo son muy similares en sus características. Ambos proporcionan un corriente nominal de 4 A, una potencia nominal de 0,7 kW aproximadamente y disponen de capacidad de análisis integrada. En este caso, como los dos cumplen perfectamente con las especificaciones indicadas, se seleccionará el de Omron, ya que es más económico.

A continuación, una vez seleccionado el *driver* que se va a emplear en esta aplicación, se procede a realizar el coste económico que supone la inversión inicial:

Tipo	Coste unitario	Cantidad	Coste total
Controladora	980 €/u	21 u	20.580 €
Sustitución controladoras	11,8 €/h	2 h	24 €
Programación	22,2 €/h	10 h	222 €
Total:			20.826 €

Tabla 10.14_Cálculo económico del coste de la aplicación

Como se puede observar, la inversión inicial para este caso es mucho más elevada que en el caso anterior. En cambio, el coste de personal se ve muy reducido, ya que es más simple la sustitución de estos elementos.

Por otra parte, debe calcularse el consumo energético que supone la utilización de estas controladoras. Como cada una de ellas tiene una potencia de 0,75 kW y van a funcionar durante todos los turnos diarios, su consumo será de 3.240 kWh. Teniendo en cuenta que se tienen un total de 21 unidades, el consumo total anual será de 68.040 kWh. Sabiendo que el precio de la electricidad se sitúa en 0,15 €/kWh, el coste energético de estos elementos será de 10.206 €/año.

Una vez analizadas ambas opciones (sensores y controladoras), se procede al cálculo del coste que supone un error (con parada de línea) si se instala alguno de los dos elementos. En este caso, el tiempo de detección del error e identificación del elemento defectuoso es nulo, ya que se obtiene toda la información digital de manera inmediata. La sustitución del motor eléctrico se mantiene en 20 minutos, lo que implica una pérdida de producción de 80 lotes. Por lo tanto, el coste económico de un fallo eléctrico con parada de línea es de:

Factor	Cantidad	Coste unitario	Coste total
Lotes de jabón perdidos	0 lotes	16 €/lote	0 €
Operario/a de mantenimiento	0,33 h	14,1 €/h	5 €
Lotes de jabón dejados de fabricar	20 lotes	16 €/lote	320 €
Total:			325 €

Tabla 10.15_Cálculo del coste económico de un fallo eléctrico

En este caso, el coste se sitúa en 325 €. Por lo tanto, si se supone que la tasa de fallos se mantiene en 0,00156 fallos/hora, el coste anual por estos fallos será de 1.950 €. Es decir, se obtendrá un beneficio anual de 4.779 € comparándolo con el estado actual.

Tal y como se ha comentado anteriormente, se si dota a la instalación de alguna de estas herramientas estudiadas, la tasa de fallos se verá altamente reducida y se evitarán paros en la línea de fabricación.

A continuación, se estudia el periodo de retorno de ambas opciones:

$$\text{Periodo de retorno}_{\text{Opción sensores}} = \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Ganancias anuales}} = 9,5 \text{ meses} \quad (\text{Ec. 10.21})$$

$$\text{Periodo de retorno}_{\text{Opción controladoras}} = \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Ganancias anuales} - \text{Consumo eléctrico}} = \text{Error} \quad (\text{Ec. 10.22})$$

Como se puede observar, el cálculo del periodo de retorno para la opción de las controladoras da un error. Esto es debido a que el consumo eléctrico que supone la utilización de estos elementos representa un gasto económico superior a las ganancias que se obtienen por la instalación de esta aplicación. Esto quiere decir que la inversión realizada nunca podrá recuperarse. Por lo tanto, esta opción queda definitivamente descartada y, sin lugar a duda, la opción seleccionada es la de los sensores.

10.2.2.2. Desgaste de elementos

En lo que se refiere a los actuadores eléctricos, se realizará, al igual que para los actuadores neumáticos, la instalación de sensores de posición al principio y final de la carrera. Con ello, se podrán detectar posibles desgastes en los elementos mecánicos que alteren las posiciones extremas.

A continuación, se muestra una tabla con la cantidad de sensores a instalar por cada celda:

Celda	Nº actuadores eléctricos	Nº total de sensores
1	3	6
2	4	8
3	2	4
4	5	10
5	0	0
6	2	4
7	4	8
Total: 40 sensores		

Tabla 10.16_Cálculo del número de sensores totales necesarios

Como en el apartado anterior de desgaste mecánico de los elementos neumáticos ya se ha seleccionado un tipo de sensor, se utiliza el mismo para estos actuadores, ya que su funcionamiento es exactamente igual. Por lo tanto, se procede a calcular únicamente la inversión inicial a realizar:

Elemento	Coste unitario	Unidades	Coste total
Sensor	37,68 €/u	40 u	1.507 €
Instalación de los elementos	11.8 €/h	2 h	24 €
Programación PLC	17 €/h	12 h	204 €
Total:			1.735 €

Tabla 10.17_Cálculo del coste económico de la aplicación

En este caso, la inversión inicial tiene un coste total de 1.735 €. Como la tasa de fallos para actuadores neumáticos y eléctricos es la misma, no se va a demostrar de nuevo el ahorro económico que genera esta actividad. La ganancia anual, para este caso, de incluir sensores es de 87.477 €.

Por otra parte, debe considerarse el gasto económico debido al consumo eléctrico que supone el uso de estos sensores. Conociendo que cada uno tiene una potencia de 2,8 W y funcionan ininterrumpidamente durante los dos turnos del día, el consumo total anual que generan es de 483,84 kWh. Sabiendo que el precio de la electricidad es de 0,15 €/kWh, el gasto económico total que supone su uso es de 73 €/año.

Por lo tanto, la inversión inicial tendrá el siguiente periodo de retorno:

$$\text{Periodo de retorno} = \frac{\text{Inversión a realizar}}{\text{Ganancias anuales} - \text{Gasto energético}} = 6 \text{ días} \quad (\text{Ec. 10.23})$$

Al igual que para los actuadores neumáticos, se concluye que esta aplicación es económicamente rentable y tiene un periodo de retorno de 6 días.

10.2.3. Automatización de las compras

Una de las tareas importantes dentro del mantenimiento industrial es la adquisición de los recambios. Actualmente, con la Industria 3.0, la gran parte de las empresas disponen de un almacén donde guardan aquellos elementos que son más susceptibles a fallar o a estropearse. De cada uno de ellos, se genera un *stock* de seguridad concreto en función de la cantidad que hay en funcionamiento y la gravedad de los problemas que pueden ocasionar, principalmente. Esta tarea suele realizarse en un periodo concreto del año.

Esta acción, a vistas de la Industria 4.0, puede ser optimizada con la automatización de las compras. En este apartado se pretende desarrollar todo el proceso para su implementación.

Si se consigue elaborar e implementar un sistema de mantenimiento predictivo como el que se ha comentado en los apartados anteriores, se puede conocer el estado de todos los elementos de la línea de fabricación, así como aquellos que pueden sufrir algún problema en un breve periodo de tiempo. Si esto se percibe, puede detectarse a tiempo y sustituir ese elemento defectuoso para evitar, principalmente, paradas de máquina que interrumpan la producción y, por lo tanto, reducir el beneficio de la empresa.

Por otra parte, se debe conocer el plazo de entrega que ofrecen los proveedores de todos los elementos de la línea de producción para obtener recambios.

Si mediante la instalación de sensores en todos los elementos, tanto mecánicos como eléctricos, se puede conocer el estado de estos elementos y, por lo tanto, el tiempo en el que sucederá el próximo fallo. Además, al conocer los plazos de entrega de estos productos por parte del proveedor, no es necesario generar ningún tipo de *stock* en la fábrica.

Para aclarar este concepto, se va a exponer un ejemplo. Se supone que, mediante los sensores instalados en los elementos de la línea de fabricación, se detecta que un actuador neumático tiene algo de desgaste. Según los cálculos ya estipulados e instalados en el programa del PLC, este elemento dejará de funcionar u ocasionará problemas, si sigue realizando el mismo número de ciclos diarios, en las próximas 100 horas de trabajo. Por lo tanto, el actuador neumático supondrá una parada de línea dentro de 6 días aproximadamente. Si se conoce que el proveedor puede suministrar este elemento en, por

ejemplo, 24 horas, se puede automatizar la compra para que se realice justo cuando ocurra este suceso.

Para poder realizar esta actuación, los datos de los sensores que recibe el PLC deben ser tratados de la manera adecuada. Además, este debe de estar conectado a la página web del proveedor para que ejerza las compras siempre que sea necesario.

ERP

Es conocido que todas las empresas están compuestas por diferentes departamentos. Cada uno de ellos tiene unas tareas y responsabilidades diferentes. Algunos de estos departamentos pueden ser el de ingeniería, mantenimiento, compras, recursos humanos, *marketing*, etc.

Pese a que cada uno realiza tareas totalmente distintas a los demás debe existir una cohesión y comunicación entre ellos. Por ejemplo, el departamento de ingeniería, si desarrolla un proyecto, debe tener en cuenta al departamento de mantenimiento y finanzas (entre otros) para que sea factible. Por lo tanto, las gestiones y tareas que realiza cada departamento deben estar compartidas con los demás con el fin de facilitar la comunicación y cooperación.

Para unificar todo esto, se puede implantar una herramienta ERP o *Enterprise Resource Planning* [38]. Este es un *software* encargado de unificar todos los procesos de la empresa, es decir, de todos los departamentos. Con ello, todas las personas, independientemente de su labor, trabajan sobre el mismo programa informático. Con esta metodología se consigue compartir los datos entre todos los departamentos de la empresa, facilitando así el desarrollo de proyectos y la comunicación entre personas.

El departamento de compras suele disponer de una aplicación incluida en el ERP para poder realizar las compras. Este apartado se comunica directamente con el proveedor y le informa de los productos demandados. Es común también que, en empresas que realicen la compra de *stock* en un periodo concreto del año, programen la compra mediante este *software*. Esto facilita y agiliza todo el proceso ahorrando tiempo y costes para la empresa.

Para que la automatización de las compras se pueda llevar a cabo, los datos recibidos y analizados por el PLC deben de ser comunicados al sistema de compras del ERP. De esta manera, cuando el PLC detecta algún fallo de detección por parte de los sensores en los actuadores, informará directamente al sistema de compras para ejecutar un pedido del elemento defectuoso.

Para la correcta implementación de esta herramienta, se deben tener bien identificados cada uno de los elementos con sus respectivos sensores y así realizar un pedido correcto

del producto que falla.

Al igual que en el caso de la aplicación para poder producir bajo demanda, se requiere un elemento capaz de hacer de intermediario entre el PLC y, en este caso, el ERP: una API.

La gran mayoría de sistemas de *software* ERP modernos ya incorporan una API para poder facilitar la comunicación con otros dispositivos o programas. Por lo tanto, para este caso, se va a suponer que el programa de gestión global de la empresa ya dispone de su aplicativo API.

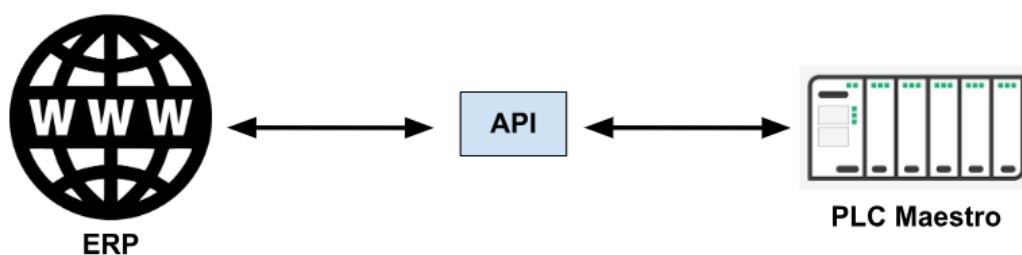


Fig. 10.28 __ Representación de la transmisión de datos

Como ya se ha estudiado en el apartado anteriormente mencionado, la manera para enviar y recibir datos desde el PLC hacia la API es el uso de un protocolo de comunicación.

Los valorados para este uso han sido OPC, MQTT y RESTful. Como la aplicación es la misma, el resultado también lo es y, por lo tanto, el protocolo de comunicación escogido es RESTful. Este es el más adecuado para este tipo de comunicaciones, ya que, al estar basado en HTML, facilita y simplifica la metodología usada, así como la codificación de los mensajes.

Las ventajas de automatizar el proceso de compra de los elementos de repuesto o sustitución de la línea de fabricación son, principalmente, el ahorro de un almacén para la realización de *stock* de material y el ahorro de tiempo que supone a los trabajadores/as encargados realizar las compras de todos los elementos necesarios.

Por otra parte, la automatización de esta tarea está limitada, en ciertos casos, por los plazos de entrega. Actualmente, debido a la crisis de los microchips, muchos componentes que integran electrónica tienen plazos de entrega anormales, mucho más elevados de los habituales.

Si se implementara esta herramienta y se detectara el próximo fallo de un elemento con electrónica, por ejemplo, el plazo de entrega sería superior al fallo total de este, suponiendo una parada de línea y una pérdida de beneficios.

Por lo tanto, en momentos poco comunes, el plazo de entrega de ciertos elementos puede ser incierto y suponer una verdadera limitación para esta automatización.

A continuación, se muestra una tabla donde se definen todos los costes de los elementos requeridos para la instalación de esta herramienta:

Tipo	Cantidad	Coste unitario	Coste total
Programación PLC	40 h	22,22 €/h	889 €
Total:			889 €

Tabla 10.18. Cálculo del coste económico de la inversión

Como se puede observar, la puesta en marcha de la aplicación no implica la compra de ningún elemento físico, ya que se dispone de todos ellos. La única acción a realizar es la programación del PLC para poder establecer una comunicación con la API del ERP, que es de menos de 900 €.

La instalación de esta herramienta tiene un difícil cálculo de su rentabilidad. Para realizar una estimación acorde con la realidad, se debería de conocer el tiempo invertido por el personal encargado introducir las compras en el sistema ERP, así como los retrasos en las entregas de componentes urgentes por realizar compras tarde.

A parte de eso, también debe calcularse el coste que supone el almacén donde se guarda el stock de seguridad. Para realizar esta estimación, se va a recoger un dato aproximado del valor del metro cuadrado de las naves industriales nacionales. El rango medio puede situarse entre 180 y 350 €/m² [39]. Para este caso, se considerará un coste de 260 €/m². Suponiendo que cada año se genera un *stock* de seguridad de 2 unidades de todos los elementos constituyentes en la línea de fabricación, puede requerir un espacio de 10 m² aproximadamente. Por lo tanto, 2.600 € considerando el coste indicado.

Por lo tanto, al implementar esta herramienta, el almacén donde se guardaba el *stock* de seguridad quedará libre, ahorrando un coste de 2.600 € a la empresa en concepto económico.

Sin tener en cuenta los otros ahorros explicados (reducción del tiempo invertido para la realización de compras, reducción de retrasos en las entregas, etc.), la inversión ya está amortizada con el coste del almacén.

En resumen, como se ha calculado en el anterior apartado, esta herramienta es totalmente rentable tanto en la parte económica como productiva. Su implementación supone un gran ahorro de costes para la empresa, así como ahorro de tiempo para ciertos empleados. Aun así, los plazos de entrega de los elementos que suministran los proveedores pueden ser

inciertos e inestables. Por esta razón, se debe de generar *stock* de aquellos productos más sensibles a cambios para que, en caso de avería, evitar el paro de la línea de fabricación.

10.3. Aumento de productividad

El aumento de la productividad en una línea de fabricación puede suponer un elevado ahorro económico. Para ello, se debe estudiar los puntos débiles de la instalación y, siempre que se pueda, optimizarlos para agilizar o simplificar la producción.

La línea de fabricación seleccionada y tomada como ejemplo dispone de muchos puntos de mejora en los que, aplicando las herramientas correctas, se aumentaría considerablemente la productividad de esta. Entre ellos, se ha decidido seleccionar el que impide que la producción esté totalmente automatizada: los operarios y operarias.

Esta línea dispone de 5 operarios y operarios por cada turno que realizan tareas que pueden ser automatizadas. La acción humana en este tipo de aplicaciones puede ser totalmente prescindible, reduciendo los costes económicos y los posibles fallos humanos.

A continuación, se va a estudiar los procesos que realiza cada operario y operaria y seleccionar la mejor manera para su automatización.

Operarios y operarias

Como se ha especificado en la descripción de la línea, esta consta de un total de 5 operarios y operarias por turno que realizan tareas esenciales para la fabricación de los productos. Cada uno de ellos realiza las siguientes tareas:

Operario/a	Número de celda	Tarea
1	1	Colocar sujeciones en la cinta transportadora
2	2	Colocar recipientes en la cinta transportadora
3	3	Rellenar el depósito de jabón
4	4	Colocar tapones en la cinta transportadora
5	7	Colocar cajas de cartón vacías y retirar los lotes completos

Tabla 10.19_ Distribución de los operarios y operarias por tarea

Todas estas acciones pueden ser automatizadas y permiten prescindir de la intervención humana. Teniendo en cuenta los costes estimados por trabajador/a anteriormente, el gasto económico anual que supone los operarios y operarias de producción son los siguientes:

Tipo	Cantidad anual	Coste unitario anual	Coste total anual
Operario/a	10 operarios/as	22.583 €/año*operario/a	225.830 €/año
Total:			225.830 €/año

Tabla 10.20_Coste económico que suponen todos los operarios y operarias anualmente

A continuación, se especifica la automatización de cada tarea para tratar de prescindir de los operarios y operarias en la línea de producción.

10.3.1. Colocación de elementos en la cinta transportadora

Para este apartado se va a realizar la automatización de la colocación de los diferentes elementos en la cinta transportadora.

Los tipos de elementos que se colocan en las cintas transportadoras son: sujeciones, recipientes y tapones. Todos ellos tienen formas y pesos distintos. Por ese motivo, deben tratarse de diferente manera.

A continuación, se procede a analizar cada tipo de elemento y cómo automatizar su colocación en la cinta.

10.3.1.1. Tapones

Los tapones de los recipientes son elementos que, gracias a sus dimensiones y forma, son fáciles de manipular. Para poder colocarlos en una cinta transportadora de manera ordenada y constante se puede disponer de alimentadores industriales.

Los alimentadores industriales son unas máquinas que se encargan de, mediante diferentes tipos de tecnologías, ordenar los materiales y suministrarlos de una manera concreta a, por lo general, una cinta transportadora.

Estos pueden utilizar diferentes tecnologías en función del tamaño o peso del material a tratar. A continuación, se exponen los más utilizados en las fábricas actualmente:

- Alimentadores de banda

Los alimentadores de banda [40] disponen de un recipiente en el que se introduce todo el material. Debajo de él, una cinta transportadora lo traslada a una velocidad determinada hacia la cinta final, que se mueve a una velocidad superior. Con ello se consigue obtener el material distribuido de una manera relativamente uniforme.

Está pensado para materiales de todo tipo de tamaños y pesos, pero con un gran número

de unidades. Tiene un suministro poco uniforme y de cantidad variable.

- Alimentadores vibratorios

Estos tipos de alimentadores [41] utilizan la vibración para distribuir uniformemente material de tamaño reducido. Estos pueden ser lineales o circulares.

Para el primer caso, se dispone de una bandeja rectangular con un extremo cerrado y el otro abierto. Encima de ella, se coloca el material y se ejerce la vibración. Gracias a ello, el material se distribuye de manera uniforme por toda la superficie y va cayendo por el extremo abierto de manera homogénea. Tiene un suministro uniforme y de cantidad variable.

En el caso de los alimentadores vibratorios circulares, se dispone de una cuba de forma cónica y paredes dotadas de un pequeño carril ascendente. El material se coloca en el centro y, cuando se hace vibrar la estructura, este se distribuye de manera uniforme por el carril lateral llegando hasta el extremo superior. Por lo tanto, este tipo de alimentadores requieren el material en la base para distribuirlo por arriba. Tiene un suministro uniforme y unitario.

- Alimentadores de tornillo

Este tipo de alimentadores [42] disponen de un tornillo sin fin que distribuye el material uniformemente en su salida. Es muy común para los materiales en polvo, líquido y granulados. Tiene un suministro uniforme y de cantidad variable.

- Alimentadores de placa

Un alimentador de placa [43] es un elemento muy parecido a una cinta transportadora para elementos especialmente voluminosos y pesados, como piedras o rocas. Por lo tanto, se asemeja al de banda, es decir, tiene un suministro poco uniforme y de cantidad variable.

Como se puede observar, existen diferentes tecnologías para los alimentadores. Cada uno de ellos trabaja mejor con materiales de unas características determinadas y tiene una entrega de material específica.

Para la distribución de los tapones, se requiere que el alimentador los disponga de una forma ordenada y unitaria. Además, todos los tapones deben estar boca abajo, para que los actuadores puedan introducirlo de la manera correcta en los recipientes.

El único tipo de alimentador que puede realizar el suministro de tapones en las cintas transportadoras con las condiciones adecuadas es el vibratorio circular.

Los alimentadores vibratorios circulares, tal y como se ha mencionado anteriormente, disponen de un carril ascendente pegado a la pared de este por donde circulan, en este caso, los tapones. Todo ello gracias a la vibración del mecanismo.

Los tapones suben por el carril en una disposición aleatoria: boca arriba o boca abajo. Para la aplicación se requiere que estos, una vez dispuestos en la cinta transportadora, estén boca arriba. Estos vibradores industriales pueden disponer de un simple mecanismo que los coloque en la orientación necesaria.



Fig. 10.29 __Ejemplo de un alimentador vibrador industrial circular [44]

Cada vibrador está construido a medida para el tipo de producto. Por lo tanto, en este caso, como se requiere la disposición de dos tipos de tapones, se deberán adquirir dos vibradores adaptados a cada uno de ellos, es decir, que dispongan de un carril con las dimensiones adecuadas y de un mecanismo final de orientación apto para ello.

Observando la velocidad de las cintas transportadoras de los tapones y la distancia entre ellos, los vibradores circulares deben depositar dos tapones en paralelo cada 3 segundos. De esta manera, todo se verá sincronizado con los actuadores que los roscan y la línea fabricará con normalidad.

Existen muchos tipos de vibradores industriales estándar para dosificar diferentes productos. Aun así, tal y como se ha comentado, para este caso se requiere uno concreto que sea capaz de manipular los tapones de los cuales se dispone. Por lo tanto, es muy complicado proporcionar un coste exacto de esta herramienta.

Los vibradores circulares estándar tienen unos precios que oscilan entre 1.000 € hasta 10.000 €. Sabiendo que se requieren unos especiales y personalizados, se va a tomar el de coste más alto y se le va a aumentar un 100% por la customización. Por lo tanto, se va a fijar un precio de 20.000 € por cada vibrador.

En conclusión, los costes de inversión inicial para esta aplicación son los siguientes:

Elemento	Coste unitario	Unidades	Coste total
Vibrador circular	20.000 €/u	2 u	40.000 €
Instalación de los elementos	11.8 €/h	8 h	95 €
Total:			40.095 €

Tabla 10.21. Cálculo del coste económico de la aplicación

Como se puede observar en la tabla, la inversión inicial a realizar para la automatización de colocación de tapones en la cinta transportadora es de 40.095 €.

Además de estos costes, también deben contemplarse los correspondientes gastos energéticos, ya que los vibradores suponen un consumo eléctrico. Según lo investigado, la potencia de un vibrador circular industrial se sitúa alrededor de los 7 kW. Teniendo en cuenta que estos elementos estarán activos durante los dos turnos diarios, es decir, durante 16 h/día, y que se trabaja 270 días al año, el total de horas en activo será de 4.320h. Al igual que en apartados anteriores, el coste de la electricidad se sitúa en 0,15 €/kWh.

Finalmente, el coste anual que supone el uso de dos vibradores industriales es de 1.296 €.

Teniendo en cuenta que, si se implementa esta automatización el ahorro anual será de 2 operarios y operarias (uno/a por cada turno), las ganancias se situarán en 45.166 €/año.

El periodo de retorno de esta inversión será de:

$$\text{Periodo de retorno} = \frac{\text{Inversión a realizar}}{\text{Ganancias anuales} - \text{Gastos energéticos}} = 333 \text{ días} \quad (\text{Ec. 10.24})$$

10.3.1.2. Sujeciones

Por otra parte, se deben colocar las sujeciones en sus respectivas cintas transportadoras. Estos elementos son de un tamaño y peso superiores a los tapones y, por lo tanto, se tratarán de una manera diferente.

Las sujeciones de los recipientes de jabón son elementos que se reutilizan durante todo el proceso de fabricación, es decir, cuando finalizan la última celda, son introducidas a la línea en la primera celda.

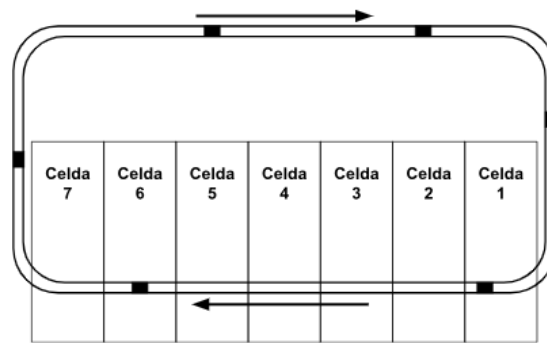


Fig. 10.30 __ Representación de la distribución de las celdas

Como se ha descrito al inicio del trabajo, la primera celda consiste en la colocación de las diferentes sujeciones en los transportines. Como la línea de montaje dispone de dos tipos de recipientes y las sujeciones también están adaptadas a ellos, se dispone también de dos tipos de sujeciones diferentes. Actualmente, cada tipo de sujeción es colocada por un operario/a en su respectiva cinta transportadora para llevarla a la celda.

Como se realizan series de 5 recipientes de cada tipo consecutivamente y, en este caso, las cintas transportadoras tienen la capacidad de parar su movimiento, el operario u operaria encargado de posicionar estos elementos en la cinta lo hace con una frecuencia de 1,5 segundos durante 5 veces para cada tipo de sujeción. Es decir, en un primer momento, empieza a colocar sujeciones de color negro en la cinta transportadora de la derecha cada 1,5 segundos. Cuando coloca 5 de ellas, realiza la misma operación con las de color gris, pero colocándolas en la cinta izquierda. Luego empieza de nuevo el proceso.

El movimiento que debe realizar el operario/a es el siguiente:

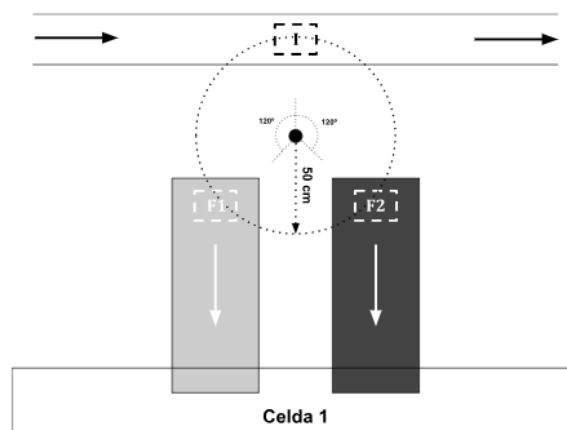


Fig. 10.31 __ Representación de las distancias de trabajo del operario/a

El dibujo indica las posiciones iniciales y finales de las sujeciones, así como las distancias. En la parte superior, se ha ilustrado la cinta que transporta todos transportines que, en este caso, están siendo llevados al inicio de la celda número 1. Como se ha comentado anteriormente, estos llevan consigo las sujeciones al salir de la última celda.

Con una letra "I" y remarcado en un cuadrado con líneas discontinuas se ha indicado la posición inicial de la sujeción antes de ser incluida de nuevo en la primera celda. De la misma manera, con las letras "F1" y "F2" remarcados con un recuadro blanco de líneas discontinuas se han indicado las dos posibles posiciones finales, es decir, la colocación en las cintas transportadoras. El rango de movimiento describe un círculo máximo de medio metro de radio.

Los parámetros y condiciones de esta tarea son los siguientes:

- Peso del transportín: 0,5 kg
- Carga desplazada de "I" a "F1"/"F2": 0,5 kg
- Carga desplazada de "F1"/"F2" a "I": 0 kg
- Tiempo agarrar transportín: 0,2 s
- Tiempo soltar transportín: 0,2 s
- Tiempo de desplazamiento de "I" a "F1"/"F2": 0,6 s
- Tiempo de desplazamiento de "F1"/"F2" a "I": 0,5 s

A continuación, se procede a calcular la distancia de desplazamiento desde "I" hacia las posiciones "F1" y "F2".

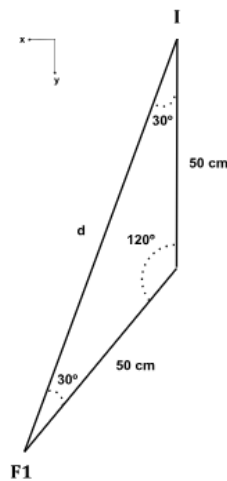


Fig. 10.32_ Representación del cálculo de distancias

Sabiendo las distancias y el ángulo indicadas en el dibujo, se puede proceder al cálculo de la distancia entre el punto I y el F1 anotada como "d". Los datos conocidos son los siguientes:

$$a = b = 50 \text{ cm} \quad (\text{Ec. 10.25})$$

$$\alpha = 120^\circ \quad (\text{Ec. 10.26})$$

Teorema del coseno

$$d^2 = a^2 + b^2 - 2a \cdot b \cdot \cos(\alpha) = 7500 \quad (\text{Ec. 10.27})$$

$$d = 86,60 \text{ cm} \quad (\text{Ec. 10.28})$$

Por lo tanto, el desplazamiento total que debe de realizarse para llevar el transportín de la posición I a la F1 o F2 (ya que ambos tienen el mismo ángulo) es de 86,60 cm. Si se desglosa en la componente vertical y horizontal el resultado es el siguiente:

Desplazamiento en x

$$x = d \cdot \sin(30^\circ) = 43,3 \text{ cm} \quad (\text{Ec. 10.29})$$

Desplazamiento en y:

$$y = d \cdot \cos(30^\circ) = 75,0 \text{ cm} \quad (\text{Ec. 10.30})$$

Finalmente, la velocidad lineal requerida para el automatismo es de:

$$v_{I-F1/F2} = \frac{d}{t_{I-F1/F2}} = 144,33 \frac{cm}{s} = 1,44 \frac{m}{s} \quad (\text{Ec. 10.31})$$

$$v_{F1/F2-I} = \frac{d}{t_{F1/F2-I}} = 173,20 \frac{cm}{s} = 1,73 \frac{m}{s} \quad (\text{Ec. 10.32})$$

Y, por otra parte, la velocidad angular requerida es de:

$$\omega_{I-F1/F2} = \frac{\alpha}{t_{I-F1/F2}} = 200 \frac{g}{s} \quad (\text{Ec. 10.33})$$

$$\omega_{F1/F2-I} = \frac{\alpha}{t_{F1/F2-I}} = 240 \frac{g}{s} \quad (\text{Ec. 10.34})$$

Para automatizar esta tarea, se puede disponer de dos tipos de herramientas: robots cartesianos (pórticos) o brazos robóticos.

Un robot cartesiano es una combinación de elementos capaces de realizar movimientos en varias dimensiones llegando hasta, en general, un máximo de 3: los tres ejes cartesianos ("x", "y", "z"). Están compuestos por elementos neumáticos y/o eléctricos que accionan actuadores lineales con el fin de realizar una tarea en concreto. Son programados de fábrica, es decir, generalmente no son programables por el usuario.

Por otro lado, los brazos robóticos son conjuntos eléctricos con una amplia libertad de movimiento. Para este caso, son capaces de adquirir más de 6. Todos ellos son programables y pueden realizar una gran cantidad de tareas.

A continuación, se procede a diseñar y seleccionar un modelo de cada tipo de herramienta y comprarlos para elegir el más adecuado.

Para el diseño del robot cartesiano se va a hacer uso de la herramienta online que dispone Festo. Esto es debido a que todos los elementos de la línea de fabricación son de esta marca y el programa de cálculo es muy potente.

Para ello, accedemos al programa "Handling Guide Online". En este caso, se procede a seleccionar la opción de "Pórtico con tres ejes de movimiento 3D". A continuación, se anotan todos los datos requeridos por la aplicación.

Definición de ejes y carga útil

Definición de ejes

Tipo de accionamiento del eje

X Eléctrico: varias posiciones
Y Eléctrico: varias posiciones
Z Neumático: 2 posiciones

Carretera de trabajo necesaria

X 1000 mm
Y 1000 mm
Z 100 mm

Al indicar los datos, considere la reserva de carretera

Carga útil

Total de los pesos de unidad frontal y pieza 0.5 kg

Distancia del centro de gravedad de la masa

X 0 mm
Y 0 mm
Z 0 mm

Definición de carga útil

(1) Su unidad frontal
(2) Centro de gravedad de la masa
(3) Su pieza

Ciclo de referencia para la configuración del sistema

Desplazamiento

Desplazamiento vertical 1 en dirección Z Z1 100 0 - 100 mm
Desplazamiento horizontal en sentido XY X 433 0 - 1000 mm
Desplazamiento vertical 2 en dirección Z Z2 100 0 - 100 mm

Perfil de movimiento Traectoria sobre el terreno

Duración de ciclo

Tiempo de desplazamiento 0.8 s
Tiempo de sujeción y de espera 0.2 s
Duración de ciclo 0.8 s

Fuerza adicional en dirección Z

En punto 1 (+ a compresión, - a tracción) 0 N
En punto 2 (+ a compresión, - a tracción) 0 N

Tensión(es) de alimentación disponible(s)

Tensión nominal, alimentación de carga DC 48 V
CA 1 fase 230 V
CA trifásica 400 V

Fig. 10.33 __ Datos requeridos por la aplicación Festo [45]

El resultado obtenido del cálculo es el siguiente:

El control de viabilidad no tuvo éxito.

Con los valores indicados no se ha podido determinar ningún sistema estándar.

Los posibles motivos son:

- * La carga útil es excesiva
- * La duración del ciclo es demasiado corta

Modifique los valores introducidos o envíe una consulta. Nuestros especialistas están elaborando un sistema individual para usted. Es un placer para nosotros ponemos en contacto con usted.

Enviar consulta

OK

Fig. 10.33 __ Mensaje de error de la aplicación Festo [46]

Como se puede observar, debido a la velocidad que requiere la aplicación, no se dispone de ningún robot cartesiano capaz de cumplir con las características necesarias.

Por este motivo, se procede a la búsqueda de un brazo robótico capaz de cubrir todos los requisitos exigidos.

LR Mate 200iD/4SH

El brazo robótico LR Mate 200iD/4SH de la marca Fanuc.

Sus características técnicas son las siguientes:

- Grados de libertad: 5
- Carga máxima: 4 kg
- Alcance máximo: 0,5 m
- Velocidad máxima del eje vertical: 460 °/s
- Velocidad máxima del eje horizontal: 540 °/s
- Potencia: 0,5 kW
- Precio: 14.000 €



Fig. 10.35 __ Brazo robótico LR Mate [46]

YuMi IRB 14050

El brazo robótico YuMi IRB 14050 de la marca ABB.

Sus características técnicas son las siguientes:

- Grados de libertad: 7
- Carga máxima: 0,5 kg
- Alcance máximo: 0,559 m
- Velocidad máxima del eje vertical: 180 °/s
- Velocidad máxima del eje horizontal: 180 °/s
- Potencia: 0,17 kW

- Precio: 28.000 €



Fig. 10.36__Brazo robótico YuMi IRB [47]

UR3e

Brazo robótico UR3e de la marca Universal Robots.

Sus características técnicas son las siguientes:

- Grados de libertad: 5
- Carga máxima: 3 kg
- Alcance máximo: 0,5 m
- Velocidad máxima del eje vertical: 280 °/s
- Velocidad máxima del eje horizontal: 300 °/s
- Potencia: 0,5 kW
- Precio: 16.000 €



Fig. 10.37 _Brazo robótico UR3e [48]

Como se puede observar en el estudio de los diferentes brazos robóticos seleccionados, el de la compañía ABB es el de precio más elevado y, además, no cumple estrictamente con los requerimientos de velocidades angulares o de rotación. Por lo tanto, esta alternativa queda totalmente descartada.

Si se comparan los otros dos, aunque ambos cumplen con todos los requerimientos, se comprueba que el de FANUC es más económico que el de Universal Robots. Por lo tanto, ya que los dos proporcionan unos comportamientos similares, se selecciona el de FANUC por disponer de un precio más bajo.

A continuación, una vez seleccionado el componente más adecuado, se procede a comprobar la viabilidad económica de esta aplicación. Para ello, en primera instancia, se va a calcular el coste total de su implementación.

Tipo	Coste unitario	Unidades	Coste total
Brazo robótico	14.000 €/u	1 u	14.000 €
Instalación física del brazo robótico	11,8 €/h	4 h	47 €
Programación del brazo robótico	22,2 €/h	16 h	355 €
Total:			14.402 €

Tabla 10.22 _Cálculo del coste económico de la aplicación

Como se puede observar en los cálculos realizados, el coste total de implementación de la herramienta se sitúa en 14.402 €.

También se debe considerar el consumo eléctrico que supone el uso del robot. Conociendo que tiene una potencia de 0,5 kW y va a estar activo durante los dos turnos del día, su

consumo anual será de 2.160 kWh. Si el precio de la electricidad es de 0,15 €/kWh, el coste económico anual del uso de este robot será de 324 €/año.

Teniendo en cuenta que el coste total del operario/a que realiza esta tarea de manera manual es de 45.166 €/año, la inversión en esta aplicación tendrá el siguiente periodo de retorno:

$$\text{Periodo de retorno} = \frac{\text{Coste inversión}}{\text{Ganancias anuales} - \text{Costes energéticos}} = 116 \text{ días} \quad (\text{Ec. 10.35})$$

10.3.1.3. Recipientes

El caso de la colocación de los recipientes en la cinta transportadora correspondiente difiere de los dos tratados anteriormente. Esto es debido a que es un elemento de unas dimensiones y peso mayor a los tapones y, a su vez, es un consumible a diferencia de los transportines.

Los dos tipos de recipientes son colocados en la misma cinta sin seguir ningún orden en concreto, ya que, cuando el manipulador eléctrico los gestiona, detecta mediante la visión artificial cuál debe seleccionar. La única condición en la colocación es que todos ellos estén paralelos al movimiento y con el orificio por delante.

El sistema de posicionamiento actual es poco eficiente, pero muy práctico para el operario/a. La línea de fabricación funciona produciendo en lotes de 5 tipos de jabón. Los recipientes los deposita el trabajador/a de una manera aleatoria en la cinta transportadora, sin seguir un orden en concreto. Esto facilita la tarea al operario/a, ya que no debe pensar en qué recipiente colocarlo, pero, por otro lado, es ineficiente, ya que los recipientes que no se seleccionan caen por la cinta.

A parte de automatizar esta tarea, se pretende disponer en lotes de 5 los tipos de recipientes en la cinta transportadora para evitar ineficiencias y que el manipulador final pueda cogerlos en orden.

Para poder llevar a cabo esta aplicación, se requiere de los elementos y herramientas necesarias. En este caso, se puede optar por el uso de robots o de alimentadores industriales, pero, antes de seleccionar el más adecuado, se deben estudiar todos los requerimientos.

Es conocido que los recipientes de jabón llegan en lotes de 4.000 unidades. Cada tipo de recipiente llega en una gran caja de cartón compuesta por 10 niveles de 400 unidades cada uno, todos ellos en posición vertical (Fig. 10.38).

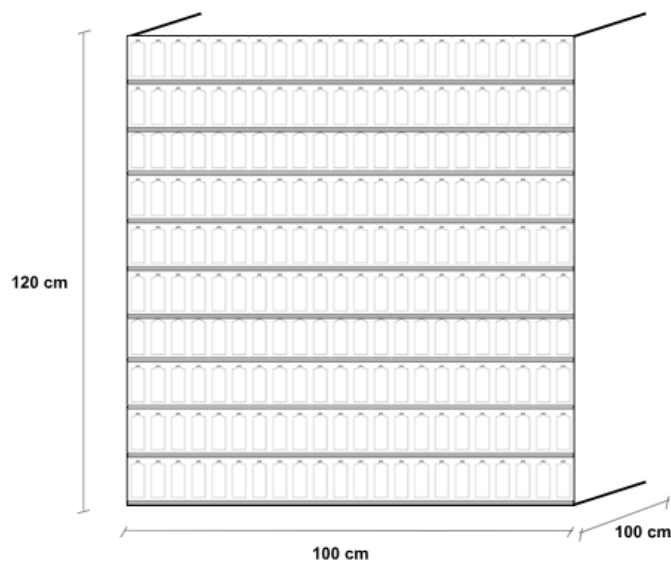


Fig. 10.38__Empaquetado de los recipientes del proveedor

Las medidas de los dos tipos de cajas son 100x100x120 cm.

El operario u operaria, situado entre la cinta transportadora de la celda y la cinta transportadora que retorna los transportines, coloca los recipientes sin ningún tipo de orden. Las distancias del mismo son las siguientes:

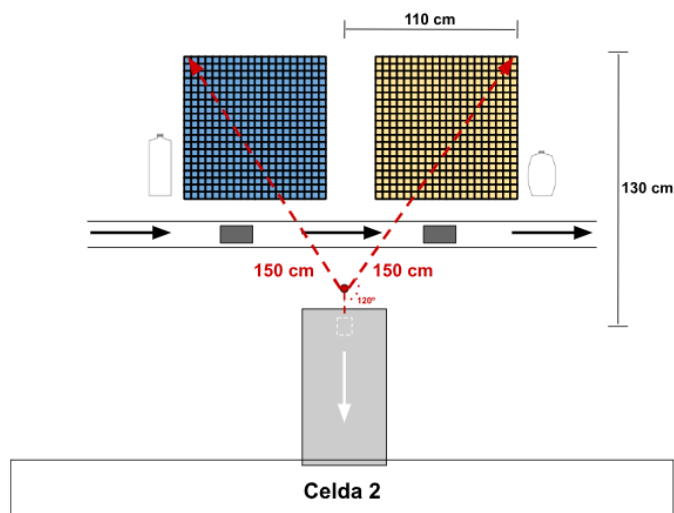


Fig. 10.39__Representación de las distancias máximas para el operario/a

En la imagen se ha representado con un punto rojo la posición del operario/a. Además, se han indicado las distancias mayores desde el operario/a hasta el recipiente más lejano, así como el ángulo que forma con la cinta. También se han indicado las distancias máximas en los respectivos ejes x e y.

Las únicas opciones para automatizar este proceso, al igual que en el ejemplo anterior, son el uso de un pórtico de 3 ejes o el uso de un brazo robótico.

En la automatización, tal y como se ha comentado, deberán colocarse los recipientes de forma ordenada y con la orientación adecuada. La separación entre 2 recipientes debe ser de 1,5 segundos.

- Pórtico

Al igual que en la anterior aplicación, teniendo en cuenta los datos de esta, se va a intentar dimensionar un robot cartesiano o pórtico de tres ejes con la herramienta de Festo "Handling Guide Online". A continuación, se proporcionan todos los datos requeridos por la herramienta.

Definición de ejes y carga útil

Definición de ejes

Tipo de accionamiento del eje

X Eléctrico: varias posiciones
Y Eléctrico: varias posiciones
Z Eléctrico: varias posiciones

Carera de trabajo necesaria

X 1100 mm
Y 1300 mm
Z 300 mm

Carera útil en dirección Z

Al indicar los datos, considere la reserva de carera

Carga útil

Total de los pesos de unidad frontal y pieza 0,10 kg

Distancia del centro de gravedad de la masa

X 0 mm
Y 0 mm
Z 0 mm

Ciclo de referencia para la configuración del sistema

Desplazamiento

Desplazamiento vertical 1 en dirección Z Z1 50 0 - 300 mm
Desplazamiento horizontal en sentido 30° X 1100 0 - 1100 mm

Desplazamiento vertical 2 en dirección Z Z2 1300 0 - 1300 mm
Y 250 0 - 300 mm

Perfil de movimiento Trajectory sobre el terreno

Duración de ciclo

Tiempo de desplazamiento 1,4 s
Tiempo de sujeción y de espera 0,1 s
Duración de ciclo 1,5 s

Fuerza adicional en dirección Z

En punto 1 (- a compresión, + a tracción) 0 N
En punto 2 (- a compresión, + a tracción) 0 N

Tensión(es) de alimentación disponible(s)

Tensión nominal, alimentación de carga DC 48 V
CA 1 fase 230 V
CA 3 fases 400 V

Definición de carga útil

(1) Su unidad frontal
(2) Centro de gravedad de la masa
(3) Su pieza

Fig. 10.40 __Datos requeridos por la aplicación Festo [45]

El resultado obtenido del cálculo es el siguiente:

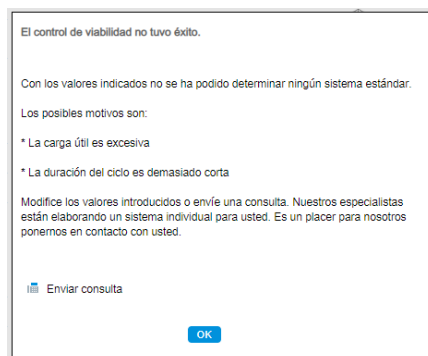


Fig. 10.41 __ Mensaje de error para el cálculo del robot cartesiano

Finalmente, el simulador no proporciona ningún dato debido a que el pórtico no es posible de construir. Por lo tanto, se debe estudiar el caso del brazo robótico.

- Brazo robótico

El brazo robótico es un elemento mucho más rápido y flexible que el robot cartesiano. Para este caso, el brazo deberá coger un recipiente y tumbarlo en la dirección correcta encima de la cinta transportadora.

Para poder seleccionar el más adecuado, se debe calcular la velocidad angular mínima necesaria. Sabiendo que, el ciclo de trabajo es de 1,5 segundos y que el ángulo a recorrer es de 120° a una distancia máxima de 150 cm, la velocidad angular mínima requerida es de:

$$\theta = \frac{2 \cdot 120^\circ}{1,5 \text{ s}} = 160 \frac{^\circ}{\text{s}} \quad (\text{Ec. 10.36})$$

Las alternativas de mercado que cumplen con estos requerimientos son las siguientes:

IRB 1520ID

Brazo robótico IRB 1520ID de la marca ABB.

Las características técnicas son las siguientes:

- Grados de libertad: 6
- Carga máxima: 4 kg
- Alcance máximo: 150 cm
- Velocidad máxima del eje vertical: $160^\circ/\text{s}$

- Velocidad máxima del eje horizontal: 320 °/s
- Potencia: 0,6 kW
- Precio: 25.422 €



Fig. 10.42__ Brazo robótico IRB 1520ID [49]

UR20

Brazo robótico UR20 de la marca Universal Robots.

Las características técnicas son las siguientes:

- Grados de libertad: 6
- Carga máxima: 20 kg
- Alcance máximo: 175 cm
- Velocidad máxima del eje vertical: 180 °/s
- Velocidad máxima del eje horizontal: 180 °/s
- Potencia: 0,5 kW
- Precio: 48.900 €



Fig. 10.43 __Brazo robótico UR20 [50]

ACR Mate 120iD

Brazo robótico ACR Mate 120iD de la marca Fanuc.

Las características técnicas son las siguientes:

- Grados de libertad: 6
- Carga máxima: 25 kg
- Alcance máximo: 183 cm
- Velocidad máxima del eje vertical: 210 °/s
- Velocidad máxima del eje horizontal: 265 °/s
- Potencia: 1 kW
- Precio: 22.000 €



Fig. 10.44 __Brazo robótico ACR Mate 120iD [51]

Una vez estudiadas las diferentes ofertas de mercado, se procede a seleccionar la más adecuada.

El brazo robótico de mayor coste es el de Universal Robots. Este tiene unas características similares a las otras opciones planteadas, pero con un precio que dobla al de sus competidores. Por lo tanto, al ser muy parecido, pero mucho más costoso, queda descartado.

Por otra parte, el robot de ABB tiene las características necesarias pero muy limitadas. Por ejemplo, sólo puede alcanzar un máximo de 150 cm. Aunque sea la especificación requerida, puede suponer un problema si existe alguna variación en el posicionamiento de las cajas de jabones. Por ese motivo y teniendo en cuenta que el robot de Fanuc cumple con todos los requerimientos necesarios para la aplicación, el de ABB queda también descartado.

Finalmente, la selección es el robot ACR Mate 120iD de Fanuc.

Una vez seleccionado la herramienta aplicada para poder llevar a cabo esta automatización, se procede a realizar el coste de la inversión inicial:

Tipo	Coste unitario	Unidades	Coste total
Brazo robótico	22.000 €/u	1 u	22.000 €
Instalación física del brazo robótico	11,8 €/h	4 h	47 €
Programación del brazo robótico	22,2 €/h	16 h	355 €
Total:			22.402 €

Tabla 10.22_ Cálculo del coste económico de la aplicación

Como se puede observar, el coste de la inversión inicial para esta aplicación es de 22.402 €.

También se debe tener en cuenta el gasto que supone el consumo eléctrico que genera el robot. Sabiendo que tiene una potencia de 1 kW y funcionará durante los dos turnos diarios, el consumo anual será de 4.320 kWh. Si el coste de la electricidad es de 0,15 €/kWh, el gasto económico anual será de 648 €/año.

Teniendo en cuenta que el coste total del operario/a que realiza esta tarea de manera manual es de 45.166 €/año, la inversión en esta aplicación tendrá el siguiente periodo de retorno:

$$\text{Periodo de retorno} = \frac{\text{Coste inversión}}{\text{Ganancias anuales} - \text{Costes energéticos}} = 184 \text{ días} \quad (\text{Ec. 10.37})$$

10.3.1.4. Relleno jabón

Para poder prescindir de un operario u operaria a la hora de rellenar el depósito de jabón se requiere de un sistema de automatización válido para ello.

Para este apartado, supondremos que el depósito de jabón de 1.000 litros se sitúa a una altura de 5 metros. Tal y como se ha comentado anteriormente, la acción de rellenar los recipientes se realiza gracias a que el depósito está en altura y, por lo tanto, no se requiere de ningún sistema de impulsión.

Para este caso, la empresa adquiere tanques al proveedor de medidas 5x1x2 metros (10 m³) con una cantidad de 10.000 litros de jabón. Estos tanques disponen de un pequeño orificio en una de sus paredes frontales para poder extraer la sustancia de una manera más sencilla.

Para elevar el jabón a una altura de 5 metros se requiere de un sistema de impulsión, concretamente, de un sistema de bombeo.

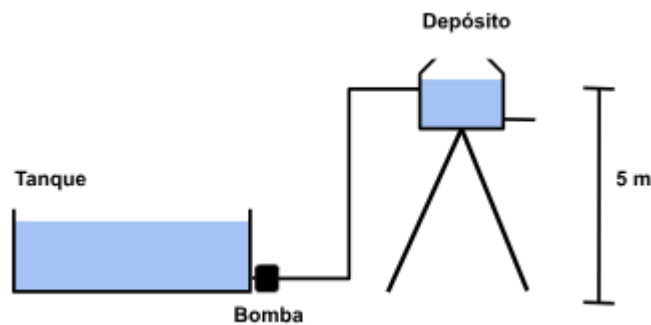


Fig. 10.45 Representación del flujo de jabón líquido

Para poder obtener la bomba más adecuada, se requiere de los siguientes parámetros:

- Altura de elevación

$$H = 5 \text{ m} \quad (\text{Ec. 10.38})$$

- Presión

$$P_{\text{Tanque}} = 1 \text{ atm} \quad (\text{Ec. 10.39})$$

$$P_{\text{Depósito}} = 1 \text{ atm} \quad (\text{Ec. 10.40})$$

- Densidad del líquido

$$\rho = 1,02 \text{ kg/l} \quad (\text{Ec. 10.41})$$

El gel de ducha está formado, mayoritariamente, por agua. Concretamente, este compuesto forma parte de entre el 60% y el 80% del jabón. A parte de ello, contiene otros ingredientes como agentes espesantes o humectantes. Estos últimos incrementan ligeramente la densidad del agua y, por ello, un valor aproximado puede situarse en 1,02 kg/l.

- Viscosidad dinámica

$$\mu = 2.000 \text{ mPa} \cdot \text{s} = 2 \text{ kg/m} \cdot \text{s} \quad (\text{Ec. 10.42})$$

- Caudal y tiempo de bombeo

Para calcular el caudal de bombeo es necesario saber el caudal requerido en la salida del depósito que llena los recipientes en la celda número 3. Así, se puede tener un dato de la velocidad con la que se vacía el depósito y saber la frecuencia con la que se tiene que rellenar para evitar que se vacíe.

Cada vez que se realiza un llenado se realiza sobre 5 recipientes. Si cada uno de ellos tiene un volumen de 400 ml, el total es de 2.000 ml o 2 l. El tiempo de ciclo de la celda 3 es de 6 segundos, pero el llenado se completa en 4 segundos. Por lo tanto, en 1 minuto de tiempo, la celda habrá rellenado un total de 50 recipientes (20 litros) en 40 segundos.

Así, el caudal requerido por la celda se sitúa en 0,5 l/s.

$$Q_{\text{celda}} = 0,5 \text{ l/s} \quad (\text{Ec. 10.43})$$

La bomba que suministra el jabón al depósito se activará cuando el volumen del depósito esté por debajo de los 100 litros. Con ello se pretende tener un margen de seguridad y evitar que el depósito se vacíe en algún momento.

Además, para evitar también el sobrellenado del depósito, se limitará a 900 litros el volumen total de jabón. Como se puede observar, en ambos casos se deja un margen de 100 litros para evitar posibles problemas.

Una vez concretados los rangos de líquido que integrará el recipiente puede observarse que sólo 800 litros serán realmente efectivos para rellenar los envases. Por ello, teniendo en cuenta el caudal, el consumo de 800 litros se realizará en el siguiente tiempo:

$$V_{efectivo} = 800 \text{ l} \quad (\text{Ec. 10.44})$$

$$t_{vacío} = \frac{V_{efectivo}}{Q_{celda}} = 1600 \text{ s} = 26,66 \text{ min} \quad (\text{Ec. 10.45})$$

Por lo tanto, cada 26,66 minutos, la bomba tendrá que activarse para rellenar el depósito hasta los 900 litros. Esta acción deberá realizarse con un caudal superior al que requiere la celda para evitar que el depósito se vacíe.

Para rellenarlo de una manera rápida y efectiva, se va a imponer el siguiente caudal:

$$Q_{bomba} = 10 \text{ l/s} \quad (\text{Ec. 10.46})$$

Con este valor, la bomba tendrá que estar activa para suministrar 800 litros de jabón durante el siguiente periodo de tiempo:

$$t_{acción} = \frac{Q_{bomba} - Q_{celda}}{V_{efectivo}} = 84,21 \text{ s} = 1,40 \text{ min} \quad (\text{Ec. 10.47})$$

- Longitud de tubo

Para este caso, se supone que el líquido tiene que recorrer un total de 9 metros desde el tanque hasta el depósito por la tubería. La sección del tubo es circular con un diámetro de 0,10 metros. Además, tal y como se observa en el dibujo (Fig. 10.45), debe de pasar por dos codos de 90° cada uno.

$$L = 9 \text{ m} \quad (\text{Ec. 10.48})$$

$$D = 0,10 \text{ m} \quad (\text{Ec. 10.49})$$

Una vez obtenidos los datos fundamentales para la selección de la bomba, se procede a calcular la potencia requerida por la misma:

- Velocidad del fluido

$$v = \frac{Q_{bomba}}{S} = \frac{Q_{bomba}}{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2} = 1,273 \text{ m/s} \quad (\text{Ec. 10.50})$$

- Pérdidas de carga

A continuación, se calculan las pérdidas de carga en los tramos rectos de la tubería (9 metros) y en los dos codos. Para ello, será necesario el uso del coeficiente de fricción f así como la constante de singularidad K_s .

Para obtener el coeficiente de fricción será necesario conocer el número de Reynolds del fluido. Para ello, se desarrolla la siguiente fórmula:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = 64,92 \quad (\text{Ec. 10.51})$$

Debido a que el número de Reynolds es inferior a 2.000, el flujo puede considerarse laminar.

A continuación, mediante el diagrama de Moody, se determinará el valor f . Como el flujo es laminar, solo se requiere del valor Re para ello.

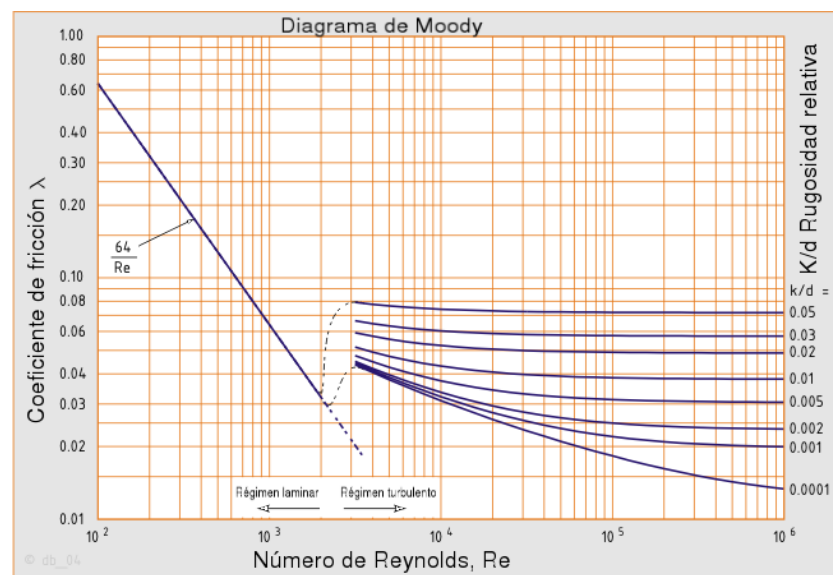


Fig. 10.46 __Diagrama de Moody [52]

Como el eje horizontal no contempla números de Reynolds menores que 100 no puede determinarse a través del gráfico el coeficiente de fricción. Aun así, tal y como se indica, al ser un flujo laminar, el coeficiente de fricción puede calcularse de la siguiente manera:

$$f = \frac{64}{Re} = 0.984 \quad (\text{Ec. 10.52})$$

A continuación, se calcula la pérdida de carga en toda la línea de la tubería (exceptuando los dos codos):

$$h_f = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{D \cdot 2 \cdot g} = 7,315 \text{ m} \quad (\text{Ec. 10.53})$$

Respecto a las pérdidas producidas en los codos, tal y como se ha comentado, se requiere de la constante de singularidad K_s para su cálculo. Esta constante se determina experimentalmente y depende, principalmente, de la geometría del codo y del régimen del flujo. Para codos de 90° el valor suele situarse entre 0,3 y 0,4. Para este proyecto, se seleccionará el valor medio:

$$K_s = 0,35 \quad (\text{Ec. 10.54})$$

A continuación, se calcula la pérdida de carga para un codo:

$$h_s = \frac{K_s \cdot v^2}{2 \cdot g} = 0,023 \text{ m} \quad (\text{Ec. 10.55})$$

- Altura total

Finalmente, con los datos calculados, puede obtenerse la altura total necesaria:

$$H_{total} = H + h_f + 2 \cdot h_s = 12,361 \text{ m} \quad (\text{Ec. 10.56})$$

- Potencia

Finalmente, se calcula la potencia requerida por la bomba para la aplicación:

$$P = \frac{Q_{Bomba} \cdot \rho \cdot g \cdot H_{total}}{\eta} = 1.546,09 \text{ W} \approx 1,55 \text{ kW} \quad (\text{Ec. 10.57})$$

El parámetro se refiere al rendimiento de la bomba, pero en este caso se ha indicado como un parámetro de seguridad para el cálculo de la potencia. Concretamente, se ha considerado un factor de seguridad del 20% o, lo que es lo mismo, un rendimiento de la bomba del 80%.

Realizando esta estimación, se puede seleccionar una bomba con algo más de potencia de la requerida para cubrir posibles fallos.

A continuación, teniendo en cuenta todos los datos calculados y los parámetros requeridos por la aplicación, se procede a mostrar posibles alternativas de mercado para la aplicación:

WPJET220-12

Bomba hidráulica de la marca SWIM.



Las características técnicas son las siguientes:

- Potencia: 2,2 kW
- Altura máxima de elevación: 62 m
- Presión máxima: 5 bar
- Caudal máximo: 10 l/s
- Temperatura del líquido: hasta 40 °C
- Precio: 160 €



Fig. 10.47 __Bomba hidráulica WPJET220 [53]

e-HMP

Bomba hidráulica de la marca LOWARA.

Las características técnicas son las siguientes:

- Potencia: 3 kW
- Altura máxima de elevación: 80 m
- Presión máxima: 8 bar
- Caudal máximo: 12 l/s
- Temperatura del líquido: hasta 90 °C
- Precio: 788 €



Fig. 10.48 __Bomba hidráulica e-HMP [54]

CS 40-160A

Bomba hidráulica de la marca DBM.

Las características técnicas son las siguientes:

- Potencia: 4 kW
- Altura máxima de elevación: 36 m
- Presión máxima: 10 bar
- Caudal máximo: 14 l/s
- Temperatura del líquido: hasta 90 °C
- Precio: 817,13 €



Fig. 10.49 __Bomba hidráulica CS 40-160A [55]

Como se puede observar, se han seleccionado 3 opciones de bombas hidráulicas con potencias y alturas de elevación diferentes para poder establecer distinción entre ellas.

La primera opción, la de SWIM es la más económica y cumple con todos los requisitos establecidos durante los cálculos. Aun así, el caudal máximo se limita a 10 l/s y, para evitar posibles problemas, se requiere algo más de lo especificado. Por ese motivo, esta opción queda descartada.

Respecto a las otras dos alternativas, ambas tienen un precio similar y unas características que cubren las especificaciones de la aplicación con creces. La de DBM, de 4 kW, puede estar sobredimensionada y tener un consumo mayor que la de LOWARA. Por ese motivo, se selecciona la bomba hidráulica de LOWARA.

Una vez seleccionada la bomba adecuada para la aplicación, se debe escoger el tipo de tubería a utilizar para poder enviar el gel del tanque al depósito.

Estas tuberías pueden ser de muchos materiales como acero, cobre, plomo, etc. Aun así, el material que menos puede interactuar con líquidos como el gel de baño es el plástico.

Para este proyecto se van a utilizar tuberías de PVC (policloruro de vinilo), ya que es muy resistente a la corrosión y a la abrasión, por lo tanto, totalmente compatible con el gel de baño.

Para este caso es necesario una cantidad de 9 metros con un diámetro de 0,10 metros. Además, se requieren dos codos de 90° cada uno.

En el caso de la empresa SERVIPLAST [56] el precio de la tubería de PVC con las características indicadas es de 1 €/m y el del codo de 90° de 2,62 €/u

Control del nivel de gel en el depósito

Tal y como se ha comentado anteriormente, el depósito tiene una capacidad de 1.000 litros, pero se va a limitar para evitar problemas futuros.

Estos límites se han definido en que, cuando el nivel de gel llegue a los 100 litros, la bomba actúe y llene el depósito y, cuando llegue a los 900 litros, deje de funcionar. Para poder detectar estos puntos, se requiere de algún tipo de sensor de nivel de fluido.

Además, para corroborar que los niveles de líquido son correctos, se deberán detectar otros dos niveles: uno en la marca de los 50 litros y otro en los 950 litros. En el caso de que la bomba no actúe cuando el gel llegue a los 100 litros, este seguirá disminuyendo hasta los 50 litros, donde se parará la instalación y se aplicará el mantenimiento necesario. El mismo caso para el llenado de jabón.

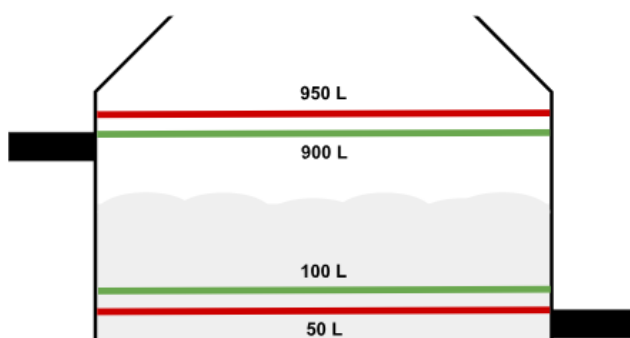


Fig. 10.50 Representación de los diferentes niveles de jabón en el depósito

Suponiendo que el depósito tiene un diámetro de 1 metro y que tiene una forma cilíndrica en todo el rango de estudio, las marcas de nivel están situadas a las siguientes alturas respecto a la base:

$$d = 1 \text{ m} \quad (\text{Ec. 10.58})$$

$$\text{Área base} = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 0,785 \text{ m}^2 \quad (\text{Ec. 10.59})$$

$$\text{Altura}_{50L} = \frac{0,05 \text{ m}^3}{\text{Área base}} = 0,063 \text{ m} = 63,694 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 10.60})$$

$$\text{Altura}_{100L} = \frac{0,10 \text{ m}^3}{\text{Área base}} = 0,127 \text{ m} = 127,388 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 10.61})$$

$$\text{Altura}_{900L} = \frac{0,90 \text{ m}^3}{\text{Área base}} = 1,146 \text{ m} = 1.146,497 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 10.62})$$

$$\text{Altura}_{950L} = \frac{0,95 \text{ m}^3}{\text{Área base}} = 1,210 \text{ m} = 1.210,191 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 10.63})$$

Para optimizar la aplicación, dentro de lo posible, se seleccionará un único sensor que sea capaz de identificar e informar sobre las 4 medidas indicadas. Por contra, se intentará evitar el uso de 4 sensores, uno para cada marca de nivel. Con esto se pretende reducir el coste del producto y el número de salidas digitales, así como facilitar la programación de los elementos.

Los tipos sensores de nivel más relevantes del mercado son los siguientes:

- De boya

Estos son los más sencillos. Disponen de un elemento que hace la función de boya y flota sobre el líquido. Cuando este alcanza un determinado nivel, se activa un interruptor que lanza una señal.

Para este tipo de sensores existen algunos con capacidad de medir diferentes niveles de líquido [57].

- Ultrasónicos

Este tipo de sensores [58] utilizan los ultrasonidos para detectar la distancia hasta la superficie más cercana. Estos calculan el tiempo que tarda el sonido desde que se emite hasta que se recibe pudiendo así calcular la distancia hasta el elemento.

Existen diferentes tipos de sensores ultrasónicos dependiendo del estado del líquido. Si este está en constante movimiento, por ejemplo, puede desviar la dirección de los ultrasonidos y afectar a la medición. En este caso, se usará un sensor ultrasónico guiado, ya que permite que las ondas reboten y no cambien de dirección.

- De conductividad

Formado por dos electrodos que cierran el circuito eléctrico cuando ambos están en contacto con el líquido. En ese momento, se realiza el envío de la señal digital. Para poder usar este sensor es necesario que el líquido sea conductor de la electricidad [59].

Algunas empresas disponen de este tipo de sensores con detección multipolo. Esto permite, mediante un solo sensor, medir hasta tres tipos de niveles en el líquido.

Los tres tipos de sensores tienen características diferentes entre sí, pero todos ellos son capaces de medir el nivel de un líquido. El de conductividad es el único que sólo puede llegar a medir 3 puntos de nivel y que, por lo tanto, para esta aplicación se requerirían dos unidades. Por lo tanto, como se quiere utilizar solo 1 producto, los sensores de nivel de conductividad quedan descartados.

El mercado ofrece una gran variedad de estos sensores. De entre todos ellos, se ha realizado una selección de uno de cada tipo para seleccionar el más adecuado:

SL1FA

Sensor de tipo boya de la empresa ELETTRROTEC.

Las características técnicas son las siguientes:

- Tipo: boya flotante
- Detección mínima: 300 mm
- Detección máxima: 2.500 mm
- Temperatura del líquido: de -10 °C hasta 80 °C
- Precio: 115 €



Fig. 10.51 __Sensor SL1FA [60]

MIC +130

Sensor de tipo ultrasónico de la marca MICROSONIC.

Las características técnicas son las siguientes:

- Tipo: ultrasónico
- Detección mínima: 50 mm
- Detección máxima: 1.300 mm
- Temperatura del líquido: de -25 °C hasta 70 °C
- Precio: 228 €



Fig. 10.51 MIC+130 [61]

Como se puede observar, ambos tipos de sensores aportan unas características similares.

El sensor de tipo boya sólo puede medir a partir de los 300 mm. La medida más pequeña es de apenas 65 mm y, por lo tanto, para instalar correctamente el sensor, se debería realizar un agujero en el tanque a tomar la medida de 300 mm como la base de este. En cambio, el sensor ultrasónico puede instalarse sin problemas en la parte alta del tanque.

Por lo tanto, pese a que el sensor de nivel de tipo boya es más económico que el ultrasónico, su instalación supondría un coste funcional y de instalación poco rentable. Así que la opción seleccionada es el MIC +30 de MICROSONIC.

Una vez analizados todos los componentes necesarios para poder automatizar el relleno de jabón, se procede a realizar una tabla con los costes de inversión que todo ello supone:

Tipo	Coste unitario	Unidades	Coste total
Bomba hidráulica	788 €/u	1 u	788 €
Tubo	1 €/m	9 m	9 €
Codo 90°	2,62 €/u	2 u	5 €
Sensor de nivel	228 €/u	1 u	228 €
Instalación	11,8 €/h	40 h	472 €
Programación PLC	22,2 €/h	10 h	222 €
Total:			1.724 €

Tabla 10.23_Cálculo del coste económico de la aplicación

La inversión inicial para llevar a cabo esta aplicación es de 1.724 €. Teniendo en cuenta que realizando esta instalación se podrá prescindir del operario u operaria, las ganancias anuales serán de 22.583 €.

Por otro lado, debe contemplarse el consumo energético generado debido al uso de la

bomba hidráulica y del sensor de nivel. En este caso, la bomba tiene una potencia de 3 kW y el sensor de nivel ultrasónico, en comparación a este, es prácticamente negligible. Por lo tanto, para este cálculo solo se tendrá en cuenta el consumo de la bomba hidráulica.

En este caso, la bomba estará activa durante 1,40 minutos cada 26,66 minutos. Esto quiere decir que, por cada turno de 8 h, la bomba trabajará durante 0,40 h y, durante un día completo, 0,8 h. Por lo tanto, el consumo anual será de 648 kWh. Sabiendo que el precio de la energía eléctrica es de 0.15 €/kWh, el coste anual será de 97 €/año.

Por lo tanto, el periodo de retorno de la inversión será:

$$\text{Periodo de retorno} = \frac{\text{Coste inversión}}{\text{Ganancias anuales} - \text{Gastos energéticos}} = 28 \text{ días} \quad (\text{Ec. 10.64})$$

10.3.2. Sustitución de cajas

La última operación realizada por un operario/a es la de retirar lotes completos y colocar cajas vacías para rellenarlas de productos acabados.

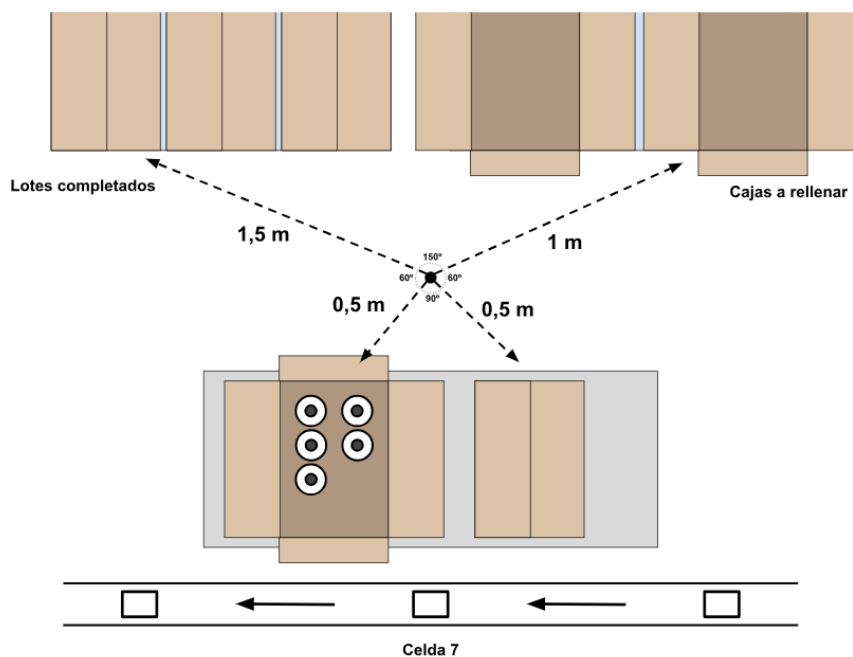


Fig. 10.52. Representación de las distancias máximas para el operario/a

En el dibujo (Fig. 10.52) se ha representado la distribución y colocación de los lotes completos y las cajas vacías. Con un punto circular negro, se ha indicado la posición actual

del operario/a cuando realiza estas acciones.

En la zona inferior, se colocan las cajas vacías para que el actuador eléctrico de la celda 7 deposite los recipientes de jabón completados en su lugar correspondiente. Cuando un lote se completa con los 8 recipientes, el operario/a lo cierra y lo coloca en la zona de “lotes completados”. A continuación, coje una caja vacía de la zona “Cajas a rellenar” para colocarla en la plataforma donde el actuador de la celda coloca los recipientes.

Los lotes de recipientes de 8 unidades son completados por el manipulador eléctrico. Como se ha comentado en un inicio, la línea de fabricación está configurada para realizar productos en lotes de 5 unidades en función del recipiente. Por lo tanto, no se rellenan las cajas de cartón consecutivamente, sino que se van rellinando en función del recipiente que aparece.

A continuación, se muestra un gráfico en el que se puede observar la cantidad de números de recipientes que tiene una caja de cartón en función del tiempo.

Formación de lotes

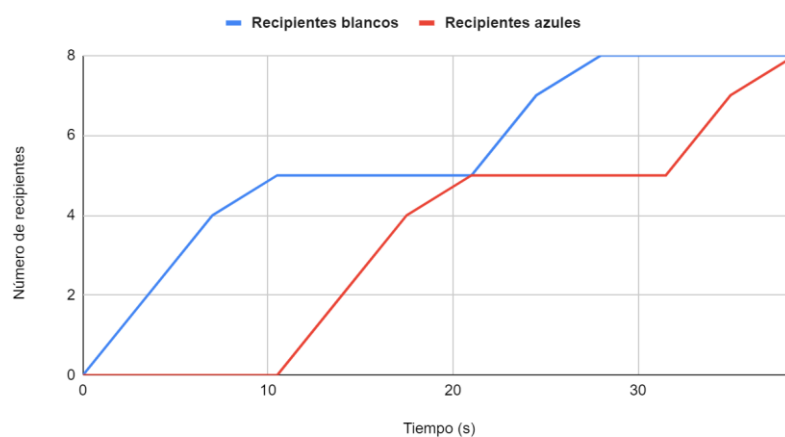


Fig. 10.53 Gráfico de la evolución de los lotes en función del tiempo

De color azul se ha representado la caja con los recipientes blancos y, de color rojo, la de los recipientes azules. Como se puede observar, cuando empieza la fabricación, únicamente una de las dos cajas se empieza a llenar hasta que se introducen 5 recipientes (10,5 s). Es en ese mismo momento en el que se empieza a llenar la otra. Si se analiza en detalle el gráfico, la caja con los recipientes blancos se completa 10,5 segundos antes que la de los recipientes azules. Este es el tiempo del que dispone el operario/a para retirar la caja completa de recipientes y colocar una caja vacía en el mismo lugar.

Los recipientes albergan un total de 400 ml de jabón. Teniendo en cuenta que la densidad

de este es de 1,02 kg/l, el peso del líquido es de 0,408 kg. Además, se considera que el conjunto del recipiente con el tapón tiene un peso aproximado de 0,1 kg. Por lo tanto, todo el conjunto pesará un total de 0,508 kg.

Las cajas de cartón tienen un peso de 0,305 kg. Por lo tanto, el lote completo pesará un total de 4,37 kg.

Una vez obtenidos todos los datos necesarios para poder automatizar la tarea, se procede a seleccionar el mejor mecanismo.

Al igual que en las anteriores aplicaciones, las únicas alternativas para automatizar estas acciones son los robots cartesianos y los brazos robóticos. Teniendo en cuenta las distancias, pesos a mover y tiempos de ciclo, se descarta automáticamente el uso de robots cartesianos. Esto es debido a que, al realizar el estudio en los casos anteriores con unas condiciones más favorables que las actuales, estos no han sido satisfactorios, ya que no han podido proporcionar ninguna alternativa.

La única opción que queda para la automatización de esta tarea es el uso de brazos robóticos.

Tal y como se ha realizado también en los casos anteriores, primero se debe realizar un cálculo de la velocidad angular máxima necesaria cuando este esté con el brazo más extendido.

En este caso, la mayor longitud (marcada en el dibujo anterior) será de 1,5 metros cargando con el lote completo, es decir, con 4,37 kg. Como se ha calculado anteriormente, la tarea de coger el lote completo, colocarlo en la zona adecuada, coger una caja vacía y colocarla en la zona correspondiente debe completarse en menos de 10,5 segundos, es decir, tendrá que recorrer un total de 360° en menos 10,5 segundos, lo que implica, como mínimo, la siguiente velocidad angular:

$$\omega = \frac{360^\circ}{10,5s} = 35 \frac{^\circ}{s} \quad (\text{Ec. 10.65})$$

Esta velocidad angular será la mínima necesaria para poder completar el ciclo sin tener en cuenta el tiempo necesario para colocar y soltar los elementos en las posiciones correspondientes. Como el tramo más complicado es el primero, ya que carga con el peso máximo, se buscará un brazo que tenga esta velocidad mínima para el peor escenario y así se podrá completar el ciclo con más facilidad.

A continuación, se muestran las alternativas que cumplen con todos los requisitos indicados:

CRX-25iA

Brazo robótico CRX-25iA de FANUC.

Sus características técnicas son las siguientes:

- Grados de libertad: 6
- Carga máxima: 25 kg
- Alcance máximo: 190 cm
- Velocidad máxima del eje vertical: 80 %/s
- Potencia: -
- Precio: 63.776 €



Fig. 10.54 __Brazo robótico CRX-25iA [62]

UR20

Brazo robótico de la marca Universal Robots.

Las características técnicas son las siguientes:

- Grados de libertad: 6
- Carga máxima: 20 kg
- Alcance máximo: 175 cm
- Velocidad máxima del eje vertical: 180 %/s
- Potencia: 0,5 kW

- Precio: 48.900 €



Fig. 10.55 __ Brazo robótico UR20 [50]

HC20DTP

Brazo robótico de la marca Yaskawa.

Las características técnicas son las siguientes:

- Grados de libertad: 6
- Carga máxima: 20 kg
- Alcance máximo: 170 cm
- Velocidad máxima del eje vertical: 80 °/s
- Potencia: 1,5 kW
- Precio: 52.220 €



Fig. 10.56 __Brazo robótico HC20DTP [63]

Una vez analizadas las alternativas presentadas, se procede a realizar la selección de la más adecuada.

Todas ellas cumplen con los requerimientos técnicos y tienen unas características parecidas. Aun así, lo que más difiere entre ellos es el coste y la velocidad de rotación. Como ya se ha comentado, la velocidad angular mínima necesaria es de 35 %/s. En el caso del robot de Universal Robots, su velocidad máxima es de 180 %/s. La elección de esta alternativa sería sobredimensionar la aplicación y, por lo tanto, queda descartado.

Entre las dos otras opciones, al tener las características tan similares, se selecciona la de menor coste, es decir, el brazo robótico de Yaskawa.

Una vez seleccionada la herramienta para la implementación de la aplicación, se procede a realizar una estimación económica de la inversión inicial a realizar:

Tipo	Coste unitario	Unidades	Coste total
Brazo robótico	52.220 €/u	1 u	52.220 €
Instalación física del brazo robótico	11,8 €/h	4 h	47 €
Programación del brazo robótico	22,2 €/h	16 h	355 €
Total:			52.622 €

Tabla 10.24_Cálculo del coste económico de la aplicación

Como se puede observar, la inversión inicial a realizar será de 52.622 €. El uso de esta herramienta implica un ahorro de costes ya que se puede prescindir de un operario/a. En este caso, la ganancia económica anual sería de 22.583 €/año.

Por otra parte, también debe considerarse el gasto económico por el uso de energía eléctrica por parte del brazo robótico. Conociendo que este tiene una potencia de 1,5 kW y va a estar en funcionamiento durante los dos turnos diarios, su consumo anual será de 6.480 kWh. Si se toma 0,15 €/kWh como el precio de la electricidad actual, el gasto

económico ascenderá a 972 €/año

Por lo tanto, el periodo de retorno de esta inversión será de:

$$\text{Periodo de retorno} = \frac{\text{Coste inversión}}{\text{Ganancias anuales} - \text{Gastos energéticos}} = 2 \text{ años y } 158 \text{ días} \quad (\text{Ec. 10.66})$$

10.4. Control de la calidad

Tal y como se ha comentado en apartados anteriores, la línea de fabricación actual genera 1 recipiente defectuoso de cada 14 fabricados, es decir, tiene un error de fabricación aproximado del 7%.

La pérdida total de beneficio debido a estos errores en la fabricación es la siguiente:

Tipo	Unidades anuales	Pérdidas totales anuales
Deshecho por fallo	728.000 u/año	720.720 €/año
Ventas perdidas	728.000 u/año	888.160 €/año
Total:		1.608.880 €

Tabla 10.25. Pérdidas totales anuales por problemas de calidad

Como se puede observar en la tabla, teniendo en cuenta los costes de fabricación que supone elaborar los productos defectuosos y la pérdida de ventas al no poder suministrarlos, las pérdidas totales ascienden a 1.608.880 € cada año

Para evitar dichas pérdidas económicas, se debe asegurar la correcta fabricación de los jabones en cada celda de la línea.

Como se puede observar en el funcionamiento de la línea de producción, los productos son desechados cuando no cumplen con la cantidad de gel correcta (400 ml). Pese a que los errores de fabricación pueden suceder en muchos puntos de la instalación, este apartado va a enfocarse en este relleno del jabón.

Para evitar que este problema suceda, se debe estudiar minuciosamente el vertido de gel en los recipientes. En la línea actual, una válvula de proceso permite o bloquea el flujo del líquido a través de la tubería durante un cierto tiempo calculado.

Tal y como se ha comentado en el anterior apartado, el tiempo de relleno de los 5 recipientes es de 4 segundos si el caudal de gel que fluye por la celda es de 0,5 l/s. Por lo tanto, la válvula encargada de gestionar el fluido está programada para abrirse durante 4

segundos para completar el proceso.

Esta programación da lugar a problemas de llenado como se puede observar en el proceso. Todo ello supone el desecho de productos defectuosos.

Las opciones disponibles para evitar este suceso son las siguientes:

10.4.1. Redistribución de las celdas

Una de las soluciones a este problema podría enfocarse en la redistribución de las celdas. En este caso, se colocaría la celda de control, es decir, la celda 5, de manera consecutiva a la de llenado del líquido (celda 3). De esta manera, se podría conocer si los recipientes contienen la cantidad de gel correcta antes de colocar los tapones.

Posteriormente, se tendría que incluir una nueva celda, similar a la número 3, para añadir gel a aquellos productos que no tengan el suficiente.

Además, se tendría que incluir también una nueva celda posterior a la anterior con un sistema habilitado para extraer el gel sobrante de los recipientes que contienen más del deseado.

Por lo tanto, se pasaría de la configuración actual:

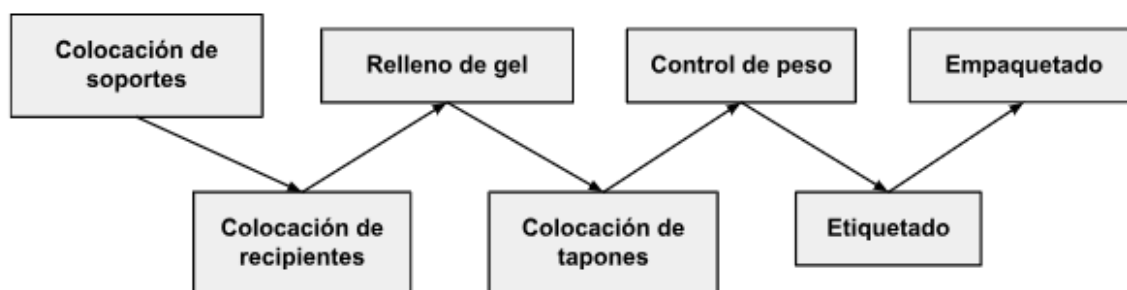


Fig. 10.57 __ Configuración actual de celdas

A la nueva configuración:

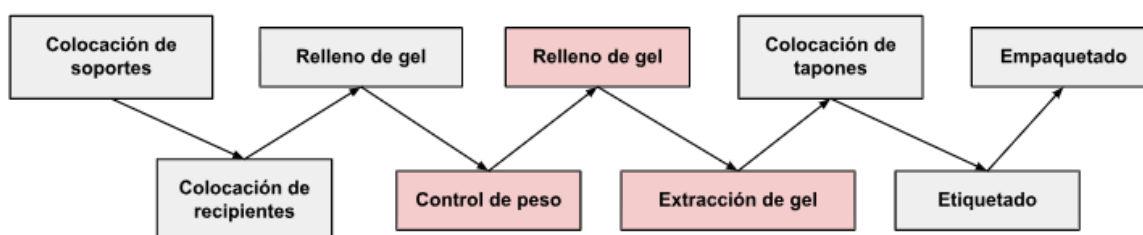


Fig. 10.58 __ Configuración de celdas propuesta

Sin necesidad de desarrollar los costes de implementación que tiene esta alternativa, se puede observar que es poco económicamente viable. Todo esto implica la reestructuración de la línea y el desarrollo de dos nuevas celdas, así como la reprogramación de todo el sistema de fabricación.

10.4.2. Reúso de los productos defectuosos

Cuando los recipientes defectuosos lleguen al final de la línea se puede considerar reusarlos para evitar perder el material. De esta manera, se vierte el jabón en el tanque de dosificación y tanto el tapón como el recipiente se limpian para poder introducirlos de nuevo en la cadena de fabricación. Con ello, se evita desechar un producto solo por el error de dosificación.

Pese a que esta es una buena opción para evitar el desecho de material y, sobre todo, de plástico, no es realmente eficiente, ya que la línea sigue fabricando productos defectuosos. Es decir, la fabricación sigue teniendo un 7% de error en la producción y, por lo tanto, no se está viendo mejorada la calidad de esta.

10.4.3. Instalación de un caudalímetro

Los caudalímetros son aparatos capaces de cuantificar la cantidad de caudal de una cierta sustancia que pasa por su interior. Estos elementos son muy útiles en múltiples aplicaciones y permiten tener un control continuo de la cantidad de material que pasa por unidad de tiempo.

Para este caso, podría instalarse un caudalímetro en la salida de la válvula reguladora para poder tener control sobre la cantidad de gel que fluye hacia los recipientes.

Tal y como se ha comentado anteriormente, la programación actual de la válvula que controla el paso del gel hacia los envases se basa en que el caudal de líquido a través de las tuberías es constante de 0,5 l/s. Esto puede suponer un problema ya que, debido a la densidad y espesor del gel, este puede fluir de diferente manera y no generar siempre un caudal de las mismas características. Por ese motivo, la instalación de un caudalímetro puede mejorar la introducción de gel si se sincroniza correctamente con la válvula de paso.

Para ello, el caudalímetro debe tener una salida analógica para poder conectarla al PLC. Este informará sobre el caudal que le atraviesa en todo momento y se podrá calcular el tiempo de apertura de la válvula de paso. El programa del PLC tratará los datos recibidos para hacer una media del caudal a cada instante y calcular la cantidad de gel (en mililitros) que se está distribuyendo. Cuando la cifra ascienda a los 2.000 ml, se cerrará la válvula de paso.

Por ejemplo, suponiendo que el caudalímetro envía un dato cada 0,4 segundos (muy poco preciso, pero suficiente para realizar el ejemplo), se obtendría la siguiente tabla a través del tiempo:

Tiempo (s)	Caudal (l/s)	Media de caudal (l/s)	Cantidad suministrada (ml)	Estado válvula
0,5	0,512	0,512	256,0	ABIERTA
1,0	0,501	0,507	507,0	ABIERTA
1,5	0,506	0,506	759,0	ABIERTA
2,0	0,488	0,502	1.004,0	ABIERTA
2,5	0,423	0,486	1.215,0	ABIERTA
3,0	0,492	0,487	1.461,0	ABIERTA
3,5	0,511	0,490	1.715,0	ABIERTA
4,0	0,512	0,493	1.972,0	ABIERTA
4,5	0,501	0,497	2.236,5	CERRADA

Tabla 10.26_Ejemplo del estado de la válvula en función del caudal

Como se puede observar en el ejemplo, la válvula finalmente suministraría una cantidad 2.236,5 ml de gel, una cantidad muy por encima de los 2.000 ml deseados. Esto provocaría que los 5 recipientes fueran defectuosos. Este resultado es debido a que el intervalo de tiempo en el que el caudalímetro envía los datos es muy elevado.

Si se realiza el mismo estudio, pero con una frecuencia de actualización de 0,001 segundos o 1000 Hz (viable para los caudalímetros actuales) y con datos de caudal aleatorios entre 0,450 y 0,550 l/s el volumen total introducido sería de 2.000,12 ml en un tiempo de 4,07 segundos. Por lo tanto, un volumen con error únicamente del 0,006 % y un tiempo que supera en 0,07 segundos el deseado. Ambos no afectan a la línea de fabricación, ya que es un desvío mínimo.

En todo caso, si se pudiera reducir la frecuencia de actualización del caudalímetro a 0 segundos, el depósito de gel sería perfecto. Como esta no es una opción viable, se van a estudiar las alternativas comerciales para obtener el mejor producto para la instalación.

Las especificaciones del producto a seleccionar son sencillas. Se requiere una salida analógica para poder enviar los datos de lectura al PLC, la temperatura del gel que fluirá estará entre 10 °C y 30 °C y debe ser lo más barato posible. El caudal máximo será inferior a 1 l/s y la viscosidad cinemática del gel es de 500 mm²/s. Hay que tener en cuenta que el gel de baño que se utiliza en el embotellamiento de los recipientes no es conductor de la

electricidad.

A continuación, se exponen diferentes tipos de alternativas de mercado para esta aplicación. Para la primera selección, se han tenido en cuenta los detalles mencionados anteriormente así que todos ellos ya cumplen con los requisitos.

Smart Measurement ALGPD

Caudalímetro ALGPD de la marca Smart Measurement.

Sus características técnicas son las siguientes:

- Salida: analógica 4-20 mA
- Medida: desplazamiento positivo
- Caudal: desde 0,3 l/s a 60.000 l/s
- Viscosidad del fluido: de 5 mm²/s a 25.000 mm²/s
- Temperatura del flujo: < 180 °C
- Precisión de la medición: +- 0,25 %
- Frecuencia: de 2 Hz a 4.000 Hz
- Precio: 600 €



Fig. 10.59 Caudalímetro ALGPD [64]

Dynasonics DFX

Caudalímetro DFX de la marca Dynasonics.

Las características principales son las siguientes:

- Salida: analógica 4-20 mA

- Medida: ultrasonidos
- Caudal: desde 0,05 l/s a 9 l/s
- Viscosidad del fluido: -
- Temperatura del flujo: < 200 °C
- Precisión de la medición: +- 2 %
- Frecuencia: 0,2 Hz
- Precio: 3.300 €



Fig. 10.60 __Caudalímetro DFX [65]

Aalborg PWM

Caudalímetro PWM de la marca Aalborg.

A continuación, se exponen sus características:

- Salida: analógica 4-20 mA
- Medida: área variable
- Caudal: de 0,4 l/s hasta 100 l/s
- Viscosidad del fluido: -
- Temperatura del flujo: hasta 70 °C
- Precisión de la medición: +- 1%
- Frecuencia: hasta 1.000 Hz

- Precio: 450 €

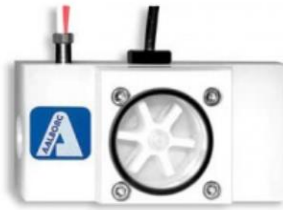


Fig. 10.61 _ Caudalímetro PWM [66]

Una vez obtenido todos los datos necesarios de las 3 alternativas planteadas, se procede a realizar la selección.

Pese a que todos cumplen con los requisitos necesarios, se debe seleccionar el que los satisfaga de mejor manera.

El DFX de Dynasonics es el de precio más elevado y, además, la frecuencia con la que se envían los datos es de solo 0,2 Hz. Los otros dos son más económicos y disponen de una frecuencia mucho más alta. Por lo tanto, esta opción queda descartada.

Entre los otros dos, pese a que el de Aalborg es algo más económico, el error de medición es más grande y el caudal mínimo está más cerca de los 0,5 l/s teóricos que se debería suministrar. Esto podría ocasionar errores de medición o, incluso, que el caudalímetro no trabajase bien. Por lo tanto, la selección final apunta hacia el ALGPD de Smart Measurements.

Para ver la rentabilidad económica de esta herramienta, se deben contemplar todos los gastos iniciales y los anuales.

La inversión económica inicial se basa en la compra del caudalímetro, su instalación y la programación del PLC:

Tipo	Cantidad	Coste unitario	Coste total
Caudalímetro	1 u	600 €/u	600 €
Instalación	16 h	11,8 €/h	189 €
Programación	2 h	22,2 €/h	44 €
Total:			833 €

Tabla 10.27_Cálculo del coste económico de la aplicación

La inversión económica inicial a realizar se calcula que es de, aproximadamente, unos 833 €.

Pese a que el estudio realizado sobre la instalación y el uso de esta herramienta muestra que el número de productos defectuosos elaborados sería nulo, realmente no lo es. Esta herramienta puede ser de gran utilidad, pero siempre pueden surgir fallos. Aun así, con la poca inversión económica que supone respecto a las pérdidas actuales, siempre que reduzca el número de productos defectuosos en, por ejemplo, un 10 %, se estaría generando una ganancia económica anual de 160.888 €. En este caso, el periodo de retorno sería de:

$$\text{Periodo de retorno} = \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Ganancias anuales}} = 2 \text{ días} \quad (\text{Ec. 10.67})$$

Por lo tanto, como se ha calculado previamente, los gastos anuales que supone los defectos de fabricación por la incorrecta introducción del gel en los recipientes son de 1.600.000 €. Si se realiza la instalación de un caudalímetro para poder tener un control de la válvula de paso, el número de productos defectuosos disminuirá de manera considerable consiguiendo así reducir las pérdidas anuales. Todo ello, con una inversión inicial de únicamente 833 €.

11. Viabilidad económica

En este apartado se pretende recoger todos los estudios económicos que se han ido desarrollando durante este proyecto para realizar un resumen y poder contemplar realmente la viabilidad económica de la industria 4.0.

A continuación, se muestra una tabla con todas las aplicaciones desarrolladas, así como sus costes de implementación y rentabilidad económica durante 5 años:

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Producción bajo demanda						
Costes	-12.654 €					
Ahorros	-	-	-	-	-	-
Mantenimiento predictivo						
Neumática						
Desgaste de elementos						
Costes	-1.128 €	-47 €	-47 €	-47 €	-47 €	-47 €
Ahorros		70.772 €	70.772 €	70.772 €	70.772 €	70.772 €
Fugas de aire						
Costes	-4.284 €	-3 €	-3 €	-3 €	-3 €	-3 €
Ahorros		2.227 €	2.227 €	2.227 €	2.227 €	2.227 €
Eléctrico						
Fallos eléctricos						
Costes	-3.802 €					
Ahorros		4.799 €	4.799 €	4.799 €	4.799 €	4.799 €
Desgaste de elementos						
Costes	-1.735 €	-73 €	-73 €	-73 €	-73 €	-73 €
Ahorros		87.477 €	87.477 €	87.477 €	87.477 €	87.477 €
Automatización de compras						
Costes	-889 €					
Ahorros	2.600 €					
Aumento de la productividad						
Colocación de elementos en las cintas transportadoras						
Tapones						

Costes	-40.095 €	-1.296 €	-1.296 €	-1.296 €	-1.296 €	-1.296 €
Ahorros		45.166 €	45.166 €	45.166 €	45.166 €	45.166 €
Sujecciones						
Costes	-14.402 €	-324 €	-324 €	-324 €	-324 €	-324 €
Ahorros		45.166 €	45.166 €	45.166 €	45.166 €	45.166 €
Recipientes						
Costes	-22.402 €	-648 €	-648 €	-648 €	-648 €	-648 €
Ahorros		45.166 €	45.166 €	45.166 €	45.166 €	45.166 €
Relleno de jabón						
Costes	-1.724 €	-97 €	-97 €	-97 €	-97 €	-97 €
Ahorros		45.166 €	45.166 €	45.166 €	45.166 €	45.166 €
Cajas de cartón						
Costes	-52.622 €	-972 €	-972 €	-972 €	-972 €	-972 €
Ahorros		45.166 €	45.166 €	45.166 €	45.166 €	45.166 €
Control de calidad						
Costes	-883 €					
Ahorros		160.888 €	160.888 €	160.888 €	160.888 €	160.888 €
Total anual	-154.020 €	548.533 €	548.533 €	548.533 €	548.533 €	548.533 €
Total acumulado		394.513 €	943.046 €	1.491.579 €	2.040.112 €	2.588.645 €

Tabla 11.1 __ Estudio económico del proyecto

Como se puede observar, la aplicación de la Industria 4.0 en una línea de fabricación tradicional es altamente eficiente, ya que supone una gran ganancia económica en un breve periodo de tiempo.

12. Planificación

La planificación del proyecto se anexa en la siguiente página.

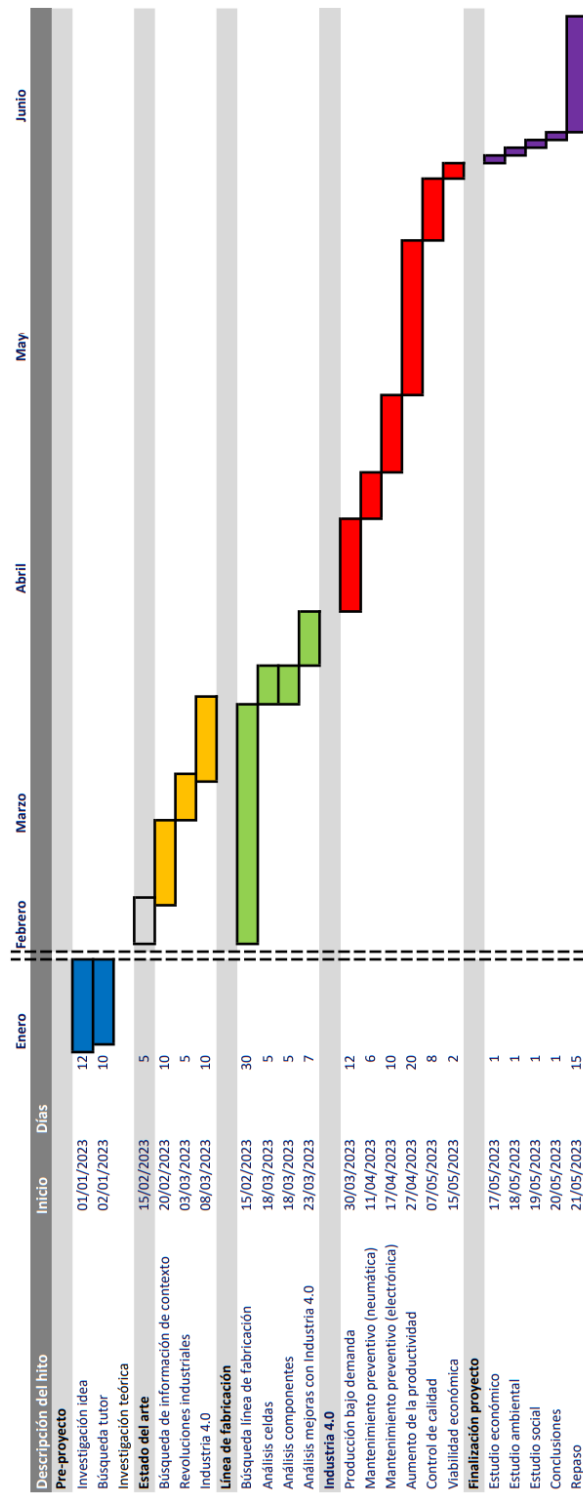


Tabla 12.1 _Planificación del diagrama Gantt

13. Estudio económico

En este apartado se pretende reflejar el impacto económico que ha implicado el desarrollo de este proyecto. Los conceptos que contemplar para el desarrollo de este punto son:

- Horas invertidas
- Consumo energético del ordenador utilizado
- Amortización del ordenador utilizado

Este proyecto ha sido desarrollado únicamente por una persona. Para simplificar el cálculo, se va a suponer que se ha invertido, de media, 2 horas diarias en el desarrollo y estudio del trabajo. Si se analiza el diagrama de Gantt desarrollado en el apartado anterior, se ha trabajado un total de 176 días, es decir, 352 horas en total.

Si se contempla un coste horario de 15 €/h por ser un ingeniero cualificado, este coste asciende a 5.280 €.

Por otra parte, se debe analizar el coste económico que ha supuesto el uso del ordenador para la realización de este proyecto. Como todo se ha realizado con el mismo, se considera un uso de 352 horas en total.

El ordenador utilizado es un portátil ASUS P1511CEA (800 € de coste) que tiene una potencia aproximada de 3.600 W. Teniendo en cuenta las horas de uso, el consumo eléctrico ha sido de 1.268 kWh aproximadamente. Conociendo que el precio de la electricidad es de 0,15 €/kWh, el coste económico asciende a 190 €.

Finalmente, si el ordenador utilizado tiene un coste de 800 € y una vida útil de 5 años, se ha amortizado, durante el transcurso del proyecto, un total de 80 € aproximadamente.

Por lo tanto, el coste total de este proyecto ha sido de 5.550 €. Si a este se le añade el IVA del 21 %, el coste asciende a 6.660 €.

Este coste calculado, en comparación al beneficio que la empresa obtiene por la implementación de todas las herramientas explicadas, es prácticamente imperceptible. Por lo tanto, se concluye que el gasto económico del desarrollo del proyecto es altamente rentable frente al proyecto.

14. Estudio ambiental

En este apartado se pretende analizar el impacto medioambiental que ha tenido el desarrollo del proyecto. Para este caso, únicamente se tiene en cuenta el consumo de energía eléctrica por el ordenador utilizado ya que no se ha gastado ningún otro recurso.

Como se ha calculado en el apartado anterior, el consumo energético de este proyecto ha sido de 950 kWh. Este consumo, si se realiza el cálculo correspondiente, supone una emisión total de 237,5 Kg de CO₂ equivalente.

Sabiendo que un árbol es capaz de absorber una media de 25 kg de CO₂ cuando crece, se tendrían que plantar un total de 10 árboles para compensar todo el CO₂ emitido durante la realización de este proyecto. Este valor puede parecer insignificante frente a otras actividades, pero, aun así, supone un gran impacto en el medio ambiente.

Por otra parte, con este proyecto se ha conseguido digitalizar y optimizar el uso de recursos en la línea de fabricación. Con todas las medidas adoptadas, se disminuye el consumo energético gracias a la implementación de dispositivos optimizados. Además, con la mejora de la calidad, se evitan desechos de plástico, como los recipientes del gel. Así mismo, con la producción bajo demanda, se evita la sobreproducción eliminando que se genere *stock* el cual posteriormente puede llegar a ser desechado.

15. Estudio social y de igualdad de género

En el mundo de la ciencia, en este caso, en concreto en el ámbito de la ingeniería, muchos colectivos se han visto excluidos. Quizá el colectivo más relevante a destacar está siendo la mujer, ya que siempre ha tenido más barreras para poder acceder a las áreas relativas a la ingeniería y a la ciencia en general. Si se concreta al presente proyecto, a la mujer se le añade otro colectivo en riesgo de exclusión social que son las personas discapacitadas físicamente, ya que durante décadas se han visto excluidos a la hora de trabajar en fábricas.

A lo largo del proyecto se ha procurado usar imágenes y lenguaje inclusivo, evitando el sexismo y el androcentrismo.

Asimismo, a lo largo del proyecto, al buscar suprimir los puestos de trabajo mediante la automatización, que ofrecen condiciones paupérrimas y sueldos exageradamente bajos, como es el caso de los operarios y operarias. Se persigue eliminar las diferencias entre colectivos, como es en este caso por motivos de nivel económico.

Los resultados del proyecto favorecen a colectivos vulnerables como podrían ser las personas discapacitadas físicamente, ya que estas dejarían de estar discriminadas para el desempeño de tareas, debido a que, con la automatización, ya no se requeriría el uso del esfuerzo físico y podrían optar a los puestos de trabajo que persiguen este avance.

Respecto a los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), que se ajustan al resultado del trabajo son los siguientes. En primer lugar, el objetivo relativo a la salud y el bienestar (3). Durante décadas los accidentes en las fábricas, las intoxicaciones e incluso las enfermedades mentales asociadas a dichos trabajos repetitivos, han dejado huella en la salud y el bienestar de los empleados. Automatizando dichos procesos, tal y como se pretende con este proyecto, se suprimen dichos puestos de trabajo, que en muchas ocasiones someten a los empleados a condiciones inhumanas. En segundo lugar, el proyecto cumple con el objetivo (5) relativo a la igualdad de género, ya que, durante toda la historia de la industria hasta hoy en día, la mujer ha sido excluida en el desempeño de estas tareas, no pudiendo, por norma general, optar a estos trabajos. Gracias a la automatización, se reducen de forma notable las diferencias entre hombres, mujeres y personas con género diferente a los clásicos, ya que pueden optar a otros puestos de trabajo alternativos como, por ejemplo, puestos de ingeniería, marketing, automatización, logística... En tercer lugar, se cumple el objetivo relativo al consumo y la producción responsables (12), ya que tal y como se expone en el proyecto, una de las opciones presentadas es la producción a demanda, para de este modo evitar el stock y la sobreproducción; fomentando, consecuentemente, el consumo y la producción responsables. Todo ello desencadenando una reducción del impacto medioambiental.

Conclusiones

Tal y como se ha comentado al inicio del proyecto, la Industria 4.0 es un concepto relativamente moderno que contempla infinidad de posibilidades.

En este proyecto se han desarrollado posibles implementaciones de diferentes aplicaciones relacionadas con la Industria 4.0. Aun así, existen muchas más posibilidades que aumentan la productividad y suponen un ahorro económico para la empresa, pero, por cuestiones de factibilidad, sólo se han podido desarrollar unas pocas. Todas las explicadas, sin embargo, se han considerado como las más necesarias y que suponen un impacto mayor en el desarrollo del producto y en la automatización de la misma.

El objetivo de este proyecto ha sido evaluar la viabilidad económica de todas aquellas aplicaciones desarrolladas en una línea de fabricación industrial relacionadas con la Industria 4.0, es decir, aplicando las nuevas tecnologías. Como se ha visto en el último apartado, se concluye que realmente tienen un gran impacto económico para la empresa la implementación de estas herramientas.

Durante todo el proyecto, se ha justificado objetivamente y de la mejor manera posible todos los cálculos desarrollados y decisiones tomadas.

En conclusión, la aplicación de la Industria 4.0 en una línea de fabricación tradicional aporta múltiples beneficios tanto productivos como económicos y, a priori, pocos inconvenientes relevantes.

Bibliografía

- [1] <<Todo sobre la Industria 4.0>>, Repsol, 12 de Febrero de 2018 [<https://www.repsol.com/es/energia-futuro/tecnologia-innovacion/cuarta-revolucion-industrial/index.cshtml>]
- [2] <<Industrial Revolution>>, History, 29 de Octubre de 2009 [<https://www.history.com/topics/industrial-revolution/industrial-revolution>]
- [3] <<The Second Industrial Revolution: The Technological Revolution>>, Richmond Vale Academy, 16 de Mayo de 2022 [<https://richmondvale.org/blog/second-industrial-revolution/>]
- [4] <<Tercera Revolución Industrial>>, Economipedia, 30 de Septiembre de 2016 [https://economipedia.com/definiciones/tercera-revolucion-industrial.html?nab=1&utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F]
- [5] <<Tercera Revolución Industrial>>, Editorial Etecé, 13 de Diciembre de 2022 [<https://concepto.de/tercera-revolucion-industrial/>]
- [6] <<8 beneficios de la Industria 4.0>>, SAP Concur, 2 de Agosto de 2021 [<https://www.concur.co/news-center/beneficios-industria-4.0>]
- [7] <<Festo Filling and Packaging Ideas>>, Sebastian Balos Tech Talk, 26 de mayo del 2022 [https://www.youtube.com/watch?v=eNT8QogI9GA&ab_channel=SebastianBalosTechTalk]
- [8] <<Festo>>, Festo [<https://www.festo.com/es/es/>]
- [9] <<Indeed>>, Indeed [<https://es.indeed.com/>]
- [10] <<Jobted>>, Jobted [<https://www.jobted.es/>]
- [11] <<Glassdoor>>, Glassdoor [<https://www.glassdoor.es/index.htm>]
- [12] <<Consulta el precio de la luz hoy>>, Tarifaluzhora [<https://tarifaluzhora.es/>]
- [13] <<¿Qué es una API?>>, AWS [<https://aws.amazon.com/es/what-is/api/>]
- [14] <<¿Cómo los protocolos de comunicación transmiten datos de manera efectiva?>>, IKUSI, Mayo del 2016 [<https://www.ikusi.com/mx/blog/protocolos-de->]

[comunicacion/#:~:text=Un%20protocolo%20de%20comunicaci%C3%B3n%20es,de%20omanera%20correcta%20y%20organizada.】](#)

- [15] <<What is OPC?>>, OPC DataHub [<https://www.opcdatahub.com/WhatIsOPC.html>]
- [16] <<What is MQTT and how does it work?>>, TechTarget, Enero de 2021 [<https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/MQTT-MQ-Telemetry-Transport>]
- [17] <<What is REST API?>>, TechTarget, Septiembre de 2020 [<https://www.techtarget.com/searcharchitecture/definition/RESTful-API>]
- [18] <<¿Qué son los Interruptores magnéticos Reed-Switch?>>, Shoptronica, [<https://www.shoptronica.com/curiosidades-tutoriales-y-gadgets/3981-que-son-los-interruptor-magnetico-reed-switch-0689593949974.html>]
- [19] <<Sensor de efecto Hall>>, BricoGeek [<https://tienda.bricogeek.com/otros-sensores/514-sensor-de-efecto-hall-us1881.html>]
- [20] <<Sensor de proximidad SDBT-MSX>>, Festo [https://www.festo.com/es/es/p/sensor-de-proximidad-id_SDBT_MSX/?page=0]
- [21] <<D-Y7K, Sensor para el detector magnético de regulación, Ranura cuadrada>>, SMC [<https://www.smc.eu/es-es/productos/d-y7k-sensor-para-el-detector-magnetico-de-regulacion-ranura-cuadrada~75455~cfg>]
- [22] <<Detector para cilindros con ranura en T con contacto Reed MR0100>>, ifm [<https://www.ifm.com/es/es/product/MR0100>]
- [23] <<Estudio de fugas>>, Holding Europeo de Compresores [
- [25] <<Cómo funcionan los presostatos y sensores digitales>>, Tameson [<https://tameson.es/pages/como-funcionan-los-presostatos-y-sensores-digitales>]

- [26] <<Sensor de presión SDE5>>, Festo [https://www.festo.com/es/es/p/sensor-de-presion-id_SDE5/?page=0]
- [27] <<IS10, Presostato, Tipo Reed>>, SMC [<https://www.smc.eu/es-es/productos/is10-presostato-tipo-reed~51991~cfg>]
- [28] <<Nuevo caudalímetro PR03>>, AIGNEP [<https://www.aignep.com/es/news/nuevo-caudalimetro-pr03/>]
- [29] <<MCR-SL-CUC-100-U>>, Phoenix Contact [<https://www.phoenixcontact.com/es-es/productos/convertidores-de-corriente-mcr-sl-cuc-100-u-2308108>]
- [30] <<Detector inductivo de anillo>>, ifm [<https://www.ifm.com/mx/es/product/I7R213>]
- [31] <<5SV8705-0KK>>, Siemens [<https://mall.industry.siemens.com/mall/es/WW/Catalog/Product/5SV87050KK>]
- [32] <<Termómetro OEM de inserción con cable>>, WIKA [https://www.wika.es/tf45_es_es.WIKA]
- [33] <<Sonda de temperatura Pt100>>, RS-PRO [<https://www.directindustry.es/prod/rs-pro/product-79967-2361491.html>]
- [34] <<Sitrans TS100, versión de cable, con aislamiento mineral>>, Siemens [<https://mall.industry.siemens.com/mall/es/WW/Catalog/Products/10168388>]
- [35] <<Regulador de servocaccionamiento>>, Festo [<https://www.festo.com/co/es/a/8143164/>]
- [36] <<Motion servo drive – Lexium 32-tensión de alimentación de una fase 115/230V>>, Schneider Electric [<https://www.se.com/es/es/product/LXM32SU90M2/motion-servo-drive-lexium-32tensi%C3%B3n-de-alimentaci%C3%B3n-de-una-fase-115-230v-0-3-0-5kw/>]
- [37] <<R88D-1SN08H-ECT>>, OMRON [<https://industrial.omron.es/es/products/R88D-1SN08H-ECT>]
- [38] <<What is ERP?>>, Microsoft [<https://dynamics.microsoft.com/en-us/erp/what-is-erp/>]
- [39] <<¿Cuánto cuesta construir una nave industrial?>>, cronoshare [<https://www.cronoshare.com/cuanto-cuesta/construir-nave-industrial>]
- [40] <<Alimentadores de Banda>>, Transportadores Universiales S.A. [https://www.tusa.es/alimentadores_banda.php]

- [41] <<¿Qué es un alimentador vibrante?>>, Talleres Losan [<https://tallereslosan.com/alimentadores-vibrantes/#:~:text=Los%20alimentadores%20vibrantes%20son%20m%C3%A1quinas,de%20producci%C3%B3n%20de%20cualquier%20industria.>]
- [42] <<Transportador de tornillo>>, Wikipedia, 3 de agosto de 2022 [https://es.wikipedia.org/wiki/Transportador_de_tornillo]
- [43] <<Alimentador de placas>>, Cintasa [<https://www.cintasa.com/productos/alimentadores/alimentador-de-placa/>]
- [44] <<Equipo vibratorio con tolva de fibra>>, MDV Sistemas de vibración [<https://www.sistemasdevibracion.com/proyecto/alimentadores-por-vibracion-para-tapon-plastico-llave-inglesa/>]
- [45] <<Handling Guide Online>>, Festo [<https://www.festo.com/es/es/a/8031049/?autoShowConfigurator=true>]
- [46] <<LR Mate 200iD/4SH>>, FANUC [<https://www.fanuc.eu/es/es/robots/p%C3%A1gina-filtro-robots/serie-lrmate/lrmate-200id-4sh>]
- [47] <<YuMi de un solo brazo – IRB 14050>>, ABB [<https://new.abb.com/products/robotics/es/robots/robots-colaborativos/yumi-portal/irb-14050-yumi-de-un-solo-brazo---robot-colaborativo>]
- [48] <<El UR3e>>, Universal Robots [<https://www.universal-robots.com/es/productos/robot-ur3/>]
- [49] <<IRB 150ID>>, ABB [<https://new.abb.com/products/robotics/robots/articulated-robots/irb-1520id>]
- [50] <<UR20>>, Universal Robots [<https://www.universal-robots.com/es/productos/ur20-robot/>]
- [51] <<ARC Mate 120iD/12L>>, FANUC [<https://www.fanuc.eu/es/es/robots/p%C3%A1gina-filtro-robots/soldadura-por-arco/arcmate-120id-12l>]
- [52] <<Diagrama de Moody>>, Wikipedia, 14 de junio de 2023 [https://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama_de_Moody]
- [53] <<Bomba de impulsión 220-12 2,2 kW con 6 m³/h elevación máx 62m succión max 10m>>, SWIM [<https://swimhome.es/es/bombas-para-piscina/bomba-de-impulsion-220-12>]

[12-22-kw-con-6-mh-elevacion-max-62m-succion-max-10m-2711.html](#)]

- [54] <<Bomba centrífuga Lowara serie e-HMP AISE-304>>, Corefluid
[<https://www.corefluid.es/product-category/bombas/bombas-centrifugas-lowara-bombas/bomba-lowara-e-hmp/>]
- [55] <<Bomba CS 40-160A Trifásica 5.5CV 4KW>>, MundoRiego
[<https://mundoriego.es/producto/bomba-cs-40-160a-trifasica-55cv-4kw/>]
- [56] <<Tubo PVC 10MM>>, Serviplast [<https://serviplast.es/tubo-pvc-10mm/>]
- [57] <<¿Qué es un sensor de nivel?>>, eicos40, [<http://www.eicos.com/datos-tecnicos/que-es-un-sensor-de-nivel/>]
- [58] <<Sensor de ultrasonido para la medición de nivel>>, Endress+Hauser
[<https://www.es.endress.com/es/instrumentacion-campo/medicion-nivel/medicion-nivel-ultrasonidos-sin-contacto>]
- [59] <<Detección de nivel por conductividad>>, Endress+Hauser
[<https://www.es.endress.com/es/instrumentacion-campo/medicion-nivel/deteccion-de-nivel-conductiva>]
- [60] <<SL1/SL2 FA>>, Eletrotec [<https://eletrotec.com/es/prodotto/sl1-sl2-fa-ta-sensores-de-nivel/>]
- [61] <<mic+ 130/IU/TC>>, Microsonic [<https://www.microsonic.de/es/sensores-de-distancia/cilindrico/micplus/sensores-est%C3%A1ndar/sensores-est%C3%A1ndar/micplus130iutc.htm>]
- [62] <<CRX-25iA>>, FANUC [<https://www.fanuc.eu/es/es/robots/p%C3%A1gina-filtro-robots/%D1%80obots-colaborativos/crx-25ia>]
- [63] <<HC20DTP>>, Yaskawa
[https://www.yaskawa.es/productos/robots/collaborative/productdetail/product/hc20dtp_17026]
- [64] <<Medidor de desplazamiento positivo de engranajes>>, SmartMeasurement
[<https://www.smartmeasurement.com/es/gear-positive-displacement-meter/>]
- [65] <<Caudalímetro ultrasónico por efecto Doppler DFX>>, Badger Meter
[<https://www.badgermeter.com/es-es/productos/medidores/medidores-de-flujo-ultrasonicos/medidor-de-flujo-ultrasonico-por-efecto-doppler-dfx-dynasonics/>]

[66] <<*PWM paddle-wheel Flow meter*>>, Aalborg [https://www.aalborg.com/pwm-paddle-wheel-flow-meter_o/64]