



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática**

# **Automatización de una estación de llenado al vacío de transformadores**

**Autor:**

**Severt Silva, Adrián**

**Tutor(es):**

**Pérez Barreiro, Cristina  
Departamento de Tecnología  
Electrónica**

**Valladolid, junio de 2020.**



*A mis padres, por todo lo que siempre han hecho y siempre harán por mí.*

*A mis amigos, por hacer más ameno este viaje que al final resulta corto.*

*A Elena, por ser mi apoyo incondicional.*

*A Cristina, por su profesionalidad, por darme la oportunidad y por su ayuda en todo momento.*



## Resumen y palabras clave

Este proyecto se fundamenta en la modernización y optimización de una de las fases más importantes en el proceso de manufacturación de transformadores. Se emplean distintas herramientas, tanto físicas como virtuales, para transformar la instalación y adaptarla a las necesidades de productividad exigidas por el mercado. La creación de un programa secuencial y un control en tiempo real a través de una pantalla táctil, sirven como cohesión para todos los cambios realizados en la estructura física de esta fase.

**Palabras clave:** Aceite | Automatización | TIA Portal | Transformadores | Vacío

## Abstract and Keywords

This project is based on the modernization and optimization of one of the most important phases in the transformer manufacturing process. Different tools, both physical and virtual, are used to transform the installation and adapt it to the productivity needs demanded by the market. The creation of a sequential program and a real-time control through a touch screen, are used as cohesion for all the changes made in the physical structure of this installation.

**Key Words:** Oil | Automation | TIA Portal | Transformers | Vacuum



# ÍNDICE

## MEMORIA

<b>1. Introducción.....</b>	<b>14</b>
<b>2. Objetivos y alcance del proyecto .....</b>	<b>15</b>
<b>3. Bases teóricas .....</b>	<b>19</b>
3.1 Transformadores .....	19
3.1.1 Descripción.....	19
3.1.2 Tipos de transformador .....	21
3.1.3 Llenado de un transformador .....	22
3.2 Aceite de transformadores.....	23
3.3 Tratamiento del aceite .....	25
3.4 Vacío de los transformadores.....	26
3.5 Transmisión del calor .....	27
3.5.1 Conducción.....	27
3.5.2 Convección .....	28
<b>4. Instalación .....</b>	<b>31</b>
4.1 Antecedentes .....	31
4.2 Descripción actual de la estación.....	32
4.2.1 Desarrollo .....	32
4.2.2 Red.....	40
4.2.3 Comunicación .....	43
4.2.4 Sensores.....	47
4.3 Problemas a solucionar.....	49
4.4 Propuesta de automatización de la instalación .....	51

4.4.1 Sensores.....	53
<b>5. Proceso de llenado .....</b>	<b>57</b>
5.1 Pasos previos .....	57
5.1.1 Traslado a la fase de llenado.....	57
5.1.2 Preparación de la cuba .....	57
5.1.3 Introducción del transformador y sellado .....	58
5.2 Funcionamiento actual de la estación de llenado .....	60
5.2.1 Etapas.....	60
5.2.2 Acciones que realiza de forma manual el operario.....	63
5.2.3 Tabla de tiempos .....	63
5.3 Automatización propuesta .....	65
5.3.1 Automatización de los pasos del proceso.....	65
5.3.2 Tabla de tiempos .....	69
5.3.3 Propuestas añadidas a la automatización.....	70
5.3.4 Modo semiautomático.....	72
5.3.5 Modo automático.....	77
<b>6. Programa de automatización .....</b>	<b>81</b>
6.1 Introducción .....	81
6.2 Tabla de variables.....	82
6.3 Programa .....	85
<b>7. Pantalla HMI .....</b>	<b>97</b>
<b>8. Estudio económico .....</b>	<b>105</b>
8.1 Coste.....	105
8.2 Amortización.....	108

9. Conclusiones .....	111
-----------------------	-----

10. Bibliografía .....	113
------------------------	-----

#### PLANOS

1. Depósito de Aceite .....	118
-----------------------------	-----

2. Tornillo de llenado.....	119
-----------------------------	-----

3. Transformador .....	120
------------------------	-----

4. Bomba de vacío .....	121
-------------------------	-----

5. Sensor de llenado 1.....	122
-----------------------------	-----

6. Sensor de llenado 2.....	123
-----------------------------	-----

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Apariencia física de un módulo de CPU de la serie S7-300 de Siemens. <i>Extraída del Manual de producto S7-300 Siemens.</i> .....	17
Figura 2. Estructura adoptada por las chapas apiladas para formar el núcleo de los transformadores. <i>Extraída de <a href="https://unicrom.com/constitucion-transformador-electrico-potencia/">https://unicrom.com/constitucion-transformador-electrico-potencia/</a></i> .....	20
Figura 3. Modelo 3D de la cuba de un transformador de potencia. <i>Elaboración propia</i> .....	21
Figura 4. Esquema del ciclo a seguir durante el proceso de llenado. <i>Elaboración propia.</i> .....	32
Figura 5. Modelo del depósito de aceite presente en el interior de la fábrica. <i>Elaboración propia.</i> .....	33
Figura 6. Modelo de la máquina de recirculación, omitiendo tuberías y cableado. <i>Elaboración propia</i> .....	34
Figura 7. Anverso y reverso de las puertas de la cámara de vacío. <i>Elaboración propia.</i> .....	35
Figura 8. Modelo de un grupo de rodillos motorizado. <i>Elaboración propia.</i> ....	36
Figura 9. Modelo de un grupo de rodillos levadizos. <i>Elaboración propia.</i> .....	36
Figura 10. Modelo de la cara posterior de la cámara de vacío. <i>Elaboración propia.</i> .....	37
Figura 11. Corte de las tuberías de extracción. <i>Elaboración propia.</i> .....	38
Figura 12. Estructura principal de la cámara de vacío. <i>Elaboración propia.</i> ....	38
Figura 13. Vista posterior de la instalación de llenado completa. <i>Elaboración propia.</i> .....	39
Figura 14. Vista anterior de la instalación de llenado. <i>Elaboración propia.</i> ....	40
Figura 15. Esquema de la información que recibe el PLC. <i>Elaboración propia.</i> .....	42
Figura 16. Estructura del bus de campo Profibus. <i>Extraído de (Ruiz &amp; Rueda, 2000)</i> .....	46
Figura 17. Modelo de una sonda PT100 con salida de 3 cables y cubierta de acero. <i>Extraído de Catálogo de componentes RS.</i> .....	48
Figura 18. Manómetro analógico positivo. <i>Extraído de Catálogo de componentes RS.</i> .....	49

Figura 19. Manómetro analógico positivo y negativo entre -1 y 3 bar. <i>Extraído de catálogo de componentes RS</i> .....	49
Figura 20. Cámara con portones que se desplazan horizontalmente y no verticalmente. <i>Elaboración propia</i> .....	52
Figura 21. Interior de una electroválvula común. <i>Elaboración propia</i> .....	53
Figura 22. Vacuostato digital con salida analógica, apto para el PLC. <i>Extraído de Catálogo de componentes RS</i> . ....	54
Figura 23. Comportamiento del haz de luz en un sensor fotoeléctrico. <i>Extraído de <a href="https://www.keyence.com.mx/ss/products/">https://www.keyence.com.mx/ss/products/</a></i> .....	54
Figura 24. Carcasa de uno de los sensores fotoeléctricos empleados, con el receptor y el emisor en el mismo dispositivo. <i>Extraído de catálogo de componentes RS</i> .....	55
Figura 25. Comportamiento del haz de luz en una barrera láser. <i>Extraído de <a href="https://www.keyence.com.mx/ss/products/">https://www.keyence.com.mx/ss/products/</a></i> .....	55
Figura 26. Modelo de la barrera láser a emplear en la salida de la cámara de vacío. <i>Extraído de catálogo de RS Componentes</i> .....	56
Figura 27. Modelo del tornillo de llenado a colocar en los transformadores previamente a su llenado. <i>Elaboración propia</i> . ....	58
Figura 28. Modelo del sensor de llenado de los transformadores con flotadores. <i>Elaboración propia</i> .....	60
Figura 29. Sensor de llenado electro-óptico. <i>Extraído de Catálogo de componentes RS</i> .....	71
Figura 30. Sensor de llenado de los transformadores actualizado con la nueva sonda electro-óptica. <i>Elaboración propia</i> .....	72
Figura 31. Diagrama de flujo del proceso semiautomático. <i>Elaboración propia</i> . ....	74
Figura 32. Diagrama de flujo del proceso automático. <i>Elaboración propia</i> . ...	79
Figura 33. Variables añadidas de forma extraordinaria para coordinar el control por pantalla. <i>Elaboración propia</i> .....	97
Figura 34. Menú principal de la pantalla de control táctil. <i>Elaboración propia</i> . ....	98
Figura 35. Pantalla vinculada al control del depósito de aceite en la pantalla de control táctil. <i>Elaboración propia</i> . ....	99

Figura 36. Pantalla vinculada al control del proceso de recirculación en la pantalla de control táctil. <i>Elaboración propia</i> .....	100
Figura 37. Pantalla destinada al control de los rodillos en la pantalla de control táctil. <i>Elaboración propia</i> .....	101
Figura 38. Pantalla destinada al control del proceso automático en la pantalla. <i>Elaboración propia</i> .....	102
Figura 39. Pantalla destinada a la supervisión del modo semiautomático en la pantalla táctil. <i>Elaboración propia</i> .....	103
Figura 40. Pantalla destinada al control del modo semiautomático en la pantalla táctil. <i>Elaboración propia</i> .....	104

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación entre los aceites para transformadores mineral y vegetal. ....	24
Tabla 2. Características físicas y químicas del aceite mineral y del aceite vegetal.....	25
Tabla 3. Direcciones habituales en MPI.....	45
Tabla 4. Tabla de tiempos del proceso manual.....	64
Tabla 5. Tabla de tiempos del proceso automatizado. ....	69
Tabla 6 Variables empleadas en el programa. ....	84
Tabla 7. Coste de los materiales necesarios para realizar la automatización. ....	105

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ley de Fourier relativa a la conducción térmica. ....	27
Ecuación 2. Ley de Fourier simplificada.....	28
Ecuación 3. Ley de enfriamiento de Newton. ....	28



**Universidad de Valladolid**



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

# MEMORIA

**Autor:**

**Severt Silva, Adrián**

**Automatización de una estación de  
llenado al vacío de transformadores**

## 1. Introducción

Este proyecto se fundamenta en el diseño de la automatización completa de una instalación industrial ya existente.

En un primer momento se planteó presentar este proyecto de forma que se estableciese separadamente aquello que ya existía en la instalación y aquello que se diseñaba e introducía. Así, se podría diferenciar claramente lo aportado con este trabajo a la producción industrial tanto a nivel físico como a nivel lógico. Sin embargo, se ha decidido cambiar la forma de presentarlo, exponiendo en primer lugar la instalación física (tanto la estructura inicial como las medidas tomadas y el resultado) y en segundo lugar la instalación lógica (referente al programa creado para manejar la producción y su control por pantalla). De esta forma, se consigue un seguimiento mucho más fácil de la información, aumentando el contraste entre la situación inicial y los cambios efectuados sobre la misma para mejorar el sistema.

Es así como se justifica la organización del trabajo, siendo el *punto 3* el referente a las bases teóricas necesarias para comprender el desarrollo del proyecto; el *punto 4* todo aquello en relación a la instalación física, sus condiciones actuales y la reforma propuesta para ser viable la automatización; y los *puntos 5, 6 y 7* los relacionados con la automatización de la instalación virtual de la estación: el programa secuencial con distintos modos de funcionamiento y el control por pantalla táctil.

Dada la situación de pandemia global generada por el COVID-19, el proyecto se ha visto relegado a un ámbito más teórico del esperado. Debido a esto, las pruebas en físico sobre la máquina no se han podido llevar a cabo, por lo que han sido necesarias distintas simulaciones y estimaciones del comportamiento de la máquina para adecuar su automatización a un proyecto razonable y funcional.

## 2. Objetivos y alcance del proyecto

Una vez introducidos los conceptos principales a desarrollar con el trabajo, se mostrará ahora la finalidad del mismo. El objetivo principal de este proyecto es la aplicación de las mejores prácticas en materia de automatización para lograr una mayor productividad en el proceso de manufacturación de transformadores de potencia, en concreto mejorando la etapa de llenado de transformadores.

Actualmente, el proceso de creación de transformadores de potencia desarrollado en esta empresa se realiza casi completamente de forma manual. La única etapa automatizada por completo se corresponde con el cortado de chapa, gracias a máquinas perfectamente cualificadas para seguir milimétricamente la hoja de ruta de cada transformador. El resto del proceso, la unión de la chapa de los núcleos, el bobinado, el montaje de las tomas de tensión... es realizado por distintos operarios, que se ayudan de la colaboración con distintas máquinas para completar sus funciones.

Una de las etapas que más coste en términos de tiempo acarrea, así como la más sensible a fallos, es el llenado de aceite de los transformadores. Se pretende, con la automatización de este proceso, disminuir el tiempo necesario para llenar los transformadores, así como minimizar la posibilidad de fallos humanos, pues todo el proceso estará controlado mediante la acción de un autómeta.

La existencia de autómetas en los entornos industriales ha permitido un aumento considerado en la productividad, así como la liberación de trabajos manuales y carga de trabajo para el operario, mejorando considerablemente las condiciones de trabajo. El autómeta, además de poder trabajar sin la supervisión de un operario (pues la probabilidad de que se produzca un fallo en la instalación debido al autómeta es prácticamente nula), cuenta con toda clase de medidas de seguridad añadidas además de aquellas que se quieran programar a mayores. Además, puede realizar distintas tareas simultáneamente o en un periodo de tiempo mucho más corto que la mano de obra humana, multiplicando la productividad por hora trabajada. Estas dos características son el principal motivo por el cual la automatización de una línea industrial siempre es recomendable.

Automatizar por completo la etapa de llenado de transformadores asegurará una mayor productividad, limitando los tiempos de producción y permitiendo que el operario realice otras acciones simultáneamente al trabajo del autómeta. Además, la flexibilidad lograda gracias al control del proceso por pantalla facilita la comunicación entre operario y autómeta, pudiendo elegir entre distintas opciones de llenado.

Se establece a continuación un compendio con los objetivos a conseguir gracias a la realización de este proyecto:

- Diseñar una posible instalación, adaptando y reutilizando todo aquello que sea necesario para comenzar la automatización.
- Realizar un estudio a conciencia de los distintos tipos de aceite utilizado para refrigerar los transformadores, así como de la forma de los mismos.
- Automatizar por completo la estación de llenado de transformadores con creación de vacío.
- Incrementar la productividad de la empresa teniendo en cuenta las limitaciones de un proceso manufacturado y en serie.
- Liberar de carga de trabajo al operario encargado de la fase de llenado, permitiendo que realice más actividades durante el tiempo de espera, maximizando la seguridad de la cámara de vacío.
- Creación de dos modos de funcionamiento para la etapa de llenado, uno automático y otro semiautomático.
- Adaptar el control de la estación para que el total de las órdenes se pueda comandar desde una pantalla.

En caso de que se cumplan todos los objetivos propuestos, la automatización de la fase de llenado, un proceso crítico en la industria de manufacturación de transformadores, responderá a una necesidad urgente e importante de manera eficaz.

Una vez mostrados los objetivos que se pretenden conseguir con la realización de este proyecto, se procede a indicar el alcance de la automatización en un entorno industrial.

Un autómeta, según el diccionario de la RAE, es una *“máquina automática programable capaz de realizar determinadas operaciones de manera autónoma y sustituir a los seres humanos en algunas tareas, en especial las pesadas, repetitivas o peligrosas; puede estar dotada de sensores, que le permiten adaptarse a nuevas situaciones.”* Tomando estrictamente esta definición, es perfectamente posible instalar un autómeta en el entorno industrial en el que vamos a trabajar.

En nuestro caso el autómeta a emplear es un autómeta de Siemens, modelo S7-300, que se observa en la *figura 1*. Este controlador lógico programable (de ahora en adelante PLC) posee una larga estela en la industria a pesar de su longevidad, pues gracias a su eficiencia y a la adaptabilidad demostrada por parte de sus desarrolladores, sigue siendo uno de los

autómatas más útiles en ciertas situaciones. Sus principales características son: posee una programación modular, por lo que sus componentes se pueden actualizar sin necesidad de variar el programa o cualquiera de las otras partes; admite la introducción de su firmware mediante micro Memory Cards, lo cual reduce el coste de mantenimiento del equipo comparado con la Memory Card estándar que había que utilizar antes; su programación se puede realizar mediante esquemas de contactos y bloques gráficos en lugar de utilizar texto, haciendo el proceso mucho más intuitivo y autodidáctico; dispone de un simulador offline; e integra seguridad (gracias a una probabilidad de fallo debido al autómata o su programación casi nula) junto a control en tiempo real, ya sea de movimiento, temperatura, presión o cualquier otra variable externa. (Soporte Industrial de Siemens, 2017)



*Figura 1. Apariencia física de un módulo de CPU de la serie S7-300 de Siemens.*

Dentro de la amplia gama de aplicaciones que presentan los autómatas en los procesos industriales, este proyecto se centrará en la automatización completa de una de las fases presente en la manufacturación de transformadores.

Al completar todos los pasos de la automatización, dispondremos en la máquina de dos tipos de procesos distintos. Se podrá realizar el llenado siguiendo un proceso semiautomatizado, en el que todos los pasos requerirán una confirmación por parte del operario a cargo de la instalación, o, por otra parte, se podrá utilizar el método totalmente automático, en el cual el autómata gestionará con total autonomía el proceso, teniendo únicamente que pulsar un botón para iniciar el proceso cuando se desee. Ambos procesos serán descritos en el capítulo *1.3 Proceso de llenado*.

El incluir al proyecto una pantalla con la que controlar todas las opciones descritas anteriormente, nos proporciona la flexibilidad necesaria en un proceso industrial, aumentando la adaptación por parte del operario a trabajar

en cualquier circunstancia que se le presente, eligiendo entre todo tipo de opciones.

Con el resultado final, se podrá escoger utilizar el proceso paso a paso o semi automático, con las pausas correspondientes entre cada una de las etapas del proceso para asegurarse de que todo avanza según lo planeado, y sus respectivas comprobaciones de seguridad. Será necesaria la presencia permanente de un operario para cumplir con éxito los objetivos de esta etapa. Por otro lado, si se escoge el proceso totalmente automático, el operario queda liberado y podrá acomodar y preparar los siguientes transformadores con sus respectivas cubas para iniciar la fase de llenado. En este último caso, la presencia del operario no es necesaria, pues con sólo ordenar la inicialización del proceso, el autómata controlará y tratará el estado y las variables del sistema de principio a fin con una posibilidad de fallo prácticamente nula.

### 3. Bases teóricas

En relación a las bases teóricas, se ha desarrollado un amplio estudio bibliográfico, recopilando información referente a los transformadores en cuanto a estas máquinas eléctricas se refiere, su composición, el aceite para transformadores y los distintos procesos de transmisión del calor que tienen lugar en el interior de estos.

En referencia a la estructura de los transformadores, se han revisado los libros correspondientes para asegurar el correcto desarrollo de la misma, comparando en distintas fuentes la composición tanto del núcleo como de los bobinados y las cubas. [1, 11, 12, 17, 20, 29, 30]

Para definir las características de los distintos tipos de aceite, así como la vida útil de un transformador en función de la temperatura que alcanza durante su empleo, se ha recurrido también a distintos artículos. [8, 10, 12, 22, 24, 25, 27]

En cuanto respecta a los procesos térmicos, se ha utilizado un libro para redactar las características propias de cada uno, adecuando el contenido útil del mismo a la situación dada en transformadores y sus cubas. [12, 18, 20]

Este proceso de búsqueda y recopilación de información ha sido esencial para asentar los conceptos teóricos, que son de conocimiento necesario para interpretar y entender correctamente el proyecto desarrollado en los siguientes puntos.

#### 3.1 Transformadores

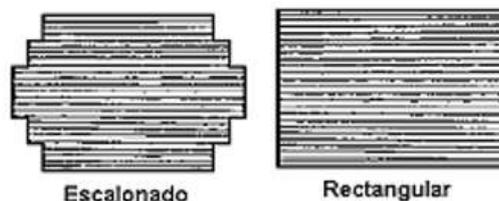
##### 3.1.1 Descripción

Un transformador es una máquina eléctrica estática destinada a funcionar con corriente alterna que permite transformar la energía eléctrica con unas magnitudes de tensión e intensidad determinadas, a otra con valores totalmente diferentes, pero siempre manteniendo la potencia y la frecuencia. El hecho de que se definan como máquinas estáticas hace referencia a que no poseen elementos móviles, como en el caso de los motores, sino que todos sus componentes realizan su trabajo sin desplazarse haciendo uso de los campos eléctricos y magnéticos, elevando con creces el rendimiento de estos dispositivos. (Kosow, 1981)

Todos los transformadores están formados por dos circuitos eléctricos y uno magnético. Los dos primeros los constituyen el arrollamiento de alta

tensión y el de baja tensión, que antaño estaban formados por hilo de cobre debido a su gran conductividad, pero hoy en día se emplea el aluminio, pues su conductividad es casi similar y es mucho más económico. Cabe destacar que, entre cada capa de aluminio, hay presente una capa de papel. Este papel posee las características adecuadas para funcionar como aislante entre cada una de las vueltas, mejorando el funcionamiento del circuito eléctrico y ayudando al aceite a penetrar con facilidad en el interior de los bobinados.

Por otra parte, el circuito magnético está formado por núcleo del transformador. Es la parte principal de la máquina eléctrica, y hoy en día también se fabrica en aluminio. En nuestro caso, los transformadores a manufacturar serán siempre trifásicos, por lo que el núcleo estará formado por tres columnas de aluminio, siendo la central un poco más alta que las otras dos. Esta parte del transformador posee dos peculiaridades características. La primera trata de su configuración, pues, aunque tiene un aspecto cilíndrico, se compone de láminas muy finas de aluminio -aproximadamente 0,5mm- y no de un bloque macizo de este elemento, evitando que se formen a lo largo de su cuerpo corrientes de Foucault y se recaliente, además de disminuir las pérdidas debidas a estas corrientes parásitas. (Acero, 1994) La segunda se debe a su disposición, pues bien es cierto que a pesar de que las láminas se cortan todas en la misma máquina, la inclinación de sus ángulos y la colocación de las perforaciones varía dependiendo del lugar que vayan a ocupar esas láminas una vez se componga completamente el núcleo. Gracias a estas pequeñas variaciones, se consigue una silueta escalonada en lugar de totalmente rectangular, como se aprecia en la *figura 2*, permitiendo una mejor refrigeración y disminuyendo por lo tanto las pérdidas en el cobre (bobinado), pues si el núcleo se encuentra a una menor temperatura, lo mismo sucede con los bobinados.



*Figura 2. Estructura adoptada por las chapas apiladas para formar el núcleo de los transformadores.*

Abstrayéndose ahora del interior de los transformadores, es necesario conocer que se encuentran contenidos en una cuba. Este armazón metálico conforma el sarcófago del cuerpo principal del transformador, pues el núcleo y los bobinados una vez introducidos en su interior, serán sellados con la tapa y sumergidos en aceite. La mayoría de las cubas (ejemplo visible en la *figura 3*)

poseen aletas para ayudar a la refrigeración interior, pues su disposición geométrica facilita la extracción del calor. Además, la elasticidad del acero de las paredes de la cuba junto con la adición de una bomba de expansión cuando sea necesario -todos los elementos mencionados se pueden ver en el apartado *Planos*- permite al transformador resistir cualquier tipo de sobrepresión interior, ya sea al introducir el aceite o durante su funcionamiento. Cabe destacar que, en nuestro caso, el proceso de llenado se lleva a cabo sometiendo el transformador al vacío, junto con la cuba y todos sus elementos, por lo que la elasticidad de la misma también impide que se produzcan abolladuras en su estructura debidas al vacío.

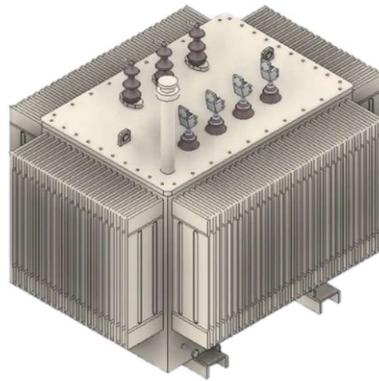


Figura 3. Modelo 3D de la cuba de un transformador de potencia.

### 3.1.2 Tipos de transformador

En la industria actual, se utilizan tres tipos diferenciados de transformadores trifásicos. Uno de ellos, el menos relevante para el proyecto actual, se denomina transformador seco. Esto se debe a que no requiere de aceite para mejorar la conductividad o la refrigeración, no se añade un aislante a mayores. En ocasiones esto acaba en transformadores quemados, pues los errores o defectos de los mismos pueden provocar cortocircuitos, chispas o cualquier otra cosa que provoque que el papel aislante comience a arder, ya que no se dispone de un líquido cubriendo los bobinados o el núcleo. Sin embargo, gracias a un nuevo sistema de encapsulado y a una avanzada técnica de bobinado para la alta tensión, se ha logrado obtener unos valores de descargas parciales inferiores a los que vienen fijados por las normas.

Los otros dos tipos de transformadores pasarán por la cámara de llenado al vacío en algún momento de su manufacturación, pues consiste en una etapa imprescindible durante su creación para asegurar el correcto funcionamiento de los mismos. Estos son:

- Transformadores de distribución: son utilizados para, como indica su nombre, la distribución de energía eléctrica a baja tensión para las ciudades o industrias. Incluyen las series de 50 a 2500 kVA. Su producción se realiza bajo las normas UNE específicas, que varían dependiendo de la serie.
- Transformadores de potencia: son aquellos cuya potencia supera los estándares de los transformadores de distribución, es decir, las 2500 kVA. Se utilizan en estaciones eléctricas e industrias con gran consumo de energía eléctrica, así como productoras de energía. Su tamaño es mucho mayor que el de los transformadores de distribución, y su producción se realiza bajo la norma UNE-EN 60076.

A mayores, existe un nuevo tipo de transformador denominado BIO, debido a que el aceite de transformador que se emplea como refrigerante y aislante está derivado de semillas vegetales.

### 3.1.3 Llenado de un transformador

El término “llenar” un transformador de potencia hace referencia tanto a llenar un equipo recién fabricado, como a rellenar de nuevo un equipo que ha sido vaciado con motivo de una revisión interna o mantenimiento.

El hecho de sumergir un transformador en aceite es necesario si se quiere mejorar su capacidad de carga, así como asegurar un buen funcionamiento a la hora de transformar energía, y alargar, en menor medida, su vida útil.

El llenado de un transformador se puede realizar *in situ*, en caso de que se llene en el mismo lugar en el que se instala, transportándolo totalmente seco hasta ese punto. Sin embargo, ha quedado demostrado que gracias a la instalación de llenado de transformadores de la que tratará este proyecto y todos sus componentes, así como los procesos que tienen lugar en la misma, es mucho más eficaz llenar los transformadores nada más terminar su elaboración, proporcionándoselos a los distintos clientes llenos, e instalándolos con el aceite en su interior. El ciclo de desgasificación y la cámara de vacío ayudarán a que el aceite se encuentre en unas condiciones óptimas, reduciendo la posibilidad de fallos en el transformador y mejorando su calidad, como se explicará a continuación.

Se especificará más adelante cómo funciona todo el proceso desarrollado en la fase de llenado, además de explicar la instalación al

completo, pero se explicarán ahora unas pequeñas nociones sobre el momento en que se llenan las cubas. La manguera con la que se introduce el aceite en el interior de la cámara de vacío está hecha de PVC y con un grosor suficiente como para soportar una presión de 4bar, además de ser indiferente a la alta temperatura del aceite. Con lo dicho anteriormente, se entiende que el aceite entra en el transformador a presión, por lo que justo después de la apertura por la que se introduce el aislante existe una placa metálica que impide que el chorro de aceite a presión afecte al núcleo o los bobinados, repartiéndolo por el interior.

### 3.2 Aceite de transformadores

El aceite (que puede ser mineral o vegetal dependiendo de la clase de transformador que queremos llenar) es tratado con anterioridad para cumplir con las especificaciones técnicas, como se explicará en los próximos apartados. Este compuesto, denominado aceite para transformadores o aceite aislante tiene, como indica su nombre, unas buenas propiedades en este sentido. Además, forma parte del circuito de refrigeración interno que poseen los transformadores. Las características de este aceite varían en función de su composición, si es vegetal o mineral, pero independientemente de su origen debe mantener una serie de propiedades: una elevada constante dieléctrica, alta conductividad térmica y presentar resistencia ante los diversos cambios químicos que se puedan producir en su composición debido a las condiciones del entorno. Es importante que, independientemente de la hostilidad del entorno que rodea al transformador, se mantengan estas características. Los transformadores suelen ser sumergidos, en su gran mayoría, en aceites de origen mineral (proceden del refinamiento del petróleo), aceites sintéticos (ésteres sintetizados con esta finalidad) o silicona (de origen químico). (Flores, Mombello, Rattá, & Jardini., 2007)

El primer tipo de aceite, el mineral, está formado mediante la unión de cuatro clases genéricas de compuestos, como son los aromáticos, parafinas, cicloalcanos y alquenos. Todos ellos son hidrocarburos con distintas composiciones, y tienen una función distinta en el seno del aislante. Por ejemplo, si se desea una mayor estabilidad se empleará un porcentaje de aromáticos más elevado a la hora de crear el aceite. Sin embargo, la proporción de los cuatro componentes tiene un máximo y un mínimo si se quiere lograr un aceite de transformador óptimo.

Una alternativa a este tipo de aceite se ha conseguido lograr con la utilización de hidrocarburos basados en siliconas o fluorocarbonos, con una reactividad bastante menor que los aceites derivados directamente del crudo. Sin

embargo, las siliconas son mucho menos degradables que los ésteres obtenidos del tratamiento del petróleo.

El desarrollo de un nuevo sistema de refrigeración debido a una sustancia denominada éster vegetal ha permitido la fabricación de transformadores bio. Este aceite es obtenido a partir de semillas vegetales (como pueden ser la soja, el maíz o la colza) y por lo tanto constituye un refrigerante biodegradable. (Fernando-Navas, Cadavid-Ramírez, & Echeverry-Ibarra, 2012). Además, cuenta con la ventaja de que al poseer antioxidantes naturales no es necesario añadir aditivos de este tipo, pues estos se mantienen a través del proceso de refinamiento al que es sometido. Las principales diferencias que presenta con los otros líquidos aislantes es su menor inflamabilidad, la capacidad de poder ser reutilizado en otros productos al final de su vida útil como refrigerante de transformadores, no ser eco-tóxico y tener un grado muy elevado de biodegradabilidad. Las ventajas y desventajas entre ellos se exponen en la *tabla 1*.

*Tabla 1. Comparación entre los aceites para transformadores mineral y vegetal.*

PROPIEDAD	ACEITE MINERAL	ACEITE VEGETAL
Inflamabilidad	Muy elevada	Baja
Biodegradabilidad	Muy baja	Elevada
Toxicidad	Muy elevada	Baja
Precio	Bajo	Elevado
Disponibilidad	Elevada	Baja

A pesar de las claras ventajas de uno frente a otro en cuanto respecta al medio ambiente o la seguridad, a la hora de elegir un aceite óptimo para llenar los transformadores en un entorno de producción industrial se aboga por escoger aquel del que más se dispone, además de ser barato.

Hoy en día gracias a la seguridad presente en cualquier fábrica, así como los controles que debe pasar la instalación periódicamente, escoger el aceite mineral frente al vegetal siempre reporta más beneficios y por lo tanto es preferible.

Para poder cumplir sus dos propósitos fundamentales, el aceite de transformadores debe presentar las siguientes constantes físicas y eléctricas, expuestas en la *tabla 2*.

*Tabla 2. Características físicas y químicas del aceite mineral y del aceite vegetal.*

PARÁMETRO	ACEITE MINERAL	ACEITE VEGETAL
Punto de inflamación	150°C	190°C
Caída de voltaje	145V	145V
Estabilidad frente a la oxidación	-	195
Calor específico	2.06 kJ/kg°C	2.06 kJ/kg°C
Permitividad	2.2	2.2

Es importante destacar que cuanto mayor sea la temperatura a la que trabaje el equipo, menor será la vida útil del aceite que se emplee como aislante, variando entre 20 años y 7 meses.

### 3.3 Tratamiento del aceite

El tratamiento del aceite tiene como objetivo optimizar el funcionamiento del mismo como aislante para el transformador. La máquina de recirculación de aceite hace pasar el líquido por el interior de un conjunto de resistencias en un circuito cerrado, consiguiendo que su temperatura se eleve a unos sesenta y seis grados. La composición del aire disuelto en el aceite es bastante distinta a la del aire atmosférico, con un porcentaje más elevado de oxígeno y por lo tanto más bajo de nitrógeno. La solubilidad de los gases en el aceite depende de su temperatura, y la presencia de los mismos hace variar su coeficiente dieléctrico. Elevar el aceite hasta esa temperatura consigue disminuir la solubilidad de los gases que se encuentran contenidos en el seno

del líquido, pues al aumentar, la fuerza de las relaciones intermoleculares se ve disminuida, logrando que las moléculas de gas escapen del circuito.

Además, la solubilidad de los gases también depende de la presión a la que se encuentre el líquido. En el caso de la máquina de recirculación de aceite, se logra que este circule a una presión constante de 4 bar, lo que dificulta en gran medida que cualquier gas presente en el circuito se diluya en el gas.

### 3.4 Vacío de los transformadores

A la hora de realizar el llenado, adoptar una situación de vacío (0mbar) es esencial para que no se generen burbujas de aire en el interior del aceite. Si se diera la existencia de éstas, disminuiría el coeficiente dieléctrico total que presenta el líquido, haciendo peligrosa la operación del transformador a altas tensiones debido a la falta de aislante entre el cuerpo principal del transformador (el núcleo y los bobinados) y la cuba en la que se introduce. A pesar de que la presencia de gases disueltos en el aceite no afecta en gran medida a su función como refrigerante, el simple hecho de que se vea disminuida su capacidad como aislante es lo suficientemente importante como para tener que impedir que se formen burbujas de aire en el interior del aceite.

Más adelante se explicará cómo se logra este vacío, así como el proceso seguido para introducir el aceite en las cubas de los transformadores.

El método que se seguirá para el llenado es hacer el vacío de forma simultánea a esta operación, pues la principal fuente de gas en el aceite es la atmósfera, y hay que aislarlo todo lo posible de la misma, pues ya se encuentra tratado y, por lo tanto, desgasificado. En ciertas referencias se especifica la necesidad de eliminar cualquier elemento externo de la cuba del transformador que se pueda ver afectado por la generación de vacío, deformándose ante la falta de presión. En este caso, como el interior de los transformadores se mantiene inconexo con el exterior (el interior de la cámara de vacío), la falta de presión en ningún momento deformará los radiadores externos de la cuba, los conectores u otros utensilios necesarios para el llenado de los transformadores, por lo que todo este proceso se realiza con el transformador totalmente manufacturado y terminado, así como ensamblado.

### 3.5 Transmisión del calor

Se define como transmisión del calor al tránsito de energía calorífica debido a una diferencia de temperatura existente entre dos entidades. En el caso de los transformadores tras su llenado, gracias a las altas temperaturas que alcanza el aceite se dan dos de los mecanismos de transmisión del calor. Ambos necesitan un medio para realizar la transmisión de energía, al contrario que la radiación, que no necesita de un medio.

#### 3.5.1 Conducción

La energía se transmite en el seno de una sustancia, ya sea un sólido o un fluido, pasando de las partículas más energéticas a las menos energéticas debido al movimiento registrado entre ellas, es decir, la actividad molecular. (Legrand, Garzón, & Aumente., 2014)

Es sabido que la dirección del flujo de calor siempre será normal a una superficie de temperatura constante. Todo flujo se define como un vector, y este se puede escribir con la siguiente expresión, conocida como la *Ley de Fourier (ecuación 1)*:

$$\mathbf{q}'' = -k\nabla T = -k \left( \mathbf{i} \frac{\partial T}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial T}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad \text{Ecuación 1. Ley de Fourier relativa a la conducción térmica.}$$

Siendo  $q''$  la tasa de transferencia de calor en una dirección por unidad de área perpendicular,  $k$  la conductividad térmica y las tres coordenadas del vector,  $i, j, k$ , forman el gradiente de temperaturas.

La conducción se da en sólidos o en fluidos estacionarios, por lo que en el interior de un transformador se da el fenómeno de conducción entre distintas partes del mismo:

- Entre los bobinados y el núcleo, pues los campos eléctricos y magnéticos calientan ambas estructuras metálicas. Al estar en contacto entre ellas, la transmisión de calor de una a otra es inevitable.
- Entre los bobinados y el aceite, pues al final de la fase de montaje, la única parte del transformador que se verá directamente expuesta al líquido refrigerante serán los devanados de alta y baja tensión. A pesar de que el aceite es un fluido, este se encuentra en estado estacionario en el interior de la cuba y por lo tanto se considera conducción.

- Entre el aceite y la cuba exterior del transformador, siendo la cuba metálica el último elemento del transformador que recibe calor debido a las interacciones eléctricas y magnéticas.

En este punto entran en juego las aletas de las cubas, parte que se ha explicado anteriormente. Si simplificamos la Ley de Fourier (ecuación 2) la fórmula que obtenemos es la siguiente:

$$q_x = \frac{Q}{t} = -kA \frac{dT}{dx} \quad \text{Ecuación 2. Ley de Fourier simplificada.}$$

Siendo A la unidad de área. Las aletas gruesas de los transformadores no hacen más que aumentar el área de contacto entre el aceite y las paredes de la cuba, logrando que la transmisión de calor de uno a otro (y por lo tanto la cantidad que se consigue disipar del interior del transformador) sea mucho mayor que si las paredes del transformador fueran lisas.

### 3.5.2 Convección

La transmisión de energía calorífica se produce entre una superficie y un fluido, lo que implica que los fundamentos son los mismos que para la conducción, pero se le añade el movimiento del segundo elemento. (Legrand, Garzón, & Aumente., 2014). Varía en función de la geometría de la superficie, la temperatura que alcanza la misma, la temperatura del fluido, la velocidad del mismo y sus propiedades físicas.

En el caso de los transformadores, la convección será natural (no requiere de ningún elemento que la fuerce para que tenga lugar), externa (pues el calor se disipa desde el interior hacia el exterior) y con fluido monofásico (se encontrará únicamente en estado gaseoso, sin cambios de estado). La ley que define este mecanismo de transmisión del calor se denomina *Ley de enfriamiento de Newton (ecuación 3)*:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad \text{Ecuación 3. Ley de enfriamiento de Newton.}$$

Siendo  $q''$  en este caso la tasa de transferencia de calor por unidad de área por convección,  $h$  el coeficiente de transferencia de calor,  $T_s$  la temperatura inicial de la superficie y  $T_\infty$  la temperatura del fluido.

La convección solo se presenta en los transformadores entre las paredes de la cuba del mismo (sólido) y el aire que hay en el exterior del dispositivo. Las paredes -calientes- transmiten todo el calor que poseen al aire -frío- para lograr alcanzar un equilibrio térmico. De nuevo aquí entran en juego

las aletas de los transformadores. El calor se transmite por toda la superficie de la cuba metálica mediante conducción, pero cuanto más área de la misma esté en contacto con el aire, más calor podrá disipar por unidad de tiempo. Al situar las aletas en las paredes de las cubas, el área de convección se ve multiplicada varias veces en comparación a la situación que se daría si las paredes de la cuba fueran lisas.



## 4. Instalación

Una vez se han asentado los conceptos teóricos básicos necesarios para analizar el contenido del proyecto, se procede al análisis de la instalación física, encontrada en el entorno industrial sobre el que se trabaja.

Previamente a realizar los siguientes puntos, se ha realizado un estudio bibliográfico para encaminar el proyecto. Si bien es cierto que la capacidad de improvisación y creatividad de un ingeniero son esenciales, también lo es la capacidad para adaptar ideas pertenecientes a distintos campos a la actividad que se está realizando. Es por eso que se han tenido en cuenta distintos trabajos realizados anteriormente un entorno industrial, referentes a la automatización de procesos y la industria 4.0. [15, 16, 19, 21]

Además, se ha recurrido a distintos manuales y libros con objetivo de explicar correctamente los conceptos de redes y comunicaciones presentes en un entorno industrial. [11, 13]

A continuación, se tratarán, de forma diferenciada, los antecedentes a la instalación, la estación actual de trabajo y los problemas a solucionar en la misma. Acto seguido, se expondrá la propuesta de cambios a realizar sobre la instalación a nivel físico con sus correspondientes justificaciones, implementando la automatización de la fase de llenado.

### 4.1 Antecedentes

Como es obvio, no se puede pasar a hablar de la instalación actual sin saber por qué se remodeló. Este entorno industrial siempre ha abogado por llenar los transformadores antes de entregárselos a los destinatarios, por lo que la fase de llenado siempre ha formado parte del proceso de manufacturación.

La larga tradición que representa la creación de transformadores ha necesitado medidas de adaptación para poder satisfacer la demanda creciente de las últimas décadas. En un principio, el método de llenado de transformadores al vacío se desarrollaba en una campana de vacío. Esto implica: que sólo se podía llenar un transformador a la vez, pues la campana permitía hacer el vacío únicamente en una zona reducida; el manómetro no podía ser permanente, pues la instalación no estaba preparada para incluirlo, así que se empleaban manómetros digitales de tamaño reducido conectados por un cable de tres hilos para controlar la presión en el interior de la cámara; la manguera de aceite se introducía en el interior de la campana de manera similar a como se hace en la cámara actual, por una apertura preparada con los aislantes y las gomas necesarias para no arruinar el vacío; por último, el

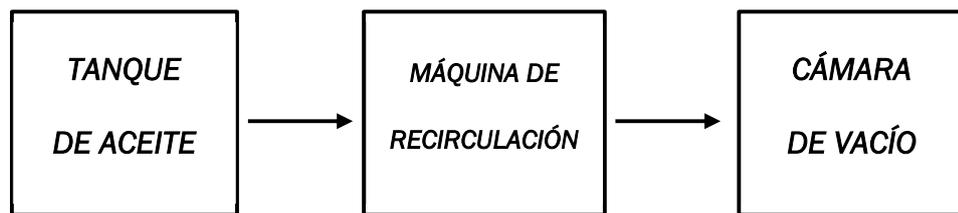
tiempo que tardaba en realizarse el vacío completo de la campana sumado al tiempo que tardaba en deshacerse, más la extracción del transformador del interior de la estructura, llevaban a hacer de este proceso algo tedioso y lento.

La productividad se veía disminuida al llegar a la etapa de llenado, pues las etapas anteriores (corte de chapa, manufacturación del núcleo, bobinado de alta y baja tensión, cableado...) eran bastante más rápidas en comparación con el llenado al vacío. Llenar un transformador cada dos horas no podía satisfacer las necesidades de producción de la empresa, así que se decidió comprar una nueva cámara de vacío, cuya disposición y estructura se explicará a continuación.

## 4.2 Descripción actual de la estación

### 4.2.1 Desarrollo

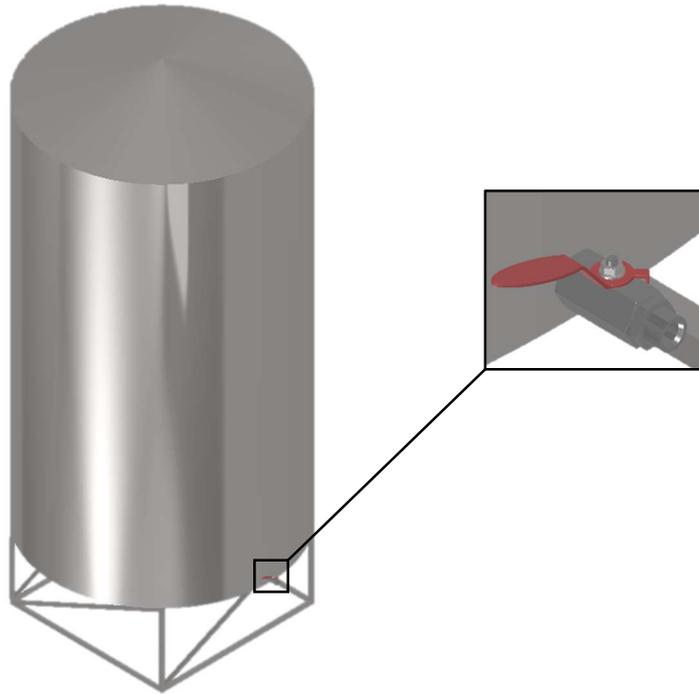
La última fase de la manufacturación de los transformadores se lleva a cabo en la máquina de llenado al vacío de transformadores. Como se ha explicado previamente, es necesario realizar el llenado completamente al vacío, para que no se formen burbujas de gas en el interior del aceite que puedan dificultar la refrigeración o el aislamiento de los transformadores. Si bien es cierto que la máquina principal consiste en la estación de llenado, esta fase necesita simultáneamente de la acción de otros dos dispositivos: un tanque para el aceite y el equipo que recircula el aceite extraído del tanque. A continuación, se procede a describir la fase al completo, siguiendo el orden natural del ciclo (*figura 4*).



*Figura 4. Esquema del ciclo a seguir durante el proceso de llenado.*

La materia principal de esta fase es el aceite. Ya sea de origen mineral o de origen vegetal, se almacena en un tanque con capacidad para cinco mil litros establecido en el interior de la nave industrial (fuera de la misma hay otros tres depósitos de aceite, únicamente para almacenamiento masivo). Este depósito, cuyo modelo 3D se expone en la *figura 5*, con forma cilíndrica y

cubierta de acero inoxidable reforzado, contiene la cantidad de aceite necesaria como para llenar transformadores durante una semana de trabajo.



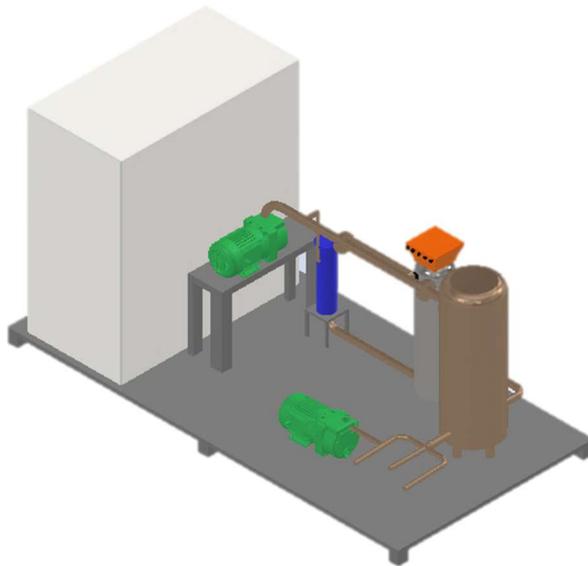
*Figura 5. Modelo del depósito de aceite presente en el interior de la fábrica. Cuenta con un detalle de la válvula de salida.*

Dispone de una entrada para alimentarse, comunicada con los depósitos exteriores a la fábrica, mucho más grandes que este; y de una salida, que conecta el tanque de almacenamiento de aceite con la máquina de recirculación. Tanto la entrada como la salida del tanque se abren y cierran de forma manual con las válvulas dispuestas en las correspondientes tuberías.

La función de recircular el aceite, mencionada ya en las bases teóricas, consiste en la desgasificación del mismo, así como el calentamiento, para disminuir la solubilidad de los gases en este. El aceite atraviesa el mismo circuito cerrado en repetidas ocasiones durante aproximadamente 3 horas, hasta alcanzar unos 66 grados centígrados.

Esta máquina consta de apartados bien diferenciados, formando entre todos ellos un circuito cerrado a apreciar en la *figura 6*: un calentador de aceite, que aumenta la temperatura del aceite haciendo pasar el líquido por un tubo ascendente rodeado de resistencias a alta temperatura (gracias a hacer circular una elevada tensión por las mismas); una columna de vacío, que logra mantener la presión interna de este circuito a 4mbar durante todo el proceso de recirculación; filtros de partículas, para liberar al líquido de las mismas en caso de transportarlas; una bomba de impulsión, que propicia la energía

cinética necesaria para que el aceite continúe avanzando por el circuito durante todo el proceso; un grupo enfriador de agua, que refrigera la columna de vacío constantemente y además evita el arrastre de aditivos; generador de aire seco; una bomba de vacío; y distintos elementos de medida, como pueden ser un henrímetro (para conocer la inductancia del circuito en todo momento), un vacuómetro (que mide el vacío presente en la columna de vacío), un higrómetro que controla la humedad del aceite y distintos manómetros a lo largo del circuito.

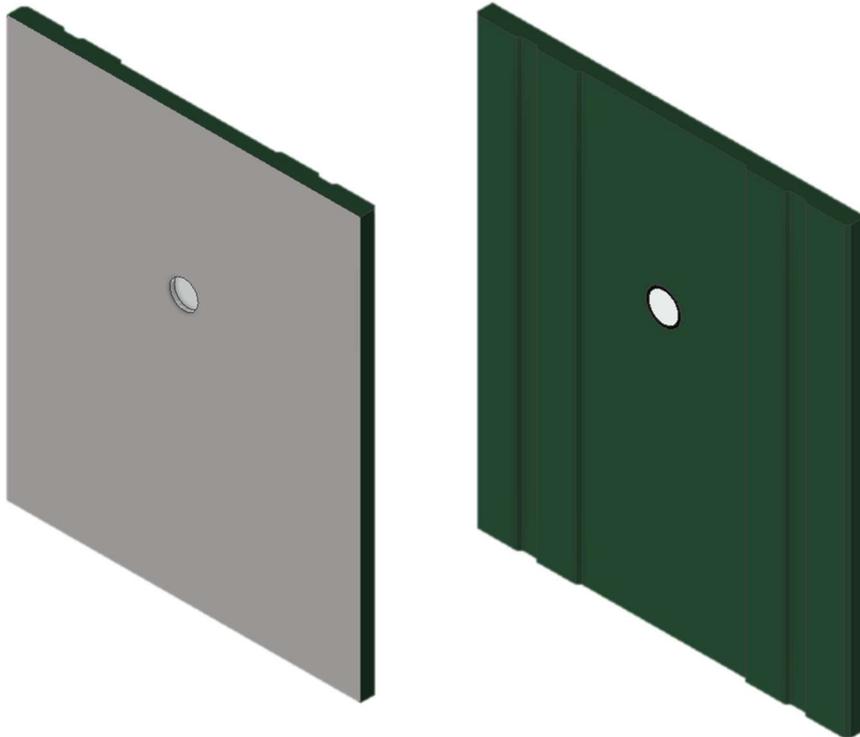


*Figura 6. Modelo de la máquina de recirculación, omitiendo tuberías y cableado.*

Por último, la cámara de vacío es la máquina esencial de esta fase. Consiste en un armazón de acero con capacidad para tres transformadores simultáneamente en su interior. Las paredes, con más de 8cm de grosor en algunos puntos, son ideales para aguantar el vacío que se va a realizar en su interior sin temor a que se deforme la forma original de la misma debido a la falta de presión (se alcanzarán los 0 mbar). La estancia, con 3m de alto y 2,5m de ancho y 6m de largo, tiene capacidad para el llenado de tres transformadores simultáneamente, dos en horizontal y otro en disposición vertical. Además, cuenta con una estructura de vigas de acero empleada para elevar las puertas o poder realizar el descenso durante la apertura y el cierre de las mismas, respectivamente.

Las puertas de la cámara consisten en dos planchas de acero (*figura 7*) con una ventana redonda de tamaño reducido para controlar de forma visual la situación en el interior durante el proceso de llenado. Entre las mismas y el cuerpo principal de la cámara hay una goma que asegurará el sellado total cuando las puertas se cierran. Su mecanismo de apertura se realiza gracias a

dos cabrestantes motorizados que elevan las puertas por encima de la altura del suelo hasta librar completamente la altura de la cámara (es decir, 3m sobre el suelo). El cable, de acero trenzado, y la estructura de acero reforzado anclada al pavimento son lo suficientemente resistentes como para soportar el peso de las puertas y elevarlas hasta tal altura. Además, en las vigas de acero que forman esta estructura se encuentran los bulones de seguridad. Estos elementos consisten en tornillos de gran tamaño que oprimen la puerta contra la goma de la cámara una vez ha descendido por completo, asegurando un cierre hermético.



*Figura 7. Anverso y reverso de las puertas de la cámara de vacío.*

Para facilitar las operaciones de entrada y salida de los transformadores de la cámara, esta dispone de una serie de rodillos motorizados para trasladar la carga, cuyo modelo 3D se puede observar en la *figura 8*. Se extienden de principio a fin, pasando por el interior de la instalación ininterrumpidamente.

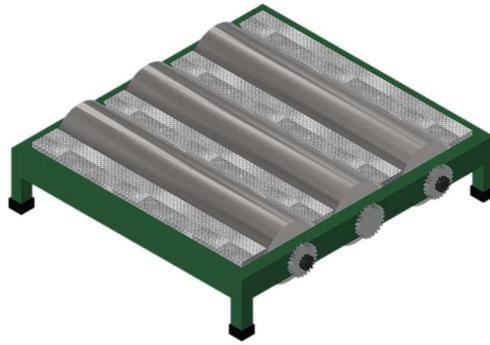


Figura 8. Modelo de un grupo de rodillos motorizado.

Para evitar que los grupos de rodillos más próximos a la entrada y salida de la cámara colapsen con las puertas cuando desciendan, se ha implementado un sistema de elevación de los rodillos, de forma que alcanzan gracias a un motor una posición de  $90^\circ$  respecto a la superficie del suelo, alejándose del cuerpo principal de la máquina para facilitar el cierre.

Este segundo grupo de rodillos, el cual se puede apreciar en la *figura 9*, dispone de una estructura más liviana, sin las pasarelas necesarias para poder acceder al otro lado de la hilera de rodillos con seguridad, para que la fuerza del motor sea suficiente a la hora de retraer el conjunto.

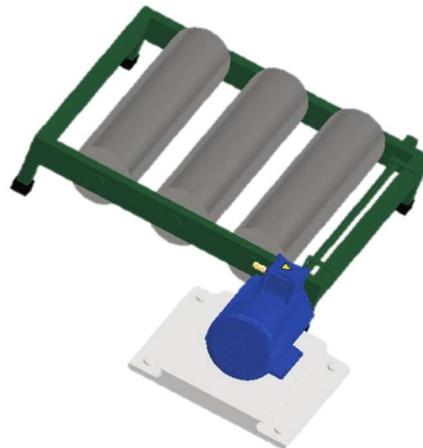
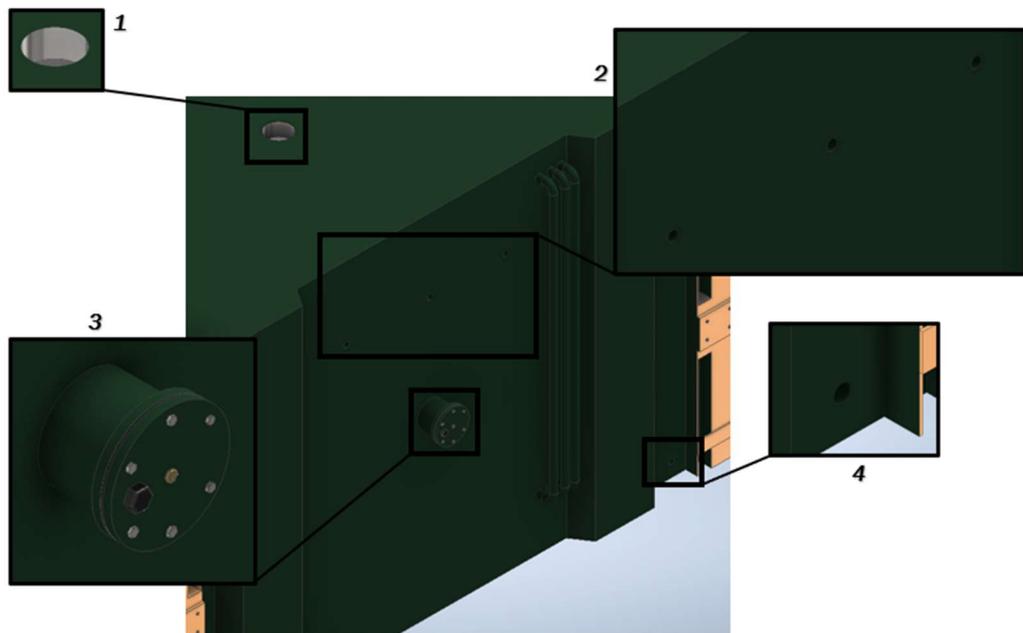


Figura 9. Modelo de un grupo de rodillos levadizos.

La cámara (*figura 10*) dispone de distintos agujeros pasantes desde el interior hasta el exterior, que son complementados y aislados con los siguientes elementos: dispone de tres orificios de pequeño tamaño para las mangueras

de aceite, que se conectan con el interior de la cámara mediante electroválvulas; en la base de la cámara, por debajo de la rejilla de metal, existe una perforación acompañada de una válvula de bola, para vaciar la parte inferior de aceite sobrante o que haya salido de los transformadores hacia el exterior ante un fallo de los mismos; en el techo de la cámara existe una abertura para las bombas de vacío; por último, en el centro de una de las paredes se encuentra la perforación principal, con una tubería saliente hacia el exterior. Esta última consiste en el paso de los cables hacia el interior, así como la disposición de un manómetro. En estos cables se incluyen los necesarios para conectar las boyas de seguridad de llenado, una luz en el interior de la cámara y la seguridad del interior de la misma.



*Figura 10. Modelo de la cara posterior de la cámara de vacío. Se presentan distintos detalles de la misma: la abertura superior para las bombas de vacío (1), los agujeros pasantes para las mangueras (2), la salida sellada de los cables del interior de la cámara (3) y el orificio para la válvula de extracción de aceite sobrante (4).*

Las bombas de vacío, anexas al techo de la estación, se conectan a través de la perforación existente con el interior, cuyo corte se presenta en la *figura 11*. Se encuentran en conjunto con dos válvulas, a las cuales denominaremos válvula de vacío (abre o cierra la manguera de vacío que permite la extracción del aire de la cámara, y es importante para que el vacío del interior no absorba el aceite de las bombas en distintas situaciones) y válvula de aireación (controla la apertura de un conducto directamente anexo a la cámara, permitiendo que el aire regrese al interior en caso de que se encuentre abierta o permitiendo el vacío en caso de que se encuentre cerrada).

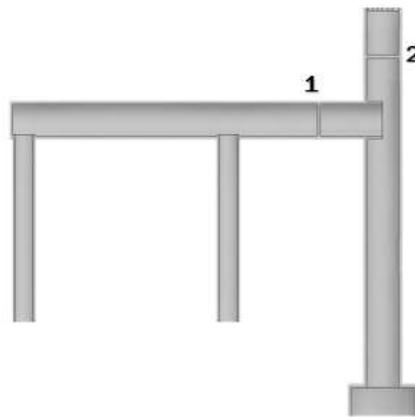


Figura 11. Corte de las tuberías de extracción, siendo visibles la válvula de extracción (1) y la válvula de aireación (2).

El resto de elementos que acompañan a la estructura principal de la instalación son triviales, como canaletas eléctricas para los cables que salen del armario y aportan energía a todos los elementos de la máquina, unas escaleras de mano para subir al techo de la cámara, tuberías más pequeñas... Se presenta un vistazo general de la cámara en la *figura 12*.

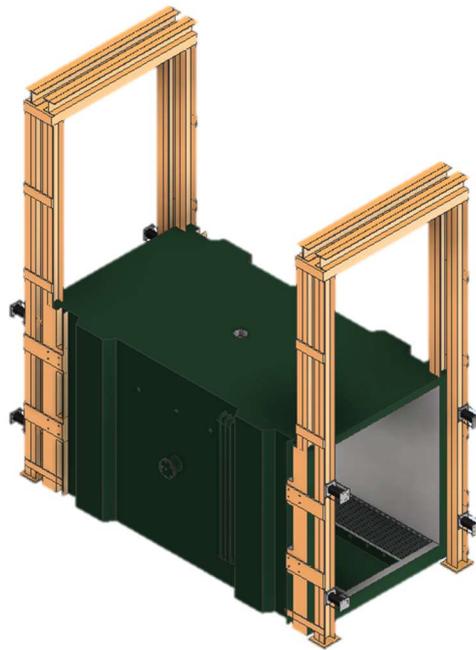
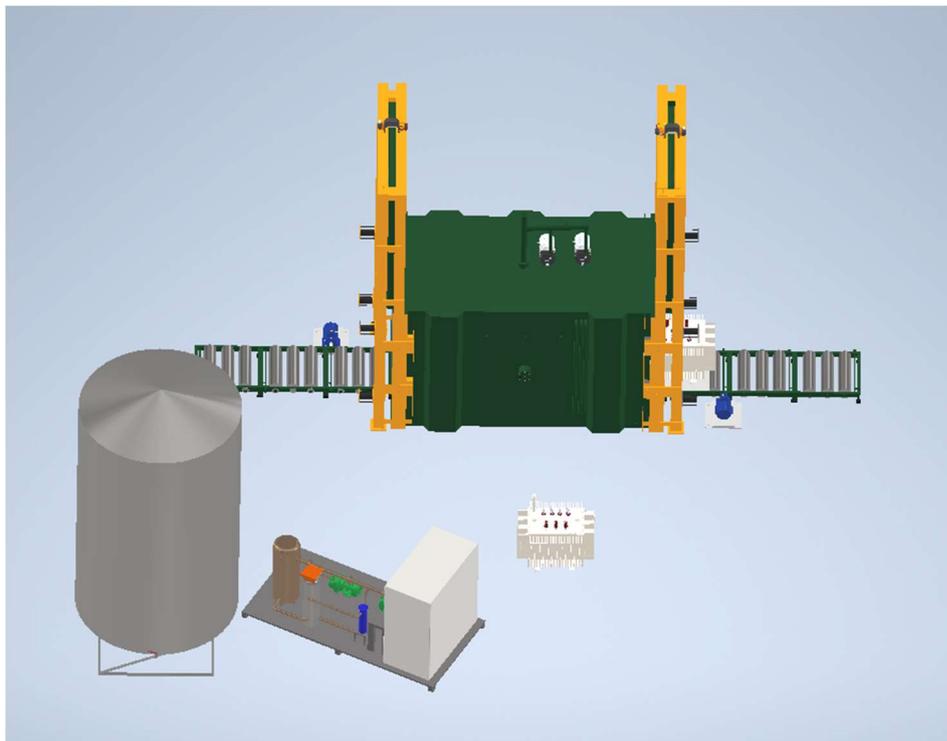


Figura 12. Estructura principal de la cámara de vacío.

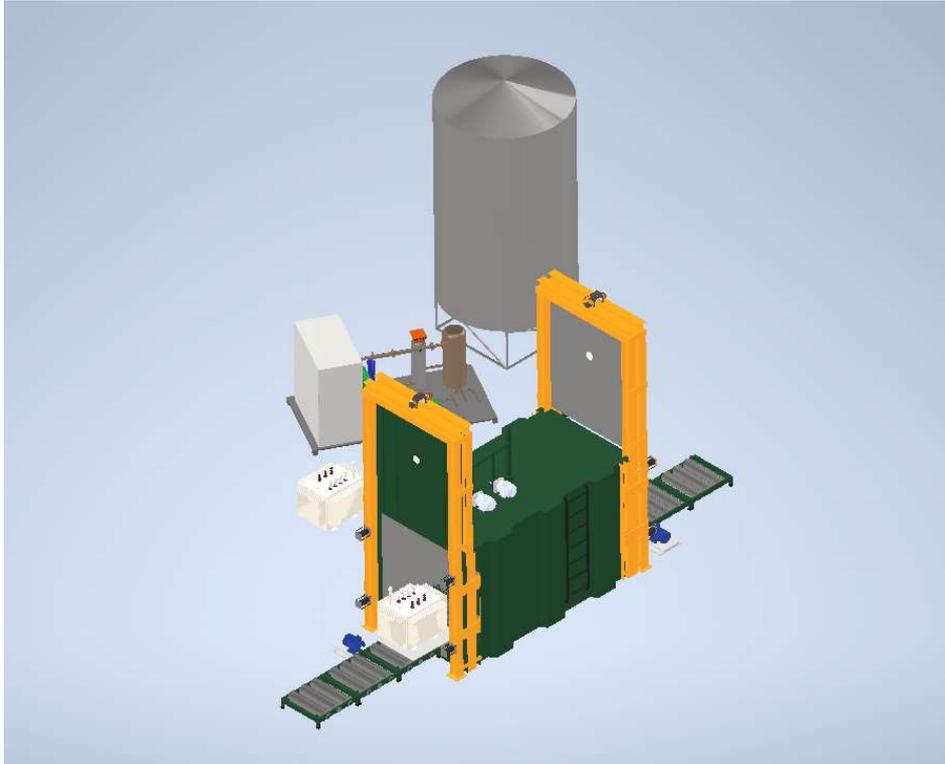
Estas últimas son totalmente necesarias para realizar el vacío, pues el cierre y apertura de las puertas, así como el movimiento de los grupos de rodillos próximos a la entrada y salida de la cámara, se encuentran manejados de forma neumática. Una válvula situada en uno de los laterales de la cámara permite actuar sobre el flujo de aire entrante en la instalación, proveyendo a la misma de aire comprimido o privándola del mismo si es necesario.

Para finalizar, el armario eléctrico se sitúa junto a la cámara de vacío. Sus principales características son que se encuentra programado en lógica inversa (esto quiere decir que los contactos se encuentran normalmente cerrados y cuando se les proporciona energía eléctrica, se abren), y dispone de un transformador de tamaño reducido en su interior, pues todos sus elementos se encuentran alimentados en corriente alterna a 220V debido a la antigüedad de la máquina.

Para tener una visión completa de la instalación, así como la relación entre tamaños de los elementos que la forman, se muestra a continuación una vista global de la misma desde dos ángulos distintos (*figuras 13 y 14*):



*Figura 13. Vista posterior de la instalación de llenado completa, con sus tres elementos principales y algunos transformadores a escala.*



*Figura 14. Vista anterior de la instalación de llenado, apreciando ahora las escaleras de mano para subir al techo de la cámara.*

Obviamente, falta todo tipo de conexionado, como cables, tuberías añadidas, canaletas para los cables, cadenas, cables de acero, etc.

#### **4.2.2 Red**

Este entorno industrial cuenta con una red de información global distribuida por toda la fábrica, siguiendo una jerarquía de estaciones maestras y estaciones secundarias para cada una de las fases de producción. Sin embargo, durante la fase de cortado de chapa y la fase de llenado -en la que nos vamos a centrar- se han incorporado redes locales para controlar de forma específica y especializada los procesos que tienen lugar en las respectivas células.

La creación de una red local para tratar los datos que nos ofrece la fase de llenado es útil para asegurar la regularidad en el intercambio de información en la red general, pues los datos obtenidos en esta fase se tratan en la misma, acompañando a la automatización del proceso. El tráfico de información generado por los operarios es casi nulo, pues el autómatas es capaz de tramitar todos los datos que le llegan y utilizarlos para adaptar el proceso. Las pocas

órdenes que necesitan entregar los operarios se quedan en la red local, pues solo van destinadas al control del PLC.

Los patrones de interacción en la administración de datos para esta fase siguen dos esquemas: cliente-servidor y gestor-agente. Ambos patrones son muy parecidos, basando su estructura física en un PLC central (el S7-300) conectado a varios sensores y actuadores.

La estructura de cliente-servidor se utiliza en procesos asimétricos, en los que existe un servidor y varios clientes conectados al mismo. El servidor nunca toma la iniciativa, sino que espera a que el cliente inicie la transacción, solicitando ciertos servicios, y el servidor se los proporciona. El servidor es capaz de analizar la petición, aceptando o declinando la solicitud del cliente y devolviendo una respuesta. Las peticiones de los clientes siempre serán *no bloqueantes*, lo que quiere decir que el servidor puede continuar analizando otras peticiones mientras analiza el resto.

Por otro lado, la estructura gestor-agente simula un administrador de recursos, siendo más útil cuantos más recursos haya presentes en la red. Hay un único gestor y varios agentes. Los agentes son procesos pequeños que monitorizan ciertos parámetros y cuando les preguntan, responden. Es el gestor el que pide la información, no hay iniciativa por parte de los agentes. Sin embargo, existe un proceso llamado *trap* mediante el cual un agente puede tomar la iniciativa mandando un mensaje al gestor, notificando a éste de que ha ocurrido un fallo o ha tenido lugar una incidencia.

Este proceso se puede observar en las entradas del autómatas. El PLC se encuentra conectado a distintos sensores de medida, que ofrecen continuamente los datos que recogen al autómatas cada vez que éste lo solicita. Si se produce algún fallo en cualquiera de los sensores, esto es notificado al gestor.

Teniendo ahora en cuenta la clase de datos que suponen el tráfico en esta red industrial local, destinada a la máquina de llenado, hay distintos tipos de información (mostrados en la figura 15):

- Datos del proceso, que se traducen a partir de las distintas mediciones que realizan los sensores incorporados en la planta, transmitiendo información útil sobre el proceso. También pueden ser proporcionados por los distintos actuadores, pues mediante finales de carrera o localizadores podemos conocer el estado de éstos. En el caso de la planta de llenado se ofrecen datos en tiempo real de: la capacidad de los transformadores (mediante sensores de llenado), la presión interior de la cámara (con un manómetro), la

situación de las distintas válvulas que rodean a la cámara (como la válvula de aireación, la de vacío, la de aire... gracias al control que ofrecen las electroválvulas), la posición de las puertas o de los rodillos (gracias a los finales de carrera), y si las bombas de vacío se encuentran activadas o no. Además, se monitorizarán las entradas y salidas del autómatas en todo momento, sabiendo si se encuentran activas o no, y, en caso afirmativo, su valor.

- Alarmas o incidencias, que surgen de la necesidad de comunicarle al operario que algo está fallando o no ha ido como se planeaba. Este tipo de mensajes tiene prioridad frente a los demás tipos, debido a que son críticos durante el proceso, sobre todo teniendo en cuenta que la productividad de toda la fábrica depende de esta planta de llenado. Se notificarán de esta forma: paradas inesperadas o situaciones que no siguen la hoja de ruta, fallo en mangueras, tuberías o válvulas; la ejecución incorrecta de cualquier parte del programa asociado al PLC; o las alarmas codificadas de forma específica para distintas partes de la máquina, como un error en el llenado, el arrastre de puertas imposibilitado o una fuga en la cámara.
- Información de control, que puede ser proporcionada por el operario a través de la pantalla HMI para ejecutar de forma remota, y no manual, ciertas acciones sobre el autómatas y el funcionamiento del proceso. El otro caso posible para transmitir información de control es la proveniente de actuadores que necesitan de la confirmación por parte del operario para continuar su trabajo, como por ejemplo las distintas confirmaciones de seguridad presentes en el modo semiautomático.

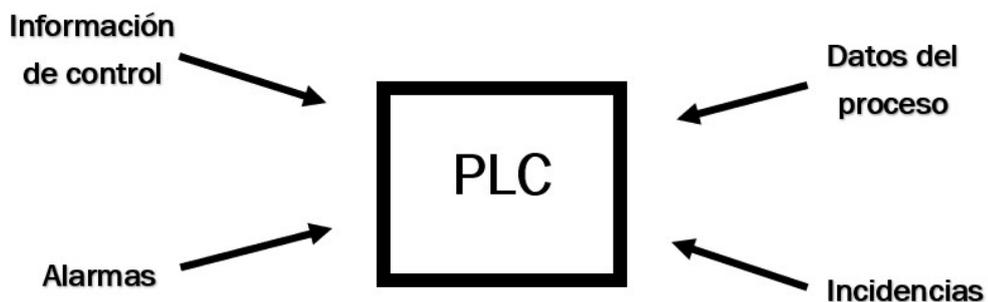


Figura 15. Esquema de la información que recibe el PLC.

### 4.2.3 Comunicación

Siguiendo la jerarquía de las redes de fabricación industrial, las comunicaciones reservadas para esta fase del proceso de manufacturación de transformadores se desarrollan en los dos niveles inferiores, siendo estos los buses de campo y la red de la célula. [3, 9, 26]

Los buses de campo, o “*fieldbus*” según la norma ISA SP50, es “*una conexión serie, digital, que permite la transferencia de datos entre elementos primarios de automatización (elementos de campo) empleados en fabricación o procesos, y elementos de automatización y control de más alto nivel*”. La disposición de la planta utilizando buses de campo agiliza todo el proceso, ahorrando peso y costes en cableado e instalación, aumentando la velocidad en el intercambio de información entre unos dispositivos y otros, y reduciendo al mínimo el número de cajas de conexión, cableado y contactores, y por lo tanto el número de errores cometidos en la instalación. Además, facilita la posibilidad de añadir nuevos elementos de campo. En la estación de llenado se identifican como elementos de campo:

- Detectores todo o nada con salida de relé: las boyas que se establecen en las tapas de los transformadores para saber si se han llenado únicamente tienen dos estados: lleno o no. También se pueden incluir aquí los distintos finales de carrera que forman parte de la instalación: en los finales del recorrido de las puertas y de los rodillos, así como en los bulones de seguridad.
- Dispositivos de medida continua: su salida es analógica, codificada entre 4-20 mA, correspondiendo 4 mA al mínimo valor y 20 mA al máximo. Sus señales requieren, una vez leídas por el PLC, ser escaladas para saber el valor real. En este apartado encontramos el manómetro, que nos indica la presión interior de la cámara en todo momento. También se dispone de un medidor de temperatura digital con un equipo de análisis incorporado, en la máquina de recirculación de aceite. Muestra la temperatura del mismo en todo momento por una pantalla, escalando los datos que extrae el sensor y le proporciona en formato 4 - 20 mA.
- El último mencionado se podría definir como un dispositivo de campo inteligente, pues gracias a su CPU de pequeño tamaño es capaz de analizar los datos y mostrar la temperatura actual, así como un historial de las temperaturas que ha alcanzado el líquido en recirculación durante el tiempo que ha estado en funcionamiento la máquina.

Por otra parte, en el nivel superior, como se ha comentado antes, se encuentra la red de célula. En este apartado jerárquico, para nuestra instalación encontramos el componente fundamental: el PLC.

El autómata escogido en este caso para realizar la automatización de toda la instalación se ha elegido teniendo en cuenta el presupuesto disponible, así como los resultados que se quieren obtener tras la realización del proyecto. Teniendo esto en cuenta, se ha escogido un autómata de SIEMENS, el S7-300, pues su uso es sencillo y ágil, cuenta con un gran abanico de funciones integradas que permiten realizar todo tipo de procesos y además su estructura es modular.

A raíz de su última característica, se definen a continuación los módulos de los que se hará uso para la consecución del proyecto de automatizar la instalación:

- CPU 315-2DP: consiste en el módulo central del autómata, es el procesador y por lo tanto el cerebro del PLC. Se conecta mediante MPI o interfaz multipunto, propio de los autómatas de SIEMENS, alimentándose con 24V. Cuenta con la posibilidad de introducir una Memory Card para cambiar de firmware y constituye la interfaz del sistema maestro – esclavo. *Modelo 6ES7 315-2AG10-0AB0.*
- Fuente de alimentación PS 307 de 5A: alimenta el resto de módulos a 24V con una entrada de tensión alterna de 230V. Ofrece 5A de corriente. *Modelo 6ES7 307-1EA00-0AA0.*
- Módulo de entradas digitales: dispone de 16 entradas digitales (1 o 0) alimentadas a 24 V DC. Reciben la información de los sensores dispersos por la instalación de llenado al vacío. *Modelo 6ES7 321-1BH02-0AA0.*
- Módulo de entradas analógicas: dispone de 8 entradas analógicas dobles (pues se conectan a estas entradas sensores de uno, dos, tres o cuatro hilos) con una resolución de 13 BIT cada una. *Modelo 6ES7 331-1KF01-0AB0.*
- Módulo de salidas digitales: tiene 8 salidas digitales de 24V de corriente continua. Se necesitarán, según la propuesta de automatización que se observará más adelante, un total de dos módulos de salidas digitales como este. *Modelo 6ES7 322-1BF01-0AA0.*

La conectividad entre ciertos módulos y el PLC, como ya se ha mencionado en las características de la CPU, se realiza mediante un cable MPI. Este medio físico, cuyas siglas significan Interfaz Multi Punto, se emplea en equipos SIEMENS de la generación S7. Gracias a este sistema de comunicación

se puede acceder a cualquier zona de la memoria del PLC, seleccionando e indicando la dirección en la que queremos leer o escribir datos. Se pueden conectar: PLCs, paneles de operador, pantallas HMI, PCs... Es decir, desde varios autómatas hasta cualquier elemento que pueda controlarlos y cuente con adaptador de cable MPI. Sus características son las siguientes:

- Cuenta con un soporte físico RS-485.
- La velocidad de transmisión de información va desde 187.5 kbit/s hasta 12 Mbit/s
- La distancia máxima entre el comienzo y el final de las conexiones del cable es de 50m, a menos que se empleen repetidores (hasta un máximo de 10 unidades), que entonces puede existir una distancia de 1000m.
- En la red existen hasta 31 direcciones MPI, por lo que ese es el máximo número de elementos que pueden formarla. Se indican los valores típicos en la *tabla 3*.

*Tabla 3. Direcciones habituales en MPI.*

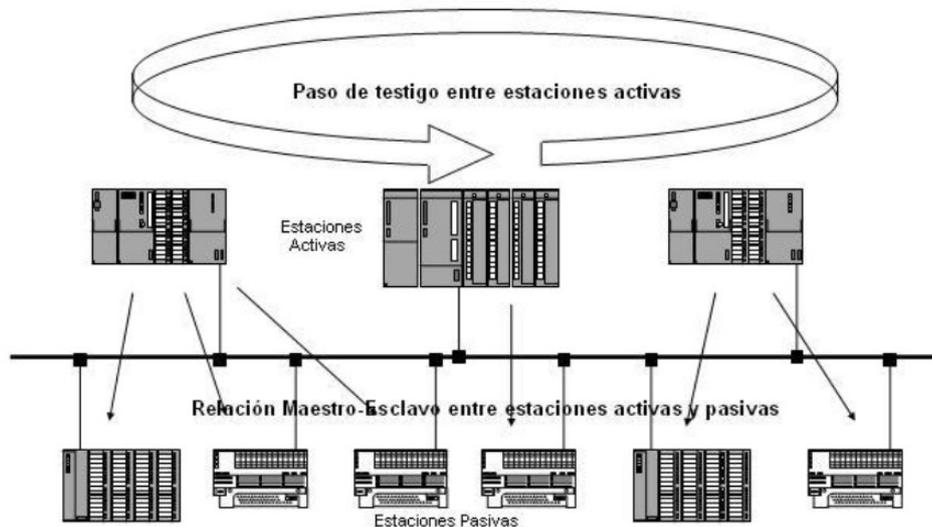
Dirección	Dispositivo	Descripción
0	OP	Panel de operación o pantalla HMI
1	PC	Dispositivo programador o PC
2 hasta 31	CPU	PLCs

Por su parte, la red de comunicaciones general se encuentra conectada mediante buses de campo del tipo Profibus. El sistema MPI que se ha comentado previamente es muy similar a éste, pues también está basado en el soporte físico RS-485.

Profibus, abreviatura de las palabras *Process Fieldbus*, cuenta con una arquitectura ágil y sencilla, con un método de acceso al medio híbrido. Este método combina un paso de testigo entre las estaciones principales con un útil acceso por sondeo y posterior selección a cada grupo de estaciones esclavas. Se establece, por lo tanto, un sistema Maestro – Esclavo entre el PLC o estación

principal y el resto de actuadores, sensores y estaciones secundarias que se encuentran presentes en la red.

Esto quiere decir que el autómatas, como estación maestra en el anillo lógico que conforma el sistema de comunicaciones mediante Profibus. Todas las estaciones activas conocen al resto de estaciones activas, y también su orden en el anillo. Cada vez que una estación activa recibe el testigo que circula a través del anillo, cuenta con un tiempo determinado para actuar como maestro sobre las estaciones esclavas o pasivas de las que se dispone en la red, a las que nunca puede llegar el testigo. Un ejemplo de la estructura que se puede alcanzar con un sistema de conexión Profibus y una red con desarrollo Maestro-Eslavo se aprecia en la *figura 16*.



*Figura 16. Estructura del bus de campo Profibus*

Las características físicas de este bus de campo son:

- Un segmento de conexión Profibus admite hasta 127 dispositivos, entre los cuales hay un máximo de 32 que pueden ser estaciones activas. El resto serán estaciones pasivas, es decir, esclavos.
- La comunicación se realiza sobre el soporte físico RS-485, por lo que se pueden alcanzar velocidades de transmisión de información de entre 9600 bit/s y 12Mbit/s como máximo.

En el caso de la presente estación industrial, se empleará la versión Profibus PA, *Process Automation*, pues se encuentra directamente orientada a conseguir la automatización de procesos en entornos industriales. Es la rama de las comunicaciones Profibus que se encarga de conectar sensores,

actuadores de campo, convertidores, transmisores de temperatura... con la estación activa, que en este caso es el PLC.

Al estar especializada, esta versión es intrínsecamente segura, siendo el establecimiento de la comunicación y el paso de información mucho más fiables que con cualquier otro tipo de comunicación. Además, reduce enormemente los fallos de datos que se puedan producir durante el intercambio de información, mejora el control en tiempo real de la instalación y reduce los costes de mantenimiento e instalación frente a las disposiciones convencionales.

En casos específicos, la interfaz física de Profibus PA puede llegar a sustituir el estándar de 4-20 mA que se emplea comúnmente en los sensores y actuadores, pero es necesario utilizar este método estándar para conectar los dispositivos de campo al autómeta.

El estándar RS-485, mencionado tanto en la comunicación mediante MPI como en la cual se emplea Profibus, fue considerado estándar a partir de un comité en el año 1983. Se creó como un modelo de bus de comunicación presente en la capa física del modelo OSI (uno de los modelos de arquitectura de comunicación más importante, sencillo e influyente, sobre el que se crean las demás arquitecturas). Sus características principales son el ser un sistema multipunto, que le permite transmitir gran cantidad de información a largas distancias con una velocidad constante y resistir a canales con ruido, un hecho bastante común en los entornos industriales que logra mitigarse gracias a la estructura física del par trenzado.

La alimentación que requiere este estándar debe ser superior a 5 V, lo que en nuestro caso serán 24 V. Además, posee una interfaz diferencial, es decir, que la información se transmite a través de dos conductores (uno positivo y otro negativo), siendo los valores de la electricidad del mismo simétricos y no requiere apantallamiento.

#### **4.2.4 Sensores**

Se analizan ahora los sensores de los que dispone la estación de llenado previamente a la automatización de esta fase, tanto física como lógicamente.

##### Sensor de temperatura

La máquina de recirculación tiene como misión conseguir que el aceite se desgasifique, aplicando presión sobre el líquido a lo largo de todo el circuito y elevando su temperatura hasta unos 66 grados centígrados.

El control de la temperatura a la que se encuentra la masa de aceite a lo largo de recorrido se realiza gracias a una sonda PT100 conectada a una pantalla gracias a su salida de tres hilos (4-20mA), siendo esta capaz de escalar e interpretar la información captada por el sensor y mostrarla por pantalla. La pantalla se encuentra alimentada mediante una pila de botón de 1.5 V.

Por su parte, la sonda PT100 (*figura 17*) recibe este nombre porque el termistor sensible a los cambios de temperatura está compuesto enteramente de platino (*PT*), y su resistencia base a 0 °C es de 100  $\Omega$ . La cubierta del termistor es de acero inoxidable, y cuenta con protección anticorrosión para los cables. La escogida para la instalación cumple con las tolerancias de Clase A IEC 751. La longitud del cabezal de la sonda son 50mm, con diámetro de 5mm. El rango de temperaturas detectado, con un error máximo de 0.5 °C, varía entre -20 °C y +100 °C.



*Figura 17. Modelo de una sonda PT100 con salida de 3 cables y cubierta de acero.*

### Sensores de presión

Hay dos tipos de sensores de presión presentes en la instalación: un manómetro analógico controlando la presión interna del circuito de recirculación de aceite (debe ser constante a 4 bar) y un manómetro de vacío con salida analógica controlando la presión en el interior de la cámara de vacío.

El manómetro presente en la máquina de recirculación de aceite (*figura 18*) consiste en un manómetro positivo analógico con escala entre 0 y 6 bar. El error cometido por el mismo no supera el  $\pm 1.6\%$  del valor reflejado, y la temperatura a la que realiza correctamente las mediciones se encuentra entre -40 °C y 80 °C. La escala se encuentra calibrada en bares y en psi.



Figura 18. Manómetro analógico positivo.

Por su parte, el manómetro de vacío presente en la cámara de vacío es igual al manómetro anterior (figura 19), sólo que su escala varía entre -1 y 3 bar. Es adecuado para entornos corrosivos o industriales, como es el caso, pues las sondas mediante las cuales detecta la presión son enteramente fabricadas en acero inoxidable y se pueden llenar de líquido (en caso de que se produzca cualquier escape de aceite para transformadores). La temperatura de funcionamiento varía entre  $-20^{\circ}\text{C}$  y  $60^{\circ}\text{C}$ .



Figura 19. Manómetro analógico positivo y negativo entre -1 y 3 bar.

### 4.3 Problemas a solucionar

El estado actual de la estación de llenado no es el óptimo, pues distintos apartados de la misma se han visto modificados debido a fallos o averías en el sistema, que se han tenido que subsanar de la forma más rápida y adecuada posible para evitar afectar a la producción.

Para comenzar, el primer paso a dar antes de planear la automatización completa de una estación de llenado es observar el entorno y valorar todo lo que hay que cambiar para que el proyecto sea eficiente:

- Las bombas de vacío vigentes en el estado inicial de la máquina, no son las originales. A causa de un fallo se han retirado y el vacío se realiza con dos bombas de vacío situadas en el suelo, adyacentes a la cámara, que se conectan a través de una tubería de extracción. Para una automatización eficiente, hay que restaurar las bombas de vacío originales, asegurando que ocupan su posición inicial en el techo de la cámara. Así se puede crear una estación automatizada de forma permanente, además de que el vacío se logra de forma mucho más rápida.
- En ocasiones los bulones de seguridad no se activan como deberían, dejando la puerta mal cerrada y ocasionando que el vacío no se pueda realizar en condiciones. Con objetivos de futuro, hay que cambiar el cableado general de la estación para que todo funcione correctamente, sin cortocircuitos, reduciendo la posibilidad de fallos.
- El armario eléctrico original de la máquina (sin autómata, únicamente formado por contactores) está programado en lógica inversa. Esto quiere decir, cuando no hay tensión, las válvulas se abren, y cuando hay tensión, las válvulas se cierran. Para hacerlo todo más sencillo, se pretende cambiar por completo el armario, creando uno nuevo con lógica positiva.
- Los flotadores o boya que detectan el llenado completo de los transformadores únicamente detienen el circuito eléctrico interno, pero no envían una señal de salida. Esta será necesaria en el programa como se verá en el *punto 1.6*, por lo que a menos que se cambie el sistema de detección de llenado, habrá que duplicar los conectores a los sensores de llenado, garantizando que cada boya ofrece una señal de salida.

Siguiendo un informe realizado tras la revisión de la máquina por un experto, se han detectado todos los fallos a suplir en la estación para que cumpla con las medidas de seguridad impuestas en las distintas normativas:

- La alimentación de cualquier elemento que precise tensión eléctrica se realizará en corriente continua de 24V para garantizar una mayor seguridad, además de dotar de estabilidad a la instalación frente a variaciones en el suministro.
- Según el *punto 2.3. Disposiciones para garantizar el uso y el funcionamiento en condiciones de seguridad*, del artículo del BOE en referencia a los equipos a presión en entornos industriales

*Directiva 2014/68/UE, “el modo de funcionamiento de los equipos a presión estará diseñad para que su manejo no entrañe ningún riesgo razonablemente previsible. Se prestará especial atención, en su caso a los dispositivos que impiden el acceso físico mientras haya presión o vacío.”* Es por eso que se tendrá que disponer de un elemento de seguridad en el interior de la cámara de vacío para que, si en algún momento una persona se encontrase en el interior cuando se comienza a realizar el vacío, esta pueda detener el proceso y abrir las puertas de inmediato.

#### **4.4 Propuesta de automatización de la instalación**

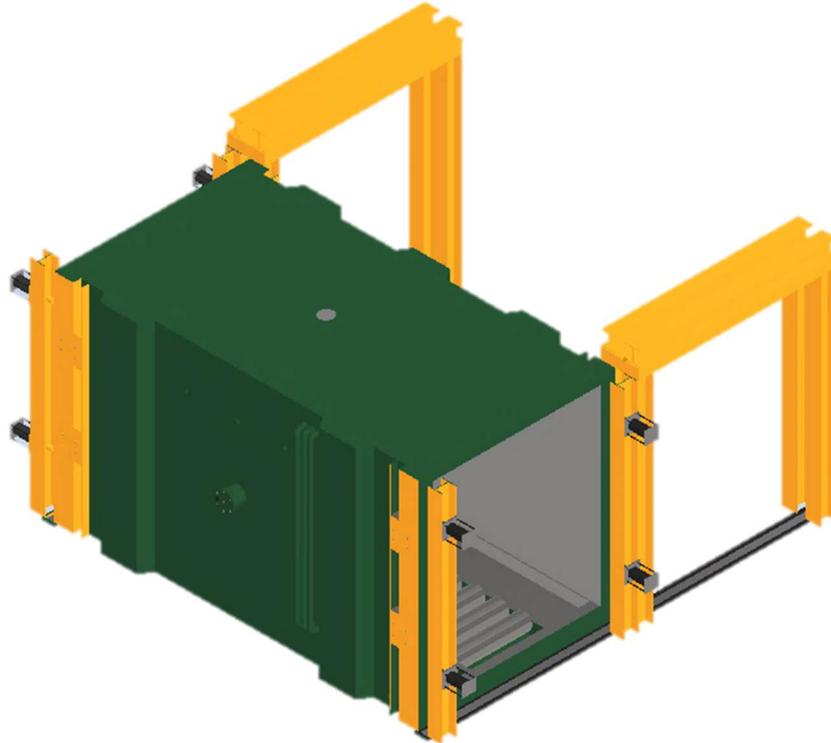
Se han detallado a continuación propuestas para automatizar la estación al completo, así como brindar mayor seguridad a los trabajadores de la misma. En este apartado se incluyen las reformas que se llevarán a cabo a nivel físico, así como los nuevos elementos añadidos. El objetivo perseguido no ha variado desde el comienzo: se trata de lograr una estación de llenado al vacío totalmente automatizada, para que el trabajador no tenga que realizar ninguna operación a mano más allá de las estrictamente necesarias, ya sea abrir válvulas, cerrar mangueras, detener procesos... Todo se controlará desde la misma pantalla. En el apartado destinado a la automatización del proceso de llenado se detallará la función de los nuevos elementos, así como su importancia en el resultado final. Cabe destacar que con un único autómeta se controlará toda la fase, esto quiere decir: depósito de aceite, máquina de recirculación y cámara de vacío.

En primer lugar, los rodillos que desplazan los transformadores de entrada a salida, se encuentran motorizados, pero no de forma automática. Esto quiere decir que el operario tiene que pulsar un botón para mantener activos los rodillos (hacia atrás o hacia delante) hasta que, aproximadamente, alcancen los transformadores su posición en el interior de la cámara. Si se define la posición en la que siempre tienen que encontrarse los transformadores, se pueden situar tres (pues es el máximo de transformadores que caben a la vez) sensores de proximidad en el interior de la cámara. Conectados al autómeta, se controlará por pantalla la posición de los transformadores de forma automática, deteniendo la acción de los motores cuando lleguen a su posición. Además, seguiría vigente el sistema no automático, por si hay que retroceder o avanzar los rodillos en caso de fallo o avería.

Estos sensores a instalar serían representativos del grupo “todo o nada”, teniendo únicamente dos posibilidades: hay transformador o no. En

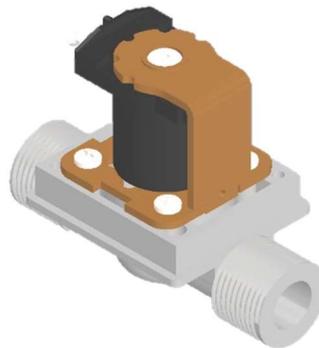
caso de no disponer de unos sensores de proximidad adecuados, se pueden instalar sensores de detección laser, colocando el otro extremo de la célula de luz en el lado opuesto de la cámara.

En segundo lugar, los dos portones de acero que permiten la introducción y extracción de los transformadores del interior de la cámara, se abren elevándose sobre la altura del suelo mediante una estructura de acero con dos cabrestantes motorizados. En el caso de que se produzca cualquier fallo o se rompa el cable de acero trenzado de los cabrestantes, la puerta caería a plomo sobre el suelo. Viendo el peligro que esto presenta para los trabajadores, se propone modificar las puertas de la cámara de vacío para que su apertura se produzca de forma horizontal y no vertical como hasta ahora, gracias a unos carriles, y reutilizando los motores que se utilizaban en los cabrestantes. El cambio realizado se puede observar en la *figura 20*.



*Figura 20. Cámara con portones que se desplazan horizontalmente y no verticalmente. Se pueden distinguir los carriles nuevos, mientras que se reutiliza parte de la estructura anterior para crear la nueva.*

Por último, se introducirán electroválvulas (cuyo modelo interior se puede ver en la *figura 21*) accionables mediante impulsos eléctricos en distintos puntos del sistema en los que ahora hay válvulas de bola normales. Estos puntos son: la salida del depósito de aceite, para poner a recircular el refrigerante cuando el operario lo desee; la salida de la máquina de recirculación de aceite, necesario para poder controlar el flujo a gusto del operario; y la entrada de las mangueras al interior de la cámara de vacío, permitiendo su apertura o cierre individualmente, controlando así qué mangueras disponen de aceite y cuáles no.



*Figura 21. Interior de una electroválvula común, presentando la estructura en PVC y los elementos metálicos correspondientes, así como el imán contenido en ella.*

Si se añaden todos estos elementos, modificando los actuales en algunos casos o simplemente adjuntándolos a mayores a la estructura que ya poseemos, se obtendrá un entorno totalmente automatizable, a falta de realizar un programa, que se explicará en los siguientes apartados.

#### **4.4.1 Sensores**

Se ha recurrido a distintos artículos y estudios, así como apreciaciones profesionales sobre sensores presentes en la industria. [2, 6, 14]

##### Sensores de presión

En primer lugar, el presostato que mantiene una posición fija para medir la presión en el interior de la cámara se va a sustituir por un vacuostato digital (*figura 22*). Este tipo de presostato permite medir con precisión decimal cualquier presión en un rango de entre 100 kPa y -100 kPa. Este modelo cuenta con salida PNP o NPN a elección del usuario, ambas de 4-20 mA, es decir, analógicas. Es de fácil instalación y su salida de tres hilos permite una sencilla conexión a una de las entradas analógicas del PLC.



Figura 22. Vacuostato digital con salida analógica, apto para el PLC.

### Sensores de proximidad

Como se ha establecido en la propuesta de automatización, se introducirán sensores de proximidad en el interior de la cámara, en cada una de las tres posiciones que pueden ocupar las cubas para proceder al llenado. Estos sensores nos serán útiles a la hora de realizar un control exhaustivo del proceso automático. Son del tipo fotoeléctrico (ejemplo en la figura 23), y aunque se valoró la posibilidad de emplear sensores ultrasónicos, no es posible debido a que necesitan de un medio para su transmisión de señal y por lo tanto no funcionan en vacío. Estos tres sensores serán *réflex*, lo que quiere decir que el emisor y el receptor se encuentra en la misma pieza: emite un haz de luz y al reflejarse en el cuerpo que tiene delante regresa hacia el receptor. Este comportamiento del sensor se describe visualmente en la figura 24.

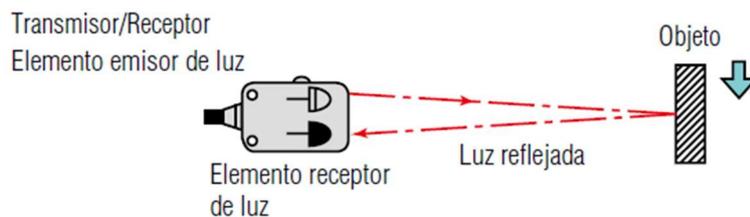


Figura 23. Comportamiento del haz de luz en un sensor fotoeléctrico.

Pueden trabajar en la oscuridad debido a que el emisor es el que emite un haz de luz (normalmente LED) y no necesita de la luz natural para poder analizar con precisión la respuesta. Emplean como base teórica de su funcionamiento la reflexión difusa: el rayo de infrarrojos lanzado por el emisor es reflejado sobre la superficie del objeto (no puede ser de color negro, pues absorbe toda la luz) en caso de que lo haya, o si no se dispersa en el entorno. Cuando el haz de luz regresa hacia el receptor, parte de la reflexión difusa que se ha producido incide sobre el mismo, cambiando la salida que proporciona el sensor fotosensible. Cuenta con una distancia de detección de entre 30 y 200 cm, ideal para la situación planteada en el proyecto, pues es capaz de detectar

las cubas con total eficacia y no llega a golpear el otro lado de la cámara de vacío, perdiéndose el haz de luz en el vacío si no hay una cuba delante.



Figura 24. Carcasa de uno de los sensores fotoeléctricos empleados, con el receptor y el emisor en el mismo dispositivo.

Por último, otro de los nuevos sensores añadidos a la fase de llenado también consiste en un fotorreceptor, pero en esta ocasión cuenta con emisor y receptor en carcasas separadas, cuyo funcionamiento se describe gráficamente en la figura 25. Esto quiere decir que se empleará para formar una barrera de luz, alineando ambas partes del sensor en lados opuestos a la salida de la cámara, la cual si se atraviesa con un objeto verá su circuito eléctrico abierto, variando la señal de salida que proporciona.

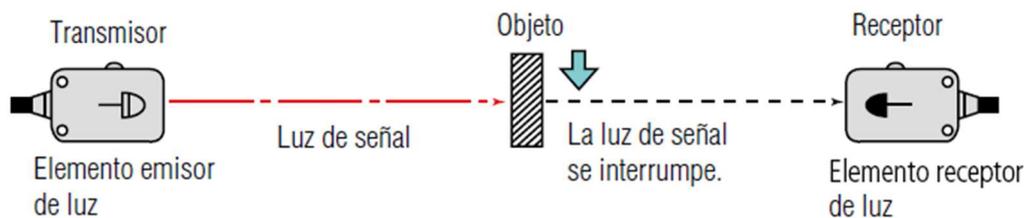


Figura 25. Comportamiento del haz de luz en una barrera láser.

Sigue el mismo principio de antes, sólo que en esta ocasión no influye para nada el color o la forma del objeto, simplemente cuando la luz se interrumpe, cambia la salida. Igual que los tres sensores anteriores, la actuación de este será de gran importancia a la hora de implementar el programa automático en la cámara de vacío, mejorando la seguridad y el control de la instalación. Físicamente, es una barrera inmaterial de 63cm de altura, con un mínimo de distancia entre ambos elementos de 0,5 m y un máximo de 5 m (figura 26). Además, se alimenta a 24V, como se pretende alimentar el resto de la instalación.



*Figura 26. Modelo de la barrera láser a emplear en la salida de la cámara de vacío. Se emplea una barrera y no un sólo hilo de luz porque la cuba puede rebasar los límites de la cámara a distintas alturas.*

## 5. Proceso de llenado

Para comprender tanto los cambios físicos sobre la instalación (mostrados anteriormente en el *punto 4*), como los cambios a nivel lógico, es esencial comprender el funcionamiento de la misma, desarrollando por completo el proceso de llenado que tiene lugar en su interior.

### 5.1 Pasos previos

#### 5.1.1 *Traslado a la fase de llenado*

La etapa anterior se lleva a cabo en la estación de secado. Es en este apartado donde el transformador se somete a altos voltajes, que circulan por un bobinado anexo a sus tomas de alta tensión, calentando sus devanados resistentes mediante energía eléctrica hasta tal punto que se seca todo el material utilizado en la manufacturación de los transformadores.

La temperatura alcanzada por cada equipo se muestra en una pantalla, dejando los transformadores en secado durante 24 horas.

Mediante el puente grúa se traslada el transformador, ya seco, desde la estación de secado hasta el apartado reservado en la planta industrial para la estación de llenado.

#### 5.1.2 *Preparación de la cuba*

A continuación, hay que preparar la cuba en la que se introducirá el transformador para que se encuentre en perfectas condiciones. Las cubas, con sus radiadores correspondientes, están finalizadas con pintura antioxidante, esperando a ser rellenadas con sus transformadores.

Un operario comprueba la cuba del transformador, midiendo las dimensiones con un metro de mano y asegurándose de que se ha elegido la adecuada según los informes previstos de ese transformador y su hoja de ruta. Es importante añadir que, si se da el caso de que la cuba es para un transformador superior a las 250KVA, hay que añadir de forma manual una protección extra en la parte inferior para aislar la bobina del hondón.

El siguiente paso consiste en aspirar el interior de la cuba para cerciorarse de que no queda en su interior ninguna partícula con el tamaño suficiente como para afectar a la refrigeración o el aislamiento del transformador, así como provocar fugas.

Para finalizar, se coloca una junta de goma en la parte superior de la cuba, que aislará la distancia entre la tapa de la cuba y la misma, evitando fugas de aceite al llenarlo.

### 5.1.3 Introducción del transformador y sellado

El transformador se eleva, gracias al puente grúa, y se encaja en el interior de su cuba con ayuda de éste, de forma manual. Gracias a los tornillos guía presentes en la cuba, esta tarea se realiza de forma precisa y rápida. Una vez en su sitio, se procede a cerrar la cuba con su tapa, sellando la unión de ambas con una veintena de tornillos y tuercas, con la ayuda de una llave carraca.

En este punto el transformador se encuentra completamente encubado como resultado final del proceso de manufacturación, a falta de llenarlo con aceite. Para completar esta última tarea, y en la que se enfocará el resto del proyecto, hay que añadir dos elementos que serán retirados del transformador a la hora de darle el acabado final: el tornillo de llenado y el sensor de llenado.

- El tornillo de llenado: consiste en un dispositivo de acero que, al abrirse, deja un agujero accesible al interior de la base de la cuba del transformador, y cuyo modelo 3D se muestra en la *figura 27*. Es el útil que nos permitirá introducir aceite en él, pues a éste se conecta la manguera del interior de la cámara de vacío. Es importante señalar que el tornillo se tiene que quedar abierto para que el aceite pueda entrar en el interior de la cuba, o se podrían producir fallos importantes como la sobrepresión en las mangueras de aceite o el retorno del mismo hacia la cámara de llenado.



*Figura 27. Modelo del tornillo de llenado a colocar en los transformadores previamente a su llenado.*

- El sensor de llenado: consiste en un cilindro de cristal y acero con una boya en su interior, conectada a un circuito eléctrico que hace de puente. Se puede ver un modelo en 3D en la *figura 28*. Cuando el transformador se introduzca en el interior de la cámara, además de conectar la manguera de aceite como ya hemos explicado, se conecta a este sensor el circuito eléctrico de las electroválvulas que controlan las mangueras de aceite. Comienza el llenado, y cuando el aceite vaya a rebasar la máxima capacidad de la cuba, la boya comienza a flotar, elevándose y situando un aislante entre las dos conexiones que forman el puente del circuito eléctrico, deteniendo la corriente. Al no recibir tensión, la electroválvula correspondiente se cierra, cesando el flujo de aceite al interior del transformador. Uno de los problemas con este sistema de detección del llenado completo conformado por una boya es que, en ocasiones, ya que el aceite entra a presión en el interior de la cuba (en concreto a 4 bar), éste se mueve y acciona la boya sin haber llegado al límite superior del transformador, por lo que la boya asciende y desciende. Cuando pasa esto, la manguera se vuelve a abrir, empujando debido a su presión el aceite que está casi en el límite fuera del transformador. Más tarde se verá la solución a esto, cuando se analice el programa de automatización.

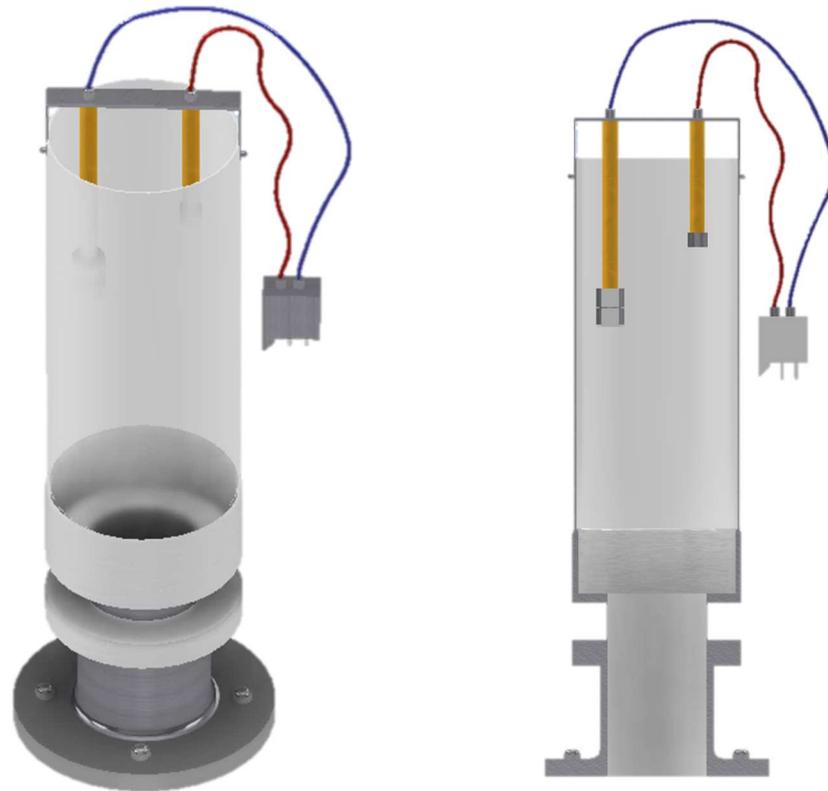


Figura 28. Modelo del sensor de llenado de los transformadores con flotadores. A la derecha, un corte de mismo para apreciar con detalle los flotadores o boyas.

## 5.2 Funcionamiento actual de la estación de llenado

### 5.2.1 Etapas

Se contemplan a continuación todos los pasos a seguir para completar esta fase de la producción de transformadores, de principio a fin, denominada fase de llenado.

1. El transformador, completamente montado, se sitúa encima de los rodillos para introducirlo en la cámara de vacío y afrontar la última etapa de su producción: el llenado. Esta acción se realiza gracias a la ayuda del puente grúa para elevar la cuba a la altura necesaria. Es importante señalar que, como las puertas para abrirse se elevan sobre la altura del suelo (pues aún no se ha implementado la automatización de la instalación), el puente grúa no llega hasta la línea de rodillos. Es por esto que se ha dispuesto de unos carriles con un grupo de rodillos independiente y móvil, que puede desplazarse desde el umbral del puente grúa hasta la línea de rodillos. El único inconveniente que presenta es que este grupo no se encuentra motorizado, necesitando la

acción de los operarios para desplazar el transformador hasta la línea de rodillos motorizada.

2. Para hacer avanzar el transformador hacia el interior de la cámara, el operario presiona el botón para hacer que los motores giren los rodillos hacia delante o hacia atrás, desplazando la carga que sostienen en una dirección u otra. Hay que tener en cuenta que la capacidad máxima de la cámara de vacío es de tres transformadores, dos en posición vertical y otro en posición horizontal, por lo que deben colocarse de forma adecuada al comienzo de los rodillos para luego tener simplemente que hacer avanzar los rodillos hasta que los tres “encajen” dentro de la cámara.
3. Una vez en su posición en el interior de la cámara, se le conecta manualmente al adaptador -el tornillo de llenado que se retirará después de esta fase- una manguera de llenado, además de conectar al circuito eléctrico de llenado las boyas con un adaptador. Una vez se comprueba el correcto funcionamiento de la boya manualmente, el operario abandona el interior de la cámara de vacío. Desde el exterior, lo único que indica que las mangueras están abiertas es una luz led roja en cada una, que seguirá encendida todo el tiempo que dure el llenado. Cuando la boya se accione, cerrando la entrada de la manguera correspondiente, la luz se apagará, indicando que ha finalizado el proceso.
4. El transformador está listo para su llenado. Mediante un sistema neumático, se elevan los rodillos más próximos a la estructura (tanto los de entrada como los de salida) y se cierran las puertas de la cámara, que se fijan gracias a cuatro bulones de seguridad en cada una. Sólo cuando todos los bulones de seguridad se encuentran perfectamente presionados y la cámara está totalmente sellada, se puede empezar a hacer el vacío. Para esto, se cierra la válvula de escape de la cámara y se abre la válvula que conecta a la misma con las bombas de vacío (permitiendo así realizar el vacío en el interior). En este punto, la cámara de vacío se encuentra completamente aislada, conectada únicamente a las bombas de extracción.
5. Se activa la primera bomba de forma manual, extrayendo el aire del interior de la cámara hasta que el manómetro externo a la misma marca 100 mbar de presión. Una vez se alcanza esta marca, se puede poner en funcionamiento el grupo de extracción auxiliar, conectando la segunda bomba de vacío. Esta última tiene menos potencia que la primera, por lo que únicamente funcionará para reducir el tiempo que

se tarda en efectuar el vacío. Además, accionar esta bomba antes de que se alcance una presión alrededor de 100 mbar podría provocar un sobreesfuerzo por su parte, aumentando la probabilidad de que falle o se averíe.

6. Una vez se logra el vacío en el interior de la cámara, se procede a abrir las mangueras de suministro de aceite (que previamente ha sido recirculado y calentado, como ya se ha explicado anteriormente). Una vez se han llenado por completo los transformadores, saltan las boyas de sus respectivos dispositivos, cerrando por completo el suministro de aceite para evitar desbordamientos. La única forma que se tiene de cerciorarse desde el exterior de que el proceso ha acabado, es mediante las tres luces que se apagan al completarse el llenado de los tres transformadores (también se pueden estar llenando sólo dos, o uno). Cabe destacar que las bombas de vacío siguen funcionando durante esta parte del proceso, todo el tiempo que sea necesario, previendo así cualquier falla de la cámara que aumente la presión en su interior. Al mantenerlas activas se asegura que el vacío será permanente a lo largo del llenado.
7. Habiéndose asegurado de que el flujo de aceite se ha detenido gracias a la acción de las boyas de los sensores de llenado, se procede a realizar los mismos pasos, pero en orden inverso, hasta extraer el transformador del interior de la cámara. Lo primero que se realiza es el cierre de la válvula que conecta el interior de la cámara con las bombas de vacío (para que así no se vea absorbido el aceite que éstas tienen en su interior por el vacío realizado en la cámara). En ese momento, ya se pueden detener las bombas de extracción.
8. El siguiente paso consiste en abrir la válvula de aireación de la cámara, deshaciendo el vacío a medida que el aire entra en su interior. Cuando el manómetro externo a la misma vuelve a marcar la presión ambiente, unos 1013 mbar (o para más seguridad, cuando la marca del manómetro deja de variar, pues se ha alcanzado el equilibrio de presiones) se puede proceder a la apertura de las puertas.
9. Se retraen los bulones de seguridad tanto de entrada como de salida, y se elevan las puertas. Una vez llegan hasta su límite de altura, los rodillos que se habían retraído, descienden a su posición original gracias al aire a presión y sus circuitos neumáticos, dejando preparado el camino para extraer el transformador.

10. Un operario entra ahora en el interior de la cámara y desconecta tanto las mangueras de aceite de los tornillos de llenado, como los sensores de llenado del circuito general de la cámara, liberando los transformadores para que abandonen la cámara de llenado. Se presiona el botón de avance de la hilera de rodillos y se extraen las cubas, finalizando así el proceso de llenado.

### **5.2.2 Acciones que realiza de forma manual el operario**

- Traslado de los transformadores desde la estación de secado hasta la planta de llenado mediante el puente grúa.
- Montaje de los transformadores en el interior de sus cubas, así como el sellado y el cierre de la tapa de las mismas.
- Traslado del transformador con uso del puente grúa para colocarlo sobre el grupo de rodillos móviles, y posterior desplazamiento de este grupo de rodillos hasta alinearlos con el resto.
- Transbordo de la cinta móvil hacia la cinta de rodillos de la máquina de llenado, pues al no estar motorizados se realiza manualmente y requiere de la fuerza del operario para hacer girar los rodillos.
- Posición del transformador dentro de la máquina de llenado, pues hay que asegurarse de que cuando las puertas desciendan no se toparán con el saliente de alguna cuba.
- Apertura y cierre de los bulones de seguridad, las puertas y todo mecanismo que deba accionarse mediante la pulsación de un botón.
- Activación y desactivación de las bombas de vacío.
- Apertura y cierre manual de todas las llaves de paso que se encuentran en la instalación: llaves para el aceite, la llave del aire, las de las mangueras y las válvulas
- Traslado del transformador hacia el final de la cinta gracias a los rodillos motorizados, previamente habiendo desconectado las mangueras y los sensores de llenado de los mismos.

### **5.2.3 Tabla de tiempos**

Se procede a continuación a analizar el tiempo que transcurriría en un proceso completo de llenado con la estación sin automatizar, siguiendo todos los pasos mencionados anteriormente.

Es importante destacar que, sin la presencia de un autómatas, todo el proceso se realiza de forma secuencial. Esto significa que un paso debe realizarse después de otro, sin adelantar o retrasar cualquiera de estos. Además, la presencia del operario debe ser constante, pues al seguir todos los

pasos del proceso de forma manual, la posibilidad de cometer errores es mucho más elevada que la de un autómatas, casi nula.

Puesto que el operario encargado del proceso de llenado va a vigilar su avance para corregir cualquier fallo en el menor tiempo posible tras su aparición, o detener todo el proceso en caso de una avería grave, se toma como inicio del ciclo la preparación de un transformador para su llenado (es decir, desde los pasos previos, punto 1.5.1) y como final de la operación la extracción de los transformadores del interior de la cámara.

Tabla 4. Tabla de tiempos del proceso manual.

Proceso	Tiempo estimado (minutos)
Preparación del transformador	30
Desplazamiento hacia la cadena de rodillos	4
Introducción de los transformadores en el interior de la cámara	8
Conexión de mangueras y sensores de llenado	5
Cierre de puertas, elevación de rodillos y seguridad de los bulones	3
Realización del vacío	25
Llenado	30
Eliminación del vacío (aireación)	3
Elevación de puertas, descenso de rodillos y bulones	3
Desconexión de mangueras y sensores de llenado	5

Traslado de los transformadores hasta el final de la hilera de rodillos	3
---	---

El tiempo total del proceso actual asciende a 119 minutos, sumando los tiempos de la *tabla 4*, lo que equivale a casi dos horas. Calculando que un turno de trabajo supone 8 horas diarias, se podrían llenar en total 6 transformadores en un solo día si se emplease la capacidad máxima de la cámara de vacío (de 3 transformadores por vez).

### 5.3 Automatización propuesta

#### 5.3.1 Automatización de los pasos del proceso

Tras analizar las posibles mejoras que se pueden plantear con la automatización de todo el proceso, hay que mencionar que ciertas acciones manuales deberán seguir siéndolo por la imposibilidad de realizarlas con la ayuda de un autómeta. Estas son: el traslado del transformador hasta los rodillos con ayuda del puente grúa, la conexión de las mangueras a las cubas de los transformadores en el interior de la cámara y de los sensores de llenado, y la posterior desconexión de estos elementos cuando se hayan llenado por completo y las puertas se abran. Por otro lado, el resto de acciones realizadas de forma manual por el operario pueden pasar a ser automáticas con los cambios necesarios y se exponen a continuación.

Siguiendo el orden lógico del proceso, se comienza con la preparación del transformador. Este paso siempre requerirá la acción humana, por lo que su realización es obligatoriamente de forma manual. Sin embargo, si se consigue automatizar de forma correcta la fase de llenado, el operario podrá dedicar el tiempo que dura el resto del proceso a preparar los transformadores siguientes para su llenado. Esto quiere decir que se ahorrarán 30 minutos de cada ciclo excepto del primero, mejorando la productividad con creces, permitiendo que se llenen hasta 15 transformadores en un turno. Esto sólo representa un 20% del total de la producción anterior por día, pero si elevamos los cálculos a un año de producción, se llenarán en torno a 1000 transformadores más gracias únicamente a dedicar esos 30 minutos a preparar otros transformadores.

Bien es cierto que se pueden producir errores, así como llenar menos transformadores que la capacidad máxima de la cámara cada vez, pero siempre será beneficioso que esos 30 minutos estén disponibles para que el operario realice otras acciones. Todo lo referente a los tiempos se analizará en las tablas posteriores a la automatización.

El desplazamiento hacia la cadena de rodillos principal, la que entra en el interior de la cámara de vacío, se puede acelerar si se elimina el grupo de rodillos móvil. Esta parte es necesaria por el hecho de que el puente grúa no llega hasta la hilera principal (las puertas necesitan elevarse para abrirse). Sin embargo, si se sigue la propuesta de automatización referida a la estructura de la cámara de vacío -expresado en el punto 1.4.4-, ahora las puertas se abren lateralmente, lo que quiere decir que el puente grúa puede trasladar perfectamente los transformadores hasta la hilera principal de rodillos. Se elimina el grupo móvil, agilizando el proceso.

Los motores que transmiten el giro a los rodillos mediante un sistema de cadenas se podrán seguir activando de dos formas: una automática, mediante la acción del autómeta, en la que se desplazarán en una u otra dirección hasta que el mismo PLC los detenga; y otra manual, por si es necesario desplazar la hilera en un sentido u otro en caso de fallo o avería.

En tercer lugar, la introducción de los transformadores en el interior de la cámara se hacía hasta ahora de forma manual, comprobando, en caso de llenar la cámara a su máxima capacidad -3 transformadores-, que las puertas podían cerrar correctamente. La colocación de las cubas se puede agilizar utilizando dos grupos distintos de sensores fotoeléctricos, y se expone a continuación.

El primer grupo consiste en dos sensores, uno situado a la entrada de la cámara y otro a la salida, ambos todavía en el interior. Consistirán en una fotocélula con un sistema difuso de luz láser, conectados al autómeta. Éste será siempre el encargado de cerrar las puertas, ya estemos en el modo semiautomático o en el automático -pues como se ha comentado al principio, el propósito es crear un nuevo armario eléctrico simplificado que controle todos los procesos utilizando el PLC como centro de mando-, así que si cualquier parte de los transformadores excede el límite de la cámara e impide que se cierren las puertas, las células lo detectarán. En caso de que las células detecten cualquier presencia, las puertas no procederán a cerrarse, aunque el operario lo solicite, aumentando la seguridad.

El segundo grupo de sensores ocupará las posiciones típicas en las que se sitúan los transformadores en el interior de la cámara. Serán tres sensores fotoeléctricos, que únicamente detectan presencia o no en una distancia máxima hacia la dirección que señalan. Así se decidirá qué mangueras activar, además de tener controlada la presencia de transformadores en el interior de la cámara.

El cuarto paso se deberá seguir realizando manualmente, pues consiste en la conexión de mangueras y sensores de llenado. Esta parte del proceso es invariable, depende únicamente de la capacidad del operario para realizarse, así como de su experiencia en esta misma operación.

En quinta instancia, el cierre de puertas, la recogida de los rodillos próximos a la cámara y la activación de los bulones de seguridad se comandará desde la pantalla adjunta al autómat. Dependiendo del modo escogido de realizar todo el proceso, será necesario pulsar únicamente un botón o varios. El control visual por pantalla nos permite saber cuándo estos tres procesos se han completado de forma satisfactoria, asegurando que la cámara se encuentra sellada y lista para realizar el vacío.

En sexto lugar, el vacío se logra mediante las bombas de extracción conectadas al techo de la cámara metálica. Gracias a la automatización completa estarán conectadas al autómat, decidiendo este cuándo se activan y cuándo es inviable hacerlo, pues estarán sujetas a ciertas condiciones dentro de la programación de PLC. Se mantiene el funcionamiento del segundo grupo de extracción como una bomba auxiliar, pues tiene una potencia menor que la primera, y simplemente se utiliza para reducir el tiempo que tarda en lograrse un vacío absoluto, es decir, 0 mbar.

Una vez se ha realizado el vacío completo, las bombas no se detienen. Se mantendrán activas durante todo el proceso, como ya se ha comentado antes, para asegurarse de que la presión no asciende en el interior de la cámara en ningún momento, permaneciendo el aceite totalmente desgasificado y sin la posibilidad de que su estado se vea afectado por la atmósfera exterior. Comienza ahora la fase de llenado, en la que gracias a los sensores fotoeléctricos de los que se ha dispuesto, sabemos qué mangueras deben abrirse y cuáles no. A pesar de que las mangueras cuentan en su extremo final, el que va unido a la cuba, con un dispositivo que impide que salga el aceite si no están conectadas correctamente para evitar fallos, aumenta la seguridad del proceso si únicamente se abren las electroválvulas necesarias.

Los transformadores se llenarán en su totalidad, cerrándose las válvulas de las mangueras correspondientes cuando se activen los sensores de llenado de las cubas a las que se encuentran conectadas. Cada circuito de llenado agrupa una manguera de llenado, un sensor de llenado y una electroválvula. Son totalmente individuales cada uno de los tres circuitos, por lo que se puede detener una manguera sin variar el funcionamiento de las otras dos, facilitando que se llenen transformadores de distintas series y por lo tanto con distintas capacidades volumétricas en el interior de sus cubas.

Una vez se han detenido las tres mangueras de aceite, comienza el paso ocho, que equivale a la aireación de la cámara. El mismo conducto que se ha empleado para realizar el vacío dispone de dos válvulas: una para conectarlo a la cámara y otro para conectarlo al exterior. En esta fase se abre la válvula de aireación (la que se encuentra en contacto con el exterior), lo que permite que el aire invada de nuevo el interior de la cámara, deshaciendo el vacío. Dependiendo del tamaño de los transformadores y el número de unidades en el interior de la cámara, tardará más o menos el mismo tiempo que la realización del vacío, pero la variación no suele ser significativa.

El noveno paso contempla la apertura de la cámara de vacío. Es importante vigilar que la cámara ya ha alcanzado la presión ambiente en su interior, fácilmente visible en la pantalla de control, pues si aún hay algo de vacío en ella (o falta de presión), las puertas continuarán selladas por la diferencia de presiones, impidiendo que los motores que las desplazan puedan abrirlas. El descenso de los rodillos, la retracción de los bulones de seguridad y el desplazamiento de puertas se produce igual que sus movimientos antagónicos previos, es decir, de forma automática gracias al autómatas central. Al igual que para el resto de pasos, las órdenes se comandan a partir de la pantalla que tenemos disponible para interactuar con la máquina.

El paso anterior permite el acceso a la cámara, por lo que es el momento de desconectar los añadidos necesarios para realizar el llenado. De nuevo, esta operación debe efectuarse de forma totalmente manual, pues depende únicamente del operario.

Por último, se extraen los transformadores de la cámara con el sistema de rodillos vigente, pues el cambio de la posición de las puertas, así como de su forma de cerrarse y abrirse, no afecta en ninguna medida a la hilera de rodillos que forman la salida. Gracias a la disposición de la fábrica, se cuenta con dos puentes grúa, y el segundo puede acceder perfectamente a estos rodillos, pues dispone de un rango de trabajo más amplio que el primero. Con la comprobación de la no existencia de fugas, termina el proceso de llenado.

### 5.3.2 Tabla de tiempos

Se expone a continuación el tiempo que durará la realización del proceso en un ciclo siguiendo el proyecto de automatización y, por lo tanto, empleando el método automático y secuencial o el método semiautomático y con comprobaciones.

Tabla 5. Tabla de tiempos del proceso automatizado.

Proceso	Tiempo estimado (minutos)
Preparación del transformador	30
Desplazamiento hacia la cadena de rodillos	2
Introducción de los transformadores en el interior de la cámara	5
Conexión de mangueras y sensores de llenado	5
Cierre de puertas, elevación de rodillos y seguridad de los bulones	1
Realización del vacío	20
Llenado	20
Eliminación del vacío (aireación)	2
Elevación de puertas, descenso de rodillos y bulones	1
Desconexión de mangueras y sensores de llenado	5
Traslado de los transformadores hasta el final de la hilera de rodillos	2

Como se puede observar en la tabla 5, el total de minutos que tarda en realizarse el proceso ahora es de 93 minutos, es decir, aproximadamente una hora y media. Suponiendo que un turno equivale a 8 horas, y aprovechando la capacidad máxima de la cámara de vacío, se podrían llegar a llenar 8 transformadores en un día, lo que hace 2 más que con el proceso sin automatizar.

Extrapolando los datos obtenidos a un año de producción, esta aumentaría un 25% respecto a la de años anteriores, aun teniendo en cuenta que es un proceso manual y no se puede llegar a calificar del todo como “fabricación en serie”. Sin embargo, únicamente con el cambio realizado a una fase crítica como la fase de llenado, se pueden apreciar resultados positivos en la productividad.

### *5.3.3 Propuestas añadidas a la automatización*

A continuación, se exponen las ideas que tienen como objetivo aumentar el nivel de automatización de la fase de llenado, mejorar el control de la cámara de vacío durante los procesos críticos, facilitar labores inusuales del operario o reducir el tiempo del proceso. Estas propuestas, si bien no se habían considerado a la hora de realizar el estudio a conciencia de la instalación física, se han tenido en cuenta a medida que se ha avanzado en el nivel lógico, pues se presentan como unas buenas opciones tanto de seguridad como de automatización para facilitar el proceso.

#### *Sensores volumétricos de llenado*

En la propuesta de automatización del proceso original, para controlar el llenado de las cubas en tiempo real (y saber qué porcentaje de su volumen interior se encuentra con aceite) hay que discernir previamente entre los tipos de transformadores que se van a introducir en el interior de la cámara, así como las series de los mismos. Esta opción se encuentra presente para seleccionar en la pantalla de control, y al escoger el transformador que se procede a llenar, con unos simples cálculos volumétricos y de caudal se obtiene el tiempo que tardará en llenarse ese transformador.

Para hacer este proceso mucho más eficaz, se puede incluir en la automatización tres sensores de llenado para el interior de la cámara. Se introducen con facilidad en el interior de las tres cubas, además de que aprovecharían la salida sellada del resto de cables del interior para comunicarse con el PLC que se encuentra en el armario exterior. Además, la fiabilidad que presenta este tipo de sensores, específicamente en el análisis



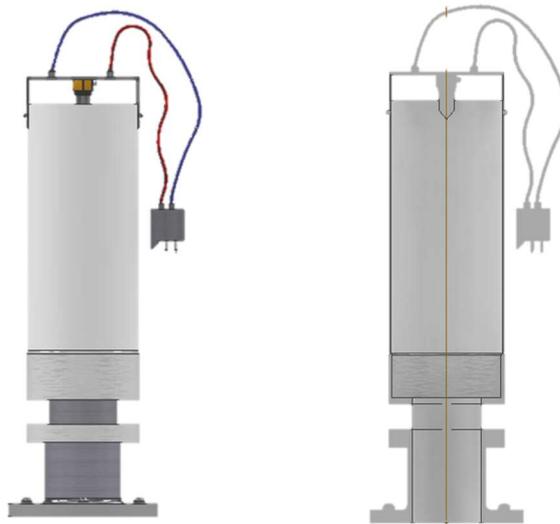


Figura 30. Sensor de llenado de los transformadores actualizado con la nueva sonda electro-óptica.

#### 5.3.4 Modo semiautomático

Es el modelo de proceso más sencillo de los dos. Se define un proceso semiautomático, según la RAE, como “*aquel proceso que efectúa parte de su funcionamiento de forma automática tras una ayuda manual, es decir, es parcialmente automático*”. Esta definición se ajusta perfectamente al modelo que se presentará a continuación, pues será necesaria la presencia del operario para confirmar los distintos pasos que sigue el proceso.

La premisa que se ha seguido para establecer este modo es conseguir que todas las acciones que el operario realizaba antes de forma manual y desde distintos lugares de la planta de llenado, se realicen ahora todas desde el control de una pantalla adjunta al PLC. Esta pantalla de control concentra todas las órdenes que pueden transmitirse a cualquiera de las tres máquinas que conforman la estación, ya sea el depósito de aceite, la máquina de recirculación o la cámara de vacío.

Gracias a la automatización completa de esta fase, se puede tener bajo control todo lo que ocurre en la misma en tiempo real, dándole la posibilidad al operario de actuar rápidamente si sucede algo fuera de lo establecido.

Se podrá actuar sobre cada uno de los procesos que tienen lugar en la planta de llenado de forma individual y totalmente independiente, lo que implica que el orden de las acciones a realizar depende únicamente del operario que se encuentre controlando la cámara en ese momento.

Por un lado, presenta varios beneficios frente al modo automático:

- No existen procesos críticos, pues se puede activar o detener cualquier acción en cualquier momento.
- Se puede revertir el proceso avanzado a partir de cualquier punto y regresar al estado inicial.
- Existe un proceso de confirmación entre cada uno de los pasos a dar. Antes de avanzar al siguiente, el operario puede comprobar visualmente tanto sobre la pantalla como en la propia estación si el resultado del paso anterior es satisfactorio, pulsando el siguiente botón en caso afirmativo. Por lo tanto, es más seguro que el proceso totalmente automático.
- Libera de carga de trabajo al operario, que ahora puede controlar toda la estación desde una pantalla.
- Presenta una flexibilidad elevada si cambia el orden de los pasos en el proceso por cualquier motivo, pues siempre se pueden seleccionar en la pantalla de distinta forma.

Sin embargo, también presenta inconvenientes:

- El ahorro de tiempo frente al proceso no automatizado es apenas notable, pues el operario debe continuar realizando todos los procesos que realizaba previamente.
- Es más probable que se produzca un fallo humano si el orden en que se seleccionan los pasos del proceso no es el correcto. A pesar de la existencia de seguridad inherente al propio programa del autómeta, si esta falla y el operario se equivoca, puede acabar en una avería de la instalación.

Esquema del proceso (mostrado en la figura 31)

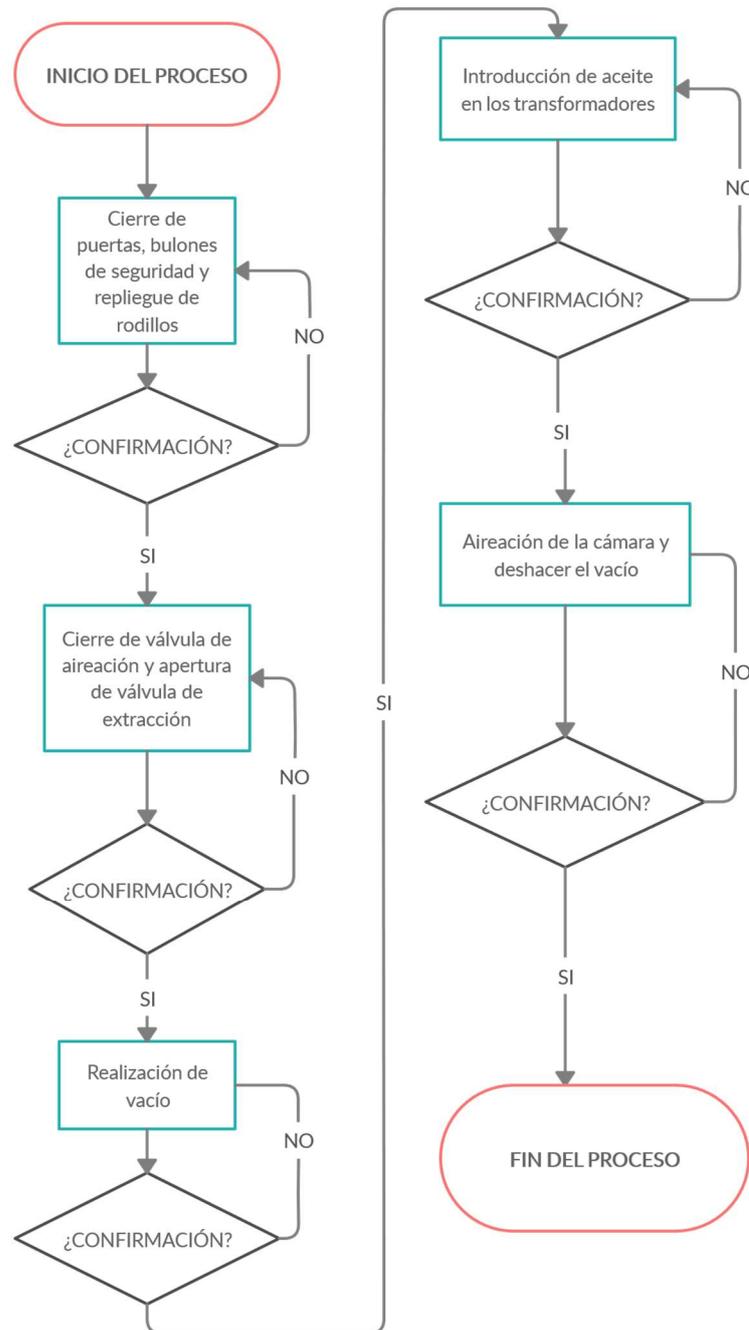


Figura 31. Diagrama de flujo del proceso semiautomático.

Ciertas partes del proceso, que siempre deben suceder así para avanzar, se pueden unir mediante contactores y finales de carrera, haciendo de ellas un pequeño proceso secuencial. Así se consigue simplificar el programa del autómat, reduciendo el número de pasos que debe autorizar y

seleccionar el operario, y por lo tanto minimizando también la posibilidad de que este se equivoque.

Es el caso por ejemplo del cierre de puertas, retracción de rodillos y empuje de los bulones de seguridad. Este conjunto de pasos se puede realizar en uno sólo con la pulsación de un único botón, y así se tratarán en el siguiente esquema resumido, en el que se destacan las confirmaciones necesarias por parte del operario.

**1. Confirmación** - La máquina se encuentra en un estado inicial. Esto quiere decir: las puertas levantadas, rodillos sin contraerse, bombas de vacío apagadas, válvula de aireación abierta y válvula de vacío cerrada (siempre antagónicas), electroválvulas de aceite cerradas y electroválvula de las bombas de vacío cerrada. Si es así, se lleva a cabo el primer paso.

- Se pulsa el botón de inicio/final del proceso. Esto provoca que se retraigan los rodillos de entrada y salida más próximos a la cámara. Cuando se contraen del todo, dejan libre el final de carrera, que al no mantenerse pulsado permite el descenso de las puertas. Cuando estas presionan sus finales de carrera, se activan los bulones de seguridad de cada una de las puertas, cerrando la cámara herméticamente.

**2. Confirmación** - En ocasiones no todos los bulones de seguridad se cierran correctamente, y por lo tanto el sellado no es hermético. Si todo es correcto, se pasa al siguiente paso.

- Se pulsa el botón de control de válvulas. Este botón maneja simultáneamente tanto la válvula de aireación de la cámara como la que permite el vacío conectando las bombas de extracción con su interior. Siempre se encuentran abierta y cerrada, de forma complementaria, permitiendo o impidiendo el vacío. Al pulsar el botón, la válvula de aireación se cierra y la de vacío se abre, permitiendo los siguientes pasos.

**3. Confirmación** - Se confirma de forma visual que las válvulas se encuentran en la posición adecuada. Si no es así, se soluciona de forma manual o se repite el proceso. Si todo es correcto, se continúa con el siguiente paso.

- Se pulsa el botón de vacío. Arranca la primera bomba de extracción, que funciona acorde al manómetro externo a la cámara. Cuando la medida de este llegue a 100 mbar, se pone en funcionamiento la segunda bomba de extracción, funcionando como grupo de vacío

auxiliar. Este paso finaliza cuando el manómetro llega a 0 mbar. Hay que tener en cuenta que, si por cualquier motivo se detienen las bombas, se debe actuar sobre la electroválvula que controla la tubería de extracción cerrándola, evitando así que el vacío de la cámara absorba el aceite de las bombas. Las bombas se mantienen activas durante todo el resto del proceso únicamente por seguridad y para garantizar el vacío en todo momento.

4. **Confirmación** - Se confirma con el manómetro que el vacío en el interior de la cámara es total. Si no es así, se deshacen todos los pasos hasta ahora, para encontrar el problema (posible fuga, mal cerrado de puertas...). Si todo es correcto, se pasa al siguiente punto.

- Se pulsa el botón de aceite, abriendo las electroválvulas que controlan las mangueras y permitiendo el paso del aceite hacia los transformadores. Únicamente saldrá aceite por aquellas mangueras que se encuentren conectadas en ese momento a un transformador, por lo que no se tiene por qué alcanzar la máxima capacidad de producción en el interior de la cámara (que asciende a 3 transformadores simultáneamente). Este paso finaliza automáticamente, cortándose el flujo de aceite inmediatamente después de que la boya disponible en el interior de los dispositivos adaptados a los transformadores detenga la señal eléctrica de las electroválvulas de aceite. Hay que tener en cuenta que también se puede detener de forma manual pulsando de nuevo el botón, en el caso de que haya algún error imprevisto o fallo en el sistema.

5. **Confirmación** - Se confirma que los transformadores están correctamente llenos y que el flujo de aceite se ha detenido. En caso de fallo, se puede actuar sobre las mangueras de forma manual y revertir todo el proceso para volver a realizar el llenado. Si todo es correcto, se avanza al siguiente paso.

- Los transformadores ya están llenos, ahora hay que deshacer el vacío. Se pulsa de nuevo el botón de control de válvulas, permitiendo el paso de aire y que así el vacío del interior de la cámara se libere. La válvula de vacío se cierra, aislando a las bombas de la cámara.

6. **Confirmación** - Se comprueba que las válvulas están en la posición adecuada para deshacer el vacío. Si no se está realizando, se actúa sobre ellas de forma manual. Si todo es correcto y se está llenando de aire la cámara, da comienzo el siguiente paso.

- Se pulsa el botón de vacío, deteniendo el funcionamiento de ambas bombas.

7. **Confirmación** - Se comprueba que las bombas se han detenido y que tanto la electroválvula propia de control como la válvula de vacío están cerradas correctamente, aislando las bombas de la cámara. Si no es así, se actúa manualmente. Cuando el manómetro marque la presión ambiente, se avanza al último paso.

- Se pulsa el botón de inicio/final del proceso, revirtiendo el primer paso que se dio, de forma que se deshace el sellado de las puertas de la cámara, se separan los bulones de seguridad, se elevan las puertas y los rodillos descienden.

*EN ESTE PUNTO SE DA POR FINALIZADO EL PROCESO.*

### *5.3.5 Modo automático*

Este modelo de proceso representa en su totalidad la completa automatización de la planta de llenado, haciendo gala de los enormes beneficios que proporciona la presencia de un autómatas en un entorno industrial. Según la RAE, un mecanismo o proceso automático es “*aquel que funciona en todo o en parte por sí solo*”, mientras que una acción automática es “*aquella que se produce después de un hecho y como consecuencia de él*”. En el caso de este modo de funcionamiento, la fase de llenado se puede considerar automática acorde a estas dos definiciones, pues gracias a seguir un proceso secuencial, se realiza de forma totalmente independiente al operario (sin tener en cuenta los pasos que se deben realizar de forma manual obligatoriamente, mencionados en puntos anteriores).

Se define este modo como secuencial debido a que los pasos se suceden uno detrás de otro de forma ordenada, siguiendo un principio de causa y efecto. El autómatas es el encargado de recibir, analizar los datos y enviar las órdenes pertinentes al resto del sistema, sin necesidad de pasar por las manos del operario.

El proceso totalmente automático comienza tras haber colocado los transformadores en el interior de la cámara de vacío, con todos los añadidos conectados. Una vez se selecciona el modo automático y se pulsa el botón de inicio del proceso, éste continuará hasta el final sin detenerse, realizando todas las acciones bajo el control del PLC. Es por esto que no necesita la presencia de un operario mientras dure esta parte de la fase de llenado, pues la fiabilidad

que nos aporta el autómatas de Siemens es absoluta a la hora de controlar el sistema en tiempo real.

Cuanto más condiciones se impongan a la hora de programar el PLC, más seguridad nos aportará en el proceso. Hay que tener en cuenta que, al ser un modo secuencial y automático, no se necesitan comprobaciones intermedias entre cada paso dado por la máquina, por lo que, si se produce algún fallo en la instalación ajeno al proceso, puede suponer un grave problema para la integridad del sistema.

Tiene, frente al modo semiautomático, diversos puntos a favor:

- El ahorro de tiempo es considerable, pues gran parte de la fase de llenado (en concreto todo lo que concierne a la cámara de vacío excepto las partes inexorablemente manuales) se realiza de forma automática. Esto quiere decir que mientras se suceden los pasos el operario es libre de realizar otras tareas distintas, como la puesta a punto de las siguientes cubas en entrar a la cámara o el traslado de núcleos desde la estación de secado, pues el control y la seguridad corren a cargo del autómatas. Es uno de los beneficios más importantes, pues mejora enormemente la productividad de la empresa.
- Las comprobaciones de seguridad del propio PLC consiguen que los fallos debidos a la programación del mismo sean nulos. Esto quiere decir que el proceso siempre seguirá el mismo orden interno y, por lo tanto, también externo a menos que se produzca un fallo en la instalación.
- La cualificación para ocupar el puesto de operario en la fase de llenado se reduce al mínimo, pues únicamente debe seguir los pasos para realizar las acciones manuales. Cualquier desempeño técnico que implique a los elementos principales de la cámara de vacío se realiza secuencial e independientemente bajo las direcciones del autómatas.

Sin embargo, también presenta algunas desventajas:

- La flexibilidad frente a cambios en el proceso es baja, pues para modificar el funcionamiento del modo automático se debe acceder al autómatas para cambiar por completo su programación.
- Al ser secuencial, cuando se cumplan las condiciones de un paso anterior, el proceso pasará al paso siguiente. Esto quiere decir que si se produce un fallo en el sistema que no afecte al desarrollo o la consecución de las condiciones necesarias para avanzar, no se notificará al operario, continuando con todo el proceso.

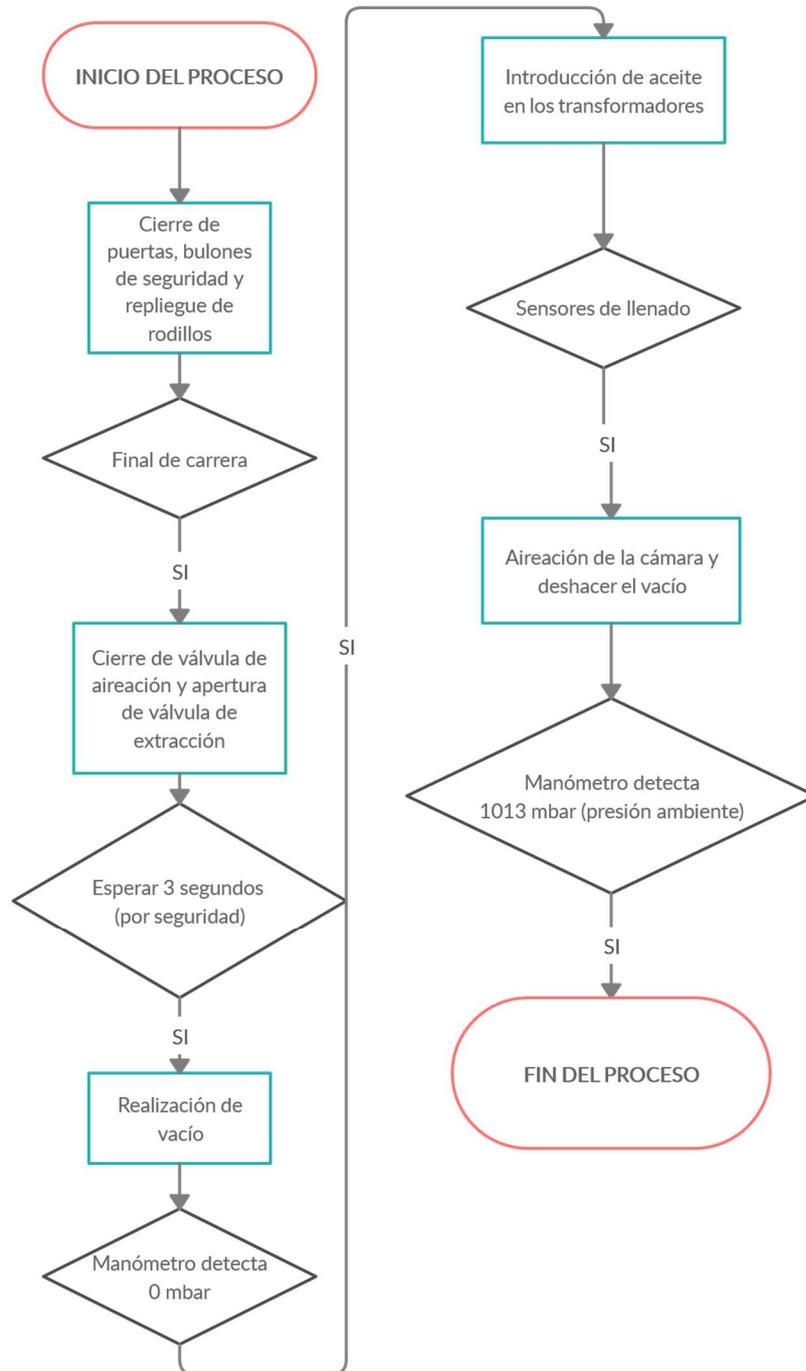
Esquema del proceso (figura 32)

Figura 32. Diagrama de flujo del proceso automático.

El esquema sería el mismo que el descrito para el modo automático solo que sin transiciones con confirmación entre un paso y otro, pues en este modelo se realiza todo de forma secuencial. Lo que hace disparar el comienzo

de las siguientes acciones es el cumplimiento de las condiciones que se establecen para ello en los pasos previos.

Si todo avanza según lo previsto, el modo automático sigue la estela de un proceso cíclico. Esto quiere decir que una vez termina, se puede repetir continuamente las veces que sea necesario, de principio a fin. La única forma de parar el proceso durante su ejecución es pulsar la seta de seguridad, deteniendo el suministro de energía hacia los motores y electroválvulas.

## 6. Programa de automatización

Una vez expuestos tanto los cambios a nivel físico (*punto 4*) como los cambios a nivel lógico (*punto 5*), se dispone ya un “contenedor” ideal para el cerebro destinado a controlar este proceso en su totalidad: la programación del autómeta. Una búsqueda bibliográfica ha permitido obtener la información suficiente sobre PLCs y su programación como para diseñar un programa sencillo y autónomo que se rija a las especificaciones de esta instalación. [3, 4, 5, 7, 23, 28]

### 6.1 Introducción

El programa destinado a completar la automatización de la fase de llenado, mediante el cual se registrará el PLC mientras esté trabajando, se realiza en una aplicación propia de la marca Siemens denominado TIA Portal. Las siglas son acrónimo de *Totally Integrated Simulation*, haciendo referencia a la alta capacidad del programa de simular cualquier proyecto de programación desarrollado en este espacio. [3, 4]

El programa dispone de toda la amplia gama de productos de Siemens, pudiendo incluir cualquier autómeta del catálogo, además de cualquier módulo que queramos añadir a nuestro proyecto.

El entorno TIA Portal nos permite controlar cualquier dispositivo que implementemos a la hora de automatizar. Gracias a su sistema de control de errores y al análisis condensado que se puede realizar de todo un proyecto de automatización, el ahorro de tiempo a la hora de programar y poner en marcha un entorno industrial es considerable. No requiere de la utilización de distintos programas para lograr completar un proyecto, todo se encuentra en el mismo entorno.

Un punto a tener en cuenta además de la flexibilidad, es la facilidad con la que se pueden solucionar errores de programación o modificar el programa inicial una vez se ha puesto en marcha la instalación en la que se encuentra trabajando el PLC. Esto se debe a que todo se puede realizar online, Sin necesidad de encontrarse in situ.

Se empleará como lenguaje de programación el KOP, basado en esquemas de contactos o Ladder. Además de ser el más intuitivo, el hecho de que sea un lenguaje de programación gráfico no reduce las posibilidades del mismo, pues además de los típicos contactos existen ya implementados distintos bloques que realizan todas las funciones necesarias en automatización. Como última opción, se pueden implementar funciones

propias y agruparlas en bloques de programa para utilizarlas en distintas ocasiones.

El lenguaje KOP es similar a los esquemas eléctricos, siguiendo la misma lógica que éstos, por lo que en el visualizador del programa sigue la misma disposición que seguirían los cables en físico.

A pesar de decantarse por un lenguaje, la flexibilidad del programa de Siemens permite utilizar distintos lenguajes de programación en distintos segmentos. Por lo tanto, en cualquier momento se puede escribir un nuevo segmento en otro de los dos lenguajes disponibles por defecto, ya sea FUP (de nuevo un lenguaje de estilo gráfico, pero que se basa en el álgebra booleana para completar los esquemas y los bloques de funciones) o AWL (un lenguaje orientado a la máquina, similar a los lenguajes de programación clásicos, al que se pueden traducir los dos anteriores, siendo el más complejo de todos).

## 6.2 Tabla de variables

Para condensar la información, el programa se agrupa en variables. Cada una de ellas representa una entrada o salida del PLC o cualquier tipo de marca de bits, como veremos más adelante. En este programa se emplearán únicamente módulos de entradas digitales, entradas analógicas y salidas digitales, por lo que las variables se deberán corresponder a estos módulos o serán las variables internas de la CPU. Todas las variables utilizadas en el programa expuesto a continuación se encuentran en la siguiente tabla de variables.

Las entradas digitales se muestran con la letra I, y son variables de tipo booleano, es decir, sólo pueden tener el valor 1 o 0, activada o desactivada. El módulo de entradas digitales cuenta con 16 bits, por lo que se dispone de I0.0 hasta I0.7, y luego de I1.0 hasta I1.7. La entrada representada con las letras IW se corresponde a la presión detectada por el manómetro, es decir, que su valor es analógico y por lo tanto el tipo de variable en este caso es *int* (un valor numérico entero entre 0 y 32768, pues tienen una resolución de 16 bits). El módulo de entradas analógicas únicamente tiene 13 bits, por lo que se dispone desde IW288 hasta IW303. (La resolución equivale al número de bits que pueden formar una palabra en una muestra digital. Si tiene una resolución de 16 bits, el total de tamaño son  $2^{16} = 65536$ ).

Las salidas digitales se muestran con la letra Q, y al igual que las entradas son únicamente booleanas, es decir, con valor 1 o 0. Se utilizarán dos

módulos de salidas digitales con resolución de 8 bits cada uno, por lo que se dispone de Q4.0 hasta Q4.7 y desde Q5.0 hasta Q5.7.

Por otro lado, las marcas del sistema se definen con la letra M precediendo a cualquier número dentro de la resolución de la CPU. Se establecen como marcas del sistema aquellas variables dispuestas en la programación únicamente como controladoras del proceso, como se verá más adelante, o en el caso de que se quieran activar o desactivar contactos mediante el uso de una pantalla externa. En este último caso, como se explicará en el punto 1.7, mediante una pantalla lo único que se puede forzar a 1 o a 0 mediante distintos botones, pulsadores... son las marcas del sistema, y no las entradas o salidas disponibles gracias a los distintos módulos añadidos a la CPU.

Aquellas marcas con una letra adicional cumplen funciones específicas en este proyecto. Este es el caso de la variable MW4, del tipo *word*, necesaria para completar uno de los apartados de un bloque de función que se verá más adelante. También sucede lo mismo con la variable MD40, del tipo *real*, pues representa la presión real que existe en el interior de la cámara (captada por el manómetro) una vez se ha escalado la variable analógica de entrada del sensor.

Tabla 6 Variables empleadas en el programa.

Nombre	Tipo de datos	Dirección
Sensor Láser	Bool	%I0.0
Inicio Proceso	Bool	%I0.1
Puertas Selladas	Bool	%I0.2
Sensor 1	Bool	%I0.3
Sensor 2	Bool	%I0.4
Sensor 3	Bool	%I0.5
Boya 1	Bool	%I0.6
Boya 2	Bool	%I0.7
Boya 3	Bool	%I1.0
Puertas abiertas	Bool	%I1.1
Modo automático	Bool	%I1.6
Seta de emergencia	Bool	%I1.7
Presión Cámara	Int	%IW288
ENERGÍA	Bool	%Q4.0
Rodillos hacia delante	Bool	%Q4.1
Rodillos hacia atrás	Bool	%Q4.2
Válvulas	Bool	%Q4.3
Electroválvula depósito	Bool	%Q4.4
Máquina recirculación	Bool	%Q4.5
Cierre puertas	Bool	%Q4.6
Bomba 1	Bool	%Q4.7
Bomba 2	Bool	%Q5.0
Manguera 1	Bool	%Q5.1
Manguera 2	Bool	%Q5.2
Manguera 3	Bool	%Q5.3
Aceite	Bool	%Q5.4
Apertura puertas	Bool	%Q5.5

Nombre	Tipo de datos	Dirección
RET_VAL	Word	%MW4
Bipolar	Bool	%M6.0
Pres. Escalada	Real	%MD40
POWER	Bool	%M100.0
Depósito de aceite	Bool	%M100.1
Recirculación	Bool	%M100.2
SA Salida de aceite	Bool	%M100.3
SA Retr7Contr Rodillos	Bool	%M100.4
SA Cerrar puertas	Bool	%M100.5
SA Abrir puertas	Bool	%M100.6
SA Bulones de seguridad	Bool	%M100.7
AV Rodillos	Bool	%M101.0
RET Rodillos	Bool	%M101.1
SA Control Válvulas	Bool	%M101.2
SA Bomba 1	Bool	%M101.3
SA Bomba 2	Bool	%M101.4
SA Manguera 1	Bool	%M101.5
SA Manguera 2	Bool	%M101.6
SA Manguera 3	Bool	%M101.7
Llenado Activo	Bool	%M102.0
Proceso Activo	Bool	%M102.1

Se marcan en amarillo dos variables que pueden emplearse o no, dependiendo de cómo se trate el proceso de cerrar y abrir las puertas de la cámara. En este caso, se van a tratar como un proceso secuencial siempre, conformado por finales de carrera y contactores, por lo que únicamente será necesario mandar la señal de abrir y cerrar puertas, y no hará falta controlar los rodillos móviles o los bulones de seguridad.

### 6.3 Programa

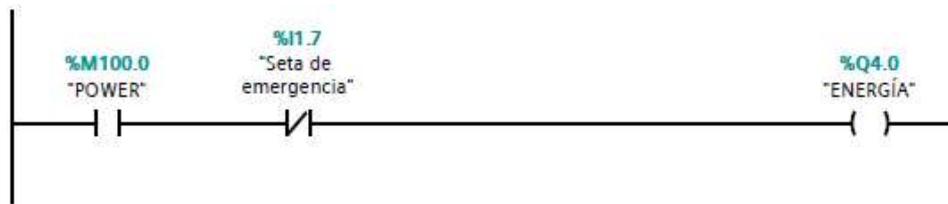
Toda la programación en el caso de este proyecto se ha realizado mediante esquemas de contactos. Hay que tener en cuenta ciertas restricciones:

- Las salidas digitales únicamente se pueden poner a 1 en un lugar del programa, o el programa puede fallar.
- Tanto el modo automático como el modo semiautomático se tienen que implementar en el mismo programa, por lo que cada segmento, a pesar de corresponder a una acción particular, funciona para ambos modos, aunque de forma distinta.
- Debe ser secuencial y reiterativo, es decir, se debe poder repetir las veces que sea necesario. Es por eso que se establece un estado inicial con todas las variables y marcas a 0, y cuando el proceso termina se alcanza de nuevo ese mismo estado para poder realizar otro llenado.
- La seta de emergencia, encargada de detener el funcionamiento de toda la estación ante el caso de que se produzca un fallo grave, debe estar programada en lógica inversa. Esto es necesario para que en el caso de que ocurra un fallo eléctrico y se pierda la alimentación de la estación, la seta de emergencia se active y detenga totalmente el funcionamiento.
- Todos los segmentos se ejecutan en paralelo y a la vez, por lo que para que el programa funcione de forma secuencial se deben establecer condiciones de inicio o final de las distintas acciones, así como marcas de control cuando sea necesario.

El estado inicial del que se parte es aquel en el que todas las válvulas se encuentran en posición de reposo, además de que no está llegando energía a ningún componente de la instalación, pues para esto será necesario activar los contactores correspondientes con la marca de POWER. En esta situación, las electroválvulas se encuentran cerradas en su totalidad, las puertas abiertas, los rodillos móviles se encuentran contraídos y los bulones de seguridad están retraídos. A mayores, la válvula de aireación se encuentra abierta y la de extracción cerrada (ambas siempre en situaciones opuestas), por lo que la cámara de vacío se encuentra a presión ambiente, y la válvula que permite el paso del aire a presión está abierta.

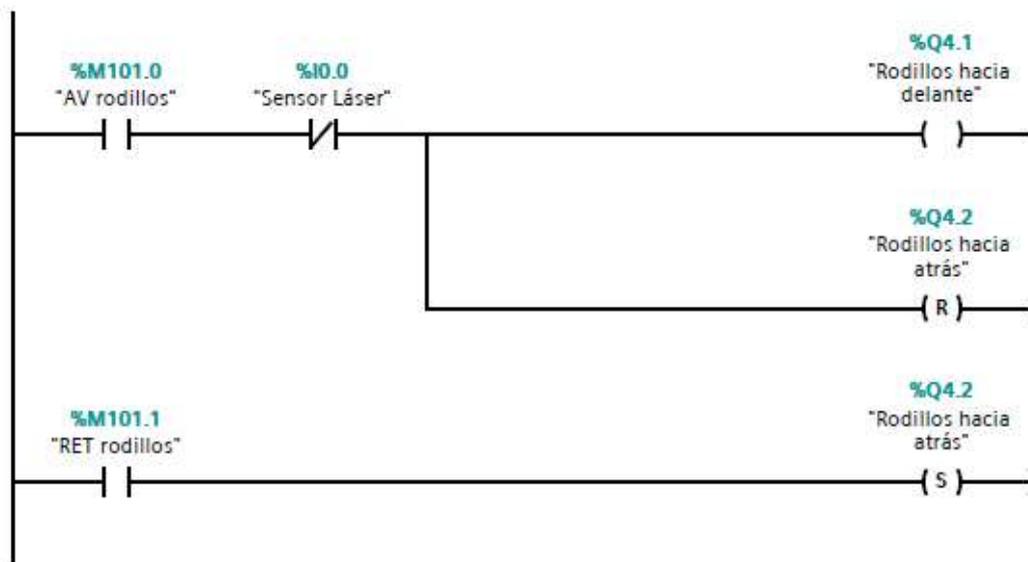
Teniendo todo esto en cuenta, se procede a analizar el programa implementado en el entorno de TIA Portal. *(Los esquemas de contactos, al considerarse fragmentos de código de programación, no se han numerado ni tratado como imágenes externas al texto).*

### Segmento 1. Suministra energía a la instalación completa.



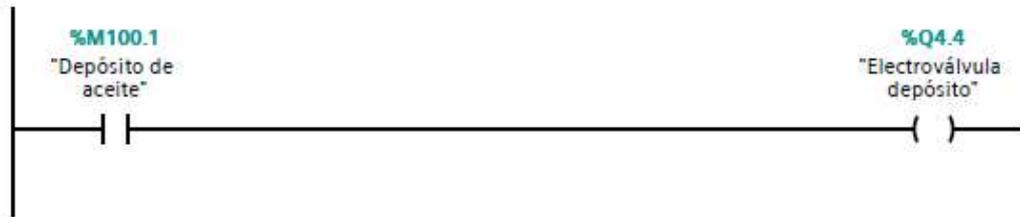
Una vez se activa la marca M100.0 a través de la pantalla de control, se activa la salida Q4.0, que activa el contactor que controla la llegada de energía eléctrica a todos los elementos de la instalación que lo necesitan. Es importante señalar que la seta de emergencia, como se ha mencionado antes, se encuentra siempre programada en lógica negativa y por mayor seguridad se encuentra presente en el resto de segmentos críticos para el proceso.

### Segmento 2. Control de los rodillos.



A través de la pantalla se controla el avance y el retroceso de los rodillos. Esta funcionalidad se encuentra disponible siempre, independientemente del modo seleccionado. El avance se torna imposible si el sensor láser detecta la presencia de un transformador. Este está colocado en la salida de la cámara, impidiendo así que la cuba exceda los límites del interior y facilitando que las puertas puedan cerrar correctamente.

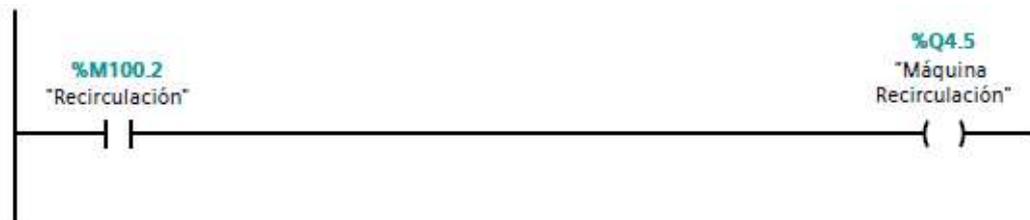
### Segmento 3. Control del depósito de aceite.



Mientras la marca designada se encuentre activa, le llegará tensión a la electroválvula que controla el paso de aceite desde el depósito a la máquina de recirculación. Cuando el operario tenga suficiente, desactiva la marca y se cierra de nuevo el paso entre ambos sistemas.

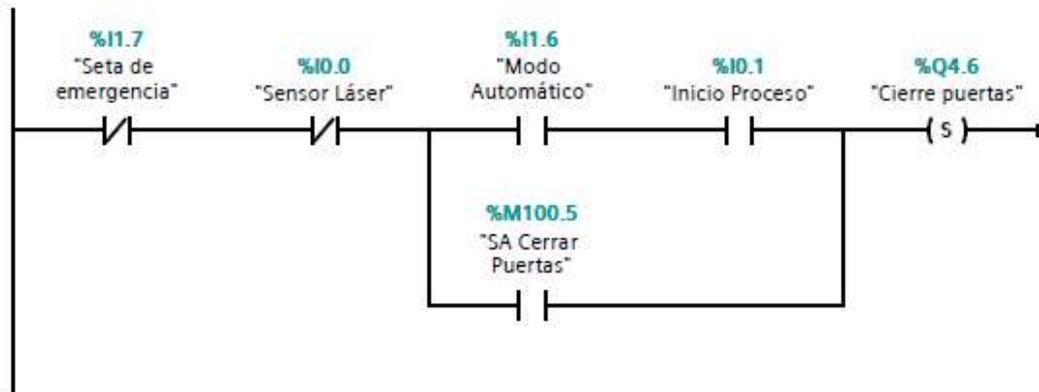
Se puede mejorar la implementación de este paso si se sitúa en el tanque principal de la máquina de recirculación un sensor de nivel como el ya analizado anteriormente en el *punto 1.5.3.2*. Haciendo esto la electroválvula que conecta esta máquina con el depósito de aceite se cierra cuando el sensor detecte el nivel deseado para comenzar a recircular.

### Segmento 4. Control de la máquina de recirculación de aceite.



La máquina de recirculación de aceite constituye un elemento independiente, por lo que dispone de su propio armario eléctrico y conexionado. Al ser así, desde la pantalla se puede controlar que le llegue o no energía al armario para comenzar a recircular. Mediante un contactor, cuando se ponga a 1 la marca correspondiente el circuito se activará, recibiendo electricidad en todos sus componentes y haciendo recircular el aceite repetidas veces hasta que el operario decida que es suficiente.

Segmento 5. Inicio del proceso.



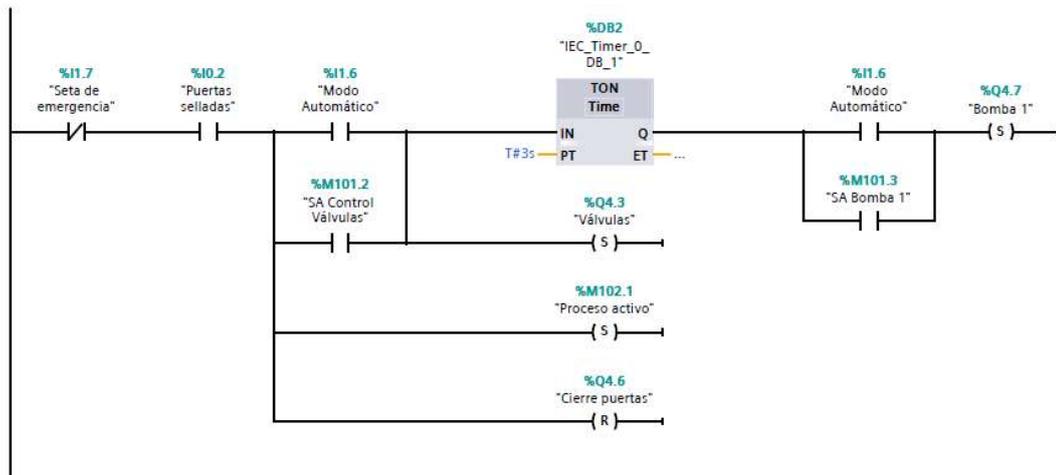
De nuevo se añade el sensor láser de la salida de la cámara, pero en esta ocasión con un contacto cerrado. Esto sirve como comprobación extra de seguridad, pues si este sensor detecta la presencia de una cuba, impide que se cierren las puertas y golpeen contra esta.

Después, se encuentra el puente que aparecerá en repetidas ocasiones en el programa, compuesto por la marca de modo automático y una marca del modo semiautomático. Si se opta por el modo automático, para comenzar el cierre de puertas solo se necesita pulsar el "Inicio Proceso", pues la marca de modo automático ya estará activada. Por otro lado, si se escoge el modo semiautomático, aun así, debe cumplirse la restricción de seguridad que supone la presencia o no de una cuba en el sensor láser. Cuando se pulse la marca de cerrar puertas, comenzará esa acción.

Es importante señalar que las letras SA acompañarán a las marcas del proceso semiautomático (*SemiAutomático*, de ahí la elección) para discernirlas con facilidad de las marcas del proceso general. Al ser el modo automático un proceso secuencial, no necesita marcas propias a excepción de la %I1.6 mencionada anteriormente, se rige únicamente por las excepciones y controladores del programa general.

El proceso de cierre de puertas es un conjunto de acciones tramitadas mediante contactores que se activan cuando distintos finales de carrera mandan su señal. Los pasos seguidos son los siguientes: esa señal de salida del PLC va hasta los rodillos móviles, que se recogen para dejar paso a las puertas. Cuando alcanzan su posición final, presionan un final de carrera cada uno y cuando ambos están activos comienza el desplazamiento de las puertas. Las puertas llegan a su posición final y presionan de nuevo dos finales de carrera, accionando mediante esta señal los bulones de seguridad que aseguran un sellado perfecto de la cámara de vacío.

Segmento 6. Control de la primera bomba de extracción.

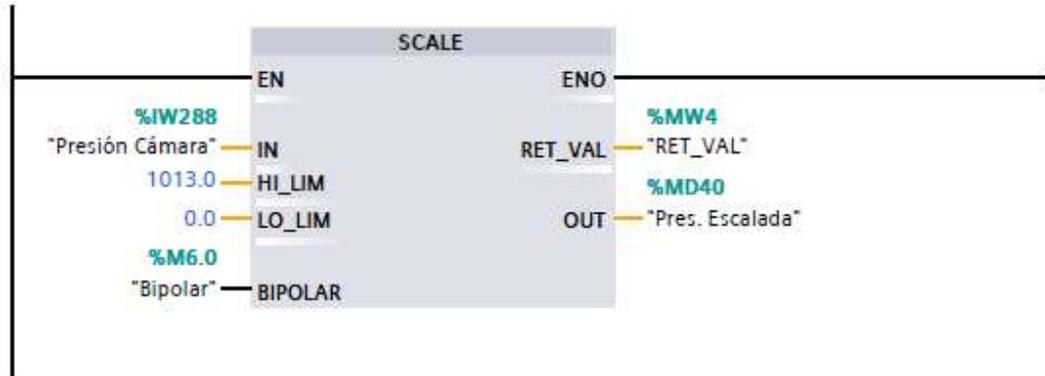


La señal de que se han sellado las puertas se corresponde a la activación interna de los 8 bulones de seguridad disponibles en el sistema, 4 por cada puerta. Se trata como una entrada booleana al autómata, y cuando se recibe el proceso puede avanzar.

Aparece de nuevo un puente entre modo automático, en el que no será necesario presionar ningún botón, o el modo semiautomático en el que el operario, siguiendo el orden correcto del proceso, debe activar el control de las válvulas. Cuando esto se hace, la válvula de aireación se cierra y la válvula de extracción se abre, permitiendo realizar el vacío en el interior de la cámara. En este momento también se pone a 1 la marca de control "Proceso activo" que será necesaria en un futuro. Además, el bit de cierre de puertas se sitúa a 0 para que cese el flujo de energía, pues ya se han cerrado correctamente.

Tras este paso, se esperan 3 segundos únicamente por seguridad, asegurándose de que las válvulas se han desplazado correctamente antes de activar la bomba 1, ya sea en el modo automático o mediante la marca de activación de la bomba en el modo semiautomático. El temporizador constituye uno de retardo a la conexión (*Time until ON*), es decir, cuenta el tiempo establecido en *PT* a partir de la activación de la entrada, y después continúa por el segmento.

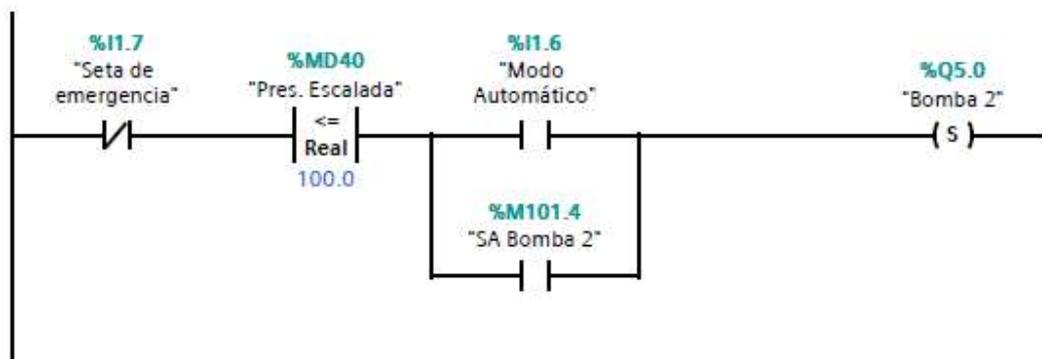
Segmento 7. Escalado de la presión medida por el manómetro.



Uno de los segmentos más importantes del programa, pues sirve para controlar, escalar y poder visualizar la presión real que existe en el interior de la cámara de vacío. Se emplea el bloque *SCALE*, que tal y como su nombre indica escala la presión desde una medida analógica hasta un valor real (el mismo que señala el manómetro, y no la salida de este). Se establecen dos límites entre los que varía la presión de entrada, siendo 1013 mbar el límite superior (la presión ambiente) y 0 mbar el límite inferior (el vacío total). Como salida, el bloque guarda en la variable **%MD40** la presión escalada a un valor real.

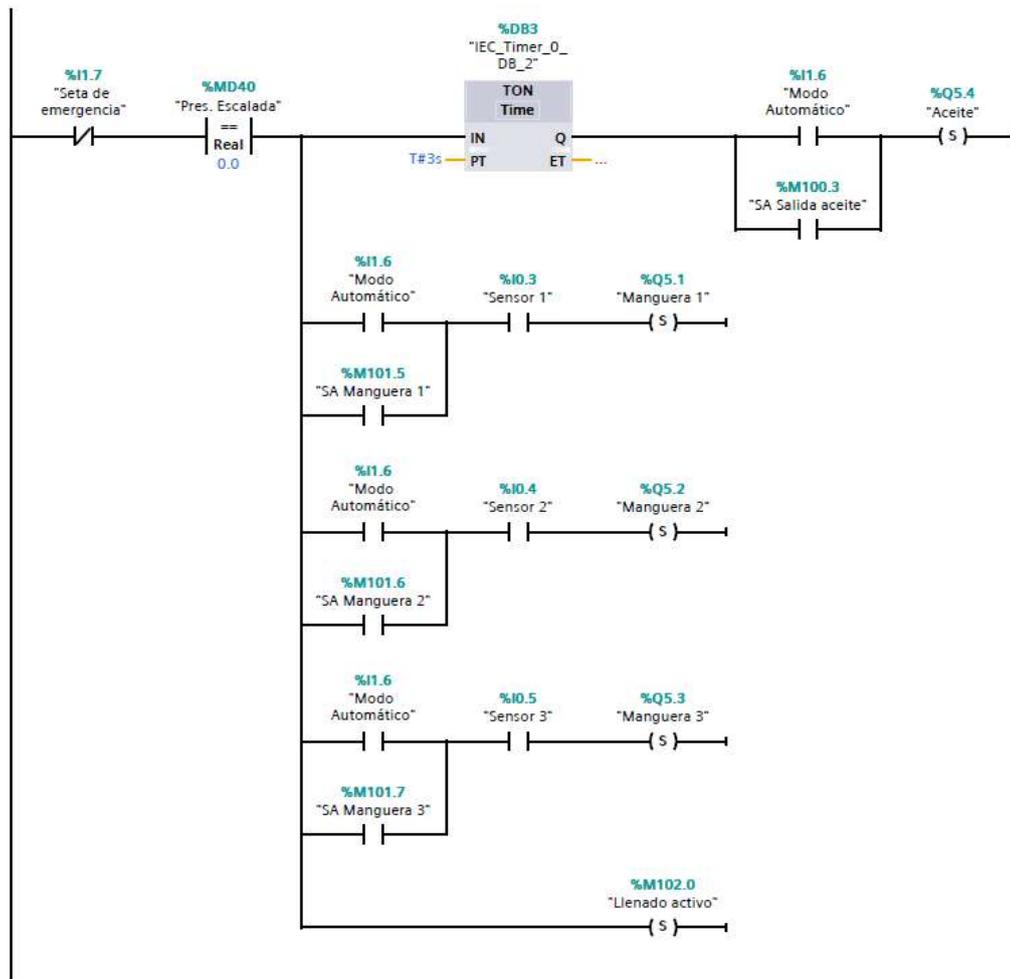
Este bloque funciona durante todo el proceso, independientemente del paso en el que nos encontremos. Se ha dispuesto así porque en distintas ocasiones es necesario conocer la presión de interior de la cámara en ese preciso momento, y es fácilmente accesible de esta manera. Además, no supone una carga de computación extra, pues se actualiza con una frecuencia de un segundo, y sólo se realiza el escalado en este punto del programa.

Segmento 8. Control de la segunda bomba de extracción.



Se comprueba que la presión escalada se encuentra por debajo de 100 mbar, umbral que se debe rebasar para poder activar con seguridad la segunda bomba de extracción. Esta condición se establece como seguridad tanto para el modo automático como para el semiautomático, impidiendo la activación del segundo grupo de extracción si no se cumple.

### Segmento 9. Control del aceite y las mangueras de llenado.



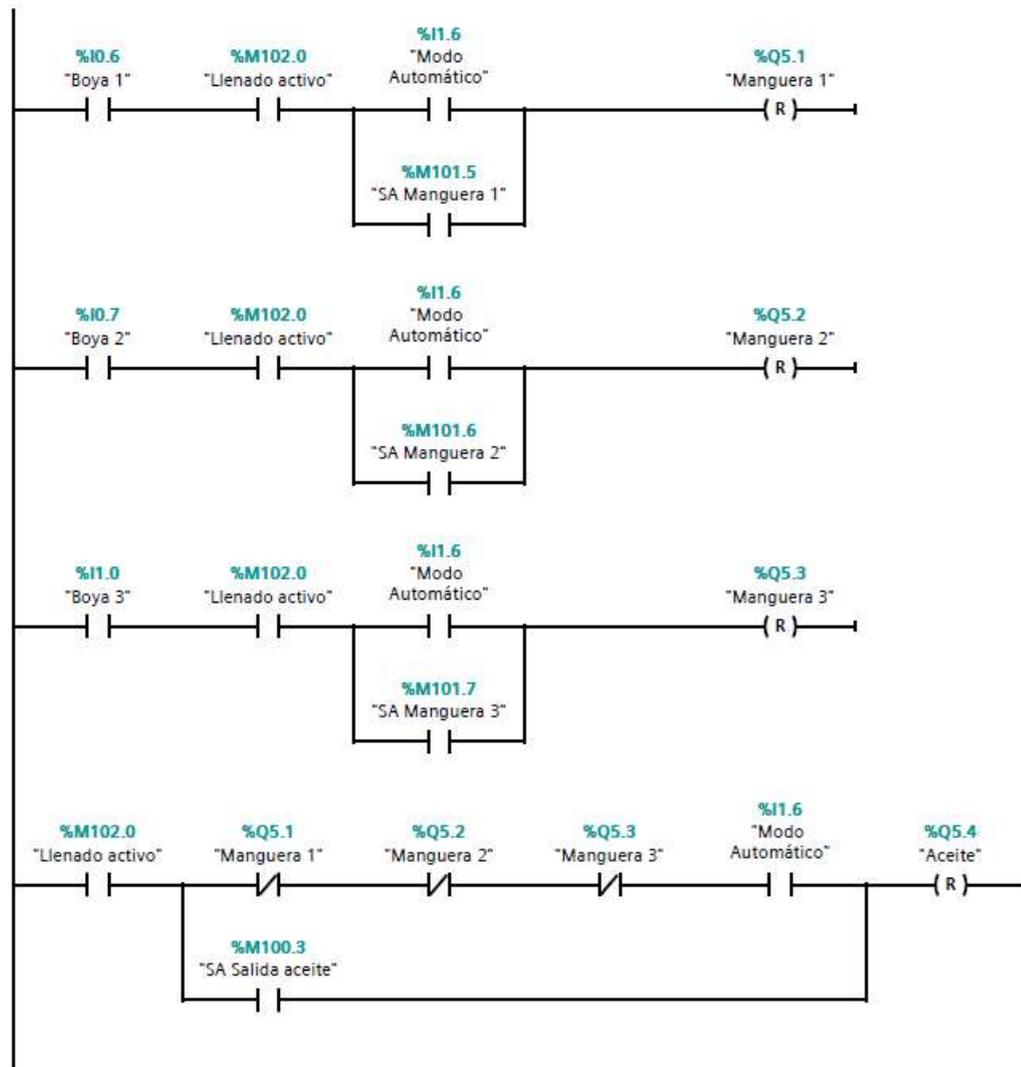
Uno de los puntos críticos del programa. La primera comprobación que se realiza independientemente del modo seleccionado para proceder, es que la presión real en el interior de la cámara debe ser 0. Cuando se alcanza el vacío total el manómetro marca  $\pm 2$  mbar, por lo que este error hace posible que se alcancen los 0.0 en cualquier repetición del proceso.

Una vez se supera esta comprobación de seguridad se activan las mangueras de llenado que se encuentran conectadas a transformadores, con cualquiera de los dos modos, pero deben superar otro punto extra.

Como se ha mencionado en el *punto 1.4.4.1*, durante la automatización se estableció que se dispondría de tres sensores de proximidad situados en las tres posiciones aproximadas que ocuparían los transformadores en el interior de la cámara. En este momento son útiles, pues únicamente se abrirán las electroválvulas de las mangueras que de verdad se encuentren conectadas y por lo tanto tengan que llenar un transformador, conociendo la presencia del mismo gracias a su respectivo sensor. Es conocido que las mangueras no expulsan aceite a menos que se encuentren conectadas a un transformador, abriendo su boquilla, pero si se evita abrir las mangueras que no se utilizan aumenta la seguridad a la hora de realizar uno de los procesos más importantes durante la fase de llenado.

Tras la apertura de las electroválvulas de las mangueras de llenado pertinentes, se esperan tres segundos gracias a un temporizador con retardo a la conexión como se ha explicado en el segmento 6 y se puede activar la salida de aceite mediante cualquiera de los dos métodos. Esta señal de salida está conectada directamente con la electroválvula de salida del circuito de recirculación, a través de la cual se expulsa aceite a 4 bar de presión. El aceite avanza por la manguera principal hasta la división en tres tuberías que conectan con las electroválvulas de las mangueras.

Segmento 10. Control de las boyas de los sensores de llenado.



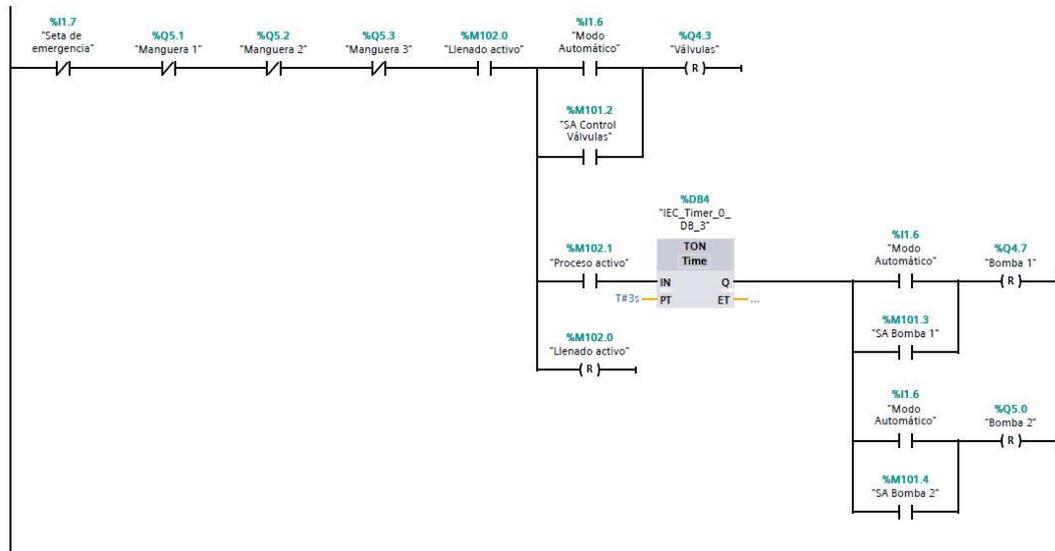
Disponiendo de los sensores de llenado que se activan mediante boyas, siempre que los flotadores alcancen el final de carrera del sensor se detendrá automáticamente la salida de aceite por las mangueras pues cortan la llegada de electricidad hacia las electroválvulas. Sin embargo, para aumentar la seguridad en la fase de llenado, se ha implementado este segmento.

Cuando se activen los sensores de llenado, y mientras la marca de llenado se encuentre activa, se cerrarán las electroválvulas que controlan las mangueras de aceite. Si es mediante el modo automático lo harán directamente según se active la boya correspondiente, pero si es en el modo semiautomático será necesario que el operario marque desde la pantalla las marcas activadas anteriormente para comenzar el llenado.

Se puede emplear el mismo botón, y por lo tanto la misma marca, gracias a la señal de control llamada “Llenado activo”, que debe estar necesariamente activa para que al pulsar la marca las mangueras se desactiven y no al contrario.

Por otra parte, paralelamente al cierre de las mangueras, también se corta el flujo de aceite desde la máquina de recirculación, pues ésta siempre dispone de un poco más del necesario. Como seguridad añadida al proceso, cuando todas las mangueras se encuentran cerradas y el proceso de llenado está activo, se cierra la electroválvula de salida del aceite hacia la cámara de vacío. Esto se puede realizar desde el modo semiautomático sin la restricción de que las tres mangueras se encuentren cerradas pulsando la marca que se ha utilizado previamente para iniciar el flujo de aceite hacia la cámara. Se ha considerado que así se ofrece más control del proceso desde este modo del programa, pudiendo actuar con mayor efectividad ante la presencia de situaciones no deseadas o fallos.

### Segmento 11. Aireación de la cámara.



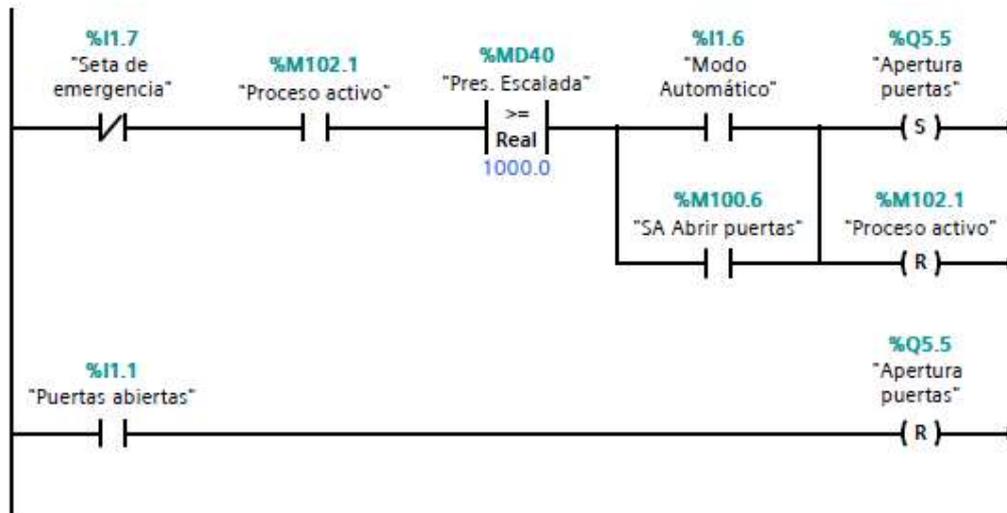
Se establece de nuevo la comprobación de que las tres mangueras se encuentran cerradas, aumentando la seguridad del proceso, así como la marca de control del llenado activo. Esta última se sitúa también en este segmento para que las acciones del mismo sólo se realicen bajo la condición impuesta de que se esté realizando el llenado (a pesar de que en estos momentos ya habrá finalizado). Cuando se cumplan las condiciones, se desactiva el control de válvulas. Esto provoca que deje de llegar tensión a las mismas y por lo tanto

se cierre la válvula de extracción y se abra la válvula de aireación, permitiendo el paso de aire al interior de la cámara y deshaciendo el vacío.

Acto seguido, se pone a 0 el valor de la marca de control de llenado activo, pues ya no será necesaria al finalizar el proceso interno de llenado. Además, así se dispone para comenzar un nuevo ciclo de la instalación.

Ahora, mientras la marca de proceso activo (cuyo valor se cambió a 1 al comenzar la extracción de aire del interior de la cámara, y por lo tanto con la primera bomba trabajando) siga vigente, se esperan tres segundos para concederle el tiempo necesario a las válvulas para cambiar de posición (y así evitar que las bombas de extracción se detengan sin aislarlas, lo que provocaría que el aceite de las mismas sea absorbido por el vacío del interior de la cámara), y se detienen las dos bombas, ya sea automáticamente o pulsando la marca pertinente en la pantalla de control si se ha optado por el modo semiautomático.

*Segmento 12. Finalización del proceso.*



Mientras el proceso siga activo, para no hacer coincidir esta situación con alguna anterior y que resulte en un fallo del sistema activando cualquier marca cuando no corresponde, y la presión real del interior de la cámara sea mayor que 1000 mbar, se procede a la apertura de las dos puertas. El proceso de apertura de puertas es inverso al del cierre: comienza con la retracción de los bulones de seguridad, que presionan el otro final de carrera del que disponen. Al recibir esta señal, las puertas retroceden por el carril hasta su posición inicial, marcando su final de carrera. Este último impulso llega hasta los rodillos retráctiles, comandando que se retraigan y establezcan una vía libre para que los transformadores puedan seguir la hilera de rodillos y abandonar la cámara de vacío.

Cuando las puertas presionan su final de carrera situado en su posición inicial, envían una señal al autómata que se recoge en la entrada %I1.1, siendo entonces cuando se sitúan al valor 0 tanto la marca de proceso activo como la señal de abrir las puertas, preparando a la instalación para realizar un nuevo ciclo, alcanzando de nuevo el estado inicial.

## 7. Pantalla HMI

Como último punto del proyecto, se trata a continuación la adaptación y programación de la unidad destinada a ejercer como interfaz entre los niveles físico y lógico de la instalación. La pantalla táctil HMI es el centro neurálgico de todas las conexiones del autómatas, pues es el único punto de acceso para manejar todo el proceso (obviando los sistemas manuales).

Como se ha establecido en la propuesta de automatización, uno de los elementos más importantes consiste en la pantalla de control. Esta pantalla táctil recibe el nombre de HMI, siglas de “*Interfaz Hombre Máquina*”, y es el medio de comunicación entre el operario y el total de la fase de llenado. Se ha procurado que mediante este útil se pueda controlar la instalación en su totalidad, así como ejercer un control en tiempo real sobre los procesos que tienen lugar en la misma.

La disposición del programa adaptado a la pantalla se basa en distintas imágenes, cada una con los botones adecuados. Existe una imagen principal, en este caso el menú, de la que “cuelgan” el resto de imágenes existentes. (Soporte Industrial de Siemens, 2017). La pantalla escogida, además de contar con todos los elementos que se hayan añadido a su superficie durante el proceso de programación, también dispone de 8 botones físicos establecidos por defecto en la parte inferior del borde de la misma. Es posible añadirles una función a cumplir dentro del programa, pero en este caso no ha sido necesario. Se suelen vincular con los botones establecidos por plantilla general (comúnmente los de la barra inferior, que suelen aparecer independientemente de la pantalla en la que nos encontremos).

Es importante añadir que para poder establecer un control en tiempo real de distintas situaciones se han implementado nuevas variables en el programa anterior, correspondientes a los sensores volumétricos de llenado presentes tanto en el depósito de aceite como en los sensores de llenado que se incorporan a los transformadores antes de ingresar en la cámara de vacío. Estas variables, mostradas en la figura 33, no se utilizan en el programa, pero serán útiles para el control por pantalla.

	Volumen Depósito	Word	%IW290
	Volumen trafo 1	Word	%IW292
	Volumen trafo 2	Word	%IW294
	Volumen trafo 3	Word	%IW296

Figura 33. Variables añadidas de forma extraordinaria para coordinar el control por pantalla.

Las cuatro son entradas analógicas (IW), pues el volumen detectado por estos sensores, explicados previamente, constituye un valor entero con una

resolución de 16 bits. En estos casos es indiferente escalar el valor obtenido en la salida de los sensores, pues el volumen de los distintos recipientes se dará en porcentaje y por lo tanto el valor 0 representará que están vacío (0%) y 32768 representará que están llenos (100%).

A continuación, se describirán las distintas imágenes que conforman el programa cargado en la pantalla y mediante las cuáles se puede tener bajo control todo el proceso.

### *Menú principal*



*Figura 34. Menú principal de la pantalla de control táctil.*

El menú principal cuenta con un botón de energía “Power off” que controla precisamente si la estación se encuentra alimentada o los contactores que permiten esta alimentación están desactivados. Al activarse, cambiará de color a verde y se activará la variable que proporciona energía a la fase.

Con los botones inferiores se puede navegar entre el resto de pestañas, correspondiendo el icono de la casa al menú principal (la imagen actual) y el resto de botones a aquellas imágenes definidas por su nombre, que se explicarán más adelante.

En esta imagen se encuentra presente el logo de la empresa para la cual está destinada la automatización de este proceso, así como la fecha actual en la esquina superior derecha. Esta última se actualiza una vez se pone en

funcionamiento el proceso, y seguirá vigente en el resto de imágenes. Además, se dispondrá de un reloj digital en la esquina superior izquierda del resto de pantallas.

### Depósito de aceite

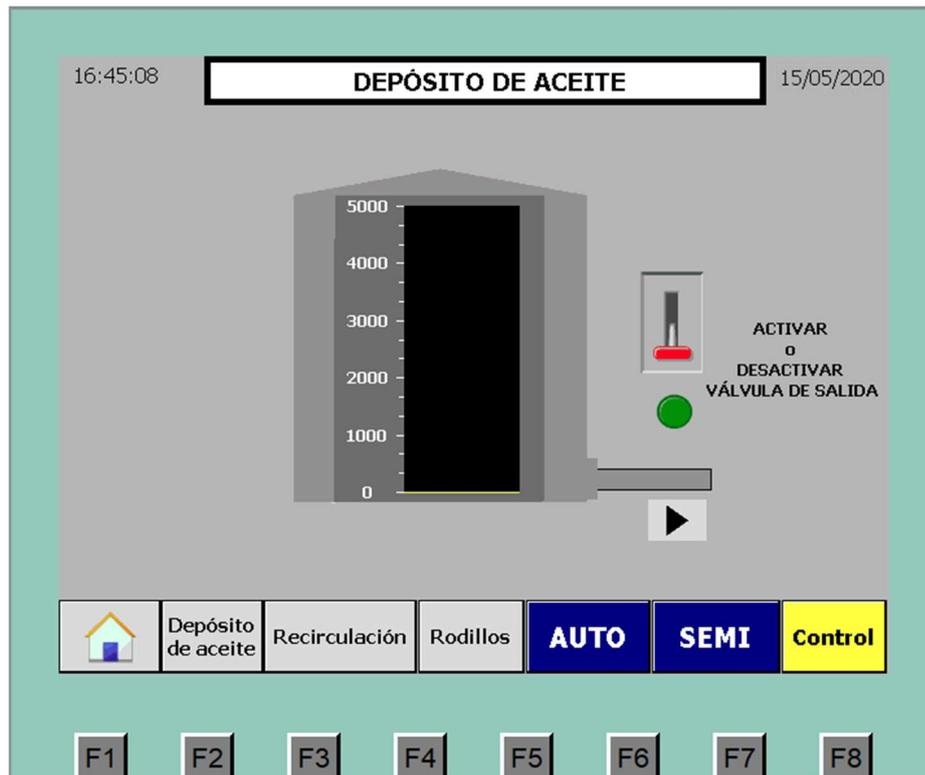


Figura 35. Pantalla vinculada al control del depósito de aceite en la pantalla de control táctil.

Se muestra en tiempo real el volumen de aceite disponible en el interior del mismo, vinculando el objeto del medidor volumétrico presente en la pantalla con la variable asignada al sensor correspondiente, en este caso la %IW290. Esta información llega en todo momento, por lo que el control es en tiempo real.

La palanca a accionar disponible a la derecha de la imagen del depósito abrirá o cerrará la válvula de salida del depósito, siendo el destino del aceite que sale del mismo la máquina de recirculación.

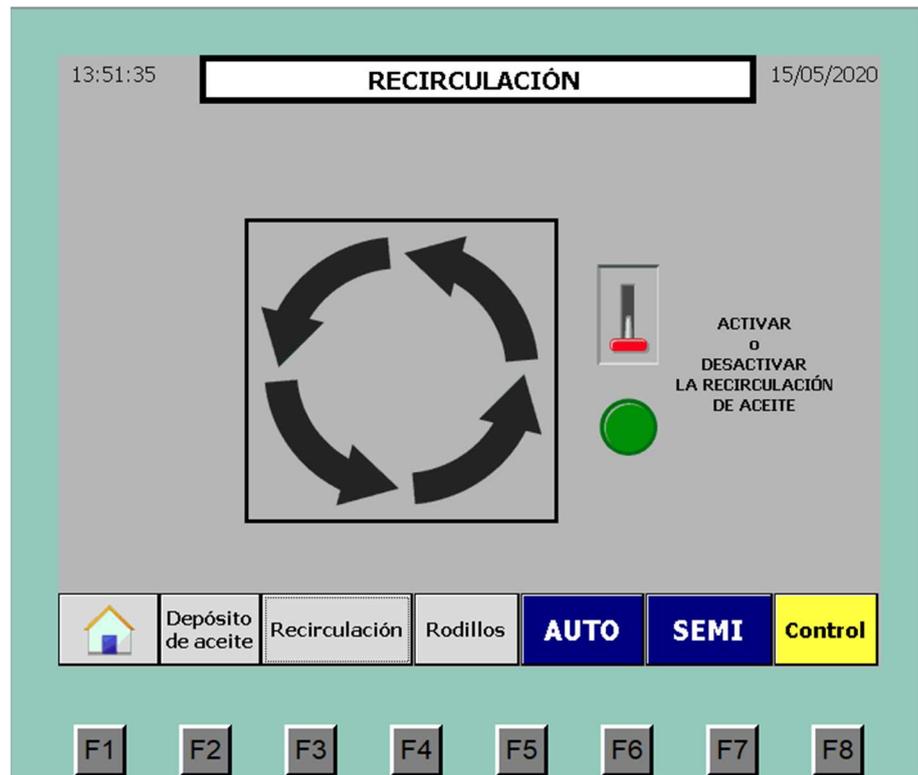
*Máquina de recirculación*

Figura 36. Pantalla vinculada al control del proceso de recirculación en la pantalla de control táctil.

Esta imagen sirve únicamente para activar o desactivar el proceso de recirculación. Como se puede apreciar en las capturas expuestas a lo largo del desarrollo de la instalación, la máquina de recirculación corresponde a un fabricante privado y por lo tanto dispone de su propio armario eléctrico, además de estar totalmente automatizada.

La única forma que tenemos de actuar sobre esta máquina es privándola o proporcionándole energía. Así pues, mientras la palanca se encuentre activada, la máquina realizará el ciclo de recirculación. Para indicar que se encuentra activa, se iluminará el piloto verde que se encuentra debajo, vinculado a la variable del programa asignada a la salida de energía hacia la máquina de recirculación.

Cabe destacar que las palancas de la aplicación de la pantalla funcionan como un pulsador, lo que quiere decir que una vez se activan (y con ella el Bit correspondiente dentro del programa) se quedan en esa posición hasta que se vuelven a pulsar. Cambiar de imagen no afecta a esta situación, pues todas se encuentran en el mismo programa.

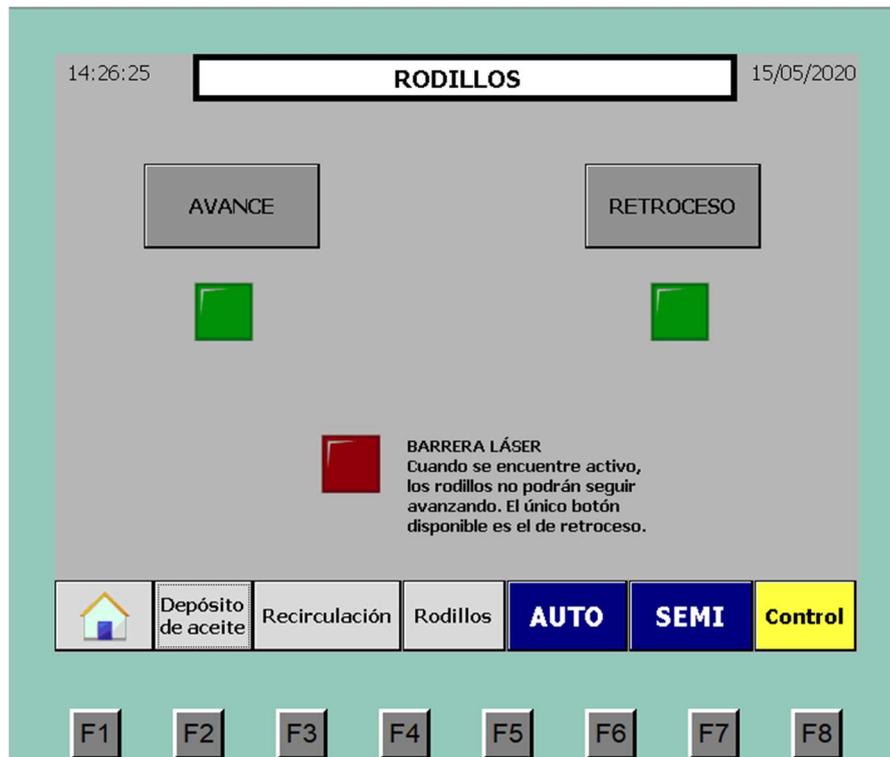
*Control de rodillos*

Figura 37. Pantalla destinada al control de los rodillos en la pantalla de control táctil.

Tanto esta imagen como en las dos anteriores (*figuras 35 y 36*) son útiles para ambos modos de funcionamiento, ya sea el automático o el semiautomático. Las funciones que ayudan a desempeñar al operario son utilizadas en cualquiera de los dos métodos, pues es totalmente ineficaz intentar automatizar acciones obligatoriamente manuales.

En este caso, la imagen se corresponde con el control del movimiento de la hilera de rodillos presente en la cámara y en su exterior. Si se pulsa el botón de avance, estos girarán en un sentido y se encenderá el piloto verde, e igualmente para el botón de retroceso.

Ahora que se dispone de un control preciso para evitar que las cubas de los transformadores excedan los límites de la cámara y las puertas se puedan cerrar correctamente, cuando esto suceda se encenderá el piloto rojo, símbolo de que la barrera láser está detectando la presencia de una cuba. Si es así, únicamente se podrá pulsar el botón de retroceso de los rodillos, el único necesario para recolocar los transformadores en el interior de la cámara de vacío.

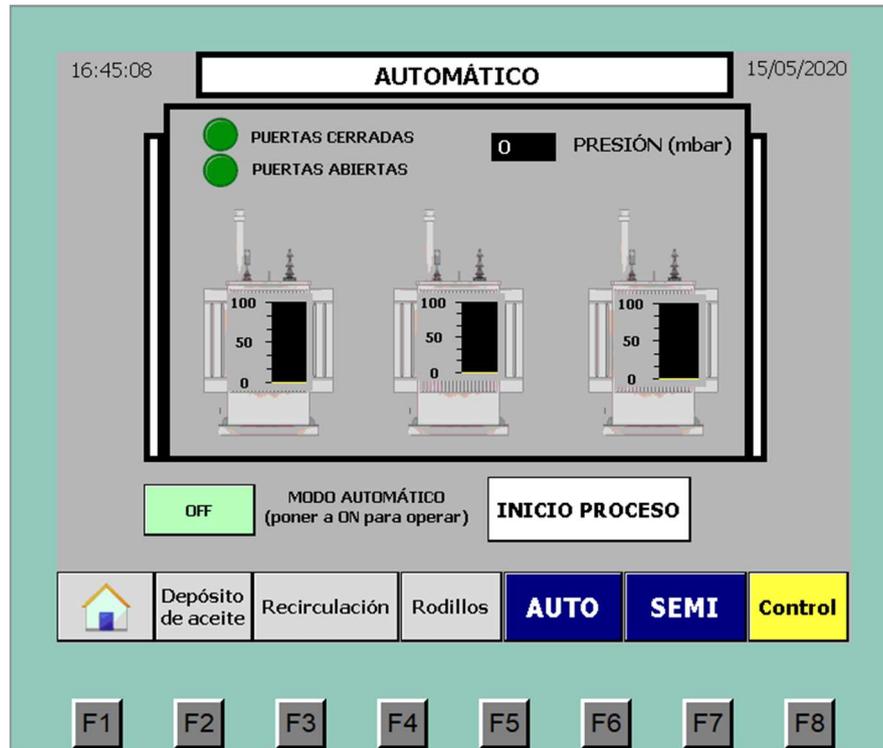
*Modo automático*

Figura 38. Pantalla destinada al control del proceso automático en la pantalla.

En la pantalla se puede apreciar la imagen de control del modo automático. Al haberse implementado en el programa de forma totalmente secuencial, únicamente hay que establecer a *ON* el botón del modo automático, para después pulsar el botón de inicio del proceso.

La imagen representa la cámara de vacío, con las puertas de entrada y salida y los tres transformadores en su interior. Además, el medidor de presión en la parte superior muestra en todo momento la presión escalada del interior de la cámara de vacío en milibares.

Los elementos presentes en la pantalla cambian a medida que avanza el proceso, pues han sido vinculados con las variables del mismo. Por ejemplo, los pilotos verdes se encenderán cuando las puertas se encuentren abiertas o cerradas respectivamente, el color de las puertas cambiará a verde cuando se encuentren perfectamente selladas, y los medidores de volumen de los transformadores cambiarán en tiempo real dependiendo del nivel de aceite que presenten.

Para el resto de variables, como las bombas de vacío o las válvulas de aireación y extracción, se ha establecido la pestaña de control. Únicamente podrán ser modificadas si el botón del modo automático no está pulsado (y por

lo tanto se emplea el semiautomático), pero se puede ver su actividad en tiempo real, como se mostrará más adelante.

### Modo semiautomático

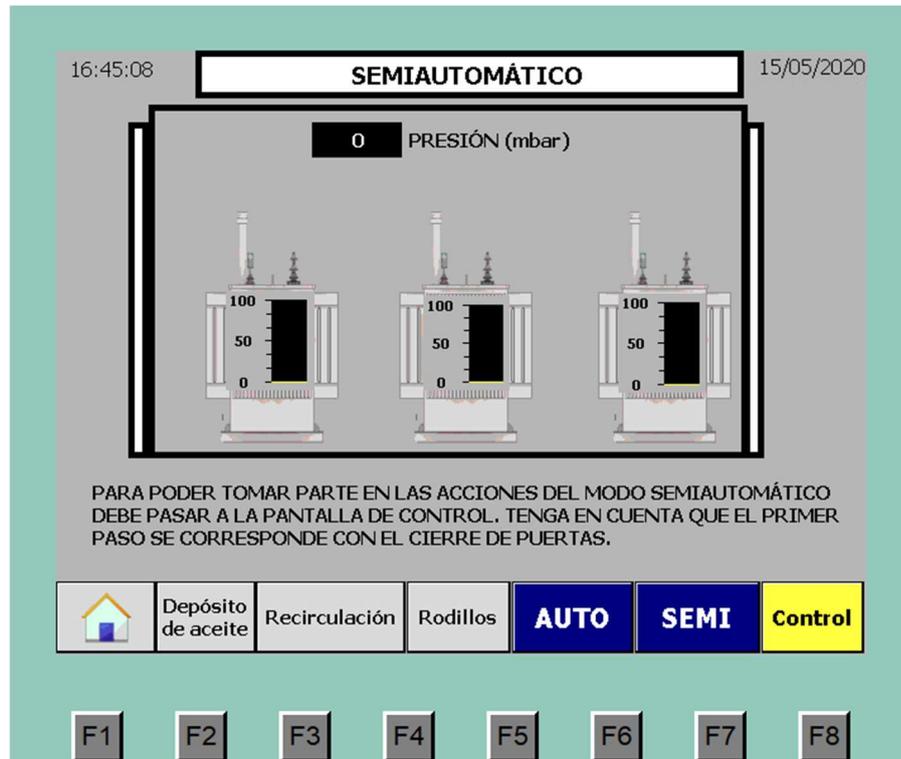


Figura 39. Pantalla destinada a la supervisión del modo semiautomático en la pantalla táctil.

La pantalla correspondiente al modo semiautomático se parece en gran medida a la pantalla anterior, pero en esta ocasión no hay ningún botón sobre el que actuar. Esto es debido a que todas las acciones que se quieran realizar en la cámara correspondientes al proceso de llenado se realizarán desde la pestaña de control.

En esta imagen únicamente se puede discernir el estado de las puertas (blancas si están abiertas o verdes si están cerradas), la presión en el interior de la cámara de vacío y el volumen de aceite presente en el interior de cada uno de los transformadores.

## Panel de control

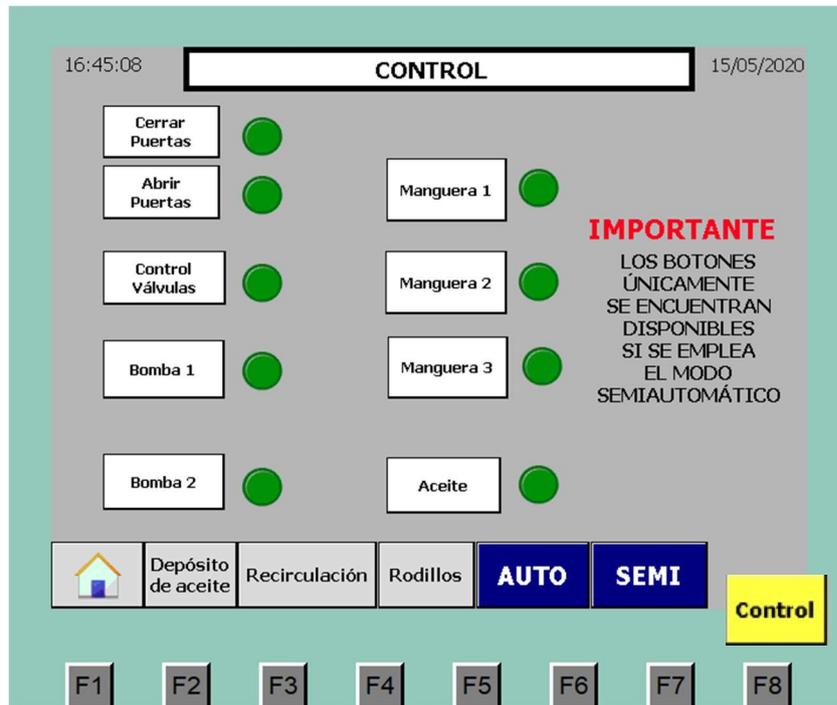


Figura 40. Pantalla destinada al control del modo semiautomático en la pantalla táctil.

Es la principal pantalla de actuación en el proceso. Desde aquí se controlan todos los movimientos a realizar durante la fase de llenado si se ha escogido el modo semiautomático. Cuenta con todos los elementos sobre los que se puede actuar, y en lugar de un control visual se ha optado por otro más intuitivo, encendiéndose los distintos pilotos vinculados a las variables del proceso. Todos los botones se pueden pulsar durante el modo semiautomático.

Sin embargo, hay pequeñas diferencias entre ellos. Los pilotos de abrir y cerrar puertas se encenderán durante el proceso de apertura o cierre respectivamente, y no cuando se hayan completado, situación que se inspeccionará de forma visual sobre la cámara de vacío por parte del operario.

El piloto de control de válvulas se encuentra apagado cuando sea imposible realizar el vacío (válvula de aireación abierta y válvula de extracción cerrada) y encendido en el caso contrario. Los pilotos de las bombas de extracción estarán encendidos cuando estas se encuentren activas, y apagados en caso contrario. Los pilotos de las mangueras estarán encendidos cuando las electroválvulas de las mismas se encuentren abiertas y por lo tanto se pueda proceder a llenar las cubas en el interior de la cámara. Además, el piloto correspondiente al aceite está vinculado a la electroválvula de salida de la máquina de recirculación, por lo que, si este no está encendido, de nada servirá que los tres anteriores lo estén.

## 8. Estudio económico

### 8.1 Coste

Para realizar un estudio económico a conciencia, se evaluarán los gastos que conlleva modernizar la instalación industrial de llenado al vacío, lo cual incluye dos partes: el coste material de todo lo que haya que añadir para lograr una automatización completa y el coste del trabajo implicado en remodelar la disposición y algunos de los componentes de la cámara de vacío para adaptarla a las modificaciones. Además, se evaluará la amortización de este proyecto de automatización teniendo en cuenta la producción de transformadores que se ha tratado anteriormente, calculando un beneficio neto y el tiempo necesario para cubrir gastos. Se han tenido en cuenta distintos precios y proveedores, intentando crear la solución más económica y fiable.

Como se ha mencionado, en primer lugar, se calcula el coste material total de acometer esta automatización. Se tienen en cuenta los dispositivos añadidos a la estación ya existente, así como el PLC y sus diversos componentes.

*Tabla 7. Coste de los materiales necesarios para realizar la automatización.*

PRODUCTO	CANTIDAD	PRECIO UD.	PRECIO TOTAL
Electroválvula 24V DC	12	118,72 €	1.424,64 €
Sensor LED de distancia	1	166,26 €	166,26 €
Barrera de haz de luz	1	567,65 €	567,65 €
Sensor ultrasónico	3	317,10 €	951,30 €
Vacuostato SMC	2	84,57 €	169,14 €
Sonda PT 100	1	16,49 €	16,49 €
Sonda de nivel	4	53,45 €	213,80 €
Contactador 24V	16	80,22 €	1.283,52 €
Puntas de crimpado	400	0,04 €	15,60 €
Canalización para cables	4	5,68 €	22,72 €
Motor eléctrico	4	454,69 €	1.818,76 €
Disyuntor Magnetotérmico	4	263,67 €	1.054,68 €

Armario de acero	1	1.028,55 €	1.028,55 €
Guardamotor	4	69,56 €	278,24 €
Cadenas de rodillos	6	128,06 €	768,36 €
CPU Siemens 315-2DP	1	1.300,00 €	1.300,00 €
Fuente de alimentación	1	240,00 €	240,00 €
Módulo DI	1	231,41 €	231,41 €
Módulo AI	1	390,00 €	390,00 €
Módulo DO	3	282,52 €	847,56 €
Pantalla HMI	1	680,24 €	680,24 €
<b>SUBTOTAL</b>			13.468,92 €
21 % (IVA)			2.828,47 €
<b>TOTAL</b>			<b>16.297,39 €</b>

Como se puede observar en la *tabla 7*, el precio total de los materiales y componentes necesarios para realizar la automatización de la instalación (ya sean sensores o partes del propio autómatas) asciende a 16.297,39€.

Hay que tener en cuenta ahora que, en los cambios de la estructura física que se proponen, destaca la modificación del cierre de puertas de la cámara de vacío. Para aumentar la seguridad en la instalación, se ha diseñado un cierre desplazando las puertas en horizontal en lugar de hacerlo en vertical, levantándolas sobre la altura del suelo 3 metros. Para ahorrar costes en esta modificación, como sujeción de los portones se puede reutilizar la estructura de vigas que anteriormente se utilizaba para elevarlos. Haciendo esto, se debería cortar las vigas a la altura del techo de la cámara y desplazar la estructura hasta el suelo, así como las puertas; además, es necesario crear un carril para propiciar el desplazamiento de las mismas. En resumen:

Coste de alquilar una grúa capaz de levantar más de 10 toneladas de acero (pues no se dispone de ella):

$$650 \text{ €/día} \cdot 3 \text{ días} = \mathbf{1950 \text{ €}}$$

Coste derivado de crear un canal en el suelo, necesario para el desplazamiento de las puertas mientras se mantienen a la altura óptima para cerrar la puerta:

Taladrado de la superficie longitudinal necesaria para crear el canal de las puertas (equivale al alquiler de un taladro neumático) → **30 €/día · 1 día = 30€**

Hormigonado de una superficie de 4 m<sup>2</sup> (precio del metro cúbico de hormigón más el precio de colocarlo) → **430 €**

Corte de las vigas de sujeción mediante la utilización de pistola de plasma o láser → **780€**

**Coste total de los cambios en la estructura:**

**TOTAL: 3190 € \***

*\* Hay que tener en cuenta una fianza que se devolverá íntegra en el mejor de los casos de 890€ por el martillo neumático y la grúa.*

En previsión de un sobrecoste a amortizar, se cuenta con que el tiempo necesario para realizar todos estos cambios en la instalación y que se encuentre de nuevo totalmente operativa es de una semana. Hay que calcular debidamente el dinero perdido por inactividad, pues si no se completa la fase de llenado, no se entrega ningún transformador durante las reformas.

Suponiendo el precio medio de un transformador relleno de aceite gracias a la estación de llenado al vacío en 3500 €, y teniendo en cuenta que en un ambiente de productividad alto toda la instalación industrial trabaja a un 75% de su capacidad, se producen al día una media de 3 transformadores por un valor de 10500 € en total. *Se valora la existencia de días en los que no se completa ningún transformador, así como una producción basada en la manufacturación que puede contar con fallos y errores humanos.*

Sabiendo esto, el dinero total a recuperar representaría un total de **73500 €** perdidos por inactividad de la estación de llenado. Este valor se suma al coste total de la reforma.

En resumen, teniendo en cuenta el coste material de todo aquello añadido a la instalación para su automatización, los costes de obra para modificar físicamente la estación y el coste del paro en la producción durante

una semana, el precio a pagar por completar la reforma diseñada para la estación de llenado al vacío de transformadores asciende a un total de:

$$16.298 + 3.190 + 73.500 = \boxed{92.988 \text{ €}}$$

## 8.2 Amortización

Como fuente del dinero necesario para amortizar el gasto de la instalación, se plantea emplear únicamente los beneficios obtenidos con la venta de transformadores, utilizando así el producto creado (y la agilización introducida en su producción con la reforma) para sufragar los gastos.

En primer lugar, hay que establecer el beneficio neto que se obtiene de un solo transformador. **Se conserva la media de precio de 3500 € por cada uno.** A esta cantidad hay que restarle el precio de las materias primas:

Acero de la cuba → 55 €

Papel → 35 €

Bobinados → 100 €

Aluminio de las chapas del núcleo → 140 €

Aceite → 1,1 €/litro · 80 litros = 88 €

Cableado → 30 €

Mano de obra (teniendo en cuenta el salario de los trabajadores por cada transformador fabricado, pues al ser una cadena todos colaboran en cada transformador) → 2500 €

La diferencia asciende a **525 € de beneficio neto** por cada transformador, lo que equivale a un **porcentaje de beneficio del 15%** sobre cada producto fabricado (en este caso llenado y vendido, pues es la última fase del proceso). Sabiendo, gracias a las tablas de tiempos vistas en el *punto 5* y manteniendo la productividad en un 75% (debido a la participación humana en la fabricación), que con la finalización de este proyecto **se aumenta la productividad de la empresa de 3 transformadores al día a una productividad diaria de 5 transformadores.** Sabiendo el beneficio neto por transformador, de media en un mes se obtendrían:

$$5 \text{ tr} \cdot 5 \text{ días} \cdot 4 \text{ semanas} \cdot 525 \frac{\text{€}}{\text{tr}} = 52.500 \text{ € /mes}$$

Lo que implica un aumento de 21.000 € al mes gracias al proyecto de automatización.

A continuación, para calcular el tiempo que se tardaría en sufragar los gastos derivados de la automatización de la estación, se suponen distintos porcentajes sobre el total de beneficios en un mes dedicados a la amortización de la reforma:

$$\text{Con un 50\%} \rightarrow 0,5 \cdot 52.500 = 26.250 \text{ € ,, } 92.988\text{€} / 26.250\text{€} = \mathbf{3,54 \text{ meses}}$$

$$\text{Con un 30\%} \rightarrow 0,3 \cdot 52.500 = 15.750 \text{ € ,, } 92.988\text{€} / 15.750\text{€} = \mathbf{5,9 \text{ meses}}$$

$$\text{Con un 20\%} \rightarrow 0,2 \cdot 52.500 = 10.500 \text{ € ,, } 92.988\text{€} / 10.500\text{€} = \mathbf{8,86 \text{ meses}}$$

*Se aplican distintos porcentajes porque la cantidad de ganancias netas destinadas al pago de otras necesidades puede variar, ya sea la luz, el agua, el gas, etc.*



## 9. Conclusiones

Tras analizar tanto los objetivos propuestos al comienzo de proyecto como el desarrollo del mismo, se pueden extraer distintas conclusiones sobre los resultados obtenidos.

Es importante señalar que, gracias al estudio bibliográfico realizado tanto de los transformadores (su estructura, el tipo de aceite y los distintos procesos térmicos que tienen lugar en su interior) como de la instalación y distintas posibilidades de automatización, el resultado final es óptimo. Con el primer punto, se han podido mostrar las ventajas de una estructura escalonada en el núcleo de los transformadores, las diferencias entre las clases de aceite de transformador, la situación adecuada de empleo de los aceites vegetales o minerales, y los beneficios que proporciona la existencia de aletas en las cubas a la hora de disipar el calor interno. Así mismo, gracias al segundo punto se han tomado distintas referencias a la hora de realizar la automatización completa de la fase, logrando una mejora sustancial tanto en la productividad como en la liberación de carga de trabajo para el operario.

En relación al desarrollo del proyecto, se han realizado todos los cambios pertinentes para el correcto funcionamiento de la instalación, automatización aparte: se han restaurado las bombas originales de la cámara, colocándolas en el techo y uniéndolas a las tuberías dispuestas para la extracción del aire del interior; se ha establecido una nueva fuente de alimentación para los sensores y actuadores de la máquina, siendo ahora alimentados a 24 V de corriente continua y no a 220 V; se ha constituido una palanca de emergencia en el interior de la cámara de vacío en caso de que algún operario se quede atrapado en su interior cuando se da comienzo al proceso; y por último, se ha conseguido cambiar el conector de los sensores de llenado, provocando que ahora también emitan una señal de salida cuando los flotadores se ven contraídos por el aceite.

En segundo lugar, se ha dividido la automatización de la fase de llenado en dos grupos destacados: la automatización a nivel físico y estructural, y la automatización del proceso a nivel virtual.

La primera de ellas se ha llevado a cabo en su totalidad para sentar las bases necesarias a la hora de realizar la automatización virtual. Se ha reutilizado la estructura de vigas de acero para conformar el nuevo sistema de desplazamiento de los portones de la cámara, incluyendo unos raíles para guiar su movimiento. Además, se han incluido en la instalación diversas electroválvulas que se emplean ahora para controlar el flujo tanto de aire como de aceite en distintos puntos del recorrido: la electroválvula de salida de aceite del depósito y de la máquina de recirculación, y se han adaptado las nuevas electroválvulas de las mangueras de aceite a 24V DC. Por último, se han incluido sensores de proximidad y detección de presencia en el interior de la cámara para realizar un mejor control en tiempo real del proceso, así como se

puede destacar la incorporación de nuevos sensores de llenado mediante tecnología electro-óptica.

La suma de todos estos elementos físicos conduce a un escenario óptimo para desarrollar un programa secuencial con dos modos de uso distintos, siendo uno un proceso semiautomático con un control exhaustivo de los múltiples pasos a seguir, y el otro un proceso totalmente automático que libera de toda carga de trabajo al operario. La seguridad y confianza que inspira el funcionamiento del autómatas de forma totalmente independiente, se ven reforzadas gracias a la disposición de una pantalla táctil empleada para controlar todo el proceso. Actuando como centro de mando, este elemento, que se utiliza como interfaz para conectar a la máquina con el operario, permite actuar en todo momento sobre el proceso, así como comprobar el correcto desarrollo del mismo en tiempo real.

En resumen, la adaptación de la instalación de llenado de transformadores al vacío gracias a la incorporación de un autómatas ha permitido que se optimice la producción, así como la reducción del tiempo necesario para completar un ciclo. Al agilizar esta fase crítica, y siguiendo el desarrollo de las tablas de tiempo impuestas en los distintos métodos de funcionamiento, la productividad se verá aumentada en un 25%, mientras que el operario se verá liberado de realizar acciones manuales no indispensables, incrementando su seguridad en el entorno industrial.

Como líneas de trabajo a seguir, no se pueden establecer muchos puntos en cuanto al resto de la instalación. Hay que tener en cuenta que el proceso de manufacturación de transformadores que tiene lugar en el interior de este entorno industrial es un proceso lento y manual, tal y como implica su nombre. Esto quiere decir que no se podría implementar un sistema de cadena en serie, en el cual las piezas avanzan mediante rodillos o cintas motorizadas, sino que el sistema establecido mediante el cual se desplazan los transformadores gracias a los dos puentes grúa es ideal para la velocidad de desarrollo del proceso.

Fijándose exclusivamente en la fase de llenado, el proceso que se ha automatizado, se podrían incluir actualizaciones para el programa virtual de control, disponiendo una lista de las distintas series de transformadores en la pantalla para mejorar el control en tiempo real del llenado (pues dependiendo de la serie, el tamaño de los transformadores es distinto), añadiendo incluso aquellos transformadores que se desvían de las líneas generales.

En relación a esto último, se podría establecer un área adicional, paralela a la cámara de vacío y también controlada por la pantalla, mediante la cual se pueda controlar el llenado de transformadores que exceden las medidas físicas de la cámara de vacío. A la hora de llenar estos gigantes de acero, el vacío se realiza en el interior de la cuba una vez se ha introducido el

núcleo del transformador, consiguiendo así que el aceite se mantenga desgasificado incluso sin disponer de un entorno de vacío artificial. Mediante distintos sensores y actuadores, se podría controlar el llenado en tiempo real al igual que con los transformadores más pequeños.

Por último, hay que tener en cuenta que el autómatas escogido es modular, lo que quiere decir que se puede actualizar a lo largo del tiempo sin necesidad de modificar la estructura establecida para este proyecto, únicamente añadiendo los módulos nuevos que sean necesarios. Por lo tanto, en caso de que se desee ampliar el proyecto con futuras reformas, la adaptación al entorno será rápida y sencilla.



## 10. Bibliografía

- [1] Acero, G. H. (1994). *Convertidores electromecánicos de energía*. Barcelona: Marcombo.
- [2] Åkerberg, J., Gidlund, M., & Björkman, M. (26-29 Julio 2011). Future research challenges in wireless sensor and actuator networks targeting industrial automation. *9th IEEE International Conference on Industrial Informatics*. Caparica, Lisbon (Portugal): INDIN.
- [3] Belmonte, L. P. (2018). *Comunicaciones Industriales y WinCC*. Barcelona: Marcombo.
- [4] Beresford, D. (2011). *Exploiting Siemens Simatic S7 PLCs*. Black Hat USA.
- [5] Berger, H. (2012). *Automating with STEP 7 in STL and SCL: SIMATIC S7-300/400 Programmable Controllers*. Erlangen: Publicis Publishing.
- [6] Chen, F., Talanis, T., German, R., & Dressler, F. (8-10 July 2009). Real-time enabled IEEE 802.15.4 sensor networks in industrial automation. *2009 IEEE International Symposium on Industrial Embedded Systems*. Lausanne (Switzerland) : IEEE.
- [7] Collins, K. (2007). *PLC Programming for Industrial Automation*. Obtenido de Web Puran: <https://www.webpuran.in/wp-content/uploads/2019/03/plcprogramming.pdf>
- [8] Danikas, M. (Sept.-Oct. 1990). Breakdown of transformer oil. *IEEE Electrical Insulation Magazine ( Volume: 6 , Issue: 5 )* , 27-34.
- [9] Dzung, D., Naedele, M., Hoff, T. V., & Crevatin., M. (31 May 2005). Security for Industrial Communication Systems. *Proceedings of the IEEE ( Volume: 93 , Issue: 6 )* , 1152 - 1177.
- [10] Fernando-Navas, D., Cadavid-Ramírez, H., & Echeverry-Ibarra, D. F. (2012). *Aplicación del aceite dieléctrico de origen vegetal en transformadores eléctricos*. *Ingeniería y Universidad*, 16(1),201-223. Bogotá.
- [11] Fink, D. G., Beaty, H. W., & Carroll., J. M. (1981). *Manual práctico de electricidad para Ingenieros - Tomo 1*. Barcelona: Reverté.
- [12] Flores, W., Mombello, E., Rattá, G., & Jardini., J. A. (2007). Vida de transformadores de potencia sumergidos en aceite: Situación actual. Parte I. Correlación entre la vida y la temperatura. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, VOL. 5, NO. 1.*, 50-54.

- [13] Font, R. O. (2009). *Diseño, implementación y automatización de una planta piloto de saponificación*. Barcelona.
- [14] Frey, G., & Litz, L. (2000). *Smc 2000 conference proceedings. 2000 IEEE international conference on systems, man and cybernetics. 'cybernetics evolving to systems, humans, organizations, and their complex interactions'*. Nashville, TN.
- [15] González, J. M. (2013). *Automatización y robotización de una línea de fabricación de estructuras navales*. La Coruña.
- [16] Karvetski, C. W., Lambert, J. H., & Linkov, I. (April 2011 (First Published on 27 Aug. 2010)). Scenario and multiple criteria decision analysis for energy and environmental security of military and industrial installations. En *Integrated Environmental Assessment and Management (Volume 7, Issue 2)* (págs. 228–236). SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry).
- [17] Kosow, I. L. (1981). *Máquinas Eléctricas y Transformadores*. Barcelona: Reverté.
- [18] Legrand, M., Garzón, R. V., & Aumente., P. A. (2014). *Ingeniería Térmica. Principios de termodinámica técnica y transferencia de calor*. Madrid: Garceta.
- [19] Lorenzo, G. (2009). *Automatización de una planta industrial*. Alicante.
- [20] Minhaz, P. R. (2014). *IEEE*. Obtenido de Transformer Manufacturing Processes.: <https://site.ieee.org/>
- [21] O., H. T., R., J. H., & Arbelaez, J. (2007). Automatización planta de embotellado, aplicando control borroso para la detección de alarmas. *Scientia et Technica (Año XIII, No 37)*, 285-290.
- [22] Oommen, T. V., Petrie, E. M., & Lindgren, S. R. (Marzo 1995). Bubble Generation in Transformer Windings Under Overload Conditions. *Minutes of the Sixty-Two Annual International Conference of Doble Clients*, 8-51.
- [23] Park, S. C., Park, C. M., & Wang., G.-N. (18 Dec. 2007). A PLC programming environment based on a virtual plant. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (Volume 39)*, 1262-1270.

- [24] Pierce, L. (Jan/Feb 1994). Predicting liquid filled transformer loading capability. *IEEE Transactions on Industry Applications* ( Volume: 30 , Issue: 1 ), 170 - 178.
- [25] Pierce, L. (Jul 1992). An investigation of the thermal performance of an oil filled transformer winding. *IEEE Transactions on Power Delivery* ( Volume: 7 , Issue: 3 ), 1347 - 1358.
- [26] Ruiz, P. M., & Rueda, J. C. (2000). *Comunicaciones Industriales*. . Madrid: Paraningo Thomson Learning.
- [27] Saha, T. K., & Purkait, P. (Enero 2008). Investigations of Temperature Effects on the Dielectric Response Measurements of Transformer Oil-Paper Insulation System. *IEEE Transactions on Power Delivery* ( Volume: 23 , Issue: 1 ), 252-260.
- [28] *Soporte Industrial de Siemens*. (Junio de 2017). Obtenido de Sistema de automatización S7-300. Datos de los módulos.: <https://support.industry.siemens.com>
- [29] Vaessen, P. (Oct 1988). Transformer model for high frequencies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1761 - 1768.
- [30] Y. Du, M. Z., Lesieutre, B., & Mamishev, A. (1999). Moisture Equilibrium in Transformer Paper-Oil Systems. *IEEE Electrical Insulation Magazine* (Vol. 15, No. 1), 11-20.





**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

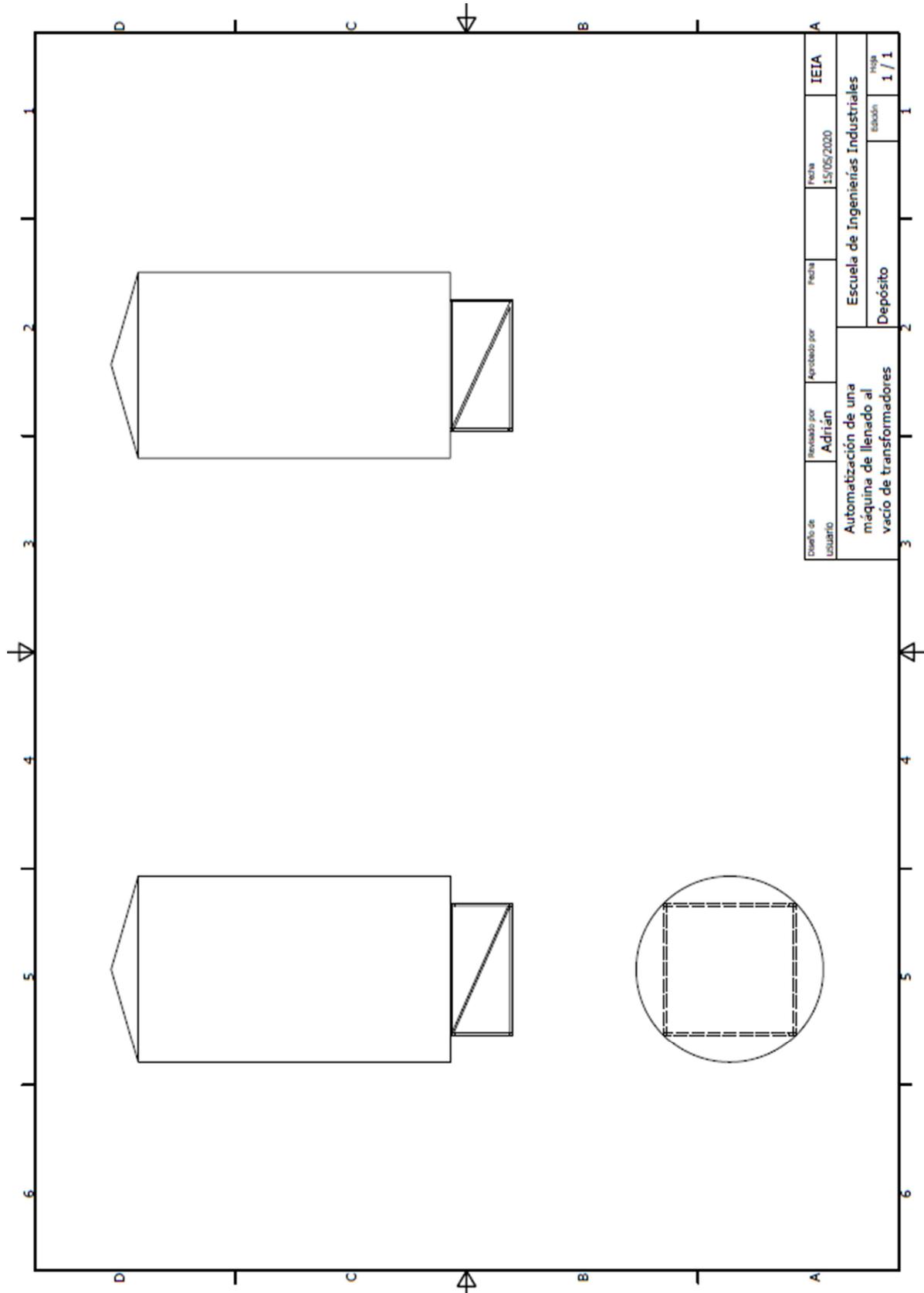
# PLANOS

**Autor:**

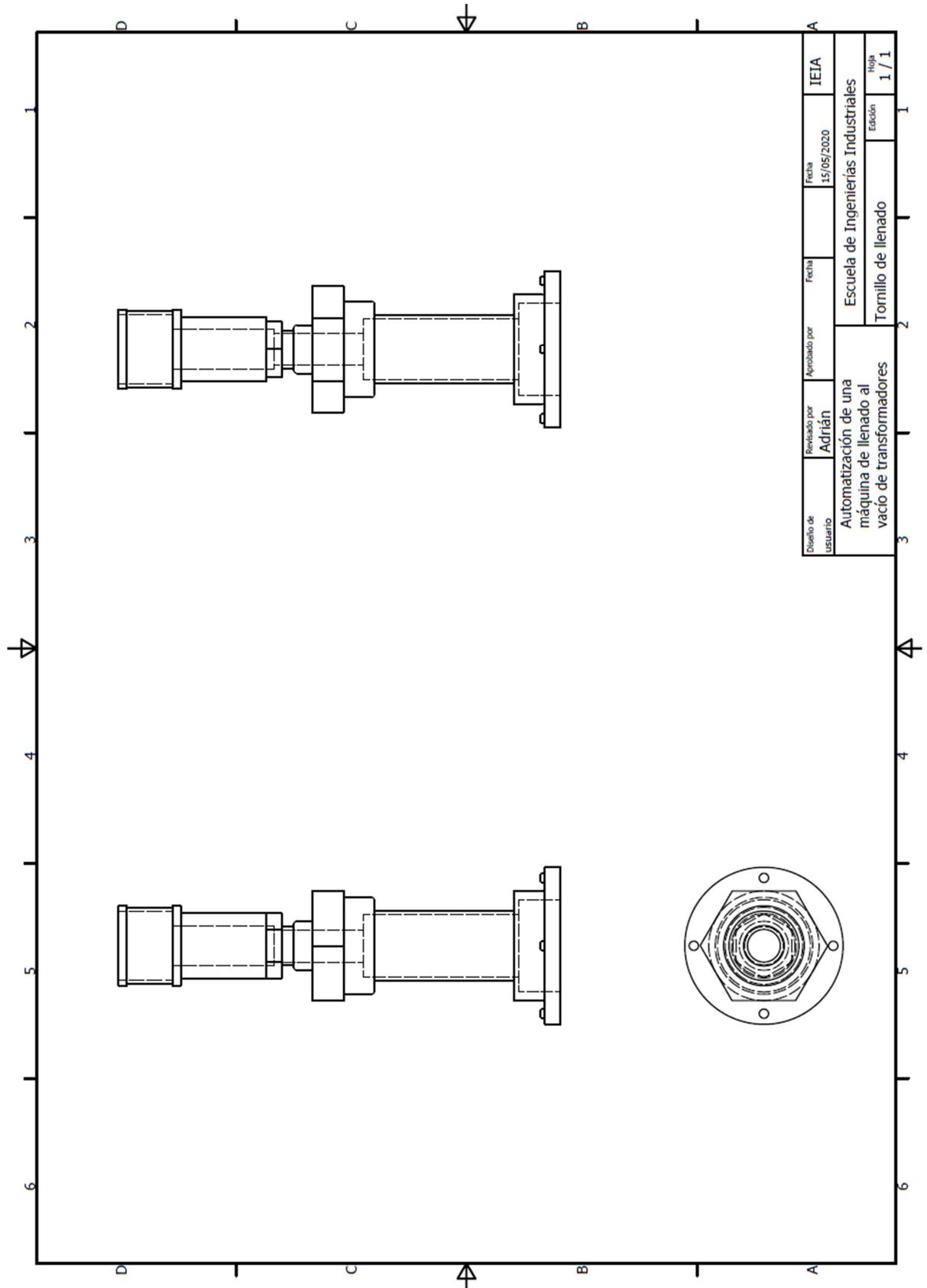
**Severt Silva, Adrián**

**Automatización de una estación de  
llenado al vacío de transformadores**

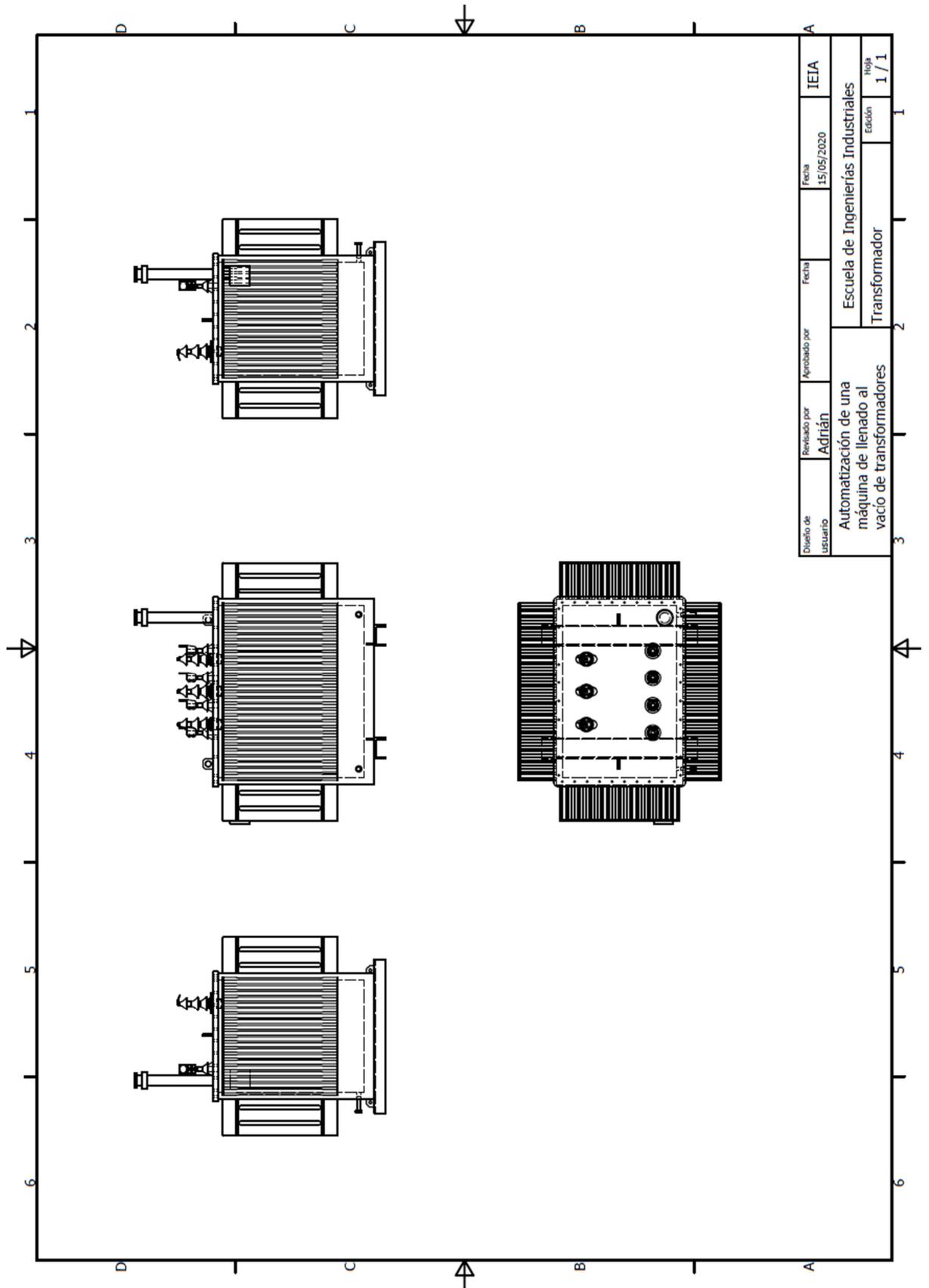
### 1. Depósito de Aceite



## 2. Tornillo de llenado

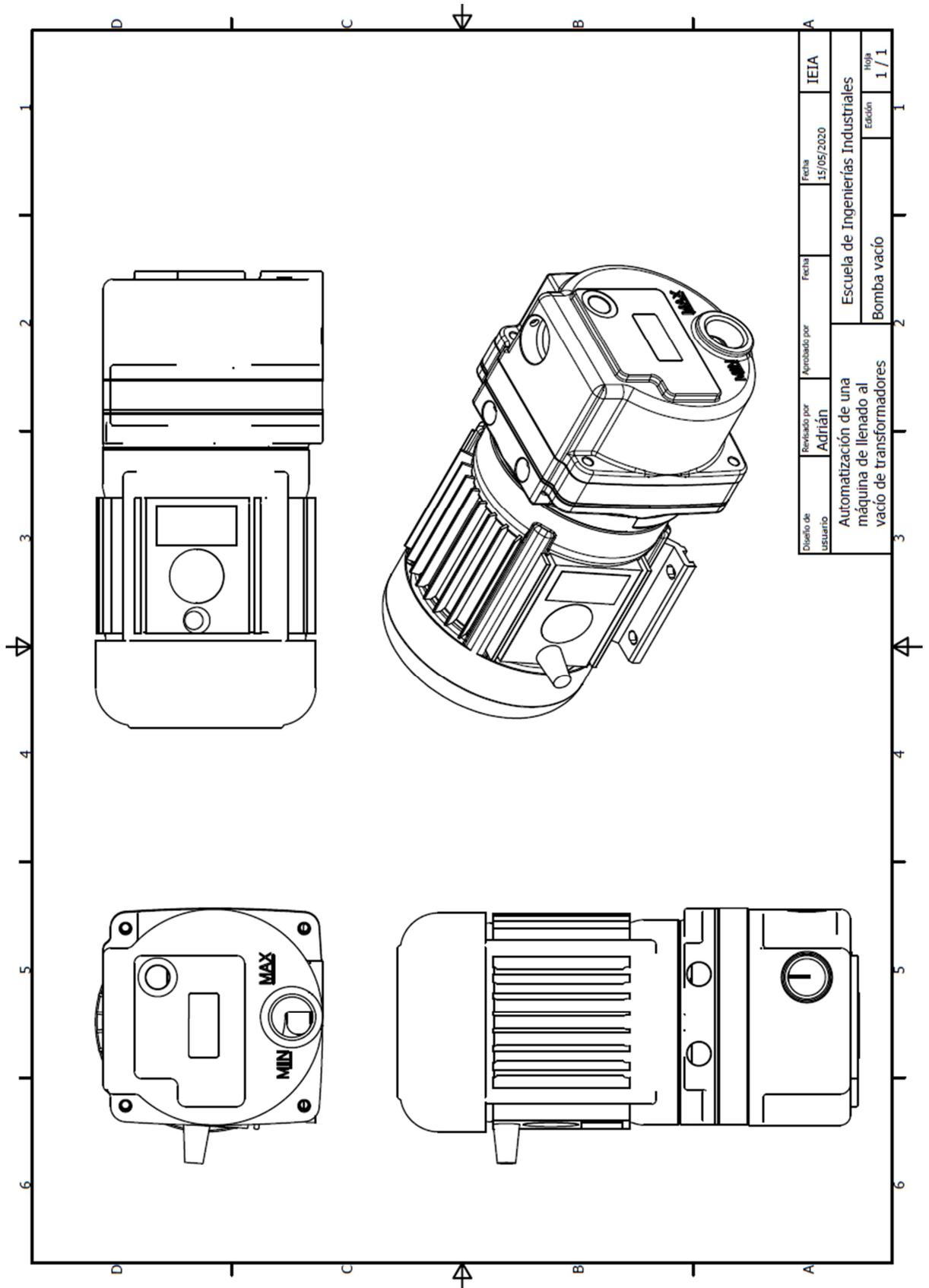


### 3. Transformador

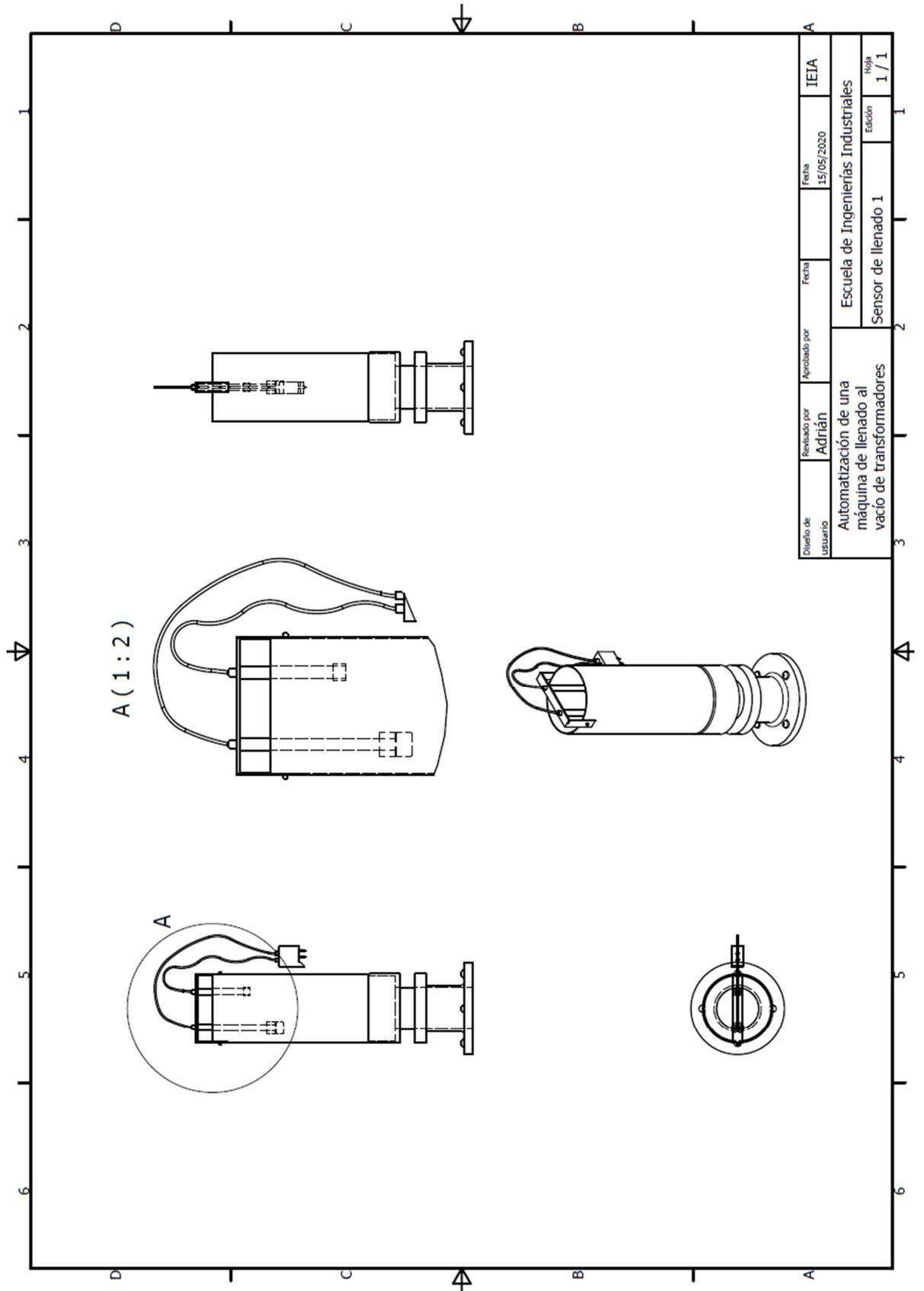


Diseño de usuario	Revisado por <b>Adrián</b>	Aprobado por	Fecha 15/05/2020	IEIA
Automatización de una máquina de llenado al vacío de transformadores		Escuela de Ingenierías Industriales		Hoja 1 / 1
		Transformador		

### 4. Bomba de vacío



### 5. Sensor de llenado 1



### 6. Sensor de llenado 2

