



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ESTUDIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN GEMELO DIGITAL EN UNA FÁBRICA DE CERVEZA

Autor: Manuel Álvarez-Requejo Heredero

Director: Íñigo Franco Arbiza

Madrid

Agosto de 2021



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ESTUDIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN GEMELO DIGITAL EN UNA FÁBRICA DE CERVEZA

Autor: Manuel Álvarez-Requejo Heredero

Director: Íñigo Franco Arbiza

Madrid

Agosto de 2021

ESTUDIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN GEMELO DIGITAL EN UNA FÁBRICA DE CERVEZA

Autor: Álvarez-Requejo Heredero, Manuel.

Director: Franco Arbiza, Íñigo.

Entidad colaboradora: I.P.S Spain S.A.

RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto se realiza en colaboración con IPS Spain con el objeto de desarrollar un estudio previo a la implementación de un gemelo digital en una fábrica de cerveza. Esto incluye un estudio del estado del arte de la tecnología de gemelos digitales, un estudio de la planta de cerveza para designar la mejor localización y un estudio de la implementación del gemelo digital. Finalmente, se realiza un análisis económico del impacto del gemelo sobre la planta.

1. Introducción

El gemelo digital es una tecnología muy extendida con la aparición de la industria conectada. Mediante el uso de un gemelo digital se pretenden resolver problemas de la industria como (1) el uso de herramientas de gestión de producción anticuadas, incapaces de procesar la cantidad de datos que se generan o gestionar los tamaños de planta y las tecnologías que se utilizan, (2) la mala optimización en los sistemas de producción, mediante el uso de herramientas especializadas o (3) errores en el análisis de datos y en la planificación de la producción.

Un gemelo digital es una representación virtual de un objeto, proceso o servicio físico que se actualiza con información en tiempo real obtenida en el objeto físico y que se puede utilizar para obtener predicciones, mejorar, estudiar el estado etc. del objeto físico. Las aplicaciones que se pueden desarrollar con un gemelo digital son, entre otras, el mantenimiento predictivo, para conocer cuándo una máquina va a fallar y mejorar la política de mantenimiento, el control de procesos, para optimizar la utilización de recursos manteniendo la calidad, y el control de calidad, para optimizar las condiciones del proceso para alcanzar la calidad deseada.

Esto se realiza mediante una integración de varias capas de la fábrica, generalmente, el nivel de campo y de control con el de supervisión, aunque se pueden añadir datos de planificación para ciertas aplicaciones. Esta integración permite utilizar todos los datos disponibles en tiempo real en una virtualización de la planta. Con estos datos se puede ejecutar una simulación o un algoritmo de inteligencia artificial, machine learning o deep learning con la intención de tomar las decisiones mejor informadas y con la mayor brevedad de tiempo acerca de la producción. Es importante destacar la necesidad de un sistema fiable de ciberseguridad, ya que en este tipo de aplicaciones se está virtualizando tanto la planta en sí misma como una gran cantidad de datos generados por ella, y muchas veces se cede un control parcial o total de las diferentes líneas a esta herramienta. Esta virtualización puede ocurrir en servidores locales o en la nube, en cualquier caso, supone una superficie expuesta de la fábrica muy alta, por lo que es importante tenerla bien protegida.

El objetivo de este proyecto es realizar un estudio de la planta en la que se desea desarrollar un gemelo digital para poder decidir dónde se pretende desarrollar dicho gemelo digital y, finalmente, realizar un estudio de la implementación de éste.

2. Estudio de la planta

El proceso de elaboración de cerveza es un proceso antiguo, con muchas reformas a lo largo del tiempo, y que debe realizarse con mucho cuidado para obtener la calidad del producto deseada. Este proceso se puede ver en la Ilustración 1.

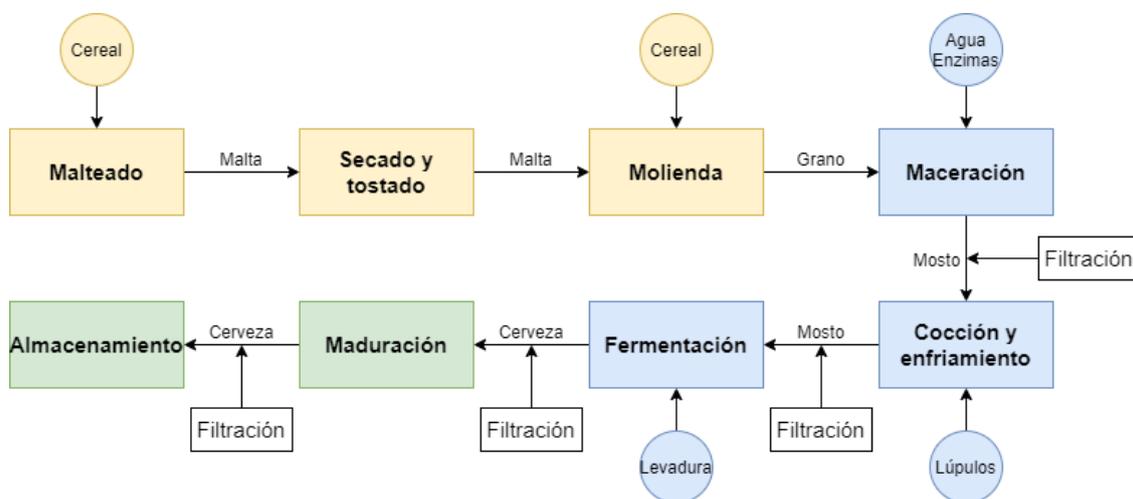


Ilustración 1. Proceso de elaboración de cerveza

Además de la elaboración de cerveza, a la que en este texto se le hará referencia como producción, la fábrica objeto de estudio también realiza el proceso de envasado de cerveza, con una línea de botellas, que sirve para retornables y no retornables, una línea de latas y una línea de barriles. Por tanto, existen dos procesos que se deben estudiar: el de producción y el de envasado.

El proceso de producción en la fábrica en cuestión está formado por:

- **Almacenamiento:** almacenamiento de la malta y el maíz recién adquiridos. Ocurre en los silos de entrada y tienen una capacidad de 18.075 toneladas/año de malta y 3.939 toneladas/año de maíz. Esto se traduce en 1.282kHL de cerveza/año.
- **Molienda:** Muele el cereal, lo pesa y lo separa en lotes de producción. Existen dos líneas, una para malta y otra para maíz. La capacidad para la malta es de 3.360 toneladas/semana y la de maíz de 2.184 toneladas/semana. Esto se traduce en 7.400 kHL de cerveza/año.
- **Sala de cocción:** la cocción del grano para comenzar a formar los azúcares. En esta etapa se añaden enzimas y lúpulo. Esta sala cuenta con (1) 4 tanques de maceración y mezcla, (2) un tanque buffer, (3) un tanque de ebullición, (4) un tanque de centrifugado y (5) un tanque de refrigeración. Estas instalaciones le dan una capacidad de 1.296kHL de cerveza/año.
- **Fermentación:** En esta etapa se añaden las levaduras que fermentan los azúcares liberados anteriormente para producir el alcohol, con lo que se obtendría la cerveza, aunque todavía no estaría lista para su venta. La planta cuenta con (1) ocho tanques Brassag con capacidad de 1.652 HL/tanque, (2) dos tanques Holvrieka con capacidad de 3.192 HL/tanque y (3) tres tanques Ziemann con capacidad de 2.903 HL/tanque. Esto se traduce en una capacidad de fermentación de 882 kHL de cerveza/año.
- **Maduración:** En esta etapa se añade agua glicolada y amoniaco y se deja madurar durante varios días para darle matices al sabor, aroma y color del producto. Tras este paso ya se obtendría una cerveza que se puede comerciar, aunque requiere de filtración previa. Las instalaciones de maduración son (1) cuatro tanques Brassag con capacidad de 1.652 HL/tanque, (2) un tanque Holvrieka con capacidad de 3.192 HL/tanque y (3)

cuatro tanques Ziemann con capacidad de 2.903 HL/tanque. Esto se traduce en una capacidad de maduración de 895 kHL de cerveza/año.

- **Filtración:** En esta etapa se eliminan depósitos y otros residuos sólidos que pueda tener la cerveza tras la maduración, como son el lúpulo, casquetes de grano, polvo, tierra etc. La capacidad de filtrado es de 2.442 kHL de cerveza/año.
- **BBT:** los tanques BBT o Bright Beer Tank son tanques en los que se deja reposar la cerveza una vez terminada, antes del envasado. Actualmente, la fábrica cuenta con (1) cuatro tanques de 305 HL/tanque y (2) cinco tanques de 930 HL/tanque. Esto se traduce en una capacidad de 796 kHL de cerveza/año.

La fábrica también produce cerveza con limón, y prepara su propio jarabe para ello. Sin embargo, estas instalaciones se han incluido en el análisis del proyecto. En resumen, las capacidades y el esquema del proceso se pueden ver en la Ilustración 2 y la Ilustración 3.

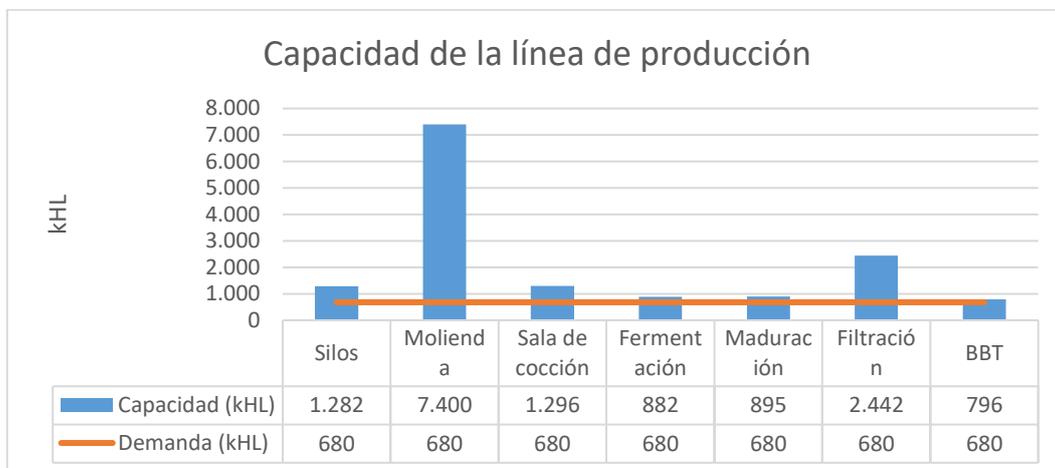


Ilustración 2. Capacidad de producción



Ilustración 3. Esquema con instalaciones y capacidades

El proceso de envasado sigue el esquema mostrado en la Ilustración 4.

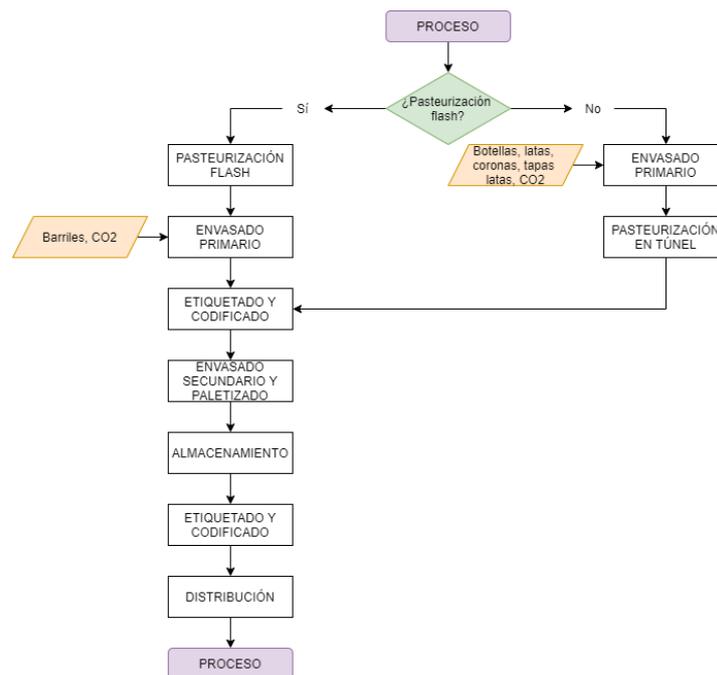


Ilustración 4. Proceso de envasado

Es ligeramente diferente si se trata de botellas, latas o barriles. Las botellas retornables siguen un proceso de lavado y enjuagado antes de entrar en la línea de llenado, mientras que las no retornables simplemente se enjuagan. Una vez limpias, todas las botellas van a la misma línea de llenado, donde se llenan y tapan antes de entrar en un túnel de pasteurizado, tras el cual se etiquetan y empaquetan para ser enviadas. Las retornables se introducen en cajones de plástico mientras que

las no retornables en envases de plástico. Luego se paletizan y envían al almacén de salida. Estas botellas pueden ser de (1) 0,2L, (2) 0,25 L, (3) 0,33 L y (4) 0,75 L.

Las latas siguen un proceso muy similar con un simple aclarado y marcado con tinta antes del llenado y taponado. Luego tienen lugar la pasteurización y el secado y se empaquetan en anillos de plástico antes de ser paletizadas y enviadas.

El proceso de los barriles es ligeramente distinto. La pasteurización de la cerveza ocurre fuera del barril, mientras que el barril es lavado, purgado y despresurizado antes del llenado. Una vez lleno, se encapsula, se etiqueta y se paletiza para ser enviado. Las capacidades de las diferentes líneas se pueden ver en la Ilustración 5.

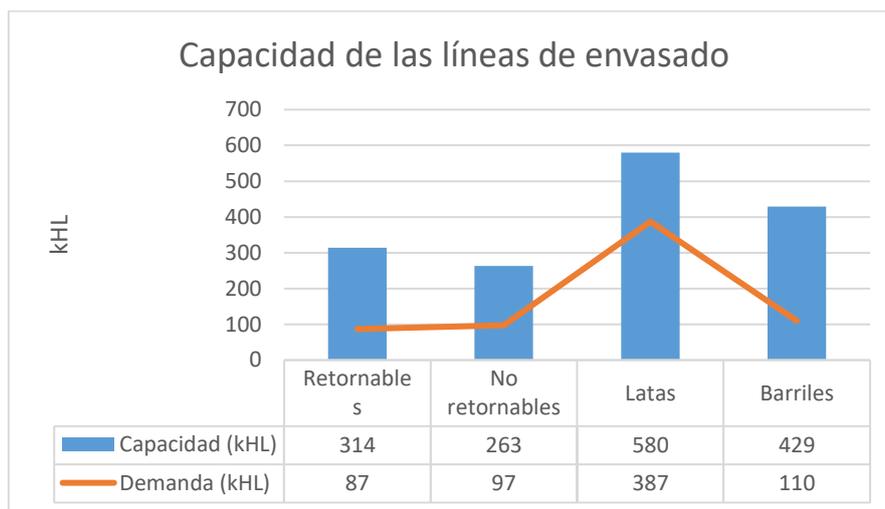


Ilustración 5. Capacidades de las líneas de envasado

En cuanto a capacidad, no son el mayor problema, sin embargo, el análisis de productividad es muy diferente. La Ilustración 6 muestra las horas de no producción y los costes de no producción de cada una de las líneas. Este dato se ha calculado suponiendo un coste de no producción de (1) 2.960€/hora para botellas, (2) 1.597 €/hora para latas y (3) 1.442 €/hora para barriles.

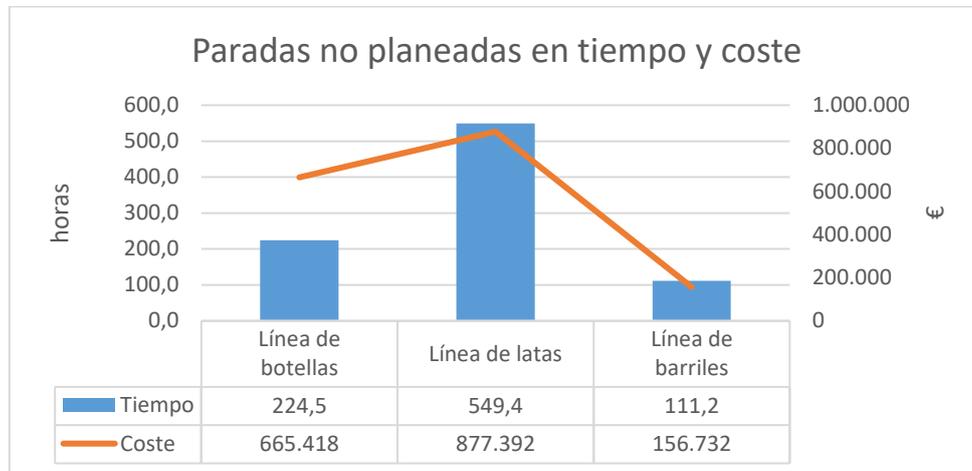


Ilustración 6. Tiempo y coste de no producción.

Además, se incurren en costes de 1,50€/HL vendido de cerveza para el mantenimiento, dando un total de 1.020.000€/año.

Por último, se ha hecho un análisis de los consumos de la fábrica. Estos consumos se han dividido en la parte de envasado, proceso y otros para los conceptos de vapor (como fuente de energía), electricidad, agua y CO₂. Tras un análisis extenso de los diferentes consumos, se llegó a la conclusión de que los mayores gastos eran los mostrados en la Ilustración 7.



Ilustración 7. Principales consumos

La parte de envasado tiene sus mayores costes en la línea de botellas, aunque la de latas también es cara, sobre todo si se tiene en cuenta que el CO₂ se consume principalmente en las líneas de envasado. La parte de proceso tiene menos consumos, pero también son importantes como la

cocción, la filtración o la refrigeración. Finalmente, en otros consumos destacan el aire comprimido y la planta de CO₂.

3. Desarrollo del gemelo

3.1. Funcionalidades

Tras este análisis de la fábrica se propusieron varios gemelos digitales que se podrían realizar para mejorar la calidad de los procesos de producción de cerveza, o reducir los consumos de ciertos subprocesos. Sin embargo, se terminó optando por un gemelo digital basado en una simulación de la línea de embotellado. Esto se debe principalmente a que uno de los mayores costes de la fábrica es debido a las paradas no planeadas que tiene la fábrica en esta línea, y, si bien el coste total es más bajo que el que presenta la línea de latas, el coste unitario de cada hora es muy superior, por lo que el potencial de ahorro es más alto.

Esta línea realiza funciones de despaletizado de botellas, enjuague, inspección, alineación, llenado y taponado, pasteurizado, etiquetado, empaquetado, desencajonado, y encajonado, lavado, paletizado y enfardado de pallets, cada una con su propia máquina y PLC, aunque ya se comentará más adelante.

Una vez decidida la localización del gemelo, y sus objetivos, es importante definir las funcionalidades que este tendrá. Estas funcionalidades son:

- Encontrar cuellos de botella. Estos pueden estar situados en diferentes lugares según las condiciones técnicas o la configuración de la línea, así que sería un buscador dinámico del cuello de botella.
- Ayudar en labores de mantenimiento. Para aquellas máquinas que fallan con mayor frecuencia, se desarrollaría un algoritmo de mantenimiento predictivo que permitiría planificar mejor los mantenimientos, reduciendo los costes de mantenimiento y las paradas no planeadas.
- Hacer un proceso más fluido. Con una mejor planificación de mantenimiento y conociendo la mejor localización de los cuellos de botella, se podría mejorar la productividad de la línea.

- Simulación para probar otros formatos. Esta es una característica solicitada por el cliente, por la que se pretende probar otros formatos antes de realizar ninguna inversión en activos y sin necesidad de detener la línea.
- Unificar la fuente de verdad. Obtención de un único lugar en el que almacenar todo el histórico de datos con fácil acceso e interpretación para futuros análisis.
- Escalabilidad. Si bien no es una funcionalidad de un gemelo digital, se pretende hacer lo más escalable posible para que posteriores mejoras sean más baratas de desarrollar.

3.2. Arquitectura

Por tanto, dadas las funcionalidades que el gemelo va a presentar, éste va a requerir de una simulación, dónde residirá el modelo 3D del activo, y además algún algoritmo de inteligencia artificial que permita desarrollar las funciones de mantenimiento predictivo. Todas estas funcionalidades se alojarían en la nube de Azure principalmente porque evitaría la necesidad de una inversión mayor en servidores, almacenamiento y ciberseguridad al inicio. Además, estando alojado en la nube el almacenamiento y la potencia no serán un limitante a la hora de intentar escalar el gemelo. Por último, se ha seleccionado Azure por que el cliente ya tiene este servicio contratado, por tanto, para mantener la consistencia con el resto de sistemas a nivel global.

Para realizar la simulación, las principales características que se buscan en el software que se pueda contratar son que sea capaz de dar la salida en un formato de informe, que pueda importar y exportar datos en tiempo real, que pueda representar en 3D el modelo y que pueda modelar eventos discretos, modelos dinámicos, estocásticos y matemáticos, ya que si se quiere incorporar la inteligencia artificial dentro de la simulación, es necesario introducir un modelo matemático.

Conocidas las necesidades, se procede a realizar una comparación del software de simulación que se podría utilizar, para lo que se comparan cinco de los softwares más utilizados en industria, ya que existen infinidad de ellos. Éstos son (1) AnyLogic, desarrollado por The AnyLogic Company, (2) FlexSim, desarrollado por FlexSim, (3) Emulate3D, desarrollado por Rockwell Automation, (4) SIUML8, desarrollado por SIMUL8 y (5) Tecnomatix, desarrollado por Siemens.

Tras estudiar las diferentes funcionalidades que cada uno ofrece, junto con valoraciones de otros clientes acerca de la calidad, el precio, la facilidad de uso y la atención al cliente, y hablar con algunos de los proveedores, se decide optar por Tecnomatix como software de simulación. Esta decisión se tomó en base a varios factores. En primer lugar, Tecnomatix ofrece todas las funcionalidades requeridas por este proyecto, y unas cuantas más que permitirían futuras ampliaciones aquí no contempladas, incluyendo una interfaz con los autómatas de Siemens que facilitaría el desarrollo del gemelo en gran medida, ya que los autómatas de la planta son de Siemens. Además, las valoraciones de clientes y la atención al cliente son bastante buenas. Por último, tras conversaciones con Siemens, se ofreció la posibilidad de que ellos, como proveedores de servicios de digitalización en su rama de sector de la alimentación, pudieran desarrollar el gemelo digital. Esto incluye la digitalización de cada una de las máquinas en la línea al nivel de complejidad requerido por la aplicación, su integración en una sola línea virtual y la conexión en la nube de Azure a la base de datos local de la fábrica. Con todos estos puntos a favor, se ha terminado optando por Siemens como proveedor del servicio.

En cuanto a arquitectura, el gemelo digital tendrá acceso a todos los sensores y actuadores que puedan ser necesarios a través de los PLC pertinentes. Éstos ya están todos ellos conectados entre sí mediante un anillo de fibra óptica que lo conecta a dos racks de servidores centrales de la fábrica, por motivos de redundancia. Desde ese rack de servidores se subirían estos datos tomados a la nube de Azure, dónde estaría implementado el proyecto descrito, para que se pudieran realizar todas las ejecuciones que fueran necesarias.

La arquitectura a nivel de la nube se deja para el desarrollo del proveedor del servicio, Siemens, ya que ésta se va a desarrollar sobre un sistema ya desarrollado, Tecnomatix, con su propia estructura de datos y aplicaciones.

Las diferentes máquinas que forman la línea, junto con los datos necesarios de cada máquina y la disponibilidad de dichos datos se pueden ver en la Ilustración 8. Aquellas máquinas definidas como “caja negra” son máquinas que no es necesario modelar, ya que o bien no requieren de mantenimiento demasiado a menudo, o no son activos críticos cuya baja detiene la línea completa o no es necesario modelarlos de cara a realizar la simulación de los diferentes formatos.

| Máquina | Datos | Disp. |
|-----------------------------------|-----------------------|-------|
| Despaletizadoras | Caja negra | - |
| Enjuagadora | Presión de aire | Si |
| | Presión de agua | Si |
| | Caudal de agua | Si |
| | Temperatura | Si |
| Inspector de botellas | Caja negra | - |
| Alineador de botellas | Caja negra | - |
| Llenadora y taponadora | Presión de aire | Si |
| | Caudal CO2 | Si |
| | Presión de cerveza | Si |
| | Caudal de cerveza | Si |
| | Temperatura | Si |
| Pasteurizadora | Temperatura | Si |
| | Caudal de agua | Si |
| | Presión aire y agua | Si |
| Etiquetadora | Visión art. etiquetas | No |
| | Ritmo | Si |
| SMI Packer I | Caja negra | - |
| SMI Packer II | Caja negra | - |
| Paletizadora | Caja negra | - |
| Enfardadora | Caja negra | - |
| Inspector de cajas 1 | Caja negra | - |
| Desencajonadora | Apertura pinzas | Si |
| | Presión de aire | Si |
| | Caudal de aire | Si |
| | Velocidad del brazo | Si |
| Lavadora vertical de cajas | Caja negra | - |
| Lavadora de botellas | Presión de agua | Si |
| | Caudal de agua | Si |
| | Presión de aire | Si |
| | Caudal de aire | Si |
| | Caudal de sosa | Si |
| | Temperatura | Si |
| Encajonadora | Apertura pinzas | Si |

| | | |
|-------------------------------|---------------------|----|
| | Presión de aire | Si |
| | Caudal de aire | Si |
| | Velocidad del brazo | Si |
| Inspector de cajas 2 | Caja negra | - |
| Cintas transportadoras | Vibraciones | No |
| | Velocidad | Si |

Ilustración 8. Máquinas con los datos necesarios de cada una de ellas.

3.3. Implementación

El proceso de implementación de un gemelo digital sigue la misma estructura que siguen la mayoría de los procesos de implementación de proyectos de digitalización. Esta estructura sigue cinco pasos diferentes.

a. Auditoría digital y del dato

Este proceso consiste en un análisis exhaustivo de la fábrica para encontrar los diferentes retos de digitalización que el proceso productivo puede presentar y definir diferentes soluciones a dichos retos. Además, una vez seleccionada la solución final, es necesario realizar una auditoría del dato para estructurar el almacenamiento y procesamiento de datos de la zona objetivo. Por tanto, este paso tiene a su vez varios subprocesos.

(1) El análisis de la fábrica, en el que se buscan las ineficiencias a las que dar solución. Estas ineficiencias se llamarán “retos”. (2) Filtración de los retos según costes y beneficio, en el que se clasifican los retos según el retorno que vayan a dar para dar prioridad a las soluciones según los retos que vayan a afrontar. (3) Búsqueda de soluciones a los retos, es un proceso en el que se buscan las soluciones posibles a los retos, y se estima el coste que tendrían. Conociendo el ahorro, el tiempo de implementación y los costes, se puede hacer una decisión fundada de qué solución se quiere tomar. (4) Definición del proyecto digital, una vez conocida la solución, es necesario definir adecuadamente qué se realizará en el proyecto y qué se espera conseguir del mismo y (5) auditoría del dato, con el proyecto elegido, es necesario establecer qué datos se van a necesitar y donde se encuentran estos datos en cualquier momento de su vida.

Este paso ya está bastante avanzado con el desarrollo de este documento, sin embargo, necesita de más profundización en ciertos aspectos.

b. Estudio de los proveedores

Conociendo el proyecto y sus necesidades, es importante realizar un estudio de los proveedores del proyecto. En este caso, serán Siemens para el software y el desarrollo del gemelo, pero también es necesario un proveedor para los sensores no disponibles mostrados en la Ilustración 8, que se decidirán cuando sean más concretas las necesidades exactas de cada uno de ellos.

c. Desarrollo del gemelo digital

En esta etapa se realizan varias funciones. Por un lado, el proveedor del servicio desarrollará en su plataforma la simulación, con la digitalización de cada uno de los activos y las inteligencias necesarias para realizar el mantenimiento predictivo. Por otro lado, es necesario llevar a cabo el aprovisionamiento y la instalación en fábrica de los nuevos activos.

d. Implementación

En esta etapa se implementa la simulación y la inteligencia y se conectan a la base de datos de la fábrica. Aquí se realizan las primeras pruebas de funcionamiento, aunque no se validen los datos de salida del gemelo digital.

e. Comisionado, formación y pruebas

Esta etapa consta de tres actividades. El comisionado consiste en la puesta en marcha por primera vez del gemelo digital, de nuevo, sin la validación de los datos. En segundo lugar, es necesario formar al personal para que puedan trabajar con todas las nuevas aplicaciones, esto incluye desde las interacciones con el gemelo hasta la interpretación de las salidas que se puedan obtener. Finalmente, es necesario realizar unas pruebas para asegurar que se cumplen los objetivos definidos anteriormente. Esta última parte se puede seguir desarrollando con el gemelo digital funcionando de forma normal.

Para la implementación, se ha desarrollado una agenda de actividades con una estimación de los tiempos necesarios para cada una de ellas. Ésta se puede ver en la Ilustración 9, donde los datos de tiempo están en meses. Por tanto, el proyecto se terminaría, en principio, en 13 meses.

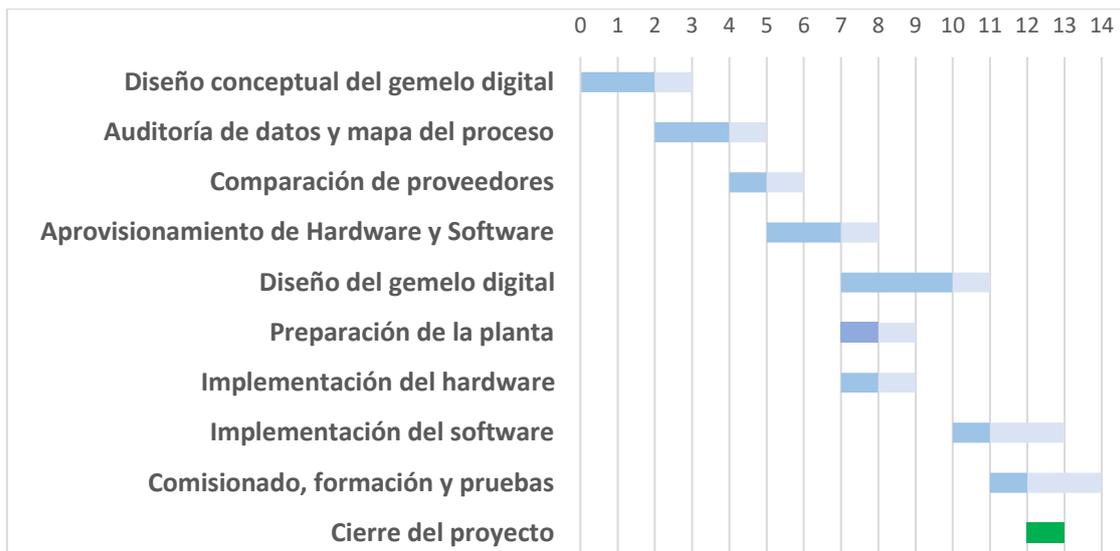


Ilustración 9. Planificación del proyecto

Para terminar, se ha desarrollado un análisis de riesgos con sus correspondientes mitigaciones o transmisiones. Dentro de todos los riesgos mencionados, el que más impacto supondría para el proyecto sería la recolección de datos incompleta, por lo que es importante trabajar con el cliente y el proveedor para estudiar perfectamente qué datos se pueden necesitar para que el gemelo funcione perfectamente.

En cuanto al impacto económico, la Ilustración 10 muestra la inversión necesaria así como los gastos en operaciones y los ingresos que se derivan como consecuencia de la realización de este proyecto.

| | Año 0 | Año 1 | Año 2 | Año 3 |
|--------------------------------------|------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 Inversión inicial (CAPEX) | 337.000 € | | | |
| 1 1 Servicios | 300.000 € | | | |
| 1 2 Hardware | 5.000 € | | | |
| 1 3 Instalación | 2.000 € | | | |
| 1 4 Comisionado, formación y pruebas | 30.000 € | | | |
| 2 Gastos operativos (OPEX) | 9.500 € | 9.500 € | 9.500 € | 9.500 € |
| 2 1 Software | 2.000 € | 2.000 € | 2.000 € | 2.000 € |

| | | | | | | |
|----------|---|----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 2 | 2 | Servicios en la nube | 6.000 € | 6.000 € | 6.000 € | 6.000 € |
| 2 | 3 | Mantenimiento | 1.500 € | 1.500 € | 1.500 € | 1.500 € |
| 3 | | Ingresos | | 296.497 € | 352.797 € | 409.096 € |
| 3 | 1 | Mantenimiento | | 196.497 € | 252.797 € | 309.096 € |
| 3 | 2 | Mejora de producción | | 100.000 € | 100.000 € | 100.000 € |
| 4 | | Total | 346.500 € | 59.503 € | 283.794 € | 683.390 € |

Ilustración 10. Flujos de caja del proyecto

El proyecto recupera la inversión inicial en algo más de un año, en concreto, un año y 63 días, considerando que los 13 meses de proyecto ocurren durante el año 0 e inicio del año 1. La inversión es bastante lucrativa, por lo que su desarrollo es muy recomendable.

4. Conclusiones

La tendencia a la digitalización está creciendo mucho en los últimos años, sobre todo con el abaratamiento de los elementos y desarrollos. Este proyecto pretende introducir en tecnologías de última generación a una fábrica con ciertas ineficiencias en su línea.

La primera parte desarrolla un análisis completo de la fábrica, para descubrir que los costes por paradas no planeadas en la línea de botellas se disparan rápidamente, por lo que se concluye que ésta es la mejor parte para digitalizar. En la segunda parte se propone un modelo de gemelo digital, con proveedores y previsión de costes, para iniciar el proyecto inmediatamente.

Los trabajos futuros para este proyecto serían, en primer lugar, llevar a cabo todo lo descrito en este documento. Todos los pasos para la implementación del proyecto hasta lograr mejorar el rendimiento de la línea de botellas. Una vez lograda esta mejora, se podrían desarrollar aquellas soluciones propuestas por el gemelo en cambios de disposición de la línea para aumentar la eficiencia y, por ende, la producción. Finalmente, se ha dado mucha relevancia a la escalabilidad del gemelo. Los siguientes proyectos podrían intentar añadir nuevas funcionalidades a un gemelo que ya existe o ampliar el gemelo para que abarque otras líneas, comenzando por la de latas que se parece mucho a la de botellas.

STUDY FOR THE IMPLEMENTATION OF A DIGITAL TWIN IN A BEER FACTORY

Author: Álvarez-Requejo Heredero, Manuel.

Supervisor: Franco Arbiza, Íñigo

Collaborating Entity: I.P.S. Spain S.A.

ABSTRACT

This project is carried out in collaboration with IPS Spain in order to develop a study prior to the implementation of a digital twin in a brewery. This includes a study of the state of the art of digital twin technology, a study of the brewery to designate the best location and a study of the implementation of the digital twin. Finally, an economic analysis of the impact of the twin on the plant is performed.

1. Introduction

The digital twin is a widespread technology with the emergence of the connected industry. The use of a digital twin is intended to solve industry problems such as (1) the use of outdated production management tools, unable to process the amount of data being generated or manage the plant sizes and technologies being used, (2) poor optimization in production systems, through the use of specialized tools, or (3) errors in data analysis and production planning.

A digital twin is a virtual representation of a physical object, process or service that is updated with real-time information obtained on the physical object and can be used to obtain predictions, improve, study the state etc. of the physical object. The applications that can be developed with a digital twin are, among others, predictive maintenance, to know when a machine is going to fail and improve the maintenance policy, process control, to optimize the use of resources while maintaining quality, and quality control, to optimize the process conditions to achieve the desired quality.

This is done by integrating several layers of the factory, typically the field and control level with the supervisory level, although planning data can be added for certain applications. This

integration makes it possible to use all available data in real time in a virtualization of the plant. With this data, a simulation or an artificial intelligence, machine learning or deep learning algorithm can be run with the intention of making the most informed and timely decisions about production. It is important to highlight the need for a reliable cybersecurity system, since in this type of application both the plant itself and a large amount of data generated by it are being virtualized, and often partial or total control of the different lines is ceded to this tool. This virtualization can occur on local servers or in the cloud, in any case, it involves a very high exposed surface of the factory, so it is important to have it well protected.

The objective of this project is to carry out a study of the plant in which it is desired to develop a digital twin in order to decide where it is intended to develop this digital twin and, finally, to carry out a study of its implementation.

2. Study of the site

The brewing process is an ancient process, with many reforms over time, and must be carried out with great care to obtain the desired product quality. This process can be seen in Figure 1.

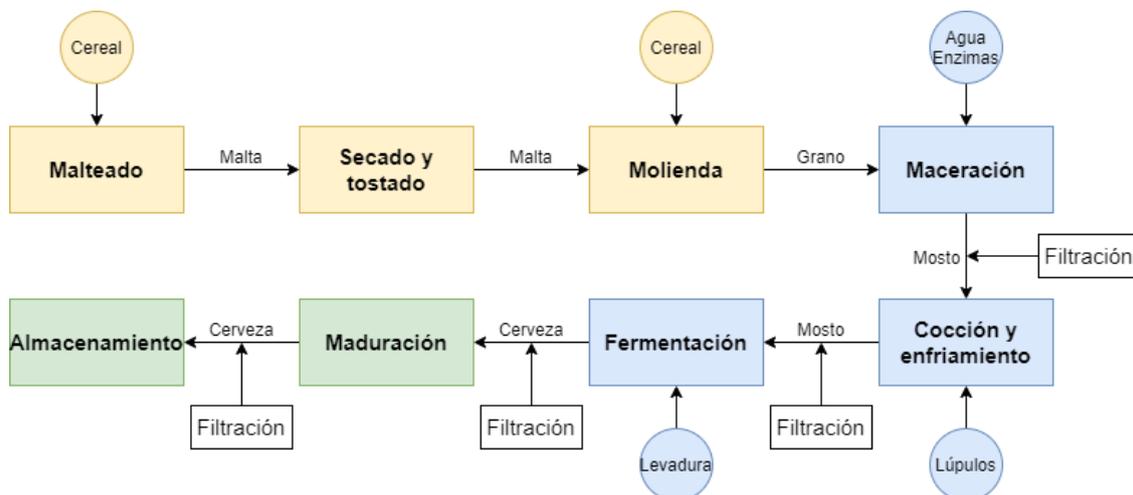


Figure 1. Process of beer brewing

In addition to brewing beer, the plant under study also carries out the beer packaging process, with a line of bottles, which is used for returnable and non-returnable bottles, a line of cans and a line of kegs. Therefore, there are two processes to be studied: the brewing process and the packaging process.

The brewing process in the factory in question consists of:

- **Storage:** storage of the newly acquired malt and corn. This takes place in the incoming silos and has a capacity of 18,075 tons/year of malt and 3,939 tons/year of corn. This translates into 1,282kHL of beer/year.
- **Milling:** The grain is milled, weighed, and separated into production batches. There are two lines, one for malt and one for corn. The capacity for malt is 3,360 tons/week and 2,184 tons/week for corn. This translates into 7,400 kHL of beer/year.
- **Brewhouse:** the cooking of the grain to start forming the sugars. Enzymes and hops are added at this stage. This room has (1) 4 mash and mash tanks, (2) a buffer tank, (3) a boiling tank, (4) a centrifuge tank and (5) a cooling tank. These facilities give it a capacity of 1,296kHL of beer/year.
- **Fermentation:** At this stage, yeasts are added to ferment the previously released sugars to produce alcohol, which would result in beer, although it would not yet be ready for sale. The plant has (1) eight Brassag tanks with a capacity of 1,652 HL/tank, (2) two Holvrieka tanks with a capacity of 3,192 HL/tank, and (3) three Ziemann tanks with a capacity of 2,903 HL/tank. This translates to a fermentation capacity of 882 kHL of beer/year.
- **Maturation:** At this stage, glycol water and ammonia are added and left to mature for several days to give nuances to the flavor, aroma and color of the product. After this step a beer is obtained that can be marketed, although it requires prior filtration. The maturation facilities are (1) four Brassag tanks with a capacity of 1,652 HL/tank, (2) a Holvrieka tank with a capacity of 3,192 HL/tank and (3) four Ziemann tanks with a capacity of 2,903 HL/tank. This translates to a maturation capacity of 895 kHL of beer/year.
- **Filtration:** In this stage, deposits and other solid residues that the beer may have after maturation are removed, such as hops, grain caps, dust, dirt, etc. The filtration capacity is 2,442 kHL of beer/year.
- **BBT:** The BBT or Bright Beer Tank is a tank in which the beer is left to settle once it is finished, before being bottled. Currently, the plant has (1) four 305 HL/tank tanks and (2) five 930 HL/tank tanks. This translates into a capacity of 796 kHL of beer/year.

The brewery also produces beer with lemon and prepares its own syrup for it. However, these facilities are not included in the project analysis. In summary, the capacities and process scheme can be seen in Figure 2 and Figure 3.

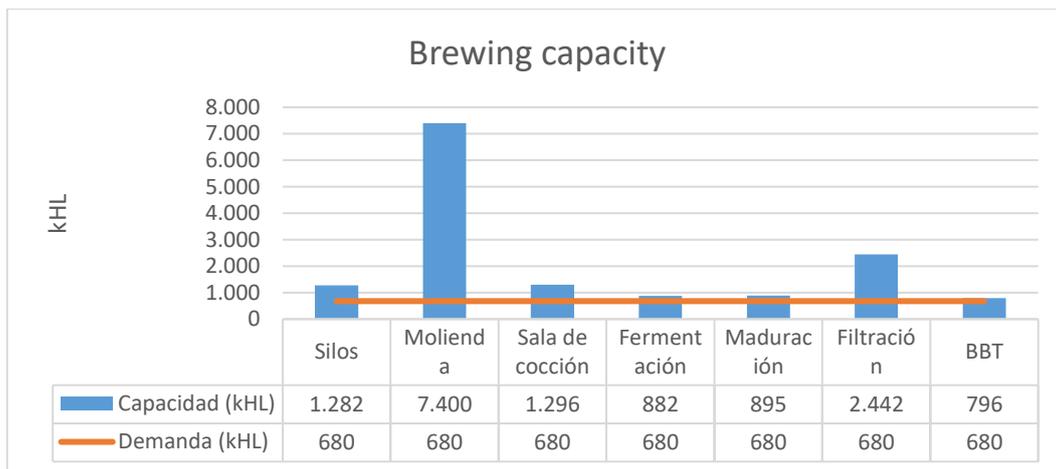


Figure 2. Brewing capacity



Figure 3. Diagram with facilities and capacities

The packaging process can be seen in the diagram shown in Figure 4.

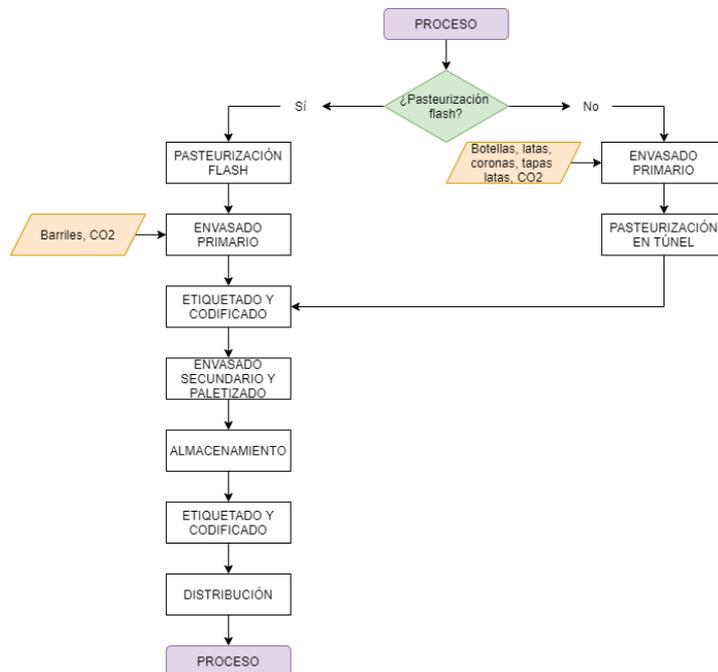


Figure 4. Packaging process

It is slightly different for bottles, cans or kegs. Returnable bottles go through a washing and rinsing process before entering the filling line, while non-returnable bottles are simply rinsed. Once cleaned, all bottles go to the same filling line, where they are filled and capped before entering a pasteurizing tunnel, after which they are labeled and packaged for shipping. Returnables are placed in plastic crates while non-returnables are placed in plastic containers. They are then palletized and shipped to the outbound warehouse. These bottles' capacity can be (1) 0.2L, (2) 0.25L, (3) 0.33L and (4) 0.75L.

The cans follow a very similar process with a simple rinsing and marking with ink before filling and capping. Pasteurization and drying then take place and they are packed in plastic rings before being palletized and shipped.

The keggling process is slightly different. Pasteurization of the beer occurs outside the keg, while the keg is washed, purged, and depressurized prior to filling. Once filled, it is encapsulated, labeled, and palletized for shipping. The capacities of the different lines can be seen in Figure 5.

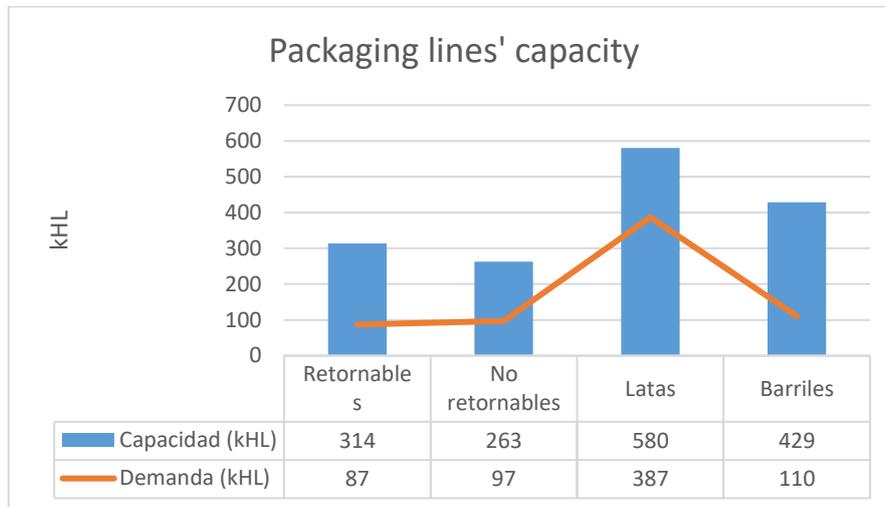


Figure 5. Packaging lines' capacity

In terms of capacity, they are not the biggest problem, however, the productivity analysis is very different. Figure 6 shows the non-production hours and non-production costs for each of the lines. This data has been calculated assuming a non-production cost of (1) 2,960 €/hour for bottles, (2) 1,597 €/hour for cans and (3) 1,442 €/hour for kegs.

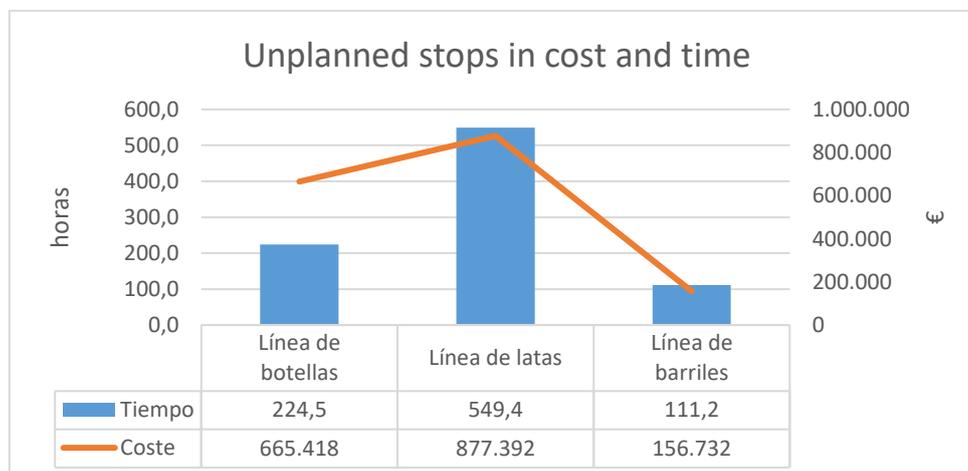


Figure 6. Time and cost of non-production

In addition, costs of €1.50/HL of beer sold are incurred for maintenance, giving a total of €1,020,000/year.

Finally, an analysis was made of the consumption of the brewery. These consumptions have been divided into packaging, process, and others for the concepts of steam (as a source of energy),

electricity, water, and CO₂. After an extensive analysis of the different consumptions, it was concluded that the biggest expenses were those shown in Figure 7.



Figure 7. Main consumptions

The packaging part has its highest costs in the bottle line, although the can line is also expensive, especially if it is taken into account that CO₂ is mainly consumed in the packaging lines. The process part has lower consumption, but also important ones such as cooking, filtration, or refrigeration. Finally, in other consumptions, compressed air and the CO₂ plant stand out.

3. Development of the twin

3.1. Functionalities

Following this analysis of the brewery, several digital twins were proposed that could be implemented to improve the quality of the brewing processes, or to reduce the consumption of certain sub-processes. However, a digital twin based on a simulation of the bottling line was chosen. This is mainly due to the fact that one of the biggest costs of the factory is due to the unplanned stops that the factory has in this line, and, although the total cost is lower than that of the can line, the unit cost of each hour is much higher, so the savings potential is higher.

This line performs bottle depalletizing, rinsing, inspection, alignment, filling and capping, pasteurizing, labeling, packing, unpacking, and boxing, washing, palletizing and pallet wrapping, each with its own machine and PLC, although this will be discussed later.

Once the location of the twin, and its objectives, have been decided, it is important to define the functionalities it will have. These functionalities are:

- Finding bottlenecks. These can be located in different places depending on the technical conditions or the configuration of the line, so it would be a dynamic bottleneck finder.
- To help in maintenance tasks. For those machines that fail more frequently, a predictive maintenance algorithm would be developed that would allow for better maintenance planning, reducing maintenance costs and unplanned downtime.
- Make the process smoother. With better maintenance planning and knowing the best location of bottlenecks, line productivity could be improved.
- Simulation to test other formats. This is a feature requested by the customer, whereby it is intended to test other formats before making any investment in assets and without the need to stop the line.
- Unify the source of truth. Obtaining a single place to store all historical data with easy access and interpretation for future analysis.
- Scalability. While this is not a functionality of a digital twin, it is intended to be as scalable as possible so that subsequent enhancements are cheaper to develop.

3.2. Architecture

Therefore, given the functionalities that the twin will present, it will require a simulation, where the 3D model of the asset will reside, and some artificial intelligence algorithm that allows the development of predictive maintenance functions. All these functionalities would be hosted in the Azure cloud mainly because it would avoid the need for a major investment in servers, storage, and cybersecurity at the beginning. Also, being hosted in the cloud the storage and power will not be a constraint when trying to scale the twin. Finally, Azure has been selected because the customer already has this service contracted, therefore, to maintain consistency with the rest of the systems globally.

To perform the simulation, the main features that are sought in the software that can be hired are that it is able to give the output in a report format, that it can import and export data in real time,

that it can represent the model in 3D and that it can model discrete events, dynamic, stochastic and mathematical models, since, if artificial intelligence is to be incorporated into the simulation, it is necessary to introduce a mathematical model.

Once the needs are known, a comparison of the simulation software that could be used is made, for which five of the most used software in the industry are compared, since there are dozens number of them available. These are (1) AnyLogic, developed by The AnyLogic Company, (2) FlexSim, developed by FlexSim, (3) Emulate3D, developed by Rockwell Automation, (4) SIUML8, developed by SIMUL8 and (5) Tecnomatix, developed by Siemens.

After studying the different functionalities that each one offers, along with ratings from other customers about quality, price, ease of use and customer service, and talking to some of the suppliers, it was decided to choose Tecnomatix as the simulation software. This decision was made based on several factors. First, Tecnomatix offers all the functionalities required by this project, and a few more that would allow future extensions not contemplated here, including an interface with Siemens PLCs that would facilitate the development of the twin to a great extent, since the plant PLCs are from Siemens. In addition, customer reviews and customer service are quite good. Finally, after discussions with Siemens, the possibility was offered that they, as a provider of digitization services in their branch of the food industry, could develop the digital twin. This included digitizing each of the machines on the line to the level of complexity required by the application, integrating them into a single virtual line and connecting them in the Azure cloud to the factory's local database. With all these points in favor, Siemens was chosen as the service provider.

In terms of architecture, the digital twin will have access to all sensors and actuators that may be needed through the relevant PLCs. These are already all connected to each other via a fiber optic ring that connects it to two central server racks in the factory, for redundancy reasons. From this server rack, the data would be uploaded to the Azure cloud, where the project described above would be implemented, so that all the necessary executions could be carried out.

The architecture at the cloud level is left to the service provider's criteria, Siemens, since it will be developed on an already existing system, Tecnomatix, with its own data structure and applications.

The different machines that make up the line, together with the necessary data for each machine and the availability of such data can be seen in Figure 8. Those machines defined as "black box" are machines that do not need to be modeled, since either they do not require maintenance too often, or they are not critical assets whose downtime stops the entire line, or it is not necessary to model them in order to simulate the different formats.

| Machine | Info | Disp. |
|--------------------------|------------------------|-------|
| Depalletizers | Black box | - |
| Rinser | Air pressure | Yes |
| | Water pressure | Yes |
| | Water Flow | Yes |
| | Temperature | Yes |
| Bottle inspector | Black box | - |
| Bottle liner | Black box | - |
| Filler and capper | Air pressure | Yes |
| | CO ₂ flow | Yes |
| | Beer pressure | Yes |
| | Beer Flow | Yes |
| | Temperature | Yes |
| Pasteurizer | Temperature | Yes |
| | Water Flow | Yes |
| | Air and water pressure | Yes |
| Labeler | Art. Vision placement | No |
| | Frequency | Yes |
| SMI Packer I | Black box | - |
| SMI Packer II | Black box | - |
| Palletizer | Black box | - |
| Pallet wrapper | Black box | - |
| Box inspector | Black box | - |
| De-boxer | Grip opening | Yes |
| | Air pressure | Yes |
| | Air Flow | Yes |
| | Arm speed | Yes |
| Box washer | Black box | - |

| | | |
|------------------------|----------------|-----|
| Bottle washer | Water pressure | Yes |
| | Water Flow | Yes |
| | Air pressure | Yes |
| | Air Flow | Yes |
| | Soda Flow | Yes |
| | Temperature | Yes |
| Boxer | Grip opening | Yes |
| | Air pressure | Yes |
| | Air Flow | Yes |
| | Arm speed | Yes |
| Box inspector 2 | Black box | - |
| Conveyor belts | Vibrations | No |
| | Speed | Yes |

Figure 8. Machines with the necessary data for each one of them

3.3. Implementation

The implementation process of a digital twin follows the same structure as most of the implementation processes of digitization projects. This structure follows five different steps.

a) Digital and data audit

This process consists of a thorough analysis of the factory to find the different digitization challenges that the production process may present and define different solutions to these challenges. In addition, once the final solution has been selected, a data audit is necessary to structure the data storage and processing of the target area. Therefore, this step has in turn several sub-processes.

(1) The analysis of the factory, in which the inefficiencies to be solved are sought. These inefficiencies will be called "challenges". (2) Filtering of the challenges according to costs and benefits, in which the challenges are classified according to the return they will provide in order to prioritize the solutions according to the challenges they will face. (3) Search for solutions to the challenges, a process in which the possible solutions to the challenges are sought, and the cost they would have is estimated. Knowing the savings, implementation time and costs, an informed decision can be made as to which solution to take. (4) Definition of the digital project, once the solution is known, it is necessary to properly define what will be done in the project and what is expected to be

achieved from it and (5) data audit, with the chosen project, it is necessary to establish what data will be needed and where this data is located at any time of its life.

This step is already quite advanced with the development of this document; however, it needs further elaboration on certain aspects.

b) Study of suppliers

Knowing the project and its needs, it is important to carry out a study of the project's suppliers. In this case, it will be Siemens for the software and the development of the twin, but it is also necessary a supplier for the unavailable sensors shown in Figure 8, which will be decided when the exact needs of each one of them are more concrete.

c) Development of the digital twin

Several functions are performed at this stage. On the one hand, the service provider will develop the simulation on its platform, with the digitization of each of the assets and the necessary intelligences to perform predictive maintenance. On the other hand, it is necessary to carry out the provisioning and factory installation of the new assets.

d) Implementation

In this stage, the simulation and intelligence are implemented and connected to the factory database. Here the first operational tests are performed, even if the output data from the digital twin is not validated.

e) Commissioning, training, and testing

This stage consists of three activities. Commissioning consists of the first commissioning of the digital twin, again, without data validation. Secondly, it is necessary to train the staff to be able to work with all the new applications, from the interactions with the twin to the interpretation of the outputs that can be obtained. Finally, it is necessary to perform some tests to ensure that the objectives defined above are met. This last part can be further developed with the digital twin working as normal.

For the implementation, a schedule of activities has been developed with an estimate of the time required for each of them. This can be seen in Figure 9, where the time data are in months. Therefore, the project would be completed, in principle, in 13 months.

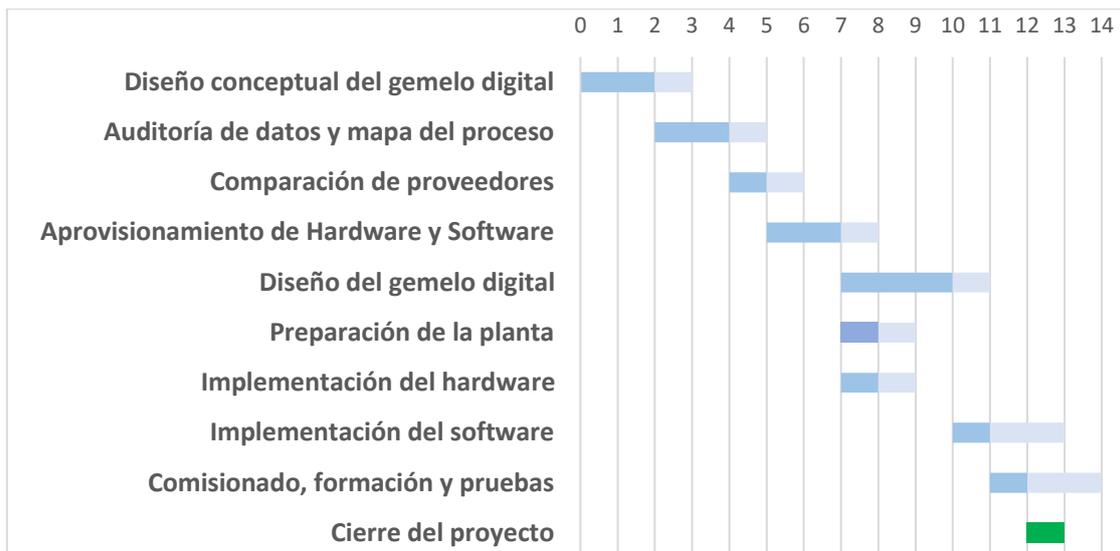


Figure 9. Project Schedule

Finally, a risk analysis has been developed with its corresponding mitigations or transmissions. Among all the risks mentioned, the one that would have the greatest impact on the project would be incomplete data collection, so it is important to work with the client and the supplier to study perfectly what data may be needed for the twin to work perfectly.

Regarding the economic impact, Figure 10 shows the investment required as well as the operational costs and the revenues derived as a result of the realization of this project.

| | Year 0 | Year 1 | Year 2 | Year 3 |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1 Investment (CAPEX) | €337,000 | | | |
| 1 1 Services | €300,000 | | | |
| 1 2 Hardware | €5,000 | | | |
| 1 3 Installation | €2,000 | | | |
| 1 4 Comissioning, training, tests | €30,000 | | | |
| 2 Operation expenses (OPEX) | €9,500 | €9,500 | €9,500 | €9,500 |
| 2 1 Software | €2,000 | €2,000 | €2,000 | €2,000 |
| 2 2 Cloud services | €6,000 | €6,000 | €6,000 | €6,000 |
| 2 3 Maintenance | €1,500 | €1,500 | €1,500 | €1,500 |
| 3 Profit | | €296,497 | €352,797 | €409,096 |

| | | | | | |
|----------|---|------------------------|-----------------|----------------|-----------------|
| 3 | 1 | Maintenance | €196,497 | €252,797 | €309,096 |
| 3 | 2 | Production improvement | €100,000 | €100,000 | €100,000 |
| 4 | | Total | €346,500 | €59,503 | €283,794 |

Figure 10. Project cash flows

The project recovers the initial investment in just over a year, specifically, one year and 63 days, considering that the 13 months of the project occur during year 0 and the beginning of year 1. The investment is quite lucrative, so its development is highly recommended.

4. Conclusion

The trend towards digitization has been growing in recent years, especially with the reduction in the cost of elements and developments. This project aims to introduce state-of-the-art technologies to a factory with certain inefficiencies in its line.

The first part develops a complete analysis of the factory, to discover that the costs due to unplanned stops in the bottle line shoot up quickly, so it is concluded that this is the best part to digitize. In the second part, a digital twin model is proposed, with suppliers and cost forecasting, to start the project immediately.

Future work for this project would be, first of all, to carry out everything described in this document. All the steps for the implementation of the project until the bottle line performance is improved. Once this improvement is achieved, those solutions proposed by the twin in line layout changes could be developed to increase efficiency and, therefore, production. Finally, much relevance has been given to the scalability of the twin. The next projects could try to add new functionalities to an existing twin or extend the twin to cover other lines, starting with the can line, which is very similar to the bottle line.

Índice

| | |
|---|----|
| Capítulo 1. Introducción | 7 |
| Antecedentes | 7 |
| Motivación | 9 |
| Objetivos | 10 |
| Capítulo 2. Estado del arte | 13 |
| Industria 4.0 | 13 |
| Introducción | 13 |
| Características de las fábricas inteligentes..... | 15 |
| Tecnologías | 21 |
| Gemelo Digital..... | 26 |
| Introducción | 26 |
| ¿Qué es un gemelo digital?..... | 28 |
| Tecnologías | 31 |
| Gemelo digital y BIM..... | 33 |
| Industria alimentaria | 35 |
| Sector de la cerveza | 37 |
| Capítulo 3. Estudio de la planta | 41 |
| Proceso de elaboración de cerveza | 41 |
| Situación actual de la planta | 44 |
| Producción..... | 44 |
| Envasado..... | 52 |
| Consumos | 62 |
| Posibles gemelos digitales y conclusiones..... | 70 |
| Situación actual de la zona objetivo | 77 |
| Capítulo 4. Gemelo digital en planta | 81 |
| Funcionalidades | 81 |
| Arquitectura..... | 83 |
| Simulación | 84 |

| | |
|---|-----|
| Gemelo digital..... | 92 |
| Arquitectura del gemelo digital en planta..... | 94 |
| Implementación..... | 98 |
| Proceso de implementación | 98 |
| Planificación temporal..... | 106 |
| Análisis de riesgos..... | 107 |
| Operación..... | 111 |
| Capítulo 5. Impacto económico y ODS..... | 113 |
| Impacto económico | 113 |
| Objetivos de desarrollo sostenible | 116 |
| Salud y bienestar | 117 |
| Trabajo decente y crecimiento económico | 118 |
| Industria, innovación e infraestructura | 118 |
| Reducción de las desigualdades | 119 |
| Ciudades y comunidades sostenibles..... | 119 |
| Producción y consumo responsables | 119 |
| Acción por el clima..... | 120 |
| Alianzas para lograr los objetivos | 120 |
| Capítulo 6. Conclusiones y trabajo futuro | 121 |
| Conclusiones..... | 121 |
| Problemas encontrados | 123 |
| Trabajo futuro..... | 124 |
| Capítulo 7. Bibliografía..... | 127 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Ejemplos de KPIs. A la derecha, consumo de agua. A la izquierda, MTBF..... | 8 |
| Figura 2. Diagrama de las revoluciones industriales. Fuente: economipedia.com | 13 |
| Figura 3. Pirámide de automatización (Fuente: smctraining.com) | 16 |
| Figura 4. Las cuatro características de la Industria 4.0. Fuente: deloitte.com. | 17 |
| Figura 5. Tecnologías de la Industria 4.0 según BCG. Fuente: bcg.com [9]..... | 21 |

| | |
|--|----|
| Figura 6. Representación de un gemelo digital. Fuente: manufactura40.com | 28 |
| Figura 7. Cuota de mercado de los grandes productores de cerveza. Fuente: t4.ai..... | 38 |
| Figura 8. Variedad de cervezas. Fuente: visualcapitalist.com | 38 |
| Figura 9. Proceso de elaboración de cerveza..... | 44 |
| Figura 10. Proceso de elaboración de cerveza del cliente..... | 45 |
| Figura 11. Silos de materias primas | 46 |
| Figura 12. Instalaciones de limpieza y molido de grano | 47 |
| Figura 13. Sala de cocción | 48 |
| Figura 14. Tanques de fermentación | 49 |
| Figura 15. Capacidades de producción y demanda..... | 51 |
| Figura 16. Proceso de elaboración de cerveza con capacidades..... | 52 |
| Figura 17. Proceso de envasado de cerveza del cliente..... | 53 |
| Figura 18. Proceso de embotellado de cerveza..... | 56 |
| Figura 19. Proceso de enlatado de cerveza | 57 |
| Figura 20. Proceso de llenado de barriles de cerveza..... | 58 |
| Figura 21. Capacidad de las líneas de envasado y demanda | 59 |
| Figura 22. Distribución de los procesos de las líneas de envasado | 59 |
| Figura 23. Paradas no planeadas en tiempo y coste..... | 62 |
| Figura 24. Consumo de vapor en MJ..... | 63 |
| Figura 25. Consumo de electricidad en kW | 63 |
| Figura 26. Consumo de agua en HL..... | 64 |
| Figura 27. Compra de CO2 en kg..... | 64 |
| Figura 28. Costes de los consumos..... | 65 |
| Figura 29. Reparto de los consumos | 65 |
| Figura 30. Costes de vapor..... | 66 |
| Figura 31. Reparto de costes de vapor..... | 66 |
| Figura 32. Costes de electricidad | 67 |
| Figura 33. Reparto de costes de electricidad..... | 68 |
| Figura 34. Costes de agua..... | 69 |
| Figura 35. Reparto de costes de agua..... | 69 |
| Figura 36. Resumen de los costes de los consumos más importantes | 70 |

| | |
|---|-----|
| Figura 37. Proceso de embotellado completo..... | 78 |
| Figura 38. Desarrollo de una simulación. Fuente: [36]..... | 85 |
| Figura 39. Realimentación de una simulación. Fuente: [34]. | 87 |
| Figura 40. Logotipos de los softwares mencionados. En orden, AnyLogic, FlexSim, Emulate3D, Simul8 y Tecnomatix..... | 89 |
| Figura 41. Modelo de arquitectura para un CPS genérico. Fuente: [21]..... | 93 |
| Figura 42. Clasificación de posibles soluciones según coste operacional y tiempo de retorno | 100 |
| Figura 43. Auditoría del dato..... | 101 |
| Figura 44. OTS del proyecto de implementación | 107 |
| Figura 45. Retorno de la inversión..... | 116 |
| Figura 46. Objetivos de desarrollo sostenible. Fuente: un.org..... | 117 |
| Figura 47. ODS Salud y bienestar | 117 |
| Figura 48. ODS Trabajo decente y crecimiento económico..... | 118 |
| Figura 49. ODS Industria, innovación e infraestructura | 118 |
| Figura 50. ODS Reducción de las desigualdades | 119 |
| Figura 51. ODS ciudades y comunidades sostenibles..... | 119 |
| Figura 52. ODS Producción y consumo responsables | 120 |
| Figura 53. ODS Acción por el clima..... | 120 |
| Figura 54. ODS Alianzas para lograr los objetivos. | 120 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Ejemplos de aplicaciones de la Industria 4.0 en el sector de la alimentación | 37 |
| Tabla 2. Ejemplos de aplicación de la Industria 4.0 en el sector cervecero..... | 40 |
| Tabla 3. Capacidades de las líneas de envasado | 58 |
| Tabla 4. Paradas no planeadas de la línea de botellas | 60 |
| Tabla 5. Paradas no planeadas de la línea de latas | 60 |
| Tabla 6. Paradas no planeadas de la línea de barriles | 61 |
| Tabla 7. Costes por hora no produciendo de las líneas de envasado | 61 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 8. Costes anuales de no producción de las líneas de envasado | 61 |
| Tabla 9. Propuestas de gemelo digital para la fábrica | 74 |
| Tabla 10. Máquinas de la línea de embotellado | 78 |
| Tabla 11. Costes de la línea de botellas | 80 |
| Tabla 12. Comparativa de posibles softwares de simulación. | 89 |
| Tabla 13. Lista de parámetros por máquina y disponibilidad | 96 |
| Tabla 14. Planificación del desarrollo del proyecto | 106 |
| Tabla 15. Análisis de riesgos | 108 |
| Tabla 16. Riesgos en tabla Probabilidad frente a Impacto | 110 |
| Tabla 17. Riesgos tras su gestión en tabla Probabilidad frente a Impacto | 110 |
| Tabla 18. Flujos de caja del proyecto. | 115 |

Capítulo 1. Introducción

En este capítulo se pretende realizar una contextualización del proyecto, incluyendo una breve descripción de la planta en la que se llevaría a cabo, la motivación detrás de su desarrollo, los objetivos a cumplir que indicarían que el proyecto ha sido terminado con éxito.

Antecedentes

El avance de las tecnologías y filosofías de producción han obligado a todos los grandes fabricantes a reinventar su forma de producir. Las herramientas tradicionales para medir rendimientos, enfrentarse a diferentes demandas y optimizar procesos se han quedado obsoletas en un mercado en el que la competencia aprieta en precios y tiempos a mercados y la flexibilidad y los bajos costes han cobrado un protagonismo que imposibilitan el uso de dichas herramientas.

El fabricante sobre el que se realizará el estudio no es una excepción. Es uno de los mayores productores de cerveza, un sector donde la competencia es muy alta. En esta fábrica no solo se produce cerveza, sino que también se envasa, empaqueta y envía al cliente final. Es decir, en esta fábrica se lleva a cabo todo el ciclo de producción de la cerveza, desde la llegada de cereales hasta el paletizado final para envío a cliente de las diferentes referencias.

Un protagonismo como este en un mercado tan competitivo como es el sector alimentario hace que las herramientas de análisis y optimización de la producción sean, necesariamente, de la más reciente generación. Actualmente, dicha fábrica utiliza KPIs (Key Performance Indicators) para analizar el estado de la fábrica. Los KPIs son valores, generalmente ratios o datos de consumos, que indican el estado de una fábrica. La optimización de estos KPIs, por tanto, resultaría en la optimización del proceso productivo íntegro. Las empresas, normalmente, se ponen objetivos en los valores de dichos KPIs y la distancia a dichos objetivos es indicativo del estado de la fábrica. Algunos ejemplos de KPIs

pueden ser el consumo de agua o el tiempo medio entre fallos (MTBF por sus siglas en inglés). Estos dos indicadores para la fábrica en cuestión se pueden ver en la Figura 1.

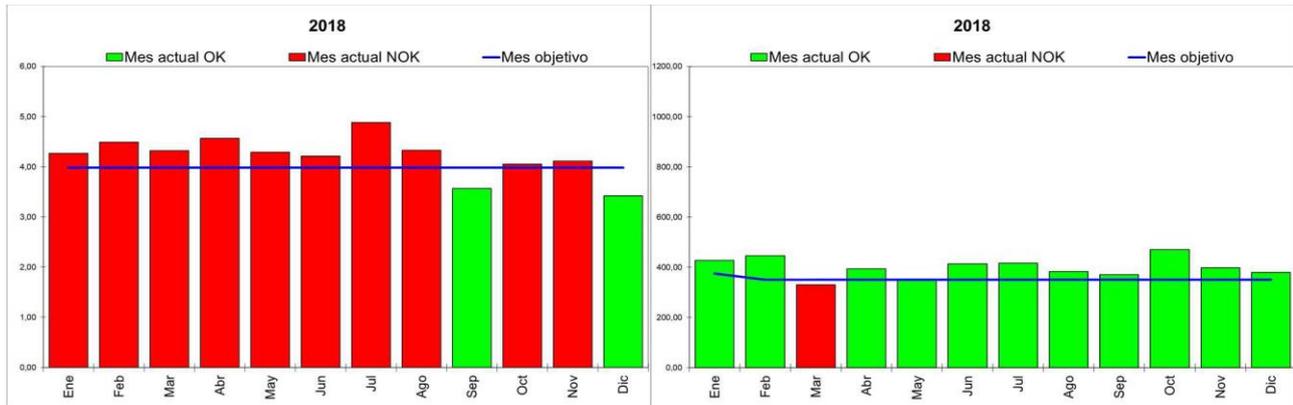


Figura 1. Ejemplos de KPIs. A la derecha, consumo de agua. A la izquierda, MTBF.

En este caso, los KPIs que se representan son para la parte de producción de cerveza y muestran el consumo de agua y el MBTF. Como se puede observar, el consumo de agua es normalmente superior al fijado como objetivo, por lo que convendría buscar maneras de reducirlo. El MBTF sin embargo está por encima del fijado de forma consistente, por lo que en ese aspecto la fábrica funciona correctamente. Esta parte de la producción en concreto cuenta con 21 indicadores que, en conjunto, informan a los usuarios del estado de la fábrica. Este análisis se hace de forma manual, comparando todas las gráficas una a una y obteniendo las conclusiones. Es una faena laboriosa y de poco valor añadido que se podría mejorar mediante la digitalización.

Con la digitalización de la fábrica, el análisis de estos KPIs se podría automatizar fácilmente. No solo eso, sino que se podrían desarrollar formas diferentes de analizar el estado de la producción, encontrar objetivos más realistas o ambiciosos según fuera necesario, descubrir qué indicadores tienen mayor relevancia sobre el resultado final de la compañía etc. En resumen, mediante la digitalización, este proceso para el que hay que dedicar tiempo de empleados todos los años y que además obtiene resultados de dudosa precisión, podría automatizarse y mejorar el proceso de búsqueda de ineficiencias.

Este proyecto propone el uso de un gemelo digital que sería capaz de leer información de la planta, almacenar esa información en su base de datos, utilizarla en

simulaciones o algoritmos de predicción, reproducir un informe para que el usuario pueda ver el estado de la línea e incluso actuar sobre la propia línea de producción para corregir dichas ineficiencias.

Un gemelo digital es, por tanto, una reproducción virtual de un proceso o producto físico con realimentación de dicho objeto en tiempo real. Esto significa que todo lo que ocurra en el modelo físico, ocurriría en el modelo virtual, por lo que todas estas ineficiencias no solo se podrían monitorizar, mediante sensorización, sino que también se podrían intentar predecir, mediante simulación o algoritmos de machine learning. Por tanto, este gemelo digital permitiría llevar a cabo mantenimiento predictivo, controles de calidad antes de obtener un producto u optimización del uso de recursos para obtener la calidad deseada.

Si bien la planta en cuestión ya cuenta con una herramienta para lectura de datos en tiempo real y almacenamiento en un servidor local SQL de los datos, estos se utilizan únicamente para monitorizar alarmas y descubrir motivos de fallos pasados. Es decir, es un sistema IoT sin ninguna inteligencia. Este proyecto pretende implantar un gemelo digital en la fábrica para realizar un análisis futuro de la producción.

Motivación

El sector de la alimentación es un sector altamente competitivo. Entre las regulaciones que se deben cumplir por seguridad, la cantidad de competidores y las economías de escala o los pequeños productores y los auges de productos ecológicos, vegetarianos, veganos etc. se ha convertido en un sector que requiere de mucha flexibilidad a costes bajos. Es por esto por lo que se encuentran infinidad de aplicaciones de Industria 4.0 en este sector.

Esto es especialmente cierto en el sector de la cerveza, donde las modas de cervezas artesanales comienzan a hacer mella en los grandes productores que dominan el mercado. Siendo un producto no esencial, la alta calidad es muy importante y siendo un producto tan variado en sabor y formas de producción, la flexibilidad para producir varios tipos es necesaria para abarcar un mercado mayor. Esta fuerte competencia, necesidad de

flexibilidad y exigencias de calidad han hecho que la digitalización para las grandes cerveceras no sea opcional [1].

Por tanto, este proyecto viene motivado por la necesidad de un gran productor de cerveza no solo de optimizar proceso productivo, sino de adelantarse en avances tecnológicos con respecto a su competencia. De esta forma, dicho productor tomaría una posición dominante dentro del mercado local en el que la fábrica produce en la actualidad.

Además, podría servir como proyecto piloto para otras iniciativas de digitalización que pueda tener este productor en otras fábricas y el estudio podría tener apartados, como la selección de proveedores, aplicables no solo a la fábrica en cuestión sino a todas las plantas que puedan tener en marcha.

Por último, independientemente de los factores externos, es innegable que la digitalización está aquí para quedarse. Mediante el desarrollo de este proyecto se pretende desarrollar un modelo de producción no solo más competitivo, sino que también más sostenible y con mejor servicio para los clientes, pero también para los trabajadores.

Objetivos

El principal objetivo de este proyecto consiste en la realización de un estudio de la situación actual de la planta para el posterior planteamiento de la implementación de un gemelo digital que pueda optimizar las ineficiencias encontradas durante dicho estudio. Estos objetivos se pueden enumerar como:

- Estudio de la situación actual de la planta. Este estudio pretende hacer una revisión del proceso productivo de la cerveza. Se analizarán los gastos y los consumos y se buscará la parte de producción que pueda requerir con mayor urgencia del desarrollo de un gemelo digital.
- Estudio para la implementación de un gemelo digital. Una vez conocida la parte con mayores ineficiencias, se procederá a realizar un estudio para implementar un gemelo digital. Dicho estudio comienza con la auditoría digital de la parte en cuestión, continua con la selección de proveedores y servicios

que puedan ser necesarios y termina con el desarrollo y el impacto que pueda tener el gemelo.

- Estudio de impacto económico del gemelo digital. Dado que el proyecto no parte de la necesidad de digitalización por ineficiencias encontradas, sino de un tanteo de posibles mejoras para la planta, el estudio económico dará luz a la verdadera necesidad que pueda tener el fabricante de implementar un gemelo como el descrito.
- Estudio de alineación con los objetivos de desarrollo sostenible. La digitalización es una vía para alcanzar el desarrollo sostenible. En este proyecto, se dedicará un apartado a justificar en términos de sostenibilidad la viabilidad del proyecto.

Capítulo 2. Estado del arte

En este capítulo se pretende dar el contexto necesario para comprender las tecnologías y, más en general, el proyecto. Dentro del contexto se hablará de la Industria 4.0, cómo se ha aplicado esta industria al sector de alimentación, qué es el gemelo digital y cómo interactúa con otras tecnologías como los modelos BIM.

Industria 4.0

Introducción

La Industria 4.0 es el estado actual de una serie de avances en las formas de producción que han cambiado la sociedad tanto industrialmente como política, económica o socialmente. Esta serie de avances comienzan en el siglo XIII con la primera revolución industrial que introduce la máquina de vapor y han ido progresando hasta la cuarta revolución industrial, la actual, en la que se utilizan las tecnologías digitales no solo para producir, sino también para optimizar los procesos. El alcance de esta filosofía de producción es tal que no solo se ha aplicado a la industria, sino que también a otros sectores como el marketing o las ventas.



Figura 2. Diagrama de las revoluciones industriales. Fuente: economipedia.com

El término Industria 4.0 se acuña en Alemania en 2011 y 2013, en el documento “Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0”, en el que se describe la estrategia alemana para seguir liderando el sector industrial mediante la integración de la cadena de valor y la digitalización del proceso productivo [2].

Esta filosofía de producción nace de la optimización de los avances conseguidos en la tercera revolución industrial. Tras la segunda guerra mundial, comienza la revolución informática, en la que se comienzan a automatizar los procesos productivos mediante el uso de los recientemente desarrollados ordenadores y otros recursos informáticos. Nace la robótica, se comienzan a usar PLCs y la electrónica cobra todo el protagonismo de las nuevas formas de producción. Este desarrollo queda limitado por un factor muy claro: las capacidades de procesamiento de los sistemas informáticos.

La Industria 4.0 nace de los desarrollos informáticos para conseguir grandes capacidades de procesamiento, así como del desarrollo de las comunicaciones para lograr altas velocidades. Esto se consigue, no solo mediante el desarrollo de nuevas tecnologías, sino que también con filosofías como el Edge Computing o los sistemas distribuidos, en los que se aprovecha las altas velocidades de comunicación para utilizar varias piezas de hardware para ejecutar un solo sistema o máquina virtual. Este aumento en las capacidades de computación y comunicación permite procesar ingentes cantidades de datos en cuestión de horas. Es por esto, que esta revolución está bastante relacionada con el análisis y la optimización. No solo de procesos, también se utilizan tecnologías de esta filosofía para analizar mercados, clientes y muchas otras aplicaciones no mencionadas. En resumen, la Industria 4.0 busca crear fábricas inteligentes mediante el uso de sistemas ciber físicos e interfaces hombre-máquina que permitan formas de producción sostenibles [3].

La variedad de tecnologías y aplicaciones hace que esta forma de producción se haya investigado desde varios puntos de vista diferente. Esto ha permitido el desarrollo de varias tecnologías que han permitido el progreso de la Industria 4.0, entre ellas, sistemas ciber físicos (CPS), IoT, la nube, fabricación aditiva, Big Data, etc. [4].

El abaratamiento de los elementos de comunicación, junto con las mejoras en velocidades de procesamiento y comunicaciones y la capacidad de dichos elementos de

almacenar sus propios datos ha permitido la propia representación digital del elemento. A esta intersección de las tres características se la llama un sistema ciber físico (CPS, cyber-physical system, en inglés) [5]. El concepto de CPS se acuña de 2006 por Helen Gill y define un sistema que combina procesos físicos, como sensores, actuadores etc. con un procesamiento digital de datos.

Los sistemas ciber físicos son sistemas físicos, biológicos y de ingeniería cuyas operaciones están integradas, monitorizadas y/o controladas por un núcleo de procesamiento. Los componentes se conectan a todas las escalas. El procesamiento de datos está “profundamente integrado” en cada componente físico, posiblemente incluso en los materiales. El núcleo de procesamiento es un sistema integrado, normalmente con respuesta en tiempo real, y suele estar distribuido. El comportamiento de un sistema ciber físico es una hibridación completamente integrada de acciones lógicas y físicas. (Traducido de [6])

Por tanto, el CPS es uno de los pilares sobre los que trabajan las tecnologías que componen la Industria 4.0. Un ejemplo de una aplicación de un CPS en el contexto sería el de una ciudad inteligente. En esta ciudad, todos los semáforos están conectados entre sí y con los vehículos que circulan. De este modo, el vehículo puede decidir qué ruta tomar según el estado de los semáforos y cuántos coches haya en cada ruta. Además, conociendo la velocidad y ruta de todos los vehículos, los servicios de emergencias, como las ambulancias o bomberos, pueden seleccionar la mejor ruta o avisar antes de tiempo de por dónde y cuándo van a pasar, para que otros vehículos les den prioridad [5].

Características de las fábricas inteligentes

La repercusión de los cambios de modelos de producción ha tenido lugar en absolutamente todos los puntos de la cadena de suministro, desde la obtención de la materia prima hasta el desarrollo del producto final. No solo esto, sino que también ha modificado cómo se trata el producto tras la venta, con las mejoras en las capacidades de trazabilidad de componentes y la posibilidad de seguir recibiendo información de productos con elementos de comunicaciones, el ciclo de vida de la producción no tiene por qué terminar con la recepción del cliente.

Esta evolución del modelo de producción no solo ha afectado a la producción en sí, sino que también ha afectado a las relaciones con el cliente (CRM) y las relaciones dentro de la propia empresa (ERP). Si bien estas herramientas existen de antes de la revolución industrial, no son igual ahora a cómo eran diez años atrás.



Figura 3. Pirámide de automatización (Fuente: smctraining.com)

El principal efecto que han tenido las nuevas formas de producción sobre la fabricación de la tercera revolución industrial se encuentra en las relaciones entre niveles y en un mismo nivel de la pirámide de automatización. La pirámide de automatización se puede ver en la Figura 3 y describe cinco niveles a los que trabaja una empresa de fabricación:

- **Nivel I o de campo:** Incluye todo el hardware que tiene una participación directa en el proceso de producción, esto es, sensores y actuadores de la planta.
- **Nivel II o de control:** Incluye todos los dispositivos para controlar el proceso, como PLCs u ordenadores.
- **Nivel III o de supervisión:** Incluye la supervisión y adquisición de datos (sistemas SCADA).

- **Nivel IV o de planificación:** Incluye los sistemas de ejecución de la producción.
- **Nivel V o de gestión:** Incluye la gestión integral de la empresa.

Con la aparición de las nuevas tecnologías de fabricación, las barreras entre los diferentes niveles e incluso dentro del mismo nivel se difuminan ligeramente. Por tanto, las características principales, según Deloitte, de los nuevos modelos de producción son las mostradas en la Figura 4 [7].

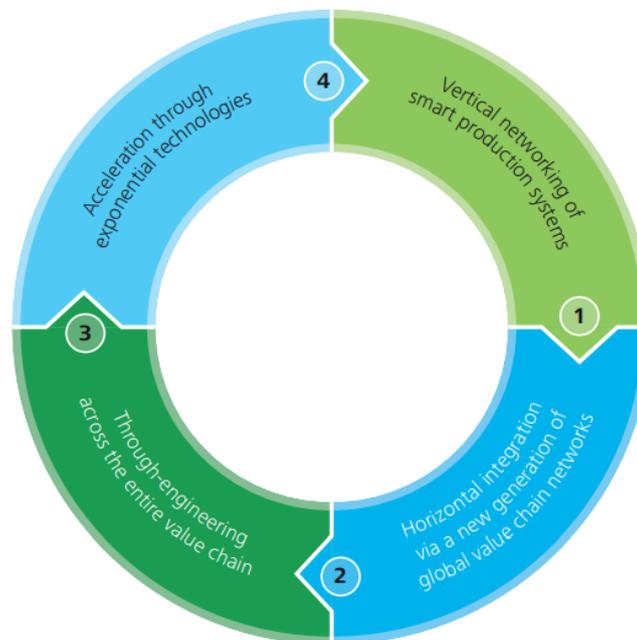


Figura 4. Las cuatro características de la Industria 4.0. Fuente: deloitte.com.

Integración vertical

La integración vertical hace referencia a la capacidad recién adquirida de los activos de realizar operaciones a diferentes niveles. Es decir, dentro de la pirámide de automatización, la relación entre los diferentes niveles no se limita únicamente a transmitir datos, sino que hay una participación más activa de los niveles superiores en los inferiores, y viceversa, para obtener respuestas más precisas, flexibles y rápidas. Esta integración está gestionada mediante CPS, capaces de leer datos del nivel de campo y procesarlos en

niveles de control o de supervisión, e incluso dar salidas para niveles de planificación o gestión. Esto permite reaccionar más deprisa a cambios en la demanda o en los inventarios.

Los CPS no solo permiten tratar con demanda e inventarios, pueden tener también funciones de gestión de mantenimiento, con inventariado de repuestos y monitorización de elementos de desgaste.

Algunas soluciones para lograr esta integración vertical serían la integración IT, evitando sistemas fragmentados y centralizando los sistemas de información, aplicaciones basadas en la nube, para analizar la enorme cantidad de datos que genera una fábrica moderna o soluciones de eficiencia operacional, con mayor transparencia del sistema de producción, que permite una mejor trazabilidad de producto y mantenimiento de instalaciones.

[Integración horizontal](#)

Consiste en la integración de elementos del mismo nivel en una red en tiempo real. Esta integración está protagonizada por tecnologías como la IoT, capaz de crear una red de elementos comunicados a un nivel. Esto permite mayor flexibilidad y robustez de la fábrica frente a posibles fallos, además de aportar mucha transparencia al sistema de producción.

El registro de los históricos de datos además, permite acceder en todo momento a los fallos que haya podido haber en planta, por lo que se pueden realizar varios análisis a posteriori o, simplemente, tener justificados todos los defectos. Esto implica una mayor trazabilidad del producto.

Algunas de las soluciones que da la integración horizontal serían una cadena de suministro inteligente, que tenga localizado el proceso siempre y optimice la realización de pedidos, uso de inventarios etc. o una logística inteligente, ya no solo externa, sino también dentro de la propia fábrica, con almacenes automáticos y AGVs. Esta integración generará la necesidad de sistemas de la información con mayor seguridad, ya que si se acaba conectando toda la empresa, en horizontal y en vertical, las vulnerabilidades aumentan y las potenciales pérdidas, es decir, el riesgo, también.

Ingeniería a lo largo de toda la cadena de valor

Con las capacidades de comunicaciones y procesamiento que se están explotando, se puede monitorizar y llevar la trazabilidad del producto mucho más allá del proceso de producción. Es decir, la vida del producto no comienza con la entrada en fábrica, y no termina con la llegada al cliente. La posibilidad de estar en constante comunicación con el proveedor permite monitorizar la materia prima para controlar el origen, la calidad, los tiempos de llegada etc. mientras que los productos con elementos de comunicaciones permiten seguir monitorizándolo tras su venta, para hacer estudios del tiempo de vida, encontrar posibles culpables de fallos postventa u ofrecer un servicio postventa personalizado al cliente.

Un ejemplo de este servicio postventa es el que se hace con los reactores de aviones, que los fabricantes siguen monitorizando desde sus oficinas centrales varios años después del primer vuelo del producto. Con esto, pueden comprobar que el motor esté funcionando bien, si deja de funcionar pueden buscar el motivo y aplicar cambios a otros productos. También pueden avisar al cliente de si tienen algún fallo e incluso hay algoritmos que permiten predecir si ocurrirá un fallo en pleno vuelo, de tal forma que se puedan evitar accidentes aéreos.

Aceleración mediante tecnologías exponenciales.

Cuando se investiga un avance nuevo en tecnología, no es para arreglar una parte de un proceso. Generalmente son tecnologías generales que sirven en varios puntos de la cadena de suministro del producto. Esto permite que con cada avance la producción avance de forma exponencial. Un ejemplo de esto es la fabricación aditiva, que tiene varias funciones a lo largo de toda la cadena de valor de un producto.

De cara a seguir desarrollando nuevas tecnologías se proponen soluciones como el *corporate venturing*, estrategias de investigación y emprendimiento en colaboración con otras empresas por el progreso de dicho emprendimiento.

Gracias a esta integración completa del sistema de producción, se pueden definir unas características más concretas de las fábricas del futuro [8]:

- **Personalización masiva.** La flexibilidad de las nuevas tecnologías, junto con la capacidad de obtener mucha más información del cliente, permite desarrollar productos o incluso procesos productivos completamente personalizados en periodos de tiempo relativamente bajos.
- **Agilidad.** La capacidad de comprender las líneas de producción, así como la demanda y las necesidades del cliente, han permitido que se pueda automatizar la determinación del tiempo, la calidad y el precio de los productos. Los cambios de producto de una línea se pueden hacer sobre la marcha.
- **Gestión en tiempo real.** Con el avance de las velocidades de comunicación, actualmente, el progreso del 5G, se puede obtener una imagen fidedigna sin apenas latencia de la planta, así como actuar sobre ella de forma remota. Este proyecto se centrará bastante en esta aplicación.
- **Automatización.** La automatización, que lleva ya en desarrollo desde antes del concepto de la Industria 4.0, está progresando muy rápidamente en los últimos años. Las altas capacidades de procesamiento y comunicación permiten que los sistemas tengan cientos de procesos completamente automatizados, con su autómatas, todos ellos supervisados por una misma unidad. Esto está permitiendo prescindir de operarios en ciertos puestos que pueden resultar monótonos y aburridos, así como con riesgo de lesión del trabajador, y puede evitar los errores de índole humana.
- **Mantenimiento predictivo.** La posibilidad de analizar grandes cantidades de datos en cuestión de horas ha permitido el desarrollo de aplicaciones o algoritmos que pueden predecir cuándo una máquina puede fallar. Gracias a esto se pueden programar los mantenimientos de una forma mejor justificada que una periodicidad basada en la experiencia y que no aprende de la situación de cada máquina.

- **Integración de la cadena de valor.** Muy similar a la integración horizontal mencionada más arriba, permite recoger datos del producto desde la materia prima hasta que sale de fábrica. Estos datos se pueden analizar a posteriori para entender mejor el proceso y tomar medidas de reconfiguración.
- **Gestión energética.** La Industria 4.0 pretende alinearse considerablemente con los ODS, por tanto, este punto se ha puesto a parte. Además de la recolección de datos de otros tipos, los datos acerca de consumos energéticos se pueden analizar para reducir las emisiones. Esto también se puede hacer con el consumo de otros servicios como el agua.

Tecnologías

Las tecnologías que protagonizan esta última revolución industrial son varias y no están perfectamente definidas [8]. Según la referencia que se consulte, la lista puede ser más larga o más corta. En el caso de BCG [9], las tecnologías identificadas son Big Data & Analytics, robots autónomos, simulación, integración horizontal y vertical, que se correspondería con CPS, IoT, ciberseguridad, la nube, fabricación aditiva y realidad aumentada (Figura 5). En otras literaturas, se añaden tecnologías como el blockchain o los sensores inteligentes [10].

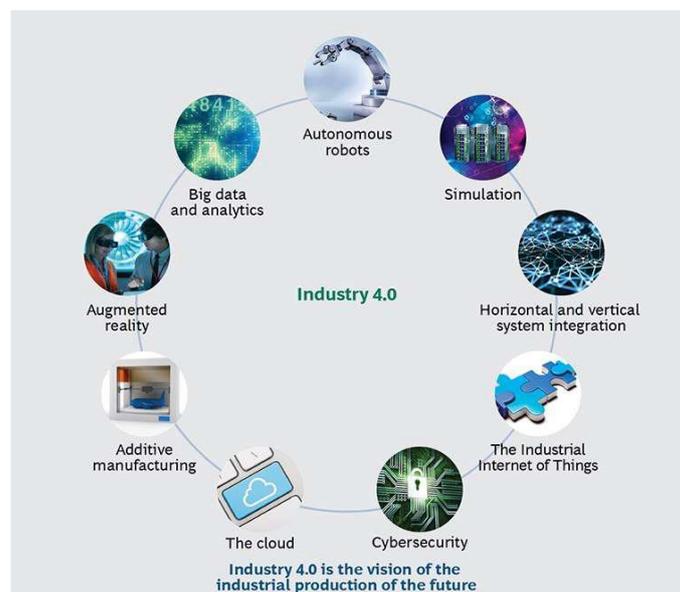


Figura 5. Tecnologías de la Industria 4.0 según BCG. Fuente: *bcg.com* [9]

Big Data & Analytics

El mayor impulsor de la Industria 4.0 ha sido el aumento de la capacidad de procesamiento y la velocidad de comunicación para sacar mayor partido a los datos obtenidos de un proceso. Esta parte de la Industria 4.0 es la que se encarga de ordenar toda esa cantidad de datos, analizarla y extraer conclusiones de éstos.

Esto se puede realizar gracias a los sistemas distribuidos. Los datos ya no requieren de un procesador en un ordenador físico para ser analizados, sino que se puede hacer en un sistema distribuido, con varias centrales de procesamiento, para combinar la potencia. Esto no solo permite los aumentos en capacidad y velocidad de análisis de datos, sino que también permite utilizar metodologías ágiles, en las que la secuencia de procesamiento no es de un paso tras otro, sino que se pueden ejecutar varios pasos al mismo tiempo [11].

Robots autónomos

Si bien esta tecnología se viene usando desde antes de acuñar el término de Industria 4.0, el desarrollo de esta ha sido uno de sus grandes habilitadores. Los robots autónomos son capaces de realizar tareas repetitivas, áridas y que pueden requerir de mucho esfuerzo físico por su cuenta, sin necesidad de operarios.

La mejora en su potencia ha permitido que éstos puedan realizar tareas más complejas, de manera más precisa e incluso trabajar de la mano de un operador. Estos robots pueden formar entornos multi-agente en los que colaboran varios de ellos de forma completamente autónoma. Actualmente, se está trabajando en programas de aprendizaje simulado que permita a los robots no sólo trabajar por su cuenta, sino también aprender a trabajar, para reducir las necesidades de programación que requiera cualquier aplicación [12].

Simulación

La simulación es otra tecnología que lleva presente en la industria varios años. De nuevo, gracias a desarrollos de ordenadores más potentes y de modelos matemáticos más precisos, ésta se ha visto favorecida en esta última revolución industrial.

Una simulación permite obtener una predicción de la situación de un sistema en un momento futuro. Para obtener dicha predicción, es necesario realizar una reproducción más o menos fidedigna del sistema que se va a simular y conocer aquellos parámetros de los que éste depende. Esta simulación puede estar basada en predicciones estocásticas, utilizando modelos estadísticos, o incluso existen algoritmos de IA que permiten a la simulación hacer predicciones basadas en modelos entrenados, no en modelos matemáticos [13].

Esta tecnología es especialmente relevante en el desarrollo de este proyecto, ya que si a una simulación se le da información en tiempo real, mediante algún tipo de conexión con el sistema físico que representa, se puede empezar a desarrollar un gemelo digital. Esencialmente, esta va a ser la metodología que se va a seguir para el desarrollo del gemelo digital que se menciona en el proyecto.

Integración horizontal y vertical

Como ya se ha explicado anteriormente, esta parte de la Industria 4.0 es la que permite englobar varias funciones y niveles de automatización en un mismo sistema. Los CPS son la perfecta representación de esta integración. Estos CPS recogen información de campo y la analizan en niveles más altos o recogen decisiones tomadas en niveles más altos y las ejecutan a nivel de campo.

Esencialmente, esta es la definición de un gemelo digital. Este proyecto, así como cualquier otro gemelo que se pueda desarrollar, consiste en la recolección de información a nivel de campo mediante sensores o de información derivada de los sensores y obtenida en los autómatas. Esta información se utilizará posteriormente para ejecutar la simulación o cualquier algoritmo de inteligencia artificial que se pueda desarrollar. Finalmente, se devuelve un informe de la situación, o bien se da órdenes a los actuadores directamente para que actúen sobre la producción.

IoT

En este caso, más bien IIoT (Industrial Internet of Things), el IoT desarrollado para aplicaciones industriales. Consiste en el uso de comunicaciones de alta velocidad y

densidad para eliminar el intermediario en las comunicaciones en fábrica y permitir que los procesos se conecten entre sí directamente. De esta forma, todos los elementos del nivel de campo están conectados entre sí (integración horizontal) y con el ordenador central, donde se almacenarán y procesarán los datos obtenidos.

Esta tecnología se puede utilizar en cadena de suministro, junto con sistemas ERP para conseguir una imagen global del proceso de producción en un momento concreto. De esta forma, toda esta información queda centralizada y ordenada, y se puede utilizar posteriormente para realizar un análisis que permita saber si va a haber retrasos, si la materia prima es suficiente, si la mano de obra tiene los recursos para desarrollar el trabajo etc. [14].

Ciberseguridad

Si bien muchas fuentes se olvidan de esta tecnología, podría considerarse la más importante de todas. La Industria 4.0 tiene su gran punto fuerte en la digitalización de todos los puntos de la producción, lo que permite tener acceso a esa información desde cualquier lugar, y con cualquier plataforma para realizar todo tipo de análisis. Esta información se puede reflejar en representaciones 2D o 3D, o puede ser sencillamente una base de datos con toda la información del proceso. No solo eso, también esta digitalizada toda la información sobre clientes, empleados, proyectos, estrategias etc.

Si bien esto permite acceder a procesos que mejoran la calidad y el servicio de la compañía de forma sustancial, también supone la mayor vulnerabilidad que las nuevas formas de producir han traído. Mediante el acceso a la red se puede acceder a cualquier parte de una compañía, tanto alguien de dentro, como alguien de fuera. La ciberseguridad es una tecnología absolutamente necesaria en el desarrollo de la Industria 4.0 ya que, sin ella, todos los activos e información confidencial de una empresa es vulnerable.

Los ataques relacionados con ciberseguridad están aumentando en los últimos años, es por esto, que las empresas están comenzando a invertir mayores cantidades en ciberseguridad. Para combatir estas vulnerabilidades, se están desarrollando estándares de ciberseguridad por parte de organizaciones como NIST, ENISA, IETF o W3C que establecen referencias de seguridad que las empresas deben cumplir [15].

La nube

Si bien la computación distribuida ha permitido que las velocidades de procesamiento aumenten considerablemente, un sistema distribuido y el espacio que ocupa no está al alcance de todo el mundo. De la misma forma, las empresas digitalizan millones de GB de datos, y los servidores de almacenamiento tampoco se los puede permitir cualquiera.

La nube son servicios que ofrecen grandes empresas con muchas instalaciones informáticas y que permiten el almacenamiento y procesamiento de datos en sus infraestructuras. Gracias a las altas velocidades de comunicación, los proveedores de estos servicios pueden cobrar por el uso de su infraestructura y sus clientes pueden acceder a altas potencias sin necesidad de hacer una inversión demasiado alta. Este modo de operar está muy extendido, no solo a aplicaciones industriales, sino a todo tipo de empresas e incluso particulares. Los mayores proveedores de este servicio en la actualidad son Amazon, Microsoft y Google, aunque existen otros agentes en este mercado como Ali Baba o IBM.

Fabricación aditiva

Más comúnmente conocida como impresión 3D, consiste en la fabricación de piezas según varias tecnologías añadiendo material, generalmente por capas. Es una forma de fabricación muy flexible que permite el uso de una alta variedad de materiales, lo que ha permitido la fabricación de piezas que, antes, habrían sido imposibles de fabricar. Además, permite el prototipado y fabricación de piezas completamente personalizadas de forma rápida, fácil, y no necesariamente muy cara.

Esta tecnología se usa para hacer piezas en bajas cantidades, generalmente personalizadas y de aplicación específica, aunque también tiene aplicaciones en otros sectores como el médico, donde se pueden hacer prótesis o réplicas de órganos.

Realidad aumentada

Si bien esta tecnología no es de las que más llama la atención, y está mucho menos desarrollada que las demás, el potencial que tiene es indiscutible. La realidad aumentada

difiere de la realidad virtual en que no oscurece todo lo que hay alrededor y reproduce una realidad virtual, sino que reproduce los elementos virtuales sobre un fondo real [16].

Blockchain

El blockchain es una base de datos distribuida en la que, para guardar información en dicha base de datos, se requiere de un algoritmo de consenso ejecutado por nodos mineros, que lo “encadena” a otros nodos de información. Este algoritmo hace que la información contenida en el nodo de blockchain recién guardado esté segura y no sea accesible ni modificable.

Las principales ventajas que aporta esta tecnología son la descentralización de la información, el aumento de transparencia en el proceso de asegurarla y la seguridad [17].

El objetivo de este proyecto es desarrollar un gemelo digital. En el siguiente apartado se discutirá en qué consiste un gemelo digital y qué papel tiene dentro de la Industria 4.0.

Gemelo Digital

Introducción

Como ya se ha mencionado, la principal aplicación de las tecnologías relacionadas con la Industria 4.0 consiste en la optimización de procesos, a ser posible de forma automática, mediante el análisis masivo de datos. Todo esto no ha sido posible hasta que no se han desarrollado las tecnologías y sistemas con las potencias necesarias para ejecutar dichas funciones. Es por esto, que algunos sistemas más anticuados presentan ciertas ineficiencias. Los principales problemas que tienen las compañías no digitalizadas con respecto al procesamiento de datos son:

- Herramientas de gestión de la producción anticuadas y no adaptadas a las nuevas tecnologías. Las herramientas que utilizan muchas empresas para la gestión de la producción son herramientas tradicionales, que han funcionado en mercados con menos opciones, y eran válidas. Estas herramientas estaban basadas generalmente en Excel o algún programa similar que,

aunque pueda permitir un análisis más o menos complejo, el proceso sigue siendo manual y susceptible de errores.

Sin embargo, con el auge de las tecnologías informáticas, es importante poder hacer análisis de la producción muy deprisa, a veces incluso en tiempo real, y flexibilizar la gestión para responder a la demanda.

- La optimización de la producción se hace por prueba y error. Al igual que la gestión, la optimización de los procesos se sigue haciendo de forma manual en muchas empresas. Esto es, probar la idea que se les haya ocurrido, basada en cálculos teóricos y validarla. Este proceso es lento, la toma de datos es monótona y susceptible de errores, y los resultados de los cálculos no dan garantía de que vayan a ser correctos. Mucho menos, si el modelo evoluciona de tal forma que sale de los parámetros en los que suele operar.

Esta forma de optimizar requiere además, normalmente, de inversiones relativamente altas. Cualquier prueba que se vaya a hacer requiere del activo físico sobre el que se vaya a probar, que, si bien no siempre incurre en un coste directo, sí que puede tener un coste de oportunidad si es necesario o bien detener la producción o bien ralentizarla.

Mediante una simulación, o análisis en tiempo real, se pueden ejecutar algoritmos de optimización que permitan en cuestión de horas obtener la mejor solución del problema. Esto, además, sin la necesidad de utilizar los activos físicos de la compañía, por lo que no repercute sobre los costes de producción. Además, si bien las primeras pruebas pueden ser más caras, ya que es necesario desarrollar el modelo, las posteriores se basan en un modelo ya existente, por lo que el coste es próximo a cero, pudiendo aumentar si se necesitan operarios especializados para ejecutar dichas simulaciones.

- Errores en la planificación de la producción. Las formas tradicionales de optimización de la producción se basan en cálculos desarrollados por el personal y que son realmente susceptibles de errores. Estos errores de

optimización podrían ser, por ejemplo, fallos en el modelo que impiden que se encuentre un óptimo, o coger como solución un máximo local, cuando existe uno global que serviría de solución. Estos errores pueden tener una repercusión directa sobre los costes y los tiempos de producción.

Mediante la implementación de un gemelo digital se pretende encontrar una solución única a todos estos problemas, que sea capaz de mejorar el rendimiento de la instalación sin incurrir en costes muy altos, además de ser fácilmente operable y funcional.

¿Qué es un gemelo digital?

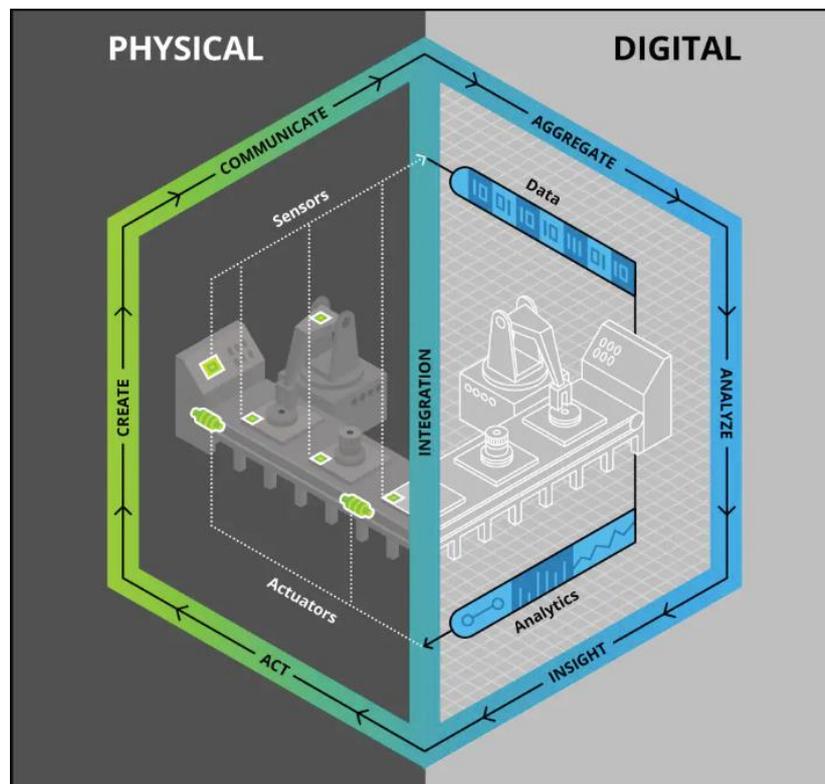


Figura 6. Representación de un gemelo digital. Fuente: manufactura40.com

No existe una definición de gemelo digital única. De hecho, hay varias interpretaciones de qué alcance tiene el gemelo. Siemens lo define como: “Un gemelo digital es una representación virtual de un producto o proceso físico que se utiliza para comprender y predecir las características de rendimiento de su equivalente físico.” [18]. Según General Electric: “[...] una representación en software de un activo físico, sistema o proceso diseñado para detectar, prevenir predecir y optimizar mediante análisis en tiempo

real para conseguir valor añadido.” [19]. Y según IBM: “[...] un modelo virtual para reflejar con precisión un objeto físico. []. Unos sensores producen información sobre los diferentes aspectos del desarrollo del objeto [...]. Esta información se introduce luego en un sistema de procesamiento de datos y es aplicado a la copia digital. Con esta información, el modelo virtual puede ejecutar simulaciones, estudiar el desarrollo y generar mejoras [...]” [20].

Es decir, un gemelo digital es una representación virtual de un objeto, proceso o servicio físico que se actualiza con información en tiempo real obtenida en el objeto físico y que se puede utilizar para obtener predicciones, mejorar, estudiar el estado etc. del objeto físico. Este esquema se puede ver en la Figura 6. Esto es una herramienta actualizada, adaptada a las nuevas tecnologías, con herramientas de optimización como la simulación para evitar la prueba y error y con mayor fiabilidad que las opciones de optimización actuales, por lo que ahorra tiempo y costes en la ejecución de las optimizaciones estudiadas.

Para realizar esto el gemelo digital lee datos en tiempo real directamente del autómatas del proceso. Si es un gemelo digital de un producto, también puede leerlos de una base de datos o directamente recibirlos. Estos datos son posteriormente utilizados en la lógica que se le haya implementado al gemelo. Esto puede ser tan sencillo como una simulación, alimentada de los parámetros de la planta en tiempo real, o tan complejo como algoritmos de Deep Learning que utilicen la información del gemelo como entrada de datos. Según la lógica desarrollada, la salida obtenida será diferente. Esta salida puede ser un informe para un operario, una alarma para avisar de algún mal funcionamiento o incluso una actuación directa sobre la planta para controlar ciertas entradas, entre otras.

Más arriba se ha mencionado la capacidad de realizar simulaciones u otros tipos de análisis de datos por parte del gemelo digital. Si la virtualización de la planta está bien hecha y acondicionada para distintas funcionalidades, se podrían hacer más cosas, como puede ser el entrenamiento virtual del personal o una puesta en marcha a distancia de los elementos. Para estas aplicaciones, se podrían utilizar tecnologías como la realidad aumentada. Finalmente, el gemelo también permite tener una única fuente de verdad, con

el historial de todos los datos que se quieran guardar, lo que permite hacer análisis a posteriori de posibles fallos o momentos de mejor rendimiento.

Con todas estas capacidades, el gemelo digital permite varias aplicaciones:

- **Mantenimiento predictivo.** Las aplicaciones de mantenimiento predictivo permiten saber cuándo una máquina va a sufrir un fallo que baje su rendimiento o la pare. De esta forma, se pueden agendar los mantenimientos de las máquinas con respecto a las previsiones de fallos, y no con respecto a un calendario recurrente y sin fundamento tecnológico mayor que la experiencia. Además, con información obtenida de esta aplicación se puede mejorar el proceso de producción buscando los puntos más críticos y mejorándolos, o creando *buffers* allá donde se realicen más labores de mantenimiento.

El gemelo digital permite realizar labores de análisis para la predicción de estos fallos utilizando la información obtenida en tiempo real.

- **Control de proceso.** El control de procesos consiste en el control de uso de materias primas, así como de tiempo, de tal forma que el producto salga cumpliendo las reglas de calidad de pero sin excederse en gastos. Mediante este tipo de aplicaciones se pueden reducir costes drásticamente en aprovisionamiento, así como consumo de agua, vapor, calor e incluso, si la máquina lo permite, electricidad. Otra aplicación de este tipo de control sería la gestión de inventario en el proceso. Conociendo las diferentes máquinas por las que pasa el producto, y con ayuda del mantenimiento predictivo, se puede saber qué máquina es el cuello de botella y cuándo ésta va a fallar. De esta forma, se puede gestionar el inventario de tal forma que las máquinas no tengan por qué estar paradas, sino que adapten su ritmo a las capacidades de los *buffers* y otras máquinas.

El gemelo digital utiliza la información sobre la receta del producto y un histórico de consumos y calidad de la salida para ser capaz de predecir qué

cantidad de materia prima hay que utilizar para que el producto se mantenga en los estándares requeridos.

- **Control de calidad.** Muy parecido al apartado anterior, el control de calidad busca alcanzar la máxima calidad minimizando los costes de producción. En este caso no se controlan materias primas o tiempos de procesamiento, variables de entrada del sistema, sino que se tienen en cuenta otras variables, variables internas como la temperatura, humedad etc. Si el control se hace de forma adecuada, se puede predecir la calidad que tendrá el producto antes de que éste termine de fabricarse. Esto permite descartar productos que se sabe que no alcanzarán la calidad adecuada, ahorrando en costes de proceso e incluso permitiendo reaprovechar parte de las materias primas utilizadas.

El gemelo digital utilizaría información obtenida del producto y del proceso para analizar qué calidad tendrá el producto final mediante el uso de un algoritmo entrenado específicamente para ello.

Tecnologías

Un gemelo digital es, por tanto, un tipo de CPS que realiza la función de unificar el nivel de campo con el nivel de control, y según el alcance del gemelo, el nivel de supervisión. Este CPS en concreto está compuesto de:

- Por el lado físico, todos los sensores que componen la línea de producción, incluidos pero no limitados a los sensores de final de carrera, de temperatura, humedad, presión, nivel etc. También incluye todos los actuadores, como pueden ser los motores que accionan las cintas transportadoras, servos de las máquinas, válvulas, sistemas hidráulicos etc. Por último, es importante incluir a los autómatas que rigen el sistema, todos los PLC que permiten que el proceso se complete son los intermediarios entre las lecturas físicas o las acciones y la parte digital.
- Por el lado cibernético, o de software, el abanico de soluciones es mucho más amplios. En esta parte se incluyen las bases de datos que almacenen la

información, los servicios de nube que pueda utilizar, o no, el gemelo, la simulación o los modelos de IA que sirvan como lógica del sistema etc.

Por último, es importante tener en cuenta todas las comunicaciones que ocurren dentro del gemelo digital. De nuevo, estas pueden ser de varios tipos. Entre los elementos físicos, lo normal es tener comunicaciones ad hoc, con protocolos como Zigbee, Bluetooth o VANET, mientras que la comunicación entre el nivel físico y el nivel virtual se puede realizar con comunicaciones punto a punto [21].

Vista una arquitectura muy básica de este tipo de CPS, se procede a mencionar las tecnologías que componen los gemelos digitales, dentro de las que ya se han estudiado en el apartado anterior:

- **Big Data & Analytics.** La base lógica de un gemelo digital se basa en el análisis de datos. Bien sea para utilizarlos posteriormente en una simulación o porque se va a desarrollar directamente un modelo de IA, la parte de Big Data es esencial, ya que la cantidad de datos que se recogen será inmensa, y es importante estructurar estos datos y tratarlos para ser procesados. Como ya se ha mencionado, no siempre se va a desarrollar un modelo de análisis de datos, muchas veces se pueden utilizar en otras partes, pero la parte de *analytics* sigue siendo una parte esencial en el desarrollo de un gemelo.
- **Robots autónomos.** Si bien la relación no es evidente, sí que puede aparecer como un componente del gemelo si es un componente del elemento físico. Por tanto, puede ser un elemento que virtualizar y programar en la virtualización.
- **Simulación.** Es una herramienta esencial dentro del gemelo. La gran mayoría de los gemelos que se desarrollan están basados en una simulación. Esta simulación está parametrizada para que los datos de entrada se puedan leer directamente de la planta y ejecutar varias situaciones para comprobar posibles salidas.

- **Integración vertical y horizontal.** El desarrollo de un gemelo digital consiste en la integración de los diferentes elementos de la fábrica con los niveles superiores.
- **IloT.** La conexión de todos los elementos de la fábrica es necesaria para que el gemelo funcione. Si no hay comunicación, la lógica no tendrá sentido. Esta comunicación se realiza con redes ad-hoc.
- **Ciberseguridad.** El gemelo digital consiste en realizar una copia digital de la producción y permitir que esa copia digital la controle. La ciberseguridad es absolutamente esencial de cara a protegerse de amenazas externas que puedan interferir en el proceso o robar información confidencial. Además, el gemelo puede ser una puerta de entrada a otras partes de la fábrica o de la empresa, por lo que también se puede considerar aislarlo del resto de la organización.
- **La nube.** Si bien este elemento no es esencial, puede resultar de mucha ayuda. El uso de la nube permite más flexibilidad a la hora de realizar el gemelo, ya que no hay limitaciones de requisitos de hardware o memoria, además de estar en servidores perfectamente seguros y de responsabilidad del proveedor. Dicho esto, si el tamaño del gemelo y la información recogida son lo suficientemente pequeños, está perfectamente justificado su desarrollo a nivel local, sabiendo siempre que su tamaño vendrá limitado por la capacidad de inversión en nuevo hardware informático y el espacio para el mismo.
- **Sensores inteligentes.** La principal fuente de datos del CPS serán los sensores. Inteligentes o no, este elemento aparecerá en todos los gemelos digitales que se puedan diseñar.

Gemelo digital y BIM

Un modelo BIM (Building Information Model) es un modelo informático que se utiliza mucho en arquitectura y en diseño de estructuras. Este modelo incluye toda la información

funcional, de desarrollo y de propiedades geométricas de los componentes del edificio. Con el objetivo de controlar el progreso de la construcción [22].

Dentro de los modelos BIM, existen varios niveles de profundidad que éstos pueden representar. En primer lugar, están los modelos BIM 3D, que son una representación geométrica y funcional de la construcción. Cuentan con toda la información en un modelo 3D del edificio y contienen elementos funcionales como tuberías, conductos de aire o cableado eléctrico. En segundo lugar, están los modelos BIM 4D que incluyen, además de todo lo que incluye el 3D, todos los elementos con variable temporal. Esto pueden ser, planes de construcción, órdenes a subcontratistas etc. y optimiza el proceso de construcción [22]. En tercer lugar, están los modelos 5D, en los que se incluye además información acerca de los costes de desarrollo de la construcción. Por último, los modelos nD, que son aquellos modelos en los que también se puede introducir información acerca de la operación y mantenimiento del edificio. Esto es, el edificio está conectado mediante tecnología IoT y el modelo puede leer y representar en tiempo real el estado de aquellos elementos que están monitorizados mediante sensores. Por ejemplo, la máquina central del aire acondicionado del edificio podría tener sensores de velocidad de aire, temperatura y humedad. Estos parámetros podría leerlos el modelo BIM y utilizarlos [23]. El software más utilizado para el desarrollo de modelos BIM es Revit, vendido por Autodesk.

Conociendo todas estas capacidades del modelo BIM, es innegable que podría funcionar muy bien de la mano de un gemelo digital. De hecho, los modelos de mayores dimensiones, los nD, son modelos que podría decirse que son un gemelo digital. Contienen una representación virtual de un objeto físico y hacen lecturas en tiempo real de dicho objeto.

Es por esto, que además del estudio de la implementación del gemelo digital, se estudiará el uso de un modelo BIM para ayudar a desarrollar dicho gemelo. El modelo BIM contendría toda la información geométrica, así como funcional, mientras que el gemelo digital se encargaría de las comunicaciones y la lógica.

Industria alimentaria

La industria alimentaria es una de las industrias más grandes del mundo. El hecho de ser un producto de necesidad, y no de lujo, junto con la existencia de duras regulaciones, productos perecederos, la volatilidad del mercado ante cualquier noticia, además de los bajos márgenes y la alta competitividad, hace que este sector requiera de toda la flexibilidad y eficiencia de producción de la que pueda disponer. Si a esto se le añaden los gustos variables del consumidor y las tendencias de las redes sociales, la actualización de las formas de producción deja de ser una opción [24]. El crecimiento de los consumos y la concienciación de la población hace que los proveedores busquen nuevas formas de producir de forma ecológica, utilizando metodologías ágiles y aprovechando oportunidades para el control del sector [25].

Esta industria cada vez pone más presión sobre la cadena de suministro, con temas como, por ejemplo, la tendencia del consumo de refrescos en envases más grandes, aunque con la concienciación para la reducción de consumo de azúcares, las empresas deben adaptarse a producir refrescos bajos en azúcares o volver a reducir el tamaño de los envases [25]. Esto es un ejemplo de la flexibilidad que requiere la cadena de suministro según el mercado en el que esté operando y las tendencias marcadas por profesionales de la salud o estrellas de cine o de las redes sociales.

Además, hay una tendencia por los consumos online. Desde servicios de comida a domicilio hasta repartos de la compra, las compañías del sector deben adaptarse para incorporar un posible reparto al consumidor final dentro de su cadena de suministro. Esto se puede hacer sin necesidad de aplicaciones de Industria 4.0, pero a medida que escalen las necesidades, la posibilidad de centralizar esa información en un sistema conectado e inteligente mejorará las eficiencias de desarrollo.

Estos son algunos de los condicionantes que están forzando al sector de la industria alimentaria a actualizarse hacia las nuevas formas de producción. Se ha generado una necesidad de conocer al cliente, para producir de acuerdo con sus necesidades, flexibilizar la producción, hacerlo de manera sostenible y eficiente etc. Estas necesidades se acentúan

al observar las tendencias del mercado, en el que los consumos siguen aumentando y la necesidad de opciones sostenibles y ecológicas crece. A continuación, se explican algunos ejemplos de aplicación de la Industria 4.0 en el sector alimentario. Estos ejemplos se resumen en la Tabla 1.

Köbnick *et al.* proponen hacer evolucionar la industria alimentaria de un modelo “*make and sell*” (fabrica y vende) en el que el productor fabrica para vender todo lo que pueda a un modelo “*sense and act*” (mide y actúa), en el que el productor se adapta a la demanda [26]. La parte de medir hace referencia a la capacidad de conocer las necesidades del cliente, hacer estudios de hábitos de consumo etc. mientras que actuar hace referencia a la capacidad del proveedor de flexibilizar su servicio para ofrecer un producto más personalizado.

En [16], se desarrolla una aplicación de realidad aumentada capaz de llevar a cabo la trazabilidad de productos alimenticios. La aplicación móvil utiliza la cámara para detectar el envase que se va a consumir y es capaz de detallar toda la información acerca del producto y, si bien es una aplicación en desarrollo, tiene mucho potencial para poder rastrear su origen para hacer una cadena de suministro más transparente.

En [27], se propone una aplicación para control de calidad mediante el uso de sistemas de visión artificial. Se podría hacer capturas de la comida y analizar el color, la forma e incluso la presencia de cuerpos extraños como cristales o plásticos de hasta 1,5x1,5mm para intentar deducir la calidad del producto.

En [28] se propone el diseño de un CPS para reproducir el comportamiento de una embotelladora de agua. Este sistema es muy sencillo y permite monitorizar la línea de producción y toma los datos para representarlos de tal forma que sean sencillos de interpretar.

Tabla 1. Ejemplos de aplicaciones de la Industria 4.0 en el sector de la alimentación

| Aplicación | Tecnologías utilizadas | Descripción de la aplicación | Fuentes |
|-----------------------------------|--------------------------------|--|---------|
| Análisis de mercado | Big Data & Analytics | Analizar las necesidades de los clientes para hacer productos más personalizados y adaptados a la demanda. | [26] |
| Trazabilidad de productos | Realidad aumentada | Aplicación de realidad aumentada para ver el origen de los productos comprados y sus contenidos | [16] |
| Control de calidad | Visión artificial / IA | Sistema de visión artificial para evaluar la calidad del producto | [27] |
| Optimización de un proceso | Simulación / Integración V y H | Monitorización de una planta de embotellado de agua para encontrar ineficiencias o posibles fallos | [28] |

Sector de la cerveza

En el caso del sector de la cerveza, la situación no es muy diferente. El sector cervecero está protagonizado por un perfil de cliente generalmente exigente con la calidad y cobra mucha importancia la capacidad de desarrollar un producto diferente. La gran mayoría del mercado está dominado por los grandes productores, con cuotas de mercado muy parecidas, sin embargo hay hueco para una gran cantidad de pequeños productores artesanales. Todo esto genera no solo un ambiente de mucha competitividad, sino que aparecen muchos productos sustitutos. Estos productos incluyen otras marcas de cerveza, cerveza sin alcohol y otras bebidas alcohólicas y no alcohólicas como el vino, la sidra o los refrescos. Las cuotas de mercado de cada gran productor se pueden ver en la Figura 7 y la gran variedad de marcas de cerveza en la y la Figura 8.

Beer Market Share, 2018, Volume

www.T4.ai

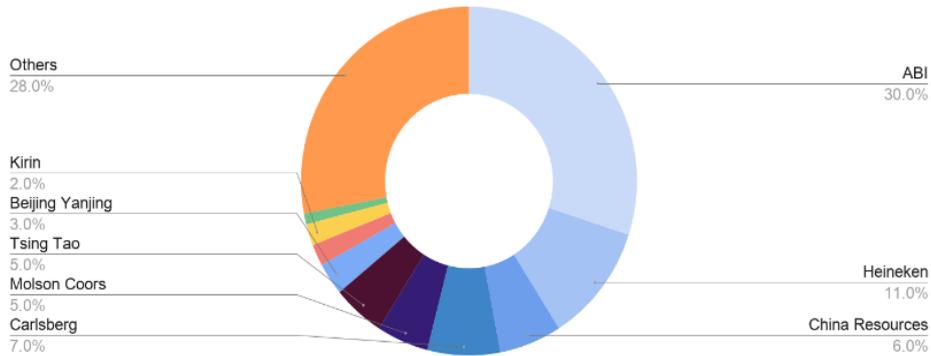


Figura 7. Cuota de mercado de los grandes productores de cerveza. Fuente: t4.ai



Figura 8. Variedad de cervezas. Fuente: visualcapitalist.com

Esta feroz competencia, junto con la inmensa variedad de productos que se ofrecen obligan a los productores del sector a reducir costes para ser competitivos y flexibilizar al máximo la producción para acceder a ciertos mercados locales. Para lograr esto, se pueden desarrollar varias funcionalidades relacionadas con tecnologías de la Industria 4.0. A

continuación, se presentan algunos ejemplos de Industria 4.0 en el sector cervecero, que se pueden ver resumidos en la Tabla 2.

En [29], se presenta un caso de optimización de lavado de los tanques donde se trata y almacena la cerveza. Para obtener un producto de calidad, es importante que entre un lote y el siguiente no haya mezclas de productos, para que no distorsione el sabor. Esto se logra mediante los sistemas CIP, que limpian los tanques de cerveza de forma automática. Esta aplicación consiste en monitorizar dicha limpieza para evitar que el tanque quede sucio, pero intentando minimizar el uso de productos químicos para reducir los costes.

En [30], AB Inbev desarrolla un sistema junto con Pluto7 en Google Cloud por el que se monitoriza el cambio de filtros del tanque de cerveza. De nuevo, este filtro debe ser cambiado en el momento preciso para que el exceso de uso no distorsione el sabor, pero que el cambio no sea prematuro y aumente los costes de mantenimiento. Mediante esta monitorización, se consigue averiguar el momento exacto en el que debe ocurrir el cambio a través de un algoritmo de IA.

En [31], el autor propone utilizar tecnologías de automatización para optimizar la configuración de los sistemas en una fábrica durante su funcionamiento. Este proceso de configuración, que se hacía de forma manual, era un proceso que llevaba mucho tiempo y era susceptible de errores. El texto ejemplifica la utilidad de la aplicación con una fábrica de cerveza en Australia, en la que se observó una reducción del 99% en los esfuerzos de configuración.

En [32], el fabricante norteamericano de cerveza Deschutes observó en su planta que la fermentación de uno de sus productos no funcionaba como debía. Tras aplicar análisis propios de la Industria 4.0, descubrieron que se debía a los excesos de tiempo de fermentación, con lo que consiguieron no solo mejorar la calidad de su producción, sino acortar el tiempo de elaboración de cerveza en 24 horas, lo que permitió producir \$450.000 más al año.

Tabla 2. Ejemplos de aplicación de la Industria 4.0 en el sector cervecero

| Aplicación | Tecnologías utilizadas | Descripción de la aplicación | Fuentes |
|--|-------------------------------|---|----------------|
| Lavado de tanques | Big Data & Analytics / IloT | Monitorización de la limpieza de tanques para optimizar el uso de recursos y la calidad | [29] |
| Cambio de filtros | Big Data & Analytics / IloT | Monitorización de los filtros de los tanques para optimizar los tiempos de cambio | [30] |
| Configuración automática | Automatización | Evitar los cambios de configuración manuales para reducir el error humano y los tiempos de cambio | [31] |
| Optimización de tiempos de fermentación | Big Data & Analytics / IloT | Análisis de la fermentación para acortar tiempos, mejorando calidad y aumentando la producción | [32] |

Capítulo 3. Estudio de la planta

Una vez puesta en situación las técnicas de la industria para digitalizar la producción y justificada la necesidad que tiene el sector de progresar, se va a contextualizar el proyecto dentro de la fábrica y se buscará qué localización se podría beneficiar del uso de un gemelo digital. Este capítulo comienza con un apartado en el que se explica el proceso de producción de cerveza, posteriormente se hace un estudio de la planta en cuestión, analizando los diferentes procesos, y finalmente se proponen posibles gemelos digitales del proceso y se concluye cuál se estudiará en futuros capítulos.

Proceso de elaboración de cerveza

El proceso de elaboración de cerveza es uno de los procesos más antiguos que existen. Si bien este proceso se ha ido mejorando con los avances científicos y tecnológicos a lo largo de los siglos, lo cual haría que el producto conocido hoy como cerveza no se parezca en absoluto a lo que fue en sus orígenes, consta que las primeras fermentaciones de cereales para lograr esta bebida se sitúan alrededor del 9.000a.C, en Mesopotamia. Este proceso ha ido incorporando nuevas tecnologías y conocimientos científicos para mejorar el sabor, incrementar la variedad y aumentar la seguridad en su consumo. El proceso de elaboración de cerveza consta, por tanto, de los siguientes pasos [33]:

1. **Germinación o malteado.** Mediante la germinación, el cereal desarrolla los enzimas necesarios para la maceración. Este proceso requiere de unas condiciones de temperatura y humedad concreta, y en la industria se lleva a cabo en el suelo de grandes almacenes con riegos constantes de agua y rastrillos. Este proceso no se lleva a cabo en la fábrica en cuestión, por lo que no se le dará más importancia.
2. **Secado y tostado.** Esta parte del proceso no tiene porqué realizarse. El grano se seca para reducir la humedad y alargar los tiempos de almacenamiento. Además, el tostado ofrecerá un color y un sabor característico al producto final,

por lo que es una variable con la que se puede jugar para obtener diferentes resultados. Al igual que el paso anterior, éste no se lleva a cabo en la fábrica en cuestión, por lo que tampoco se le dará la mayor importancia.

- 3. Molienda.** La molienda del grano se lleva a cabo para reducir el cereal a tamaños mínimos. De esta forma, la superficie expuesta del grano es mayor y el acceso a los enzimas durante la maceración es más sencillo.
- 4. Maceración.** Durante la maceración, se le añade agua al grano y los enzimas serán los responsables de la descomposición de los azúcares en el grano. Estos azúcares son los que serán, posteriormente, fermentados y convertidos en alcohol.

Este proceso es altamente sensible a cambios de temperatura y al pH en el tanque de maceración, por lo que es importante controlar bien la temperatura con tubos de refrigeración ya que las condiciones en las que se desarrollen este proceso tendrán un efecto directo sobre la calidad del producto final.

- 5. Cocción y enfriamiento.** Durante la primera parte de este proceso se añade el lúpulo, que influirá en el sabor amargo de la cerveza y se asegura un medio aséptico, donde luego se inocularán las levaduras para la fermentación. Este proceso no solo esteriliza el mosto y da sabor, sino que también aumenta la concentración de azúcares y le da más color al mosto.

El enfriamiento del mosto es necesario para evitar que las levaduras que se introducen durante la fermentación mueran. De nuevo, es importante llevar el mosto a una temperatura adecuada para que el siguiente paso se lleve a cabo en las condiciones adecuadas. Este enfriamiento se realiza a través de un intercambiador de calor en forma de serpentín por el que circulará agua dentro del tanque de enfriamiento.

- 6. Fermentación.** Probablemente el subproceso más conocido dentro de la elaboración de cerveza. Durante esta etapa se introducen las levaduras que se encargarán de la fermentación de los azúcares presentes en el mosto. Al igual

que la maceración, esta es una de las etapas más decisivas en el resultado final del proceso. Tanto la cantidad de levaduras que se introducen, como su tipo o la temperatura y pH a la que se produzca esta parte tendrán protagonismo en el resultado final. Mediante variaciones en estas variables, se pueden conseguir diferentes tipos de cerveza, por lo que cada receta y cada productor guarda estas variables con sumo secretismo.

Es especialmente importante controlar bien la temperatura del proceso, ya que la fermentación es exotérmica, es decir, libera calor, y si las temperaturas crecen en exceso pueden aparecer productos derivados que reduzcan la calidad del producto. Esta temperatura se controla mediante intercambiadores de calor en los tanques de fermentación.

7. **Maduración.** Si bien todos los pasos hasta ahora tienen efectos sobre el sabor, olor y color de la cerveza, la mayoría de estos efectos son involuntarios, o, más bien, parte esencial de la cerveza. En el proceso de maduración se le da al producto los sabores y olores característicos de cada tipo. Se puede llevar a cabo en barriles de acero o de madera, y se deja madurar entre unas semanas y 6 meses.
8. **Almacenamiento.** Finalmente, el producto terminado se almacena en tanques de presión donde se mantendrá hasta que éste pueda ser envasado.

Entre varios de los pasos mencionados anteriormente, es necesario hacer una filtración para eliminar todos los depósitos que dejan el mosto y la cerveza a lo largo del proceso, como son polvos, el bagazo, granos, levadura, tierra etc. Este proceso completo se puede ver en la Figura 9.

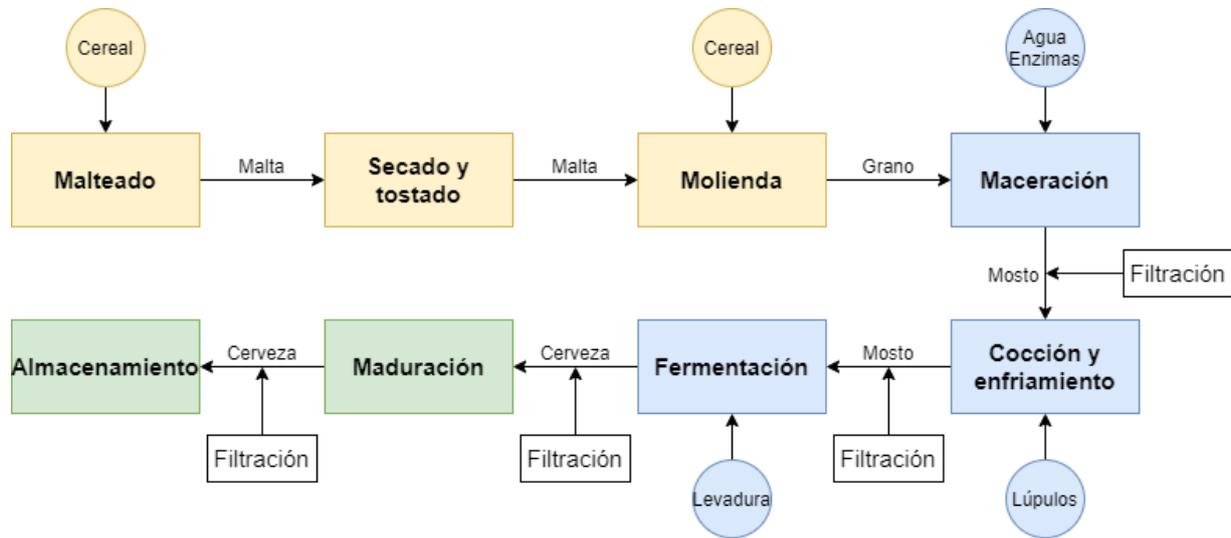


Figura 9. Proceso de elaboración de cerveza

Situación actual de la planta

Si bien la solución digital que se va a proponer ya es conocida, el gemelo digital, la zona de aplicación requerirá de una rápida auditoría digital para comprobar qué parte de la planta necesita con más urgencia esta solución. La auditoría digital se compondrá de un análisis de la situación actual de la planta, para entender qué parte tiene más gastos, y finalmente se propondrán algunas soluciones utilizando el gemelo digital.

Producción

El proceso de producción de cerveza se lleva a cabo en la fábrica de forma muy similar a la descrita en el apartado anterior. Los procesos de malteado y tostado no se llevan a cabo dentro de la planta, ya que el grano se compra directamente malteado y, si fuera necesario, tostado, por tanto, el primer paso del proceso es la molienda. Sin embargo, sí hay un almacén de grano anterior donde se entregan las materias primas. En la Figura 10 se muestra el proceso exacto que se lleva a cabo en esta fábrica y en el Anexo I. Proceso y envasado un diagrama más detallado de en qué consiste cada subproceso.

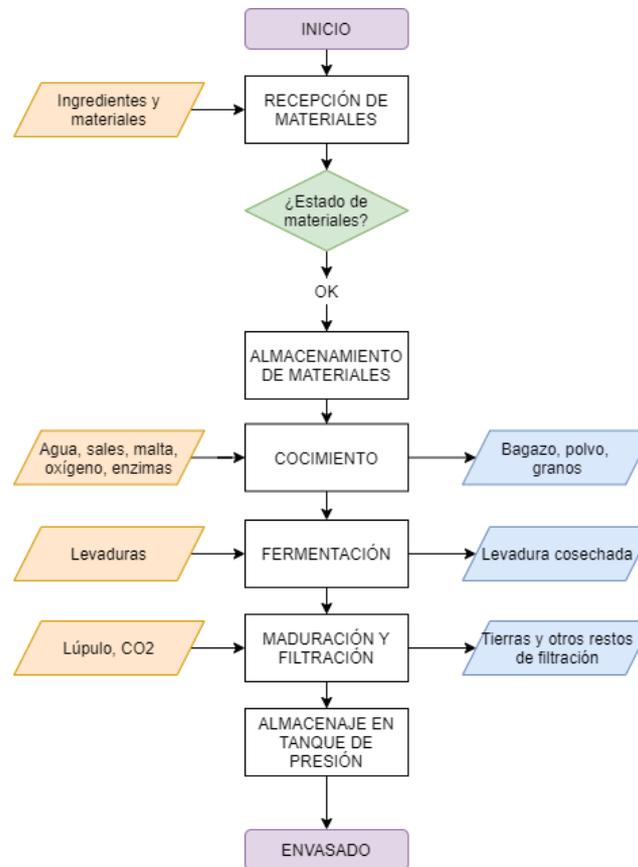


Figura 10. Proceso de elaboración de cerveza del cliente

Almacenamiento

Tras la recepción y un control de calidad sobre los materiales recibidos, éstos son almacenados en los silos que se encuentran en la parcela del cliente. Esta planta recibe malta y maíz para la fabricación de la cerveza. Ambos elementos son limpiados para evitar introducir otros granos o piedras en el proceso antes de ser enviados al siguiente paso, la molienda.

La planta cuenta actualmente con:

- 4 silos de malta con capacidad de 123,8 toneladas/silo y;
- 2 silos para cereales con capacidad de 107,9 toneladas/silo.

Y las capacidades anuales que presentan son de:

- Malta: 18.075 toneladas/año y;
- Maíz: 3.939 toneladas/año.

Teniendo en cuenta unas pérdidas de alrededor del 0,7% de la malta y el 0,3% del maíz, estas cantidades se pueden traducir en la producción de alrededor de 1.282 khl/año. La Figura 11 muestra dos imágenes de los silos.



Figura 11. Silos de materias primas

Molienda

El proceso de molienda incluye la molienda del grano, pero también el pesaje y la dosificación del grano. Este proceso se hace por separado para la malta y para el maíz, ya que este último no necesita ser molido. Para facilitar la molienda del grano, a esta parte del proceso se le añaden agua, agua caliente y ácido, que pasarán por un control sensorial antes de ser introducidos en el molino. Existen dos líneas: una fabricada por HUPPMAN y SEMACE para la malta y otra fabricada por SEMACE para el maíz. Las capacidades para ambas líneas son:

- Malta: 3.360 toneladas/semana y;
- Maíz: 2.184 toneladas/semana.

Esto, en términos de producto terminado, se traduce en unos 7.400 khl/año de cerveza. En la Figura 12, se pueden ver las instalaciones de limpieza, pesaje y molido del grano.



Figura 12. Instalaciones de limpieza y molido de grano

Sala de cocción

La sala de cocción incluye el proceso de maceración, ebullición y refrigeración del mosto. En esta etapa entrarán la malta molida y el maíz en grano y van a los tanques de maceración, donde se les añade agua, vapor, cloruro cálcico, sulfato cálcico y enzimas. El resultado de la maceración se filtra con ayuda de agua caliente y ácido para separar el mosto del bagazo, que se someterá a un análisis y vendido. El mosto pasará por otro control de calidad antes de ir al tanque de espera para la ebullición.

Al proceso de ebullición se le añade, además del mosto, vapor, ácido y lúpulos, que son sometidos a un control visual de calidad, y de éste se obtiene vapor de agua, que será utilizado en otros procesos de la fábrica, y el mosto caliente que pasará a los tanques de centrifugado y refrigeración. El tanque de centrifugado separará el mosto más turbio, que se unirá al bagazo obtenido de la maceración, y el mosto claro, que será refrigerado con ayuda de aire y oxígeno. Finalmente, el mosto refrigerado pasa por un control sensorial antes de comenzar la fermentación.

La sala de cocción de la fábrica cuenta con:

- 4 tanques de maceración y mezcla;
- 1 tanque de buffer entre el macerado y la ebullición;
- 1 tanque de ebullición;
- 1 tanque de centrifugado y;
- 1 tanque de refrigeración.

La capacidad total de la sala de cocción es de 1.296 khl/año de cerveza. Una imagen de dicha sala se puede ver en la Figura 13.



Figura 13. Sala de cocción

Fermentación

Tras la refrigeración del mosto, éste es oxigenado y se manda a los tanques de fermentación. En los tanques de fermentación se introduce también las levaduras, que vienen de un proceso de reproducción en el laboratorio y han pasado un análisis sensorial, agua glicolada y amoníaco. El proceso de fermentación dura 288 minutos y emite CO₂, que se aprovechará en la línea de envasado o se venderá, y el mosto que, tras someterse a un análisis sensorial, se le cosecharán las levaduras reproducidas durante esta etapa y se

llevarán a la cuba de levaduras. Al mosto, se le añade lúpulo y se envía a los tanques de enfriamiento.

En este punto, ya se puede hablar del líquido producido como cerveza. Desde los tanques de enfriamiento, se puede o bien obtener directamente la cerveza joven, como producto terminado, o bien enviar el producto hacia los tanques de maduración, donde pasarán la última etapa de la elaboración de cerveza.

En la planta en cuestión hay trece tanques de fermentación:

- 8 tanques Brassag con capacidad de 1.652 hl/tanque y un ratio de llenado de 82%;
- 2 tanques Holvrieka con capacidad de 3.192 hl/tanque y un ratio de llenado de 75% y;
- 3 tanques Ziemann con capacidad de 2.903 hl/tanque y un ratio de llenado de 74%.

La capacidad de los tanques de fermentación es de 882 khl/año. En la Figura 14 se puede ver una imagen de los tanques de fermentación de la planta.

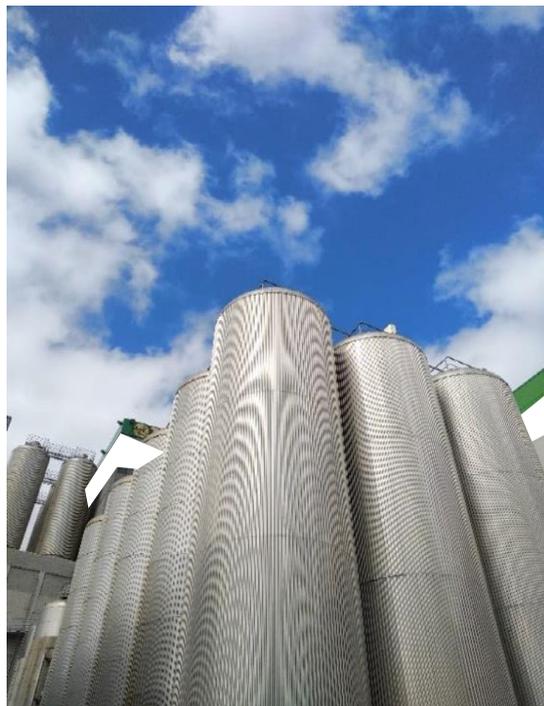


Figura 14. Tanques de fermentación

Maduración

Al proceso de maduración entra la cerveza fermentada, se le añade agua glicolada y amoníaco y se deja madurar durante varios días, dependiendo de la cerveza que se esté fabricando. Tras la maduración, habrán depositado restos sólidos de la cerveza como levaduras, lúpulo u otros subproductos, mientras que se liberará CO₂ de manera natural, que se aprovechará en la línea de envasado. Tras un análisis del resultado, se introduce en tanques de mezclado donde se añadirán las colas y cabezas de la cerveza, previo análisis sensorial. Finalmente, se enfría utilizando agua glicolada y se pasa a os tanques buffer antes de una última filtración para dejar el líquido limpio.

Los tanques utilizados para la maduración son muy parecidos a los utilizados durante la fermentación:

- 4 tanques Brassag con capacidad de 1.652 hl/tanque y un ratio de llenado del 82%;
- 1 tanque Holvrieka con capacidad de 3.192 hl/tanque y un ratio de llenado de 75% y;
- 4 tanques Ziemann con capacidad de 2.903 hl/tanque y un ratio de llenado de 74%.

La capacidad de maduración de cerveza es de 895 khl/año.

Filtración

Antes de poder utilizarse la cerveza, es necesario filtrarla para envasar un líquido limpio y apto para el consumo. Esta filtración se hace primero por tierras, con filtros de kieselguhr y agua desaireada y, tras pasar por un tanque buffer, se le vuelve a añadir lúpulo y se vuelve a mezclar con agua desaireada y cabezas y colas de cerveza. Este es el último mezclado antes de la filtración final, que se hace con cartuchos de 5µm, después de lo cual la cerveza terminada pasa a los tanques de almacenaje BBT.

El proceso completo de filtración incluye los tanques mencionados anteriormente y tiene una capacidad de filtrado de 2.442 khl/año de cerveza.

BBT

Los tanques BBT (bright beer tanks) son el último paso de la cerveza antes de llegar al envasado. La fábrica tiene nueve tanques BBT:

- 4 tanques de 305 hl/tanque y;
- 5 tanques de 930 hl/tanque.

La capacidad de los tanques BBT actual es de 796 khl/año.

La fábrica, además de cerveza produce cerveza con limón, por lo que se deben tener en cuenta dos procesos más:

Preparación de cerveza con limón

Primero se prepara el jarabe con agua, azúcar y ácido cítrico y se filtra con agua desaireada para obtener un jarabe diluido. Éste se somete a controles de oxígeno y brix, para comprobar cuánto sólido hay en el líquido y, si los pasa, se procede a mezclar el jarabe con la cerveza que viene directamente de la etapa de filtración. Se le añaden aromas, se enfría, se hace un ajuste final con agua desaireada y CO₂ y pasa a los tanques buffer antes de ser envasada. Este proceso se realiza en dos líneas diferentes para dos productos que usan aromas o jarabes distintos, sin embargo, el proceso es el mismo para ambos. Este proceso no se tendrá en cuenta en el estudio de la fábrica.

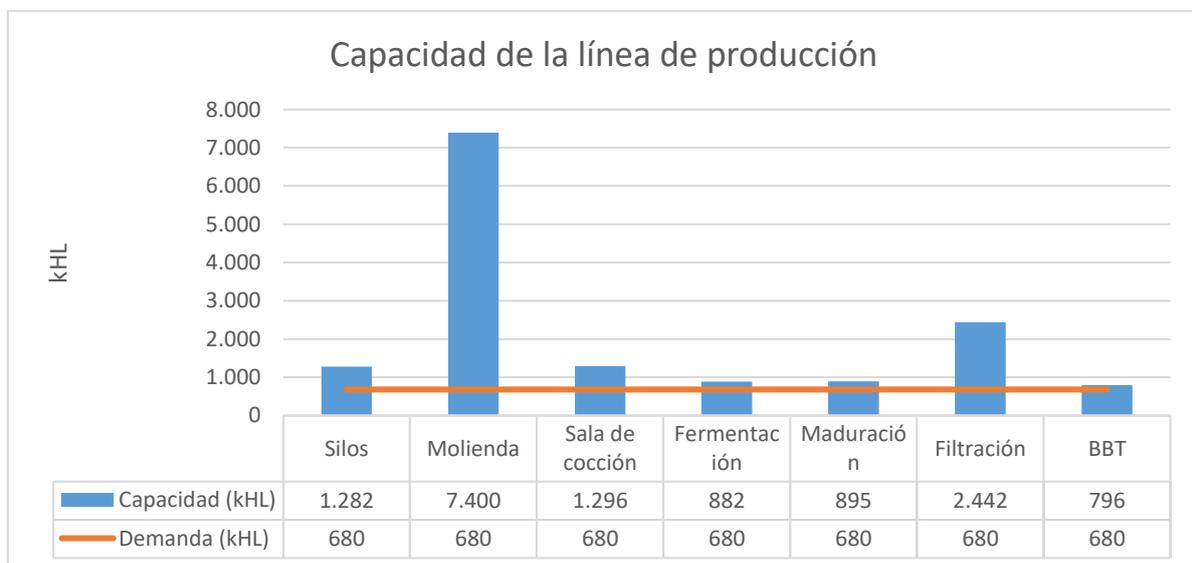


Figura 15. Capacidades de producción y demanda

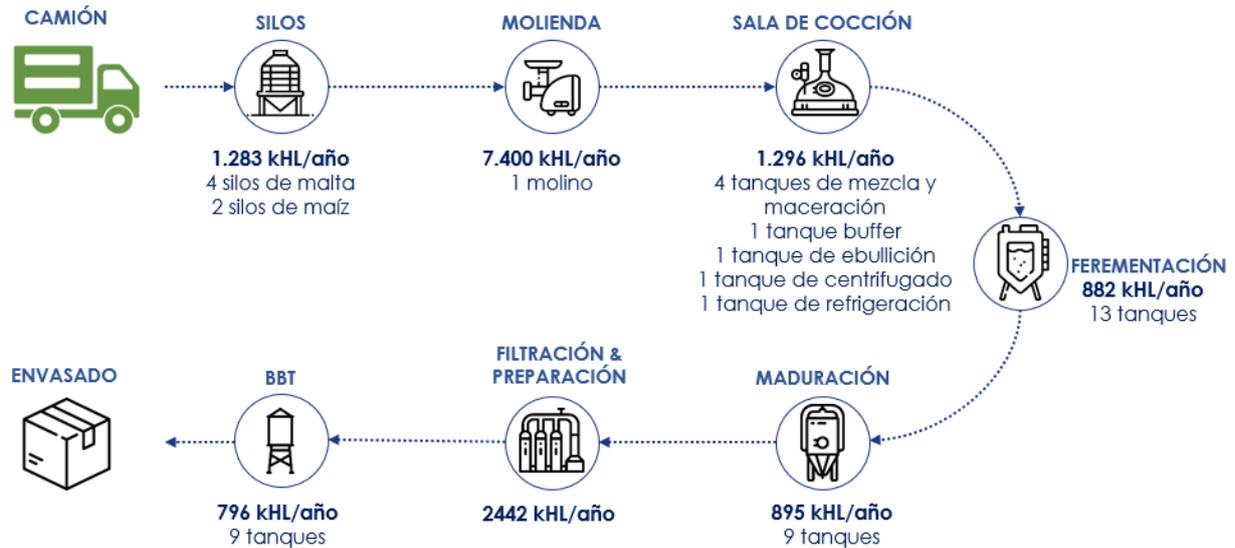


Figura 16. Proceso de elaboración de cerveza con capacidades

Un resumen de las capacidades de producción se puede ver en la Figura 15.

Como se puede ver en esta tabla resumen, la línea de producción tiene la capacidad para responder a la demanda observada actualmente de 680 kHL, no obstante, en el caso de que ésta fuera a subir, los puntos críticos a mejorar serían los tanques BBT, la fermentación y la maduración. Éstos son también los cuellos de botella y, por tanto, la parte del proceso que debe operar a máximo rendimiento todo el tiempo posible, para no recortar la capacidad de producción por debajo de la demanda.

Finalmente, en la Figura 16 se puede ver el esquema de todo lo descrito anteriormente.

Envasado

La fábrica de cerveza tiene tres líneas de envasado para tres formatos diferentes: una línea para botellas de cristal, que pueden ser retornables o no retornables, una línea para latas y una última para barriles. En la Figura 17 se puede ver un esquema de cómo funcionan las líneas de envasado aquí mencionadas y en el Anexo I. Proceso y envasado se puede ver un detalle de cada una de las líneas.

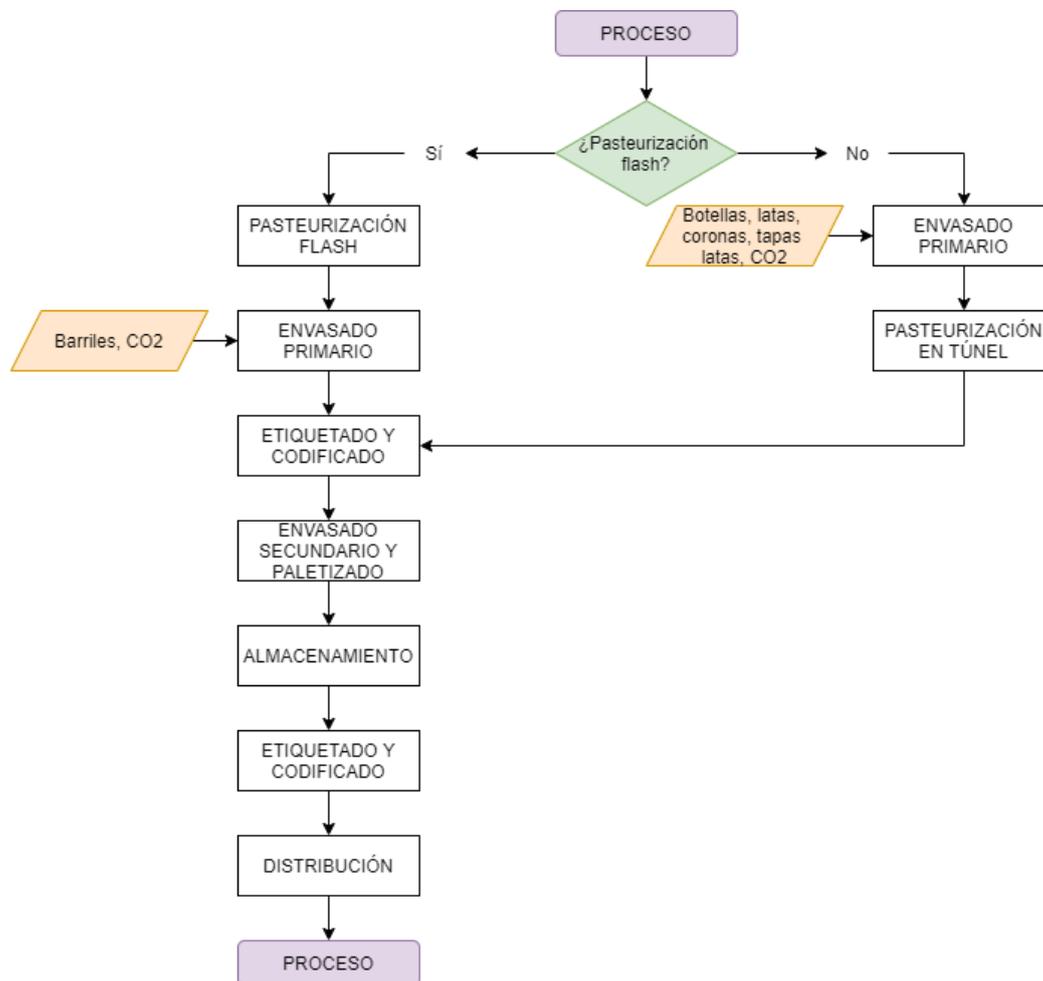


Figura 17. Proceso de envasado de cerveza del cliente

Si bien el proceso de envasado tiene tres líneas diferentes, éste es muy parecido para las tres, salvo por la pasteurización. En el caso de los barriles, la cerveza se pasteuriza antes de ser envasada, mientras que en el caso de las latas y botellas la pasteurización ocurre en la línea de envasado. A continuación, se procede a explicar cada una de las tres líneas con un poco más de profundidad.

Línea de botellas

Dentro de la línea de botellas, existen dos formatos diferentes. En primer lugar, las botellas retornables son aquellas botellas que se envían a restaurantes, discotecas, bares etc. y que posteriormente son devueltas para lavar y rellenar. Por otro lado, las botellas no retornables son aquellas que suelen ir dirigidas a supermercados, minoristas y algún

establecimiento de restauración y que son de un solo uso, es decir, en lugar de lavarse y rellenarse se reciclan directamente con el vidrio.

Ambos formatos siguen la misma línea de llenado, sin embargo, el preparado de las botellas para su llenado es diferente, ya que las botellas usadas requieren de una desinfección más a fondo que las nuevas. Por tanto, dentro de la línea de botellas se pueden distinguir tres procesos diferentes:

Preparación de botellas retornables

Las botellas retornables se reciben en el almacén, se despaletizan y, si son nuevas, se identifican. Dado que vienen en cajones, es necesario hacer un desencajonado y una inspección. Las cajas proceden a un lavado de cajas utilizando agua, sosa y vapor, mientras que las botellas por otro lado entran en la lavadora donde pasarán por varias etapas. En primer lugar, un pre-enjuague con agua y sosa, luego se dejan en remojo en un tanque de sosa con aditivos, se lava el interior con espráis y se pone en remojo de nuevo, sólo con agua. Se hace un enjuague exterior, un lavado exterior y un enjuague interior, todo ello con agua. Tras hacer una inspección para comprobar que no haya fragmentos de vidrio u otros cuerpos extraños en las botellas, se hace un enjuague final y se manda a la línea de envasado.

Preparación de botellas no retornables

El proceso de preparación de las botellas no retornables es mucho más sencillo, ya que la desinfección de las botellas, dado que no han sido utilizadas, es más directa. La recepción y el despaletizado ocurren de la misma manera, y se identifican los pallets para añadir trazabilidad al producto. Posteriormente, las botellas pasan a la enjuagadora de presión, y se hace una prueba a caudal constante con agua. Si pasa el control, se enjuaga la botella directamente y se envía a la línea de envasado.

Llenado de botellas

Finalmente, se procede al llenado de las botellas de cerveza. En este punto se tratan indistintamente a todas ellas, bien sean retornables o no retornables, y atraviesan la misma línea. Antes de comenzar el llenado, todas las botellas se someten a un inspector de

botellas vacías, que comprueba si hay fragmentos de vidrio u otros cuerpos extraños en la botella, o si la boca está rota o tiene fisuras. Se transporta hasta la llenadora donde se vuelve a hacer la misma inspección y se llenan de cerveza con ayuda de agua y CO₂. Además, se utiliza aire comprimido para eliminar el aire en el cuello de las botellas. Tras el llenado pasa directamente al taponado, donde se utilizarán o bien tapones o bien coronas, según el formato, y se hace una inspección de tapón, para asegurar que está bien puesto. Antes de pasar a la etiquetadora, se hace un enjuague exterior para eliminar todos los restos y se pasa por el pasteurizador donde es tratada con agua, vapor y otros aditivos. Se seca la botella y está lista para ser etiquetada y codificada. Finalmente, pasa una inspección de nivel de llenado, presión, etiqueta y cuello.

Alcanzado este punto, es necesario realizar el envasado secundario, por el que las botellas se envasan en las cajas de plástico que se han lavado antes si son retornables o cajas de cartón si no lo son. Estas cajas se paletizan, el pallet se etiqueta y queda listo para su envío.

Existen cuatro referencias diferentes para las botellas, bien sean retornables o no:

- 0,2 L
- 0,25 L
- 0,33 L
- 0,75 L

Y el ritmo la capacidad que tiene la línea es de 314 kHL/año para botellas retornables y 263 kHL/año para botellas retornables.

En la Figura 18 se puede ver un esquema de cómo funciona la línea de botellas.



Figura 18. Proceso de embotellado de cerveza

Línea de latas

La línea de latas, como la de botellas comienza con la recepción y almacenamiento del material de envasado. Éste se despaletiza, previa identificación del pallet por motivos de trazabilidad, y se codifican las latas con tinta. No requieren de más preparación que un enjuague con agua, ya que el material es nuevo y viene limpio, y una inspección para asegurarse de que no hay fragmentos de metal u otros sin enjuagar.

Con la lata limpia y lista, se procede al llenado de cerveza, utilizando agua y CO₂ para eliminar el aire debajo de la tapa. Inmediatamente después se cierra la lata con más CO₂ y las tapas de las latas y se hace una inspección del contenido y la tapa. Con la lata ya llena y cerrada, se procede al pasteurizado y secado, tras lo que se hace otra inspección para asegurar que no hay fugas. Finalmente, se agrupan en anillos de plástico en la Hi-Cone, se realiza el empaquetado secundario, se paletiza, se etiqueta el pallet y se almacena lista para enviar.

La línea de enlatado tiene una capacidad de 580 kHL/año con ocho referencias diferentes de latas que incluyen diferentes tamaños y marcas. En la figura XX se puede ver un diagrama del proceso de enlatado.



Figura 19. Proceso de enlatado de cerveza

Línea de barriles

La línea de barriles sigue un esquema ligeramente diferente a las de embotellado o enlatado, ya que la pasteurización es flash, en lugar de ser en un túnel de pasteurización. El comienzo, es muy parecido. Llegan los barriles, se almacenan y se despaletizan. Los barriles son retornables, así que es necesario hacer un lavado más a fondo, por lo que antes de nada se hace una inspección de presión residual con aire y se procede a un lavado exterior con agua, sosa y aditivos y a un lavado interior con detergente. Se hace un chequeo y se procede a la esterilización utilizando vapor y, finalmente, se purgan los barriles y se despresurizan con CO₂. Con esto termina la preparación del material de envasado antes del llenado.

En una línea paralela, la cerveza se somete a un procedimiento de pasteurización flash, que consiste en un aumento de temperatura seguido de una bajada muy brusca de la temperatura. Se hace una inspección de la conductividad y se almacena en un tanque buffer.

Estando la cerveza y los barriles listos, la primera es filtrada al salir del tanque y se utiliza para llenar los barriles. En este caso, no es necesario usar aire para despresurizar el barril, porque eso es algo que ya se ha hecho en la preparación de éste. El barril lleno se

somete a un control del pH y, si lo pasa, se desinfecta la válvula, se pesa, se capsula, se etiqueta, se paletiza y se etiqueta el pallet para quedar listo para el envío.

La línea de envasado de barriles tiene dos referencias diferentes, barriles de 30 litros y de 50 litros. La capacidad actual de la planta es de 429 kHL/año de cerveza para la línea de barriles. En la figura XX se puede ver un diagrama del proceso de llenado de barriles.



Figura 20. Proceso de llenado de barriles de cerveza

Resultados finales

Finalmente, la capacidad de las líneas de envasado se puede ver resumida en la Tabla 3 y representada gráficamente en la Figura 21.

Tabla 3. Capacidades de las líneas de envasado

| | RETORNABLES | NO RETORNABLES | LATAS | BARRILES | TOTAL |
|------------------------|-------------|----------------|-------|----------|-------|
| CAPACIDAD (KHL) | 314 | 263 | 580 | 429 | 1586 |
| DEMANDA (KHL) | 87 | 97 | 387 | 110 | 680 |

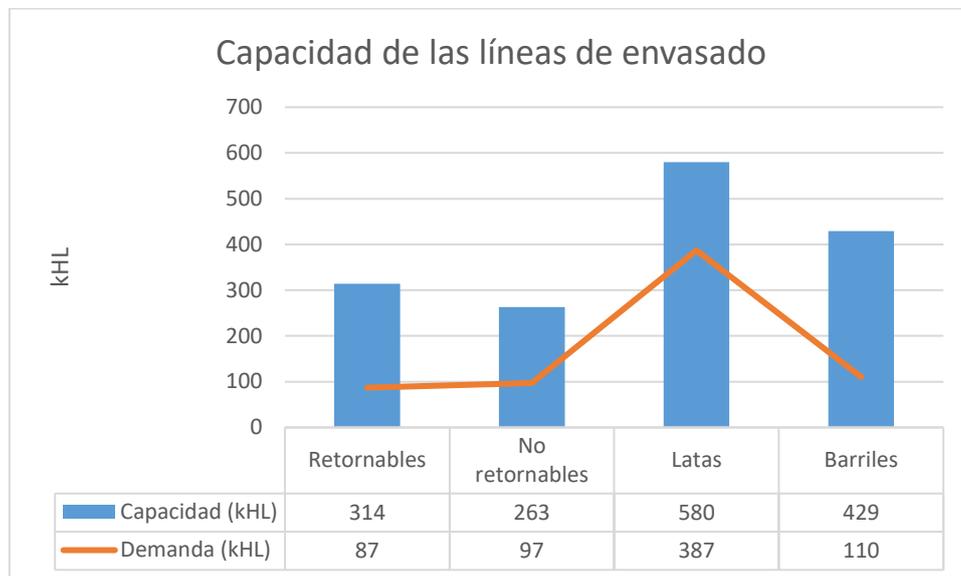


Figura 21. Capacidad de las líneas de envasado y demanda

Las líneas de envasado no suponen un gran riesgo para el ritmo de producción, ya que todas ellas tienen un margen bastante amplio para seguir produciendo. La línea de latas es la más demandada, aunque también es la que más capacidad de producción tiene, mientras que en relación con su demanda, la línea que menos aprovechada está es la línea de barriles.

Productividad

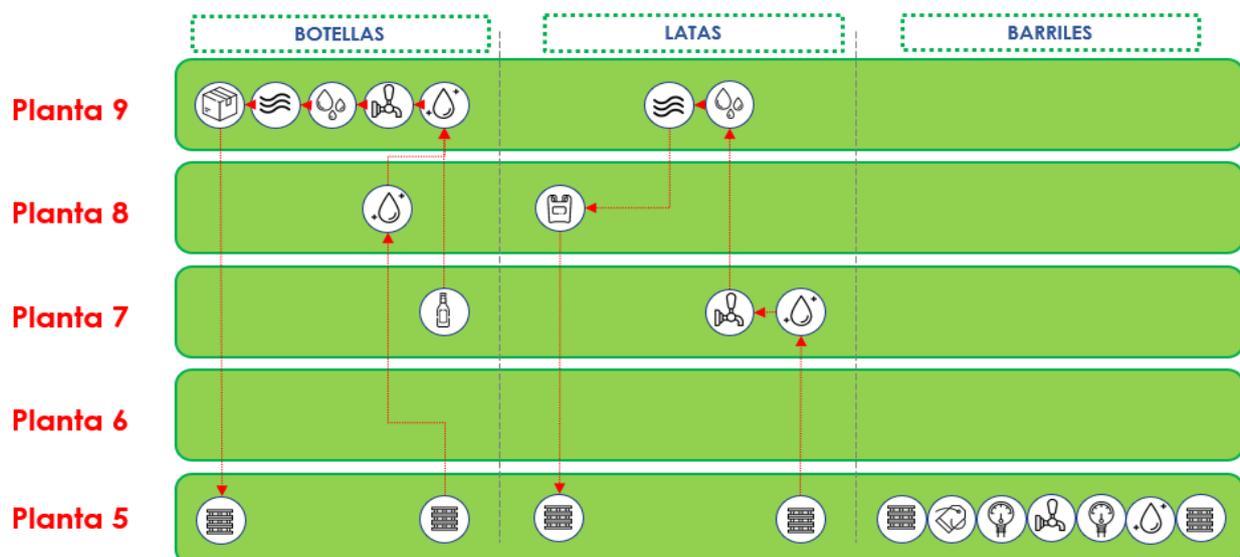


Figura 22. Distribución de los procesos de las líneas de envasado

Uno de los puntos que más llamó la atención durante el estudio de esta fábrica fueron los costes de mantenimiento de las líneas de envasado. Si bien, por motivos de confidencialidad, no se puede revelar la localización de la planta, sí que se puede mencionar que es una parcela que, por la topografía del terreno, ha obligado al fabricante a construir en vertical. Esto significa que las líneas de envasado no funcionan en una planta, sino que requieren de ascensores para cambiar los productos de nivel para algunos de los procesos. Esta situación se puede apreciar en la Figura 22.

Esta necesidad de subir y bajar el producto continuamente hace muy complicado el mantenimiento de las líneas. Los escapes de líquidos son excesivamente comunes debido a la situación y resulta en problemas de corrosión, además de mantenimientos y paradas no planeadas.

En la Tabla 4, la Tabla 5 y la Tabla 6 se pueden ver los datos de las paradas no planeadas de cada una de las líneas de envasado de la fábrica.

Tabla 4. Paradas no planeadas de la línea de botellas

| Productividad de la línea de botellas | |
|---------------------------------------|--------------|
| Causas | Horas |
| Mecánicas | 123,3 |
| Eléctricas | 88 |
| Automatización | 0,3 |
| Instrumentación | 2,4 |
| Operacionales | 10,5 |
| Total | 224,5 |

Tabla 5. Paradas no planeadas de la línea de latas

| Productividad de la línea de latas | |
|------------------------------------|-------|
| Causas | Horas |
| Mecánicas | 330,3 |
| Eléctricas | 97,2 |
| Automatización | 45,3 |
| Instrumentación | 5,2 |
| Operacionales | 71,4 |

| | |
|--------------|-------|
| Total | 549,4 |
|--------------|-------|

Tabla 6. Paradas no planeadas de la línea de barriles

| Productividad de la línea de barriles | |
|--|--------------|
| Causas | Horas |
| Mecánicas | 45,6 |
| Eléctricas | 64,3 |
| Operacionales | 1,3 |
| Total | 111,1 |

El coste de no producción es diferente para cada una de las líneas, dependiendo de la capacidad máxima, los ingresos obtenidos por cada formato y otros parámetros del modelo. Estos costes se pueden ver en la Tabla 7. Conociendo este dato, se puede calcular el coste anual que tienen las paradas para cada línea. Estos costes se pueden ver en la Tabla 8 y, finalmente, en la Figura 23 se pueden ver estos datos representados gráficamente.

Tabla 7. Costes por hora no produciendo de las líneas de envasado

| Costes de no producción (€/hora parada) | |
|--|--------------|
| Línea de botellas | 2.960 €/hora |
| Línea de latas | 1.597 €/hora |
| Línea de barriles | 1.442 €/hora |

Tabla 8. Costes anuales de no producción de las líneas de envasado

| Costes de no producción (€/año) | |
|--|---------------|
| Línea de botellas | 665.418 €/año |
| Línea de latas | 877.392 €/año |
| Línea de barriles | 156.732 €/año |

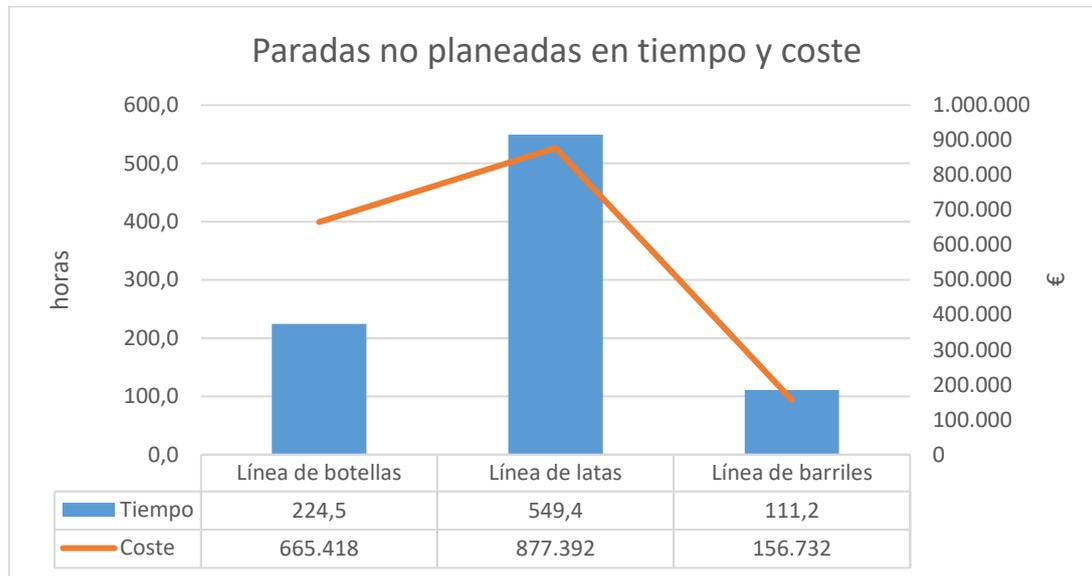


Figura 23. Paradas no planeadas en tiempo y coste

Si bien el coste de paradas no planeadas es mucho más alto para la línea de latas que para la de botellas, esta también es la línea que más actividad tiene. En términos relativos, el coste más alto es el de la línea de botellas y, por tanto, es la línea que mayor potencial tiene de mejora. La línea de barriles, siendo la línea que trabaja en una sola planta, es la que menos costes por paradas no planeadas.

A estos costes de mantenimiento no planeado, hay que añadir los costes de mantenimiento que tienen las líneas de forma natural. Éstos rondan los 1,5€/HL, o, lo que es lo mismo, 1.020.000€/año para responder a la demanda de 680 kHL.

Consumos

Una de las opciones de proyectos que se pueden proponer es la posibilidad de optimizar el consumo de recursos de servicios públicos, a saber, combustible para generar vapor, electricidad, agua y dióxido de carbono (CO₂). Estos cuatro consumos se han identificado en tres zonas diferentes, producción, envasado y otros consumos. En la Figura 24, la Figura 25, la Figura 26 y la Figura 27 se puede ver los consumos que ha tenido la fábrica en el último ejercicio.

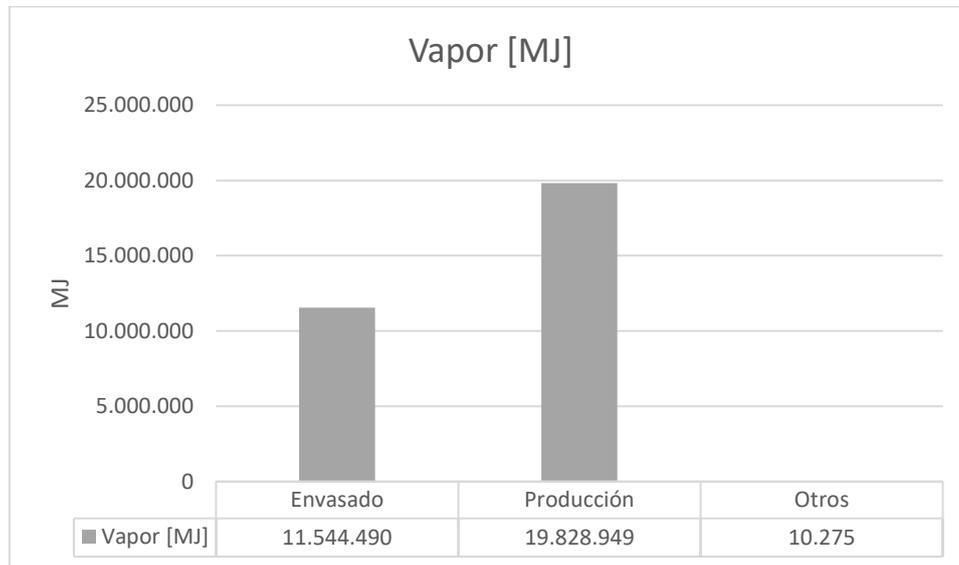


Figura 24. Consumo de vapor en MJ

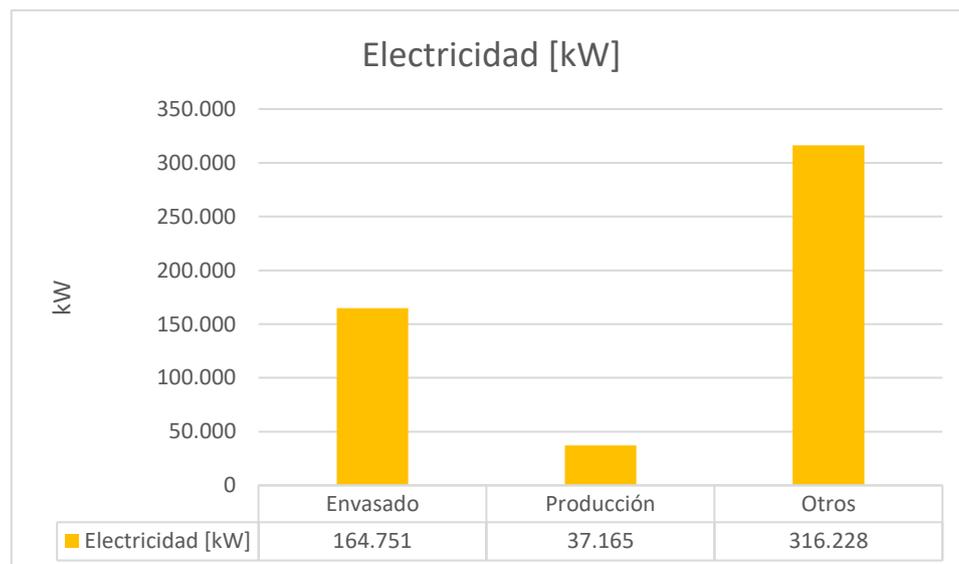


Figura 25. Consumo de electricidad en kW

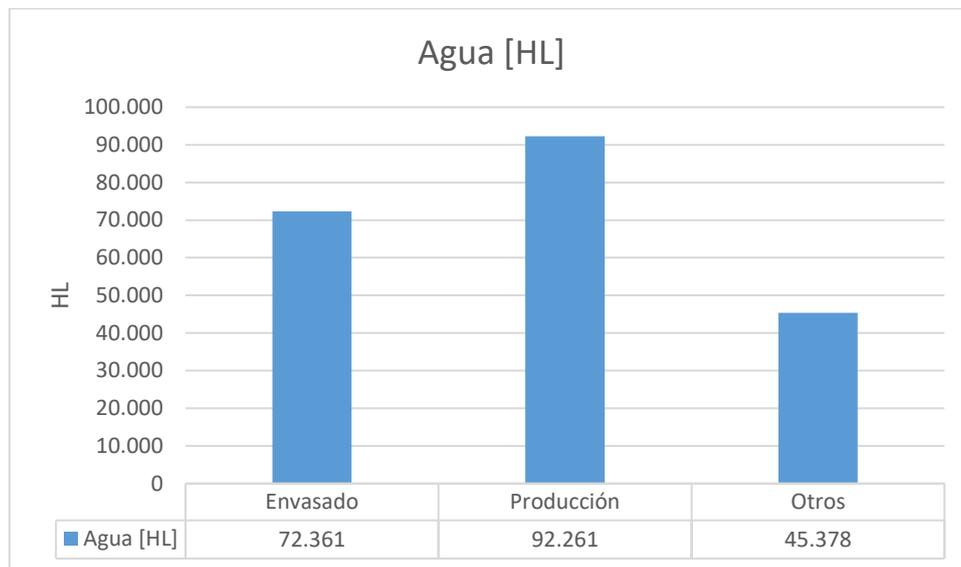


Figura 26. Consumo de agua en HL

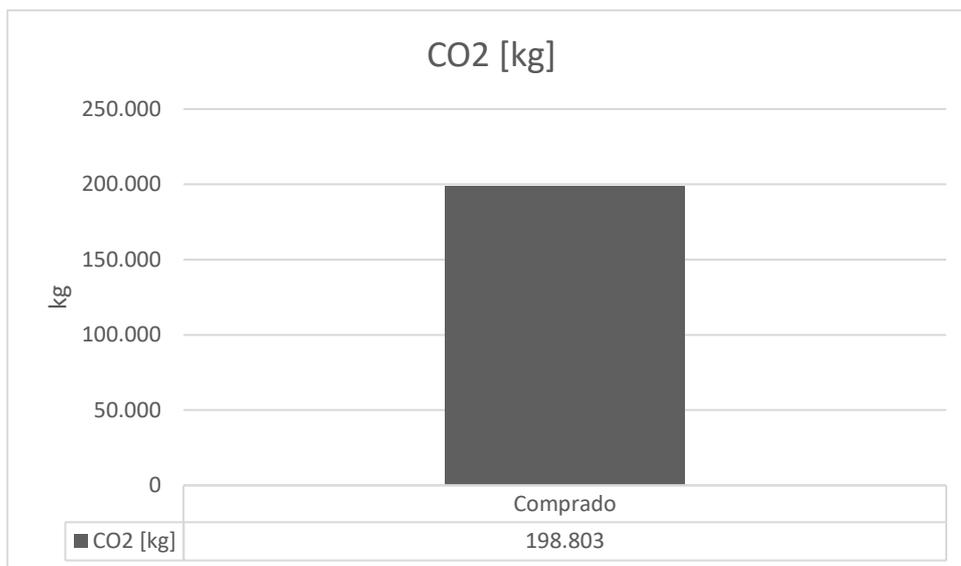


Figura 27. Compra de CO2 en kg

Esto se traduce en los costes mostrados en la Figura 28 y la Figura 29 para cada uno de estos consumos, teniendo en cuenta los costes unitarios del mismo ejercicio.

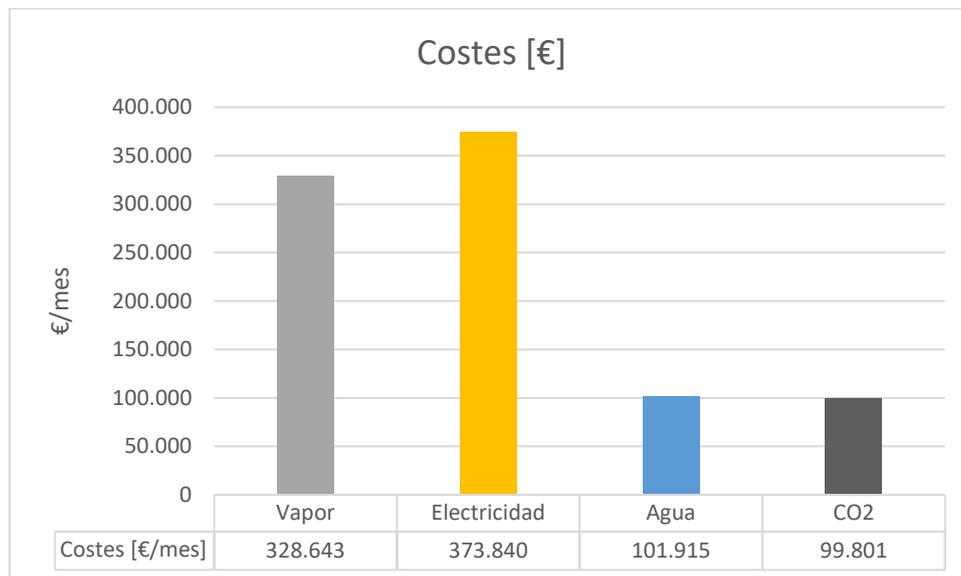


Figura 28. Costes de los consumos

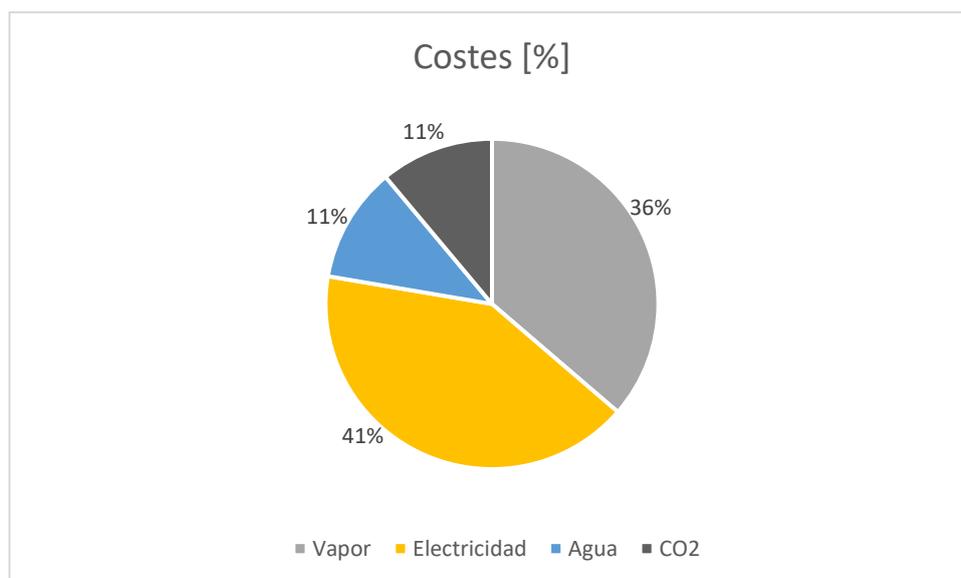


Figura 29. Reparto de los consumos

En la Figura 28 se puede comprobar que el coste total de la fábrica en el último ejercicio en cuanto a consumos es de 904.200€, siendo el mayor de los gastos la electricidad. A continuación, se muestran los costes de los consumos divididos entre los procesos concretos de cada una de las partes.

Vapor

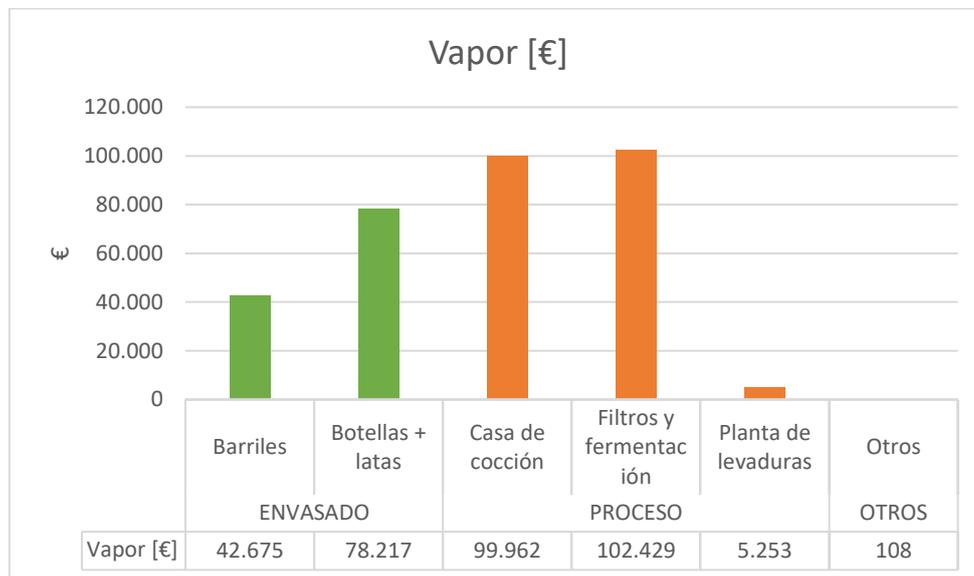


Figura 30. Costes de vapor



Figura 31. Reparto de costes de vapor

La Figura 30 y la Figura 31 muestran los principales consumos de vapor en la fábrica. La mayor demanda de este producto es la parte del proceso, sobre todo en la cocción y la filtración, aunque también es importante el consumo que tienen las líneas de envasado, donde el vapor se utiliza para limpiar y desinfectar los envases.

Electricidad

En la Figura 32 y la Figura 33 se pueden ver los costes de electricidad y su reparto. Los que más impacto tienen sobre el resultado de la fábrica son:

1. Envasado de latas y botellas;
2. Equipo de refrigeración;
3. Equipo de aire comprimido;
4. Planta de CO₂ y;
5. Sala de calderas para generar vapor.

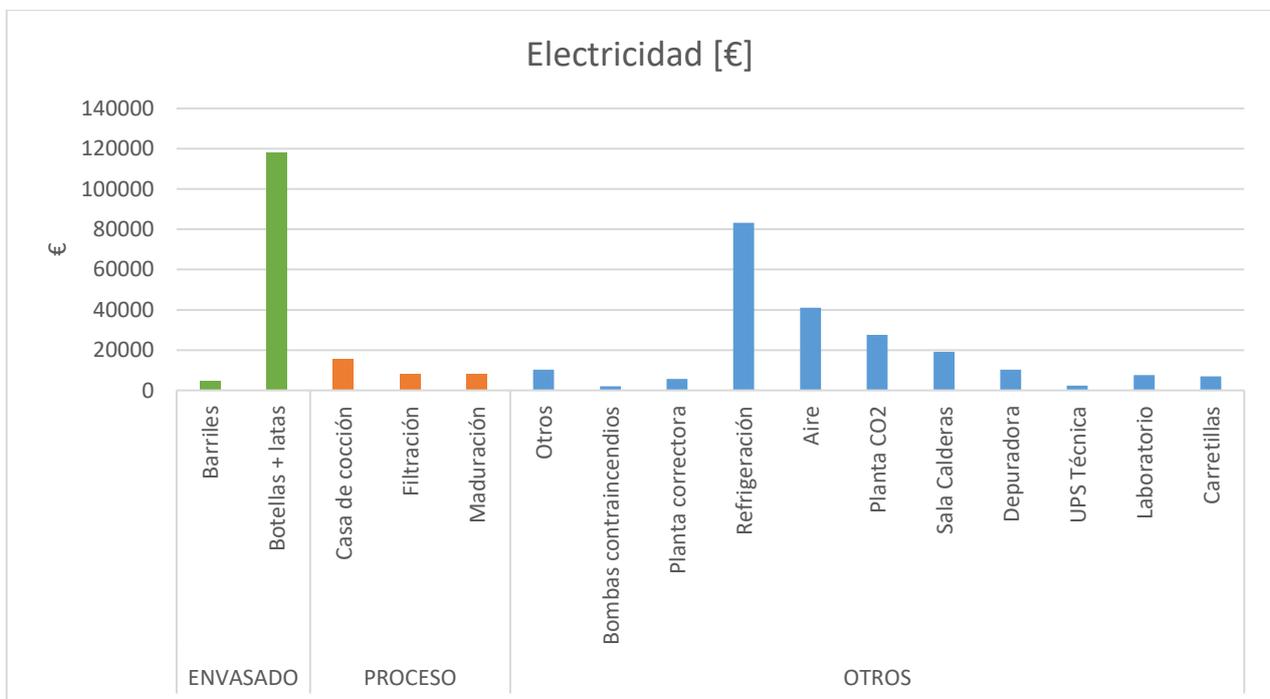


Figura 32. Costes de electricidad

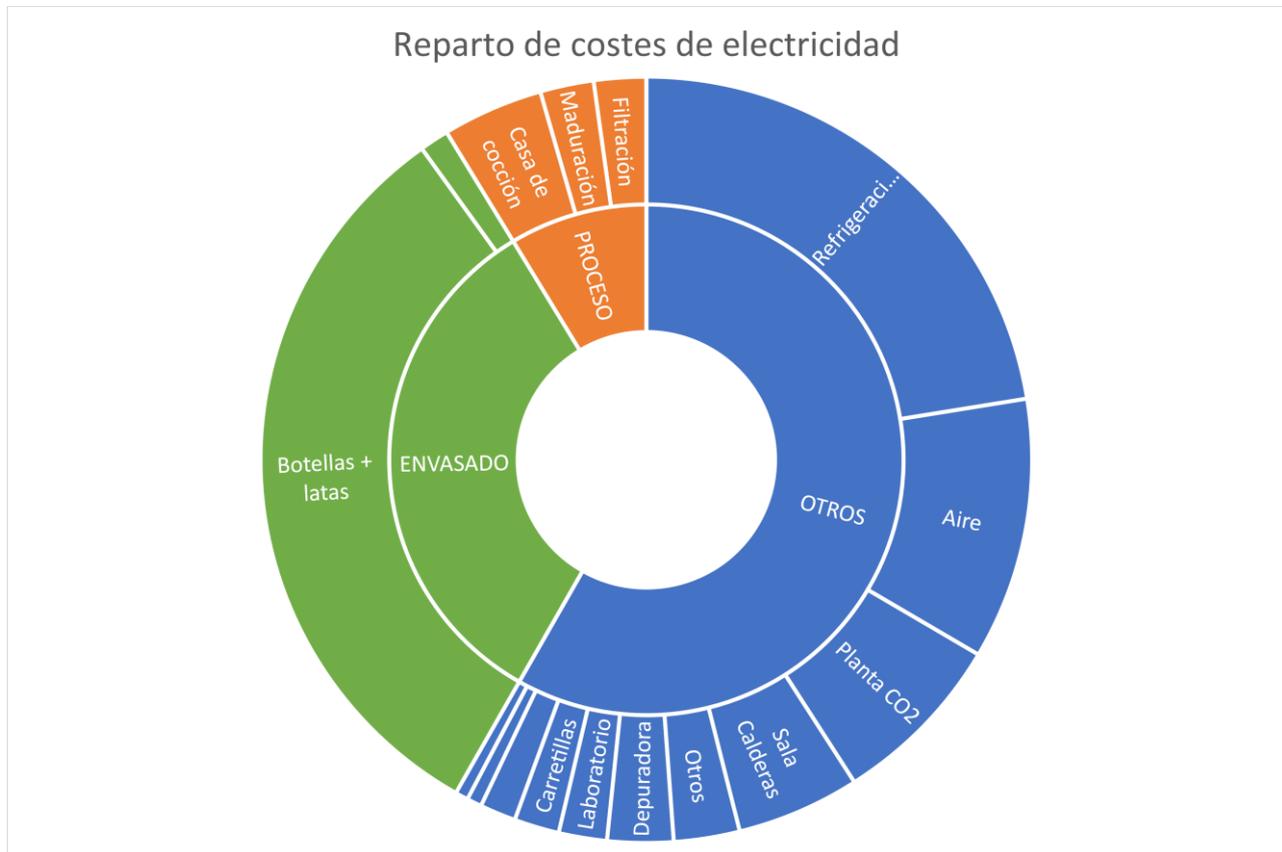


Figura 33. Reparto de costes de electricidad

Agua

La Figura 34 y la Figura 35 muestran los diferentes costes incurridos por el uso de agua en la fábrica. Estos costes son más altos para:

1. Envasado de botellas;
2. Casa de cocción;
3. Maduración;
4. Refrigeración y;
5. Condensadores.

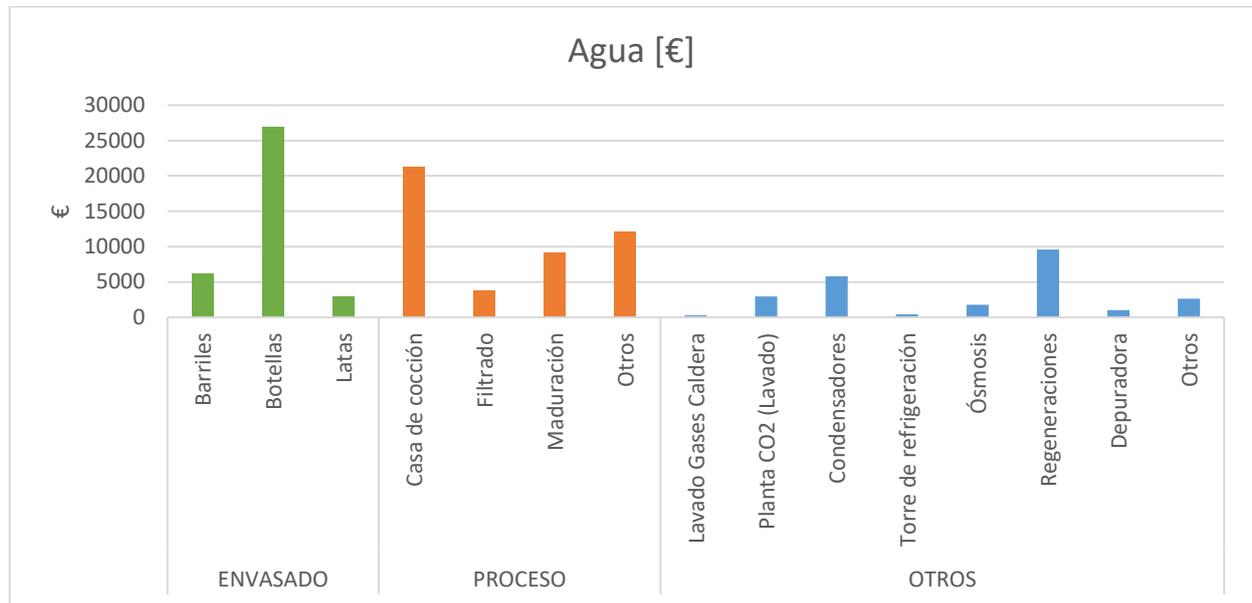


Figura 34. Costes de agua



Figura 35. Reparto de costes de agua

CO₂

El CO₂ consumido en la fábrica es el mostrado en la Figura 28 y se usa prácticamente todo en la línea de envasado. Este producto se obtiene parcialmente como parte del

proceso de elaboración de cerveza, en la fermentación, y el resto se compra a proveedores externos. El dato mostrado en la Figura 28 ya tiene descontado aquello que se produce en fábrica, por lo que los costes de CO₂ andan cerca de los 100.000€ anuales.

En resumen, los costes más importantes que tiene la fábrica se pueden ver en la Figura 36. Los costes más altos son de electricidad, y en el punto en el que más se gasta es en la parte de embotellado. Esta parte también tiene costes relativamente altos en consumo de agua y CO₂ y consume algo de vapor. En segundo lugar, la casa de cocción también supone un impacto importante para la estructura de costes de la fábrica en cuanto a consumos. Finalmente, otros gastos como la refrigeración y el aire comprimido, o gastos de producción como la filtración por vapor, también suponen una parte importante de los consumos.

|  |  |  |  |
|---|---|--|---|
| VAPOR | ELECTRICIDAD | AGUA | CO ₂ |
| Filtración por vapor | Botellas + latas | Botellas | Compras |
| 102.429€ | 114.629€ | 27.192€ | 100.000€ |
| Cocción | Refrigeración | Cocción | |
| 99.962€ | 87.585€ | 20.952€/año | |
| | Aire comprimido | | |
| | 40.737€ | | |
| | Planta CO ₂ | | |
| | 27.553€ | | |

Figura 36. Resumen de los costes de los consumos más importantes

Posibles gemelos digitales y conclusiones

El análisis anterior pone en evidencia ciertas ineficiencias presentes en la fábrica. En primer lugar, el principal cuello de botella está en varios subprocesos de la parte de producción de cerveza. Con tantos activos críticos, la fábrica es mucho más susceptible a fallos, ya que muchos de ellos podrían inevitablemente forzar la parada de la línea. No solo

esto, sino que la flexibilidad de respuesta ante demandas inesperadas se ve limitada por la cantidad de activos que se pueden tener produciendo al mismo tiempo y su capacidad.

Estos cuellos de botella están además, muy cercanos a la demanda que tiene la fábrica actualmente, lo cual implica que en caso de un fallo de alguno de ellos supondría la imposibilidad por parte del fabricante de responder ante el cliente. Por este motivo, el primer proyecto que se propone en este apartado es un gemelo para llevar el mantenimiento predictivo de toda la parte de producción.

Este gemelo permitiría tener una planificación más detallada, fundamentada en modelos matemáticos, y no en estimaciones según experiencias desarrolladas por humanos, y, por tanto, precisa, de los mantenimientos a los que se tendría que someter el proceso. La capacidad de realizar una planificación de mantenimiento adelantada mejor fundamentada y con más detalle ofrece varias ventajas, entre ellas, optimizar el uso de recambios, hacer que la maquinaria funcione de manera más fluida por lo que los consumos de recursos también se reducirían o planear la producción de tal forma que los buffers permitan minimizar los impactos de las paradas planeadas por mantenimiento.

Este gemelo se podría realizar de una parte de este proceso o del proceso completo. La primera de las opciones sería menos compleja, por lo que requeriría una inversión inicial más baja y, si se monitorizan las máquinas que suponen el problema, podría ser suficiente. Por otro lado, la segunda opción permitiría una visión más global del proceso, por lo que se podría hacer un modelo de predicción más detallado, así como una planificación global de la producción. Este proyecto está numerado como el 1.4 en la Tabla 9.

En segundo lugar, dentro de la producción de cerveza, hay tres partes del proceso que son decisivas en cuanto al sabor que adquirirá el producto final. Es decir, los principales procesos que afectarán a la calidad del producto final serán la cocción, la fermentación y la maduración. Casualmente, también son algunos de los procesos que suponen el cuello de botella y lo que más tiempo llevan.

Si bien la cocción no aporta una calidad extra al producto, sí que tiene un efecto directo sobre el sabor, aroma y color del producto final. Se podría monitorizar este proceso

para asegurar que los parámetros bajo los que se lleva a cabo son los óptimos para obtener el producto de la calidad deseada al menor coste posible. Además, el proceso de cocción es el proceso que más gastos tiene, fuera del envasado, de electricidad y agua, por lo que se podría desarrollar un modelo, aprovechando la infraestructura IoT necesaria para todo lo mencionado anteriormente, que buscara además optimizar los consumos de estos recursos. Sin embargo, esta aplicación pertenecería al apartado de futuros pasos. Este proyecto necesitaría objetivar características subjetivas como el aroma o el sabor para poder evaluar bien los resultados, lo cual puede suponer un trabajo de más. Este ejemplo se corresponde con el punto 1.1 de la Tabla 9.

La fermentación requiere de unas condiciones muy específicas para llevarse a cabo con la calidad necesaria y sin dañar a las levaduras. Un gemelo de esta parte del proceso permitiría controlar las condiciones en las que se llevaría a cabo este proceso para asegurar no solo la calidad del producto, sino la mejor reproducción de las levaduras, lo que reduciría la necesidad de reproducirlas en el laboratorio. La principal desventaja de este gemelo sería el carácter biológico del modelo, que puede complicar los algoritmos desarrollados para las predicciones. Esta aplicación también requeriría de la objetivación de características subjetivas como el aroma o el sabor. Este ejemplo se corresponde con el punto 1.2 de la Tabla 9.

Finalmente, la maduración distinguirá entre tipos de cerveza, y supone un valor añadido al producto terminado tal cual sale de la fábrica. Es muy importante que este proceso se lleve a cabo de una manera exacta para que todas las cervezas de un cierto tipo tengan el mismo sabor, aroma y color y que éstos respondan a los criterios de calidad establecidos por el fabricante. Este gemelo digital monitorizaría los parámetros que afectan directamente a estas tres características según la experiencia de los expertos y podría controlar dichas variables para obtener el producto deseado. De nuevo, es necesaria la objetivación de ciertas características subjetivas para que esto funcione. Este ejemplo se corresponde con el punto 1.3 de la Tabla 9.

Estas tres opciones de gemelos digitales no solo permiten llevar un control sobre el proceso más preciso, para mejorar los estándares de calidad intentando minimizar los

costes, sino que también permiten el descarte de productos defectuosos antes de tiempo. Esto significa que, si el modelo fuera capaz de predecir un resultado no satisfactorio de un proceso tras pocas horas de desarrollo, mediante el uso de parámetros leídos del producto que se han podido perder de control debido a causas ajenas al fabricante, se podría descartar el producto defectuoso temprano en su ciclo de vida. Esto es especialmente útil en procesos tan largos como son la cocción, fermentación y, sobre todo, la maduración. Además, el descarte del producto defectuoso antes de sacarlo de los barriles en los que pudiera estar llevándose a cabo el proceso hace innecesario el uso de un filtro a la salida de dicho proceso, lo que también supone un ahorro en los costes de producción. Otras ventajas de la detección prematura de defectos en ciertos productos pueden ser la posibilidad de reciclar elementos que aún no han sido utilizados, el ahorro de tiempo que supone liberar el activo antes de terminar un proceso que no aporta valor añadido o la obtención de menos productos secundarios o residuos del proceso, entre otros.

Finalmente se propone también el desarrollo de un gemelo digital para monitorizar la línea de envasado. En concreto, se proponen dos proyectos diferentes: la monitorización de una línea completa de envasado para realizar labores de mantenimiento predictivos, así como planificación de la producción y la monitorización de la máquina de etiquetado, que se sabe que falla mucho en aplicaciones de este tipo, para predecir cuándo se van a empezar a colocar mal las etiquetas de los botellines.

El principal problema de las líneas de envasado está en su productividad. Si bien tienen la capacidad que tienen, muy superior a la demanda de manera global y para cada una de las referencias que producen, las paradas no planeadas suponen un número importante de horas al año en las que la máquina no está funcionando. Este problema se pretende resolver mediante un gemelo digital de la línea de producción, que monitorizaría el paso de producto a lo largo de la línea y utilizaría los datos para hacer predicciones de averías basándose en ritmos de producción y otros parámetros leídos de las máquinas.

Con esta aplicación, se podría realizar una agenda de mantenimiento predictivo mucho más eficiente con respecto al que existe hoy día, se podría estudiar la causa y origen de todos los fallos y guardar un histórico de los mismos, por si vuelve a ocurrir. Además, se

podría estudiar el ritmo de producción para optimizar la localización de buffers teniendo en cuenta también las paradas, de tal forma que una parada de mantenimiento no tenga que detener toda la línea sino que permita seguir trabajando a ritmos menores. Este ejemplo se corresponde con el punto 2.1 de la Tabla 9.

Un problema que se ha visto en muchas fábricas de cerveza es la precisión en el estampado de etiquetas en las botellas. Este proceso es poco preciso y conduce a muchos descartes y algunas paradas no planeadas. La intención del proyecto sería establecer un gemelo de la etiquetadora que permitiera monitorizar el estampado de etiquetas, los ritmos de producción, los descartes realizados etc. y que pueda predecir cuando la máquina va a comenzar a funcionar mal de manera sistemática. Además, se podrían buscar aplicaciones de colocación de las etiquetas en el buffer para mejorar su colocación en la botella, o control de la velocidad de la línea para minimizar errores. Este ejemplo se corresponde con el punto 2.2 de la Tabla 9.

La Tabla 9 muestra un resumen de las ideas más interesantes sobre un desarrollo de un gemelo digital en la fábrica. Estas son las ideas mencionadas anteriormente.

Tabla 9. Propuestas de gemelo digital para la fábrica

| | Zona | Descripción | Ventajas | Desventajas |
|------------|----------------|--|--|---|
| 1 | PROCESO | | | |
| 1.1 | Cocción | <p>Monitorizar el proceso de cocción para realizar un gemelo digital que permita:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Minimizar consumos, mediante el control de entrada de recursos, optimizar su consumo para mantener la calidad. -Calidad del producto, mediante medidas de pH, temperatura etc. se puede controlar los actuadores para mejorar la calidad del producto. | <ul style="list-style-type: none"> -Proceso decisivo en la calidad final de producto. -Uno de los mayores consumidores de ciertos recursos -Proceso muy largo, por lo que una detección temprana de fallos de calidad puede ahorrar muchos costes | <ul style="list-style-type: none"> -Ausencia de un modelo 3D del proceso -Complejidad para una primera aplicación -Necesidad de objetivizar de características subjetivas (sabor, olor...) |

| | | | | |
|----------|-------------------------|--|---|--|
| 1.2 | Fermentación | Monitorizar el proceso de fermentación para realizar un gemelo digital que controle los parámetros del proceso para garantizar la calidad del producto final | <ul style="list-style-type: none"> -Proceso decisivo en la calidad final del producto. -Control de parámetros esencial para mantener, no solo la calidad, sino también optimizar la reproducción y actuación de las levaduras. -Proceso muy largo, por lo que una detección temprana de fallos de calidad puede ahorrar costes | <ul style="list-style-type: none"> -Ausencia de un modelo 3D del proceso -Complejidad de modelar, no solo los tanques, sino un proceso biológico como es la fermentación. -Necesidad de objetivar las características subjetivas (sabor, olor...) |
| 1.3 | Maduración | Monitorizar el proceso de maduración para realizar un gemelo digital que controle los parámetros del proceso para garantizar la calidad del producto final | <ul style="list-style-type: none"> -Principal decisor de la calidad final del producto. -Proceso que más tiempo dura, por lo que una detección temprana de fallos de calidad puede ahorrar costes. | <ul style="list-style-type: none"> -Parámetros bastante estudiados, la empresa no descarta mucho producto en esta parte. -Necesidad de objetivar las características subjetivas (sabor, olor...) |
| 1.4 | Proceso completo | Realizar un gemelo digital que prediga los mantenimientos necesarios para planificar y reducir los costes de mantenimiento | <ul style="list-style-type: none"> -Grandes ventajas para mantenimiento: información más precisa, planificación cuando es necesaria, reducción de costes por paradas o recambios no necesarios -Influencia sobre calidad y consumos | <ul style="list-style-type: none"> -Proceso más complejo, ya que engloba todo, por lo que requiere mayor inversión inicial -Gastos de mantenimiento del proceso no son los más altos |
| 2 | | ENVASADO | | |

| | | | | |
|-----|-------------------------|--|---|---|
| 2.1 | Proceso completo | Realizar un gemelo digital que prediga los mantenimientos necesarios para planificar y reducir los costes de mantenimiento de una de las líneas de envasado. | <ul style="list-style-type: none"> -Reducción de los costes de mantenimiento, que actualmente son los más altos en esta parte. -Reducción de paradas no planeadas: mejor planificación de producción y buffers para no detener la producción en caso de paradas planeadas -Posibilidad de probar otros formatos de embotellado -Ya en desarrollo un modelo 3D del proceso -Mayor consumidor de electricidad y agua | <ul style="list-style-type: none"> -Coste alto de primer desarrollo. La digitalización de las máquinas por primera vez puede tener costes altos. -Proceso completo, relativamente complejo. |
| 2.2 | Etiquetadora | Monitorizar la etiquetadora para detectar antes cuándo las etiquetas empiezan a estar mal colocadas | -En otras fábricas, es uno de los principales motivos de paradas. | -En esta fábrica, no es un problema tan importante. |

Tras presentar estas ideas al cliente, se analizaron las diferentes posibles aplicaciones y se seleccionó la que más le llamó la atención. La parte de proceso no es una parte que en general esté dando demasiados errores. No tienen mucho sobrecoste de mantenimiento, el producto pasa siempre los controles de calidad y los consumos están dentro de sus expectativas, es decir, son aquellos necesarios para realizar el proceso bien. Es por esto, que los cuatro primeros ejemplos no fueron considerados. Los problemas que se han visto en otras fábricas de otros productores en las etiquetadoras no eran aplicables a esta planta en concreto, por lo que la idea no le llamó mucho la atención al cliente. Además, si se va a invertir en una digitalización, mejor que sea de un proceso más general, del que obtener una visión más global y que se pueda escalar más fácilmente.

Finalmente, la idea de reducir los costes de mantenimiento del proceso de envasado pareció la mejor idea. Los costes por paradas no planeadas en las líneas de envasado

llevan siendo un problema durante un tiempo, por lo que la idea de optimizar ese proceso les pareció más adecuada. Dentro de las líneas de envasado, la de embotellado parecía la mejor sobre la que trabajar, ya que aunque las horas y los costes de paradas no planeadas sean menores que en la línea de latas, la proporción es mucho más alta, por lo que el potencial de mejora es bastante más alto. Además, el cliente propuso que el modelo fuera capaz de simular formatos diferentes de botella, para comprobar el efecto que tendría sobre la línea cambiar el formato.

En conclusión, el gemelo digital se hará finalmente sobre una línea de producción completa, la línea de botellas de la fábrica. Mediante la incorporación de este gemelo digital se pretende mejorar la eficiencia de la línea, reduciendo costes de mantenimiento y las paradas no planeadas, así como mejorando el flujo del producto y dando la posibilidad de simular el proceso para diferentes formatos de botellas.

Situación actual de la zona objetivo

El proceso de embotellado se ha explicado anteriormente, sin embargo, en la Figura 37 se puede ver con más detalle las máquinas que intervienen en éste, donde RT son botellas retornables y NRT, botellas no retornables.



Figura 37. Proceso de embotellado completo

Tabla 10. Máquinas de la línea de embotellado

| TAG | Descripción | Proveedor y modelo | Capacidad | Consumo eléctrico (kW) | Fluidos |
|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-----------|------------------------|---|
| <i>NRT/RT línea de botellas</i> | | | | | |
| PCK - 01 | Despaletizadora de NRT | Kettner – Presant Universal | 60000 b/h | | Aire comprimido |
| PCK - 02 | Enjuagadora | VT-Zurich Euro-Rinser A-3 | 55000 b/h | 5,5 | Aire comprimido Agua |
| PCK - 03 | Inspector | HEUFT Reflex inline | 72000 b/h | 10,25 | Aire comprimido |
| PCK - 04 | Alineador | | | | Agua |
| PCK - 05 | Llenadora y taponadora | Krones Sensometric | 60000 b/h | 52 | Agua Aire comprimido CO2 |
| PCK - 06 | Túnel de pasteurizado | Barry Wehmler Vortex | 56100 b/h | | Agua Aire comprimido Vapor |
| PCK - 07 | Etiquetadora | Krones Topmatic | 60000 b/h | 28 | Agua Aire comprimido |
| PCK - 08 | SMI Packer I | SMI SK600T | 60000 B/h | 185 | Aire comprimido |
| PCK - 09 | SMI Packer II | SMI SK602P | 60000 l/h | 185 | Aire comprimido |
| PCK - 10 | Paletizadora | Kettner Belader pressant uni 1N | 60000 b/h | | Aire comprimido |
| PCK - 11 | Enfardadora | | | | Aire comprimido |
| PCK - 12 | Despaletizadora de RT | Kettner – Mehrw. | 60000 b/h | | Aire comprimido |
| PCK - 13 | Inspector de cajas 1 | HEUFT | 3600 c/h | 3,7 | Aire comprimido |
| PCK - 14 | Desencajonadora | Kettner – Presant duplex | 60000 b/h | | Aire comprimido |
| PCK - 15 | Lavadora de cajas vertical & Buffer | Krones KKW65 | | | Sosa cáustica Aire comprimido Agua Vapor |
| PCK - 16 | Lavadora de botellas | Krones Flamatic Kes | 70000 b/h | 84 | Sosa cáustica Aire comprimido Agua Vapor |

| | | | | | |
|----------|----------------------|-------|----------|-----|-----------------|
| PCK - 17 | Encajonadora | | | | Aire comprimido |
| PCK - 18 | Inspector de cajas 2 | HEUFT | 4000 c/h | 3,7 | Aire comprimido |

Las máquinas existentes para cada uno de estos procesos con sus detalles se pueden ver en la Tabla 10.

Ambas despaletizadoras se encargan de deshacer los pallets que llegan al almacén. La enjuagadora es sólo para botellas no retornables y las enjuaga con agua a presión para eliminar polvo y otros residuos del transporte antes de llevarlas al inspector de botellas. En paralelo, las botellas retornables pasan por el inspector de cajas, son desencajonadas y cada producto de este proceso va a su lavadora; las cajas a una lavadora vertical y las botellas a la lavadora de botellas. La lavadora de botellas retornables lleva a cabo un proceso de lavado, enjuagado y desinfectado, tras lo cual pasa al inspector de botellas.

En este inspector se juntan las RT con las NRT y se les realiza una inspección automática. Es necesario alinear las botellas, mediante railes en las cintas transportadoras, para que entren en la llenadora en posiciones concretas. En la llenadora se llenan las botellas, se les suministra CO₂ para eliminar aire del cuello y se tapan. Pasan al túnel de pasteurizado y terminan en una etiquetadora de aire comprimido.

Una vez se tiene el producto terminado, las botellas RT van a la encajonadora, donde vuelven a encontrarse con las cajas que vienen de su lavadora, y se inspeccionan las cajas para comprobar que no se hayan estropeado por el camino antes de pasar a la paletizadora. Las NRT pasan a las empaquetadoras de la marca SMI y a la paletizadora. En este punto se vuelven a juntar los dos caminos, se paletizan las cajas de botellas, se enfardan en plástico y van al almacén de producto terminado.

Si bien toda la arquitectura de hardware se discutirá más adelante, se puede ir adelantando que cada una de las máquinas tiene su propio PLC de Siemens, además de otro PLC global que controla las cintas y comunica con todas las máquinas. A la salida y entrada de todas las máquinas existen sensores que cuentan el número de botellas que entran y salen de las máquinas. Estos sensores están por que en su momento, los PLCs

no comunicaban entre sí, por lo que era necesario saber el ritmo de entrada de las botellas para poder programar cada una de las máquinas. Todo el proceso descrito arriba está automatizado y puede funcionar sin operarios, por lo que se puede considerar que a nivel de campo, la planta ya cuenta con los sensores necesarios para tomar gran parte de los datos que se van a necesitar para el proyecto.

A un nivel más económico, por recoger los datos de la planta, los costes que tiene de mantenimiento y consumo la línea de embotellado se pueden ver en la Tabla 11.

Tabla 11. Costes de la línea de botellas

| ID | Concepto | Gastos | % |
|-------|----------------------|-------------|------|
| 1 | Coste/hora parada | 2.960 €/h | |
| 2 | Coste total | 1.058.616 € | 100% |
| 2.1 | Paradas no planeadas | 665.418 € | 63% |
| 2.2 | Mantenimiento | 276.000 € | 26% |
| 2.3 | Costes de consumos | 117.198 € | 11% |
| 2.3.1 | Vapor | 25.205 € | 2% |
| 2.3.2 | Electricidad | 38.093 € | 4% |
| 2.3.3 | Agua | 26.895 € | 3% |
| 2.3.4 | CO2 | 27.005 € | 3% |

El coste más alto es, con mucha diferencia, el coste de las paradas no planeadas, seguido de los costes habituales de mantenimiento y, finalmente, los consumos de servicios. Por tanto, el proyecto tendrá como objetivo reducir el número de horas sin producir antes que ninguna otra optimización.

Capítulo 4. Gemelo digital en planta

Este capítulo comienza comentando las funcionalidades del gemelo digital en la planta, continúa con la arquitectura y un estudio de proveedores y el proceso de implementación y finalmente describe la interacción de la planta con el CPS.

Funcionalidades

El gemelo digital que se pretende estudiar en el desarrollo de este proyecto es un gemelo que monitorice el paso de las botellas de cerveza por una línea de envasado. De esta monitorización se obtendrán datos como la velocidad de las cintas, la velocidad de paso de las botellas, los estados de las diferentes máquinas y los tiempos que están en cada uno de estos estados etc. para terminar utilizando toda esta información en una simulación. Finalmente, esta simulación será capaz de predecir el estado de la línea en un tiempo determinado, pudiendo así saber a qué ritmos se ha producido, generar casos de fallos de máquinas y monitorizar qué elementos se están saliendo de sus rutinas de funcionamiento para predecir fallos de máquinas con antelación.

Las principales salidas obtenidas de este gemelo digital serían:

- Los cuellos de botella. En cualquier sistema, existe al menos una máquina que funciona a un ritmo inferior que el resto. Cuando una línea es más compleja, bien porque se realicen cambios de formato, porque no funcionan igual con las botellas RT que las NRT o porque algunas máquinas tienen rendimientos variables según su mantenimiento, encontrar el cuello de botella puede ser complicado. Si a eso se le suma la constante avería de algunas de las máquinas, predecir dónde se debe trabajar a mayor velocidad y donde debe haber buffers para no tener que detener la producción es imposible. Mediante el desarrollo de este gemelo digital, se pretende encontrar de manera dinámica el cuello de botella, en todo momento saber qué máquina tendrá que trabajar a su límite para alcanzar la demanda. Esto puede permitir

planificar la producción de cara a evitar paradas en esta máquina o planear el mantenimiento para que no se estropee en ese momento. Además, se obtendría información precisa acerca de qué maquinaria habría que mejorar a continuación y cuantificar dicha mejora.

- Ayudar en labores de mantenimiento. La simulación contendría algoritmos de mantenimiento predictivo, con los que se recogerían ciertos parámetros de las máquinas que ayudarían a prever cuándo es más probable que falle una máquina. Esto reduce la cantidad de labores de mantenimiento que necesitará la línea al mismo tiempo que minimiza la cantidad de fallos inesperados que puedan aparecer.

Además, el mantenimiento predictivo sirve para planificar mejor la producción, ya que si es necesario detener una máquina, se puede prever la cantidad de material que se necesitará para que el resto de la línea siga funcionando a una velocidad inferior durante el tiempo que dure la parada. Esto ayuda con la programación de los operarios, la planificación de la logística y otras formas de organización internas de la fábrica.

Finalmente, la monitorización de fallos a lo largo de la vida de la máquina hará a los algoritmos de predicción cada vez más precisos. Estos algoritmos no se aplicarán a todas las máquinas, ya que esto sería un desperdicio de recursos, sino que se aplicará a aquellas máquinas que sean más críticas para el correcto funcionamiento del sistema, bien por su baja capacidad o su alta tendencia a fallo. Estas máquinas son la enjuagadora y el pasteurizado por su baja capacidad y la llenadora y taponadora, la etiquetadora y las cintas transportadoras por su alta tendencia a fallar.

- Hacer más fluido el proceso. Como se ha mencionado en los puntos anteriores, la idea de localizar buffers en ciertos puntos es evitar paradas innecesarias de ciertas máquinas que puedan trabajar a ritmos menores o que vayan a necesitar labores de mantenimiento en un futuro próximo. Este gemelo digital permitiría optimizar la localización de los buffers de la planta para que, en caso de un fallo no previsto, o que se prevea con niveles de incertidumbre altos, se pueda tener un colchón de inventario que evite que la

línea deba parar, aunque continúe trabajando a un tanto por ciento de la velocidad nominal. Estos buffers se podrían cuantificar de forma dinámica, de tal forma que se adapte a las previsiones que se puedan obtener del modelo, reduciendo así el volumen de trabajo de ciertos operarios de control de línea.

- Probar otros formatos. Una de las propuestas del cliente fue poder probar formatos diferentes en la misma simulación antes de probarlos en la fábrica real. Con este programa se podrían probar los diferentes formatos, e incluso formatos nuevos, buscar los nuevos cuellos de botella o el estrés al que someten a ciertas máquinas e incluso la mano de obra que sería necesaria en un turno de funcionamiento de la línea con dicho formato. Este requisito hará que sea necesario parametrizar ciertas máquinas que no se tenía pensado digitalizar en detalles para monitorizar eventos como el lavado de botellas o el encajonado y desencajonado de las nuevas referencias.
- Obtener una única fuente de verdad para la historia de paradas y de producción. La centralización de este tipo de información permitiría un análisis a posteriori por parte de los operarios de los motivos de los fallos. Esto puede ser muy útil para aprender de los errores que se hayan podido cometer en el pasado, así como corroborar el correcto funcionamiento del algoritmo de predicción de la simulación.
- Escalabilidad. Como cualquier proyecto de ingeniería, se intentará desarrollar el gemelo permitiendo la máxima escalabilidad posible para que pueda ser aplicado a otras líneas o ampliado con más entradas de datos o funcionalidades diferentes.

Todas estas funcionalidades se lograrán con una arquitectura concreta de hardware, de software y de comunicaciones que se comentará en el siguiente apartado.

Arquitectura

El gemelo digital que se plantea en este proyecto es un gemelo basado en una simulación. Esta simulación contendrá algún tipo de inteligencia capaz de hacer predicciones de mantenimiento, así como modelos estocásticos presentes en la mayoría

de las simulaciones de hoy día. Para que esto funcione, es necesaria una arquitectura que permita la interfaz entre la planta y la base de datos de la empresa y otra entre la base de datos y la plataforma en la que esté la lógica del programa. Además, se pretende desarrollar esta simulación en la nube de Microsoft, Azure, para evitar una gran inversión inicial en servidores y que éstos tengan unos estándares de seguridad y robustez adecuados. Además, a los servidores de la nube se puede acceder desde cualquier localización si se tienen las credenciales, así que permitiría el control de la planta sin necesidad de una presencialidad si fuera necesario.

Simulación

Introducción

Las simulaciones son herramientas de software que permiten a los usuarios de sistemas obtener los mejores procesos a los costes más bajos. Estas herramientas tienen varios usos y aplicaciones hoy día, entre ellos, preparación y justificación de toma de decisiones en el diseño de trabajos de la vida real, verificar la corrección de un diseño, desarrollo de entornos virtuales con fines como por ejemplo el entrenamiento de personal. Gran parte de los entrenamientos de los ejércitos, o de los pilotos, ya se realiza en simulaciones [34].

Por tanto, una simulación consiste en imitar la operación de un sistema real. Desde líneas de fabricación de productos hasta embarque de pasajeros en aviones o uso de gasolineras por clientes, mediante la simulación se puede obtener información útil que permita tomar decisiones fundadas acerca del sistema. Como herramienta de verificación, se puede utilizar para detectar errores de diseño en etapas tempranas de un proyecto. Cuanto más temprano se detecte el error de diseño, menor será el impacto económico que éste tenga sobre el coste total del proyecto, por lo que la relevancia de este tipo de herramientas puede llegar a ser muy alta y está presente en gran parte de los proyectos [35].

Mientras que el método analítico utiliza las matemáticas para analizar el modelo, la simulación utiliza un modelo digital, por lo que los resultados son más fiables y ofrece mayor flexibilidad y facilidad de uso. De hecho, una de las ventajas de utilizar una simulación es

que no requiere de un experto en análisis o matemáticas para su uso, sino que está orientado a ser utilizado por los propios operarios [34].

Las actividades de un modelo de simulación consisten en eventos que se activan en ciertos momentos y cambian el sistema completo. Estos eventos ocurren de forma aleatoria según modelos estocásticos, de este modo, la simulación no requiere del sistema físico para funcionar, y el sistema se mantiene sin cambios hasta que no ocurren dichos eventos, (simulación de eventos discretos). En contrapartida, también existen las simulaciones de eventos continuos, como podría ser el control del nivel de agua de un depósito abierto a lo largo del año, sin embargo, estas simulaciones se pueden aproximar por eventos discretos [34].

Para el desarrollo de este gemelo digital, estos eventos no serán activados únicamente por evento estocásticos. Ya que se dispone de información acerca del funcionamiento de la planta, se pretende activar estos eventos utilizando esta información y realizando predicciones mediante algún tipo de inteligencia.

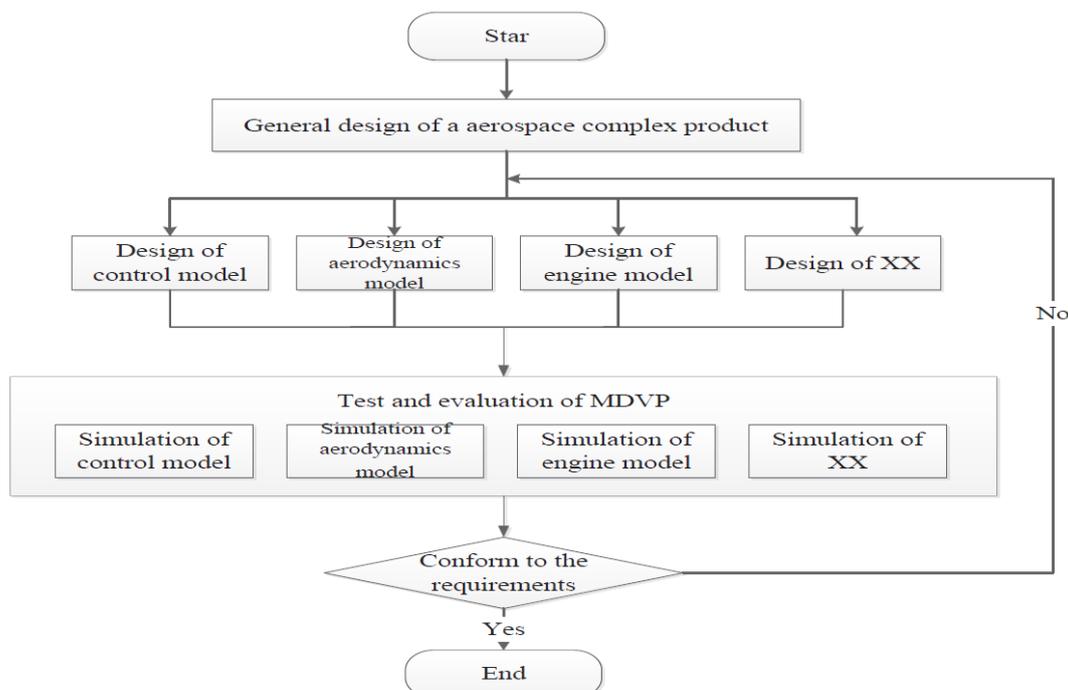


Figura 38. Desarrollo de una simulación. Fuente: [36]

El hecho de desarrollar esta simulación en la nube ofrece la oportunidad de poder ejecutar varias simulaciones en paralelo. De esta forma, se pueden evaluar cientos de casos al mismo tiempo. Para ello, primero es necesario crear un entorno en la nube y, posteriormente, los expertos en el sistema que se vaya a virtualizar proceden a crear su imagen virtual. El proceso mediante el que se desarrolla un producto complejo mediante simulaciones se puede ver en la

Figura 38 [36]. Es importante destacar que para desarrollar una simulación no solo es necesario un experto en simulaciones, sino que también es importante disponer de un profesional en la disciplina o el sistema que se vaya a simular.

Para desarrollar un modelo de simulación, es necesario [34]:

- Formulación del problema: Identificar las entradas y salidas, las restricciones, la función objetivo y desarrollar un modelo previo con las relaciones entre todas las variables.
- Recolección de datos. Cuanta más precisión se busque, más datos será necesario recoger.
- Desarrollo del modelo. Es necesario entender muy bien el sistema para desarrollar un modelo conceptual y lógico que refleje la realidad.
- Validación, verificación y calibración. La validación consiste en comprobar la correspondencia entre el modelo físico y el virtual, la verificación en la consistencia interna del modelo y la calibración en encontrar los parámetros que mejor reflejen su comportamiento.
- Análisis de entradas y salidas.
- Análisis “y-si”. Probar diferentes escenarios para encontrar la mejor solución.
- Análisis de sensibilidad. Permite al usuario saber qué variables tienen un impacto más importante sobre el sistema.
- Optimización. Introduciendo una realimentación al sistema y mediante el uso del gradiente, se pueden realizar funciones de optimización. Este análisis está muy ligado al de sensibilidad.

- Generación de un informe. Para que el usuario pueda comprender los resultados, es necesario generar un informe legible y lo más sencillo posible.

Es importante destacar la necesidad de esta realimentación mencionada arriba. Una simulación de eventos discretos da una solución para cada caso o un informe del estado de la línea, pero no es capaz de encontrar la solución óptima para el sistema. En muchas situaciones, lo que se busca es realizar una acción que mejore el rendimiento global del sistema, por tanto, lo que se necesita es resolver una optimización. Este problema de optimización se llama problema de sistemas dinámicos y utiliza una simulación de eventos discretos y realimenta la salida para seguir ejecutando simulaciones hasta encontrar una solución adecuada. Este proceso de realimentación se puede ver en la Figura 39 [37].

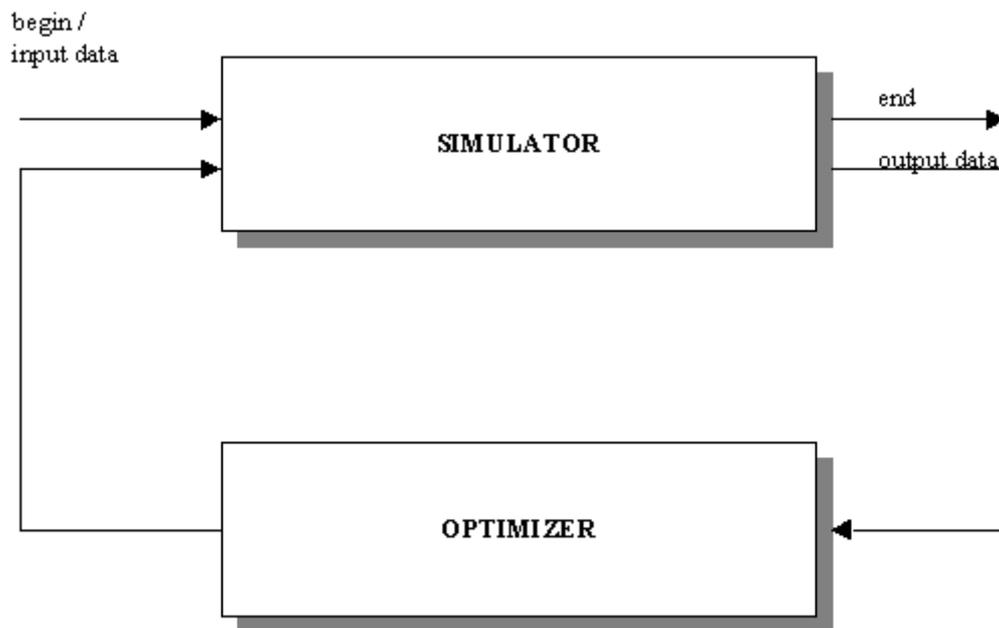


Figura 39. Realimentación de una simulación. Fuente: [34].

La búsqueda de esta solución óptima, el optimizador, se puede encontrar mediante diversas técnicas. Estas técnicas se agrupan en las siguientes categorías [34].

- Búsqueda determinista. Utiliza los datos obtenidos en la simulación directamente como parámetros para la siguiente.

- Búsqueda de patrones. Esta búsqueda consiste en ir incrementando poco a poco los parámetros de entrada. Si la salida de la simulación es mejor que el caso anterior, se sigue en esa dirección, si no lo es, se vuelve a reducir el incremento y se vuelve al caso anterior.
- Búsqueda probabilística. Selecciona una o varias nubes de puntos basadas en funciones de densidad probabilística y ejecuta esos parámetros.
- Técnicas de evolución. Toma ejemplo de la naturaleza para tratar de hacer al sistema evolucionar hacia el óptimo.
- Aproximación estocástica. Utilizan el gradiente de la función objetivo con métodos como el de diferencias finitas.
- Gradiente de la superficie. Consiste en la combinación del uso de gradientes y la metodología de superficie de respuesta.
- Mezcla. Algunas metodologías mezclan las técnicas mencionadas anteriormente.

Software de simulación

Visto el potencial y las capacidades de ahorro que ofrecen este tipo de softwares, existen una gran cantidad de proveedores de software de simulación. Los hay más especializados en ciertos sectores, o en ciertas aplicaciones, ya que no es lo mismo una simulación de una cola para la venta de seguros que la simulación del funcionamiento de una central nuclear.

Para el desarrollo de este proyecto, se van a comparar cinco de estos softwares, bastante utilizados en la industria, y todos ellos con capacidad de interfaz con otra base de datos para alimentarse en tiempo real. Estos cinco programas son:

- AnyLogic, desarrollado por The AnyLogic Company.
- FlexSim, desarrollado por FlexSim;
- Emulate3D, desarrollado por Rockwell Automation;
- SIMUL8, desarrollado por SIMUL8 y;
- Tecnomatix, desarrollado por Siemens.



Figura 40. Logotipos de los softwares mencionados. En orden, AnyLogic, FlexSim, Emulate3D, Simul8 y Tecnomatix

La comparación de los softwares de simulación se puede ver en la Tabla 12. Esta comparativa pretende dar a conocer de forma más clara las ventajas y desventajas de cada uno de los softwares estudiados para facilitar el proceso de toma de decisión.

Tabla 12. Comparativa de posibles softwares de simulación.

| Simulador | AnyLogic | FlexSim | Emulate3D | SIMUL8 | Tecnomatix |
|--------------------|---|--|--|--|--|
| Fabricante | The Anylogic Company | FlexSim | Rockwell Automation | SIMUL8 | Siemens |
| Precio | \$6.199 una vez | N/A | \$5.000 una vez | \$1.995 una vez | \$1.704 al año |
| Valoración | ★★★★★ (4.5) | ★★★★★ (4.6) | ★★★★☆ (4.4) | ★★★★★ (4.5) | ★★★★★ (4.8) |
| Descripción | Conocer mejor y optimizar procesos complejos en diferentes sectores | Validación de ideas y mejora de procesos | Manejo de materiales para usuarios en toda la cadena de suministro | Mejora de procesos en todos los sectores | Mejora de eficiencia de operaciones, optimización, visualización y planificación |

| | | | | | |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Funcionalidades más importantes | ✓ Creación de informes | ✓ Creación de informes | ✗ Creación de informes | ✓ Creación de informes | ✓ Creación de informes |
| | ✓ Importación /exportación de datos |
| | ✓ 3D | ✓ 3D | ✓ 3D | ✗ 3D | ✓ 3D |
| | ✓ Modelado de eventos discretos |
| | ✓ Modelado dinámico |
| | ✓ Modelado estocástico |
| | ✓ Modelado matemático | ✓ Modelado matemático | ✗ Modelado matemático | ✓ Modelado matemático | ✓ Modelado matemático |
| | ✓ Simulación Montecarlo | ✓ Simulación Montecarlo | ✗ Simulación Montecarlo | ✓ Simulación Montecarlo | ✓ Simulación Montecarlo |
| | ✓ Visualiz de datos | ✓ Visualiz de datos | ✗ Visualiz de datos | ✓ Visualiz de datos | ✓ Visualiz de datos |
| | ✓ Nube |
| S.O. | Windows/Mac | Windows | Windows | Windows | Windows |
| Formación | ✓ En persona |
| | ✗ En vivo | ✗ En vivo | ✓ En vivo | ✓ En vivo | ✓ En vivo |
| | online | online | online | online | online |
| | ✓ Webinars | ✗ Webinars | ✓ Webinars | ✓ Webinars | ✓ Webinars |
| | ✓ Document |
| ✓ Vídeos | ✓ Vídeos | ✗ Vídeos | ✓ Vídeos | ✓ Vídeos | |
| Facilidad de uso | ★★★★☆ (3.9) | ★★★★☆ (4.1) | ★★★★☆ (4.1) | ★★★★☆ (4.3) | ★★★★☆ (4.2) |
| Atención al cliente | ★★★★☆ (4.2) | ★★★★☆ (4.6) | ★★★★☆ (4.7) | ★★★★☆ (4.8) | ★★★★☆ (4.9) |
| Funcionalidades | ★★★★☆ (4.5) | ★★★★☆ (4.6) | ★★★★☆ (4.4) | ★★★★☆ (4.4) | ★★★★☆ (5.0) |
| Relación calidad-precio | ★★★★☆ (4.2) | ★★★★☆ (4.4) | ★★★★☆ (4.1) | ★★★★☆ (4.7) | ★★★★☆ (4.7) |
| Punto a favor | Flexibilidad | Gráficos, fácil | Fácil | Fácil, atención al cliente | Muchas funcionalidades |
| Punto en contra | Precio, curva de aprendizaje | Curva de aprendizaje | Poca documentación | Pocas gráficas No 3D | Pocos element estándar |

Las funcionalidades que más interesan para este proyecto serían la capacidad de realizar representaciones en 3D, la posibilidad de dar un informe detallado con buena visualización de datos, la importación y exportación de datos es esencial, así como la sencillez de esta interfaz, ya que es la base de un gemelo digital, y, debe ser capaz de

realizar modelados estocásticos, dinámicos y matemáticos para la simulación que se quiere desarrollar.

Si bien todos los programas ofrecen la posibilidad de importar y exportar datos, no todos son compatibles con todos los programas que se podría desear. Anylogic y FlexSim pueden funcionar con todo tipo de bases de datos, mientras que SIMUL8 solo funciona con SQL y Excel (entre otras) y Tecnomatix con Excel, SAP y SIMATIC IT. Además, una simulación de Anylogic, así como de FlexSim se puede ejecutar desde cualquier programa capaz de ejecutar Java o C++ respectivamente, Tecnomatix se puede ejecutar desde un sistema parametrizado en Excel o con PLCSIM u Oracle y el resto deben ejecutarse desde el propio programa.

Estas características ponen como finalistas a AnyLogic, FlexSim y Tecnomatix. Tras hablar con los proveedores, se llegó a la conclusión de que Tecnomatix sería la mejor opción. En primer lugar, los PLC que se encuentran hoy día en la fábrica están fabricados por Siemens. Esto puede ser una gran ventaja a la hora de conectar el software con los autómatas, ya que al ser del mismo fabricante la interfaz es muy sencilla y directa.

Además, tras hablar con Siemens, se comentó que, como parte de su negocio del sector de alimentación, se les podría encargar el desarrollo de la simulación de la línea. Esto incluye no solo la línea en sí, sino también desarrollar los gemelos digitales de cada una de las máquinas que contiene, al nivel de detalle que requiera el cliente según las salidas que se quieran obtener y los algoritmos que sean necesarios para que la simulación funcione. Tras el desarrollo del proyecto, Siemens se encargaría de subir el modelo a la nube y realizar la conexión de la fábrica al modelo, así como de las formaciones de los operarios que tuvieran que utilizarlo y el mantenimiento del modelo.

Finalmente, se descarta el uso del modelo BIM para el desarrollo del modelo 3D del gemelo digital. Esto se debe principalmente a un motivo, los modelos BIM están pensados como una representación en 3D de un edificio, no de una máquina, ni de un proceso, ni de un producto, por lo que las posibilidades del gemelo si se aplicaba esta metodología de trabajo iban a ser muy inferiores. Esto no significa que sea imposible, en el sector de edificios se están desarrollando gemelos digitales utilizando modelos BIM que funcionan

muy bien y, en ese sector, el potencial es realmente algo. Para este proyecto en concreto, se ha decidido que, si el proveedor de simulación puede desarrollar un modelo más complejo de la maquinaria, se podría obtener un gemelo mucho más preciso, además de escalable a futuras aplicaciones.

Gemelo digital

En el apartado Gemelo Digital dentro del estado del arte ya se define qué es un gemelo digital. En este apartado se comentará una posible arquitectura con la que desarrollar un gemelo digital que funcione. Esta arquitectura es igual que la que tendría un CPS.

Los dos principales bloques funcionales de un CPS son: una conexión avanzada que asegura adquisición de datos en tiempo real del mundo físico y la realimentación del mundo digital y capacidad de procesar y gestionar de forma inteligente estos datos [38]. Estos problemas se han intentado resolver de diferentes maneras, con diferentes arquitecturas, según el autor que se haga referencia. En [39] se propone una arquitectura que utilice las redes sociales como medio para las comunicaciones entre elementos. En [40] se propone una arquitectura que imite la comunicación del cerebro humana, en la que aparecen Unidades IoT que se integran para formar una IoT Ubicua. En [38] se introduce el concepto más aceptado, la arquitectura 5C, una arquitectura en cinco niveles concretos que son: Nivel de conexión inteligente, nivel de conversión de datos a información, nivel cibernético, nivel de cognición y nivel de configuración. Cada nivel aporta unos atributos al CPS que le dan su funcionalidad, y lo hacen autoconsciente y capaz de autoconfigurarse. Si bien esta arquitectura ya propone una solución robusta, inteligente y con capacidad de autogestionarse, [41] propone añadir a los tres niveles más altos el uso de la nube para hacer que la inteligencia y el almacenamiento sean escalables.

El modelo propuesto en este proyecto es el desarrollado por [21] y mostrado en la Figura 41 en el que cada *cosa* física viene acompañada de su *cosa* ciber. Es decir, cada elemento tiene su propio gemelo digital y el gemelo digital de la línea es la combinación de cada gemelo de cada uno de los elementos tal como se han combinado en el mundo físico.

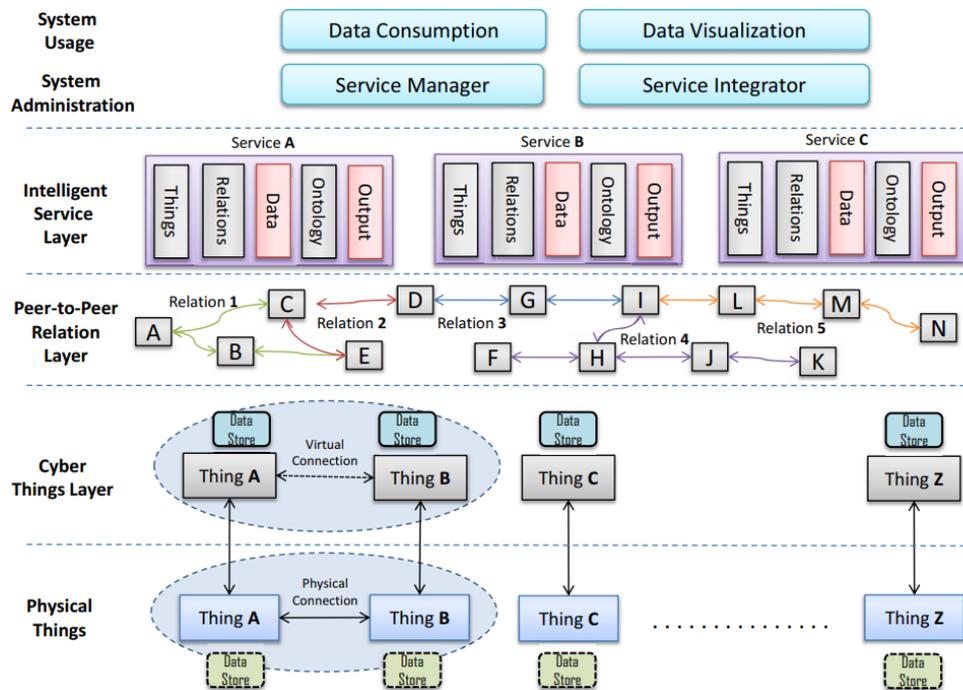


Figura 41. Modelo de arquitectura para un CPS genérico. Fuente: [21]

Las capas presentadas en este modelo son, por tanto, la capa de elementos físicos y ciber, la capa de relaciones, la capa de gestión inteligente y la capa de administración. A nivel de elementos físicos y ciber, ya se ha comentado que existe una relación uno a uno de cada uno de los elementos de la línea. Ambos elementos de la pareja son conscientes de esta comunicación y de su parte contraria. Todos los elementos, bien sean físicos o virtuales, tienen un identificador, como puede ser IPv6, UPC, EPC etc. Cada elemento tiene, por tanto, dos interfaces de comunicación: la interfaz entre ese mismo elemento y su parte contraria, que ocurre de punto a punto, y la comunicación entre elementos de su propia capa, que podría ser una comunicación ad-hoc en el caso de elementos físicos, con protocolos como VANET (propuesto en la fuente), pero también Bluetooth, Zigbee u otros. Esta comunicación dentro de una misma capa permite una redundancia en las conexiones entre elementos que hace que, si cayera la comunicación física, los elementos puedan seguir hablando entre sí a través de la red virtual. Finalmente, cada elemento tiene un almacén de datos. Los almacenes virtuales deben coincidir con los almacenes de los elementos físicos, y cada vez que se actualice la cosa de una de las capas, su parte contraria debe llevar a cabo esa actualización.

En segundo lugar está la capa de relaciones. En esta capa se gestionan las comunicaciones entre elementos. Estos elementos se pueden agrupar en relaciones con su propio identificador de relación, y cada elemento puede pertenecer a varios grupos de relaciones. De esta forma, se puede discriminar a quién se realiza una comunicación. Si un mensaje es de acceso restringido, cada elemento puede decidir quién podrá leer dicho mensaje utilizando estos identificadores de relaciones. Una gran ventaja de este sistema de comunicaciones entre elemento es la alta escalabilidad que presenta, ya que si aparecieran nuevos elementos simplemente habría que introducirlos en grupos ya existentes o crear nuevos grupos para ellos.

La capa de gestión inteligente tiene varias funciones. Entre ellas, es el middleware que gestiona las comunicaciones del nivel de relaciones, en las que se realizan las suscripciones y las publicaciones a ciertos grupos. Este nivel no solo gestiona las relaciones entre elementos, sino que también gestiona los elementos virtuales y sus ontologías, esto son, las características que los definen. Además, es importante en este nivel definir la naturaleza de la información, y a quién va dirigida, ya que se encargará de codificar los mensajes para que puedan ser interpretados por el receptor.

Finalmente aparece el nivel de administración de sistemas, en el que se puede gestionar, entre otras cosas, la visibilidad de los activos y el acceso a la información transmitida por los mismos. Si los grupos de relaciones se gestionan en el nivel mencionado anteriormente, este nivel establecerá la relevancia del mensaje. En este nivel se decide si un mensaje puede ser público, es de acceso restringido mediante una suscripción a un grupo determinado o es privado y no debe ser transmitido a otros activos. También es importante la gestión de la visibilidad de los activos, ya que si se quiere que un dispositivo físico deje de ser accesible a través de la red, simplemente se necesita desconectar el elemento virtual que representa a dicho elemento físico. Esto tendrá un impacto importante en la ciberseguridad del sistema [21].

Arquitectura del gemelo digital en planta

En este apartado se desarrollará la arquitectura que se pretende utilizar en el gemelo digital que se implementaría en la fábrica.

La arquitectura propuesta en el apartado anterior es un modelo teórico sobre el que construir un gemelo digital, que puede servir de referencia para el proyecto. Sin embargo, ésta no se va a seguir completamente. Esto se debe principalmente a que, por motivos de experiencia y mitigación de riesgos, el desarrollador del gemelo será Siemens, lo que implica que se utilizará su plataforma IoT con sus funciones y su arquitectura, Tecnomatix, sin embargo, sí que se pueden encontrar ciertos puntos en común.

El gemelo digital contará con los activos físicos ya mencionados y con una virtualización de éstos a nivel digital. A nivel físico, estos activos incluyen sensores, actuadores y los PLC que los controlan, los datos que se van a leer de estos activos se encuentran en la Tabla 13. En la fábrica, actualmente, existe un anillo de fibra óptica que conecta todos estos elementos entre sí y a dos racks de servidores centrales con una base de datos SQL en la que se almacena la información. Esto es especialmente útil por ofrecer una redundancia, ya que en un anillo la comunicación puede fluir en dos sentidos independientemente del origen y del destino.

Por tanto, todos los elementos de la capa física están conectados entre sí utilizando un anillo de fibra óptica, mediante Ethernet, aunque los PLC son capaces de utilizar Wi-fi si fuera necesario.

A nivel virtual, los activos se alojarán en la nube, en Azure, en la plataforma de Siemens, Tecnomatix, donde se llevarán a cabo las simulaciones y se gestionarán sus comunicaciones internas. Esta nube se conectará a través de internet a los servidores de la fábrica, preferiblemente utilizando protocolo UDP, ya que permitiría reducir la latencia significativamente. Sin embargo, si la velocidad a la que se pueden ejecutar las simulaciones no es demasiado alta, el protocolo TCP debería servir para el desarrollo de este proyecto.

El software que se debe desarrollar contendrá dos partes principales: la simulación de la línea y la inteligencia para prever los mantenimientos. La simulación de la línea será desarrollada por Siemens, y proporcionará una virtualización de aquellas máquinas cuyo funcionamiento sea necesario virtualizar, mientras que dejarán como cajas negras aquellas cuyo proceso no sea relevante para el sistema. La inteligencia también será desarrollada

por Siemens y se integrará en la simulación para obtener información más precisa acerca del estado de las máquinas, y simular no solo su funcionamiento sino la evolución de algunos de sus elementos.

Tabla 13. Lista de parámetros por máquina y disponibilidad

| Máquina | Datos | Disp. |
|-----------------------------------|-----------------------|--------------|
| Despaletizadoras | Caja negra | - |
| Enjuagadora | Presión de aire | Si |
| | Presión de agua | Si |
| | Caudal de agua | Si |
| | Temperatura | Si |
| Inspector de botellas | Caja negra | - |
| Alineador de botellas | Caja negra | - |
| Llenadora y taponadora | Presión de aire | Si |
| | Caudal CO2 | Si |
| | Presión de cerveza | Si |
| | Caudal de cerveza | Si |
| | Temperatura | Si |
| Pasteurizadora | Temperatura | Si |
| | Caudal de agua | Si |
| | Presión aire y agua | Si |
| Etiquetadora | Visión art. etiquetas | No |
| | Ritmo | Si |
| SMI Packer I | Caja negra | - |
| SMI Packer II | Caja negra | - |
| Paletizadora | Caja negra | - |
| Enfardadora | Caja negra | - |
| Inspector de cajas 1 | Caja negra | - |
| Desencajonadora | Apertura pinzas | Si |
| | Presión de aire | Si |
| | Caudal de aire | Si |
| | Velocidad del brazo | Si |
| Lavadora vertical de cajas | Caja negra | - |
| Lavadora de botellas | Presión de agua | Si |
| | Caudal de agua | Si |
| | Presión de aire | Si |

| | | |
|-------------------------------|---------------------|----|
| | Caudal de aire | Si |
| | Caudal de sosa | Si |
| | Temperatura | Si |
| Encajonadora | Apertura pinzas | Si |
| | Presión de aire | Si |
| | Caudal de aire | Si |
| | Velocidad del brazo | Si |
| Inspector de cajas 2 | Caja negra | - |
| Cintas transportadoras | Vibraciones | No |
| | Velocidad | Si |

Los parámetros más relevantes que se deben tomar para cada una de las máquinas y su disponibilidad se muestran en la Tabla 13. Es importante mencionar que muchos de estos datos se deben tomar en diferentes puntos de la máquina para que el sistema funcione correctamente, sin embargo, el cliente ya dispone de una lista de las zonas críticas de un estudio anterior, por lo que solo se menciona el parámetro y el gemelo leerá todos los datos disponibles de ese tipo.

Aquello elementos etiquetados como “caja negra” son elementos que se modelarán en la simulación como un retraso del producto en el proceso de producción, ya que no se requieren más detalles para que la aplicación funcione correctamente. La intención de este ejercicio era encontrar aquellas máquinas que:

- Su mantenimiento es más crítico, porque tienen menos capacidad que el resto;
- Su modelado es necesario para probar formatos diferentes en la línea o;
- Se sabe, por conversaciones en el cliente, que se rompen muy a menudo, por lo que el gemelo ayudaría a estudiar el origen de estas bajas. Este caso se da en la etiquetadora, que cuando coloca mal un número de etiquetas es necesario pararla y buscar el origen del fallo, y las cintas transportadoras, que se rompían con frecuencia debido a las vibraciones que tiene el sistema, por eso se ha añadido el sensor de vibraciones.

Implementación

En este apartado se desarrollará el proceso a seguir para una implementación adecuada y eficiente del proyecto. Algunos de los pasos que se van a mencionar ya han sido realizados anteriormente, sin embargo, otros tendrán que ser desarrollados bien en este apartado o en el futuro, con el proyecto en marcha.

Proceso de implementación

El proceso de implementación del gemelo digital seguirá un esquema muy parecido al proceso de implementación de cualquier otro proyecto de digitalización. Estos pasos serían los siguientes:

1. Auditoría digital y del dato. En esta parte del proyecto se hace un estudio específico de la situación del cliente, en el que se evalúa su situación con respecto al mercado de la industria 4.0, las posibles aplicaciones de las que se podría beneficiar y el beneficio que se obtendría de dichas aplicaciones. En esta etapa también se selecciona el proyecto y se comienza a hacer un mapa conceptual de los datos que intervendrían en la aplicación;
2. Estudio de proveedores. En esta etapa se evalúan los posibles proveedores que podrían ofrecer los servicios necesarios para la implementación del proyecto seleccionado en el punto anterior. Se estudian proveedores de software, de hardware y de otros servicios complementarios que se puedan necesitar;
3. Desarrollo del gemelo. Esta etapa incluye el aprovisionamiento, el diseño del gemelo digital y la preparación del escenario en el que éste será implementado;
4. Implementación. Tanto de hardware, como de software, incluye la instalación por parte de los proveedores de todos los servicios contratados y;
5. Comisionado, formación y pruebas.

Auditoría digital y del dato

La auditoría digital es un procedimiento que se lleva a cabo al inicio de todos los proyectos con la intención de analizar la situación de la planta y encontrar de qué aplicaciones de Industria 4.0 podría beneficiarse la fábrica. Además, tras la selección de la aplicación que se quiere desarrollar, se realiza una auditoría del dato por la cual se hace un mapa de dónde se encuentran almacenados los datos que vayan a hacer posible el proyecto, así como el camino que siguen a lo largo de su vida. Por tanto, la metodología que se sigue para llevar a cabo una auditoría digital sería la siguiente:

1. Análisis de la fábrica en busca de retos de digitalización que resolver. Este proceso es anterior al desarrollo de este proyecto, ya que el reto ya viene definido en el proyecto. Sin embargo, sí que es cierto que en el apartado Situación actual de la planta se realiza un análisis bastante exhaustivo de la situación actual de la planta en términos de capacidad y de las líneas de envasado en términos económicos.
2. Filtración de los retos por coste y beneficio. Para priorizar los retos en los que se va a participar, es importante saber qué impacto sobre el resultado final tendrá cada uno de ellos. En este paso se realiza una clasificación de los proyectos según los beneficios que pudiera dar cada uno de ellos. Esta etapa se ha desarrollado en el apartado Situación actual de la planta para decidir dónde aplicar la solución de digitalización.
3. Búsqueda de soluciones al reto propuesto. En los pasos anteriores se detecta la oportunidad, en este caso se realiza un estudio de qué soluciones pueden resolver estos retos de la forma más eficiente posible. Este proyecto es un poco extraño en este sentido, porque la solución al problema estaba encima de la mesa antes de detectar el lugar del problema. Dentro de este estudio de soluciones, puede haber soluciones no digitales mucho más sencillas, por lo que el reto dejaría de ser de digitalización pero la solución se seguiría pudiendo implementar.

La salida de este análisis sería muy parecida a la mostrada en la figura XX, en la que se puede ver el ahorro en operaciones frente al tiempo de desarrollo del proyecto y el tamaño del punto determina el tamaño de la inversión.



Figura 42. Clasificación de posibles soluciones según coste operacional y tiempo de retorno

- Definición del proyecto digital. Una vez reconocido el reto y la solución, es necesario definir perfectamente esta solución, el alcance, el impacto, los recursos etc. que pueda necesitar. Este documento está componiendo la definición del proyecto.
- Auditoría del dato. Cualquier problema de digitalización va a necesitar datos. Esta información que en algunas situaciones puede estar muy descentralizada, es importante mapearla bien y hacer un correcto seguimiento para que, en etapas posteriores, se pueda realizar un diseño adecuado.

En la Figura 43 se puede ver la auditoría del dato. En ella se observa como los datos se generan todos en el nivel de campo, algunos procedentes de los sensores, otros como salida de los controles de los PLC y otros con un cálculo interno, como son el ritmo de las botellas o los brazos robóticos para encajonar o desencajonar. Estos datos utilizan el anillo de fibra óptica de la fábrica para transmitirse a los servidores centrales, donde se enviarían a la nube a través de internet. Esta comunicación es simétrica, por lo que la actuación del CPS desde la nube tendría un camino del dato igual, pero en sentido contrario.

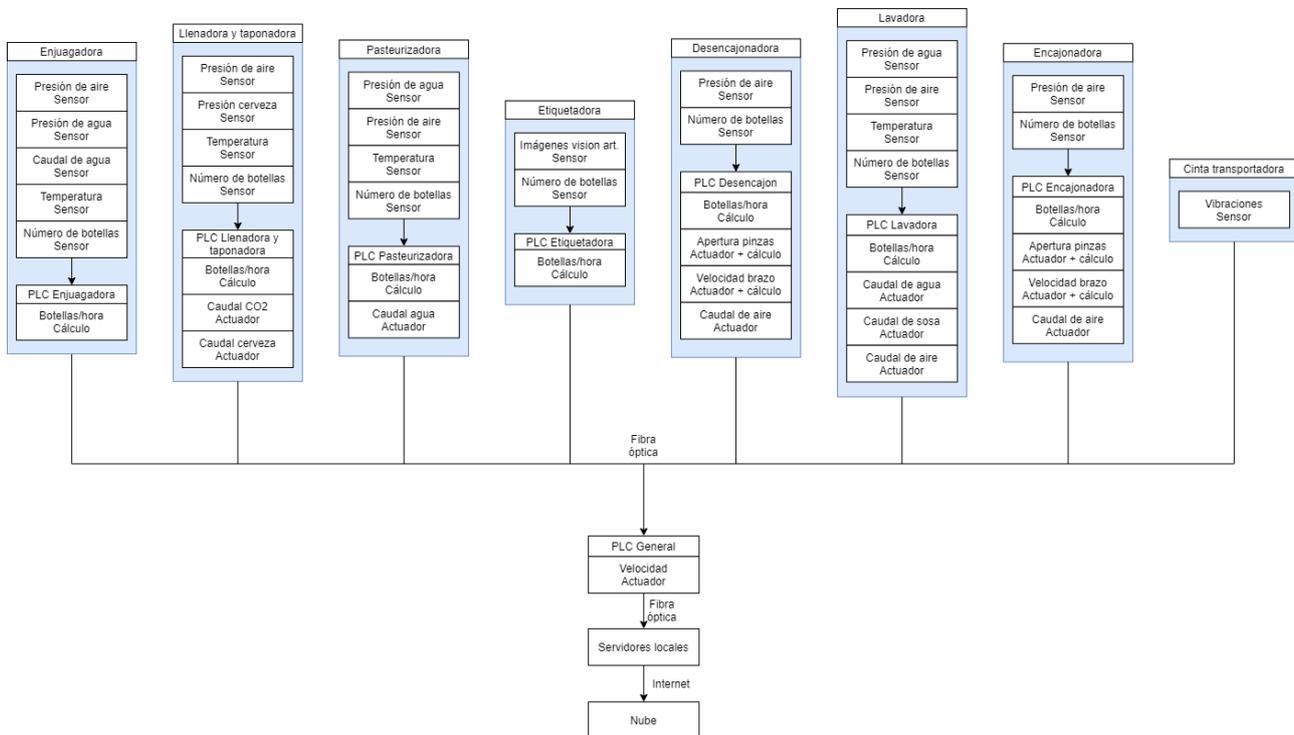


Figura 43. Auditoría del dato

Estudio de proveedores

El apartado Simulación y en la Tabla 12 ya se realiza un estudio de los posibles proveedores de software que se podrían utilizar. En ese mismo apartado, se termina por concluir que el proveedor del software será Siemens, con su plataforma Tecnomatix. Esta plataforma será desarrollada en la nube de Microsoft, Azure, ya que es el servicio que ya se utiliza en las instalaciones del cliente. Se ha seleccionado este proveedor, no solo por ofrecer un software completo, con las funcionalidades necesarias y utilizable a nivel de campo por operarios sin formación, sino que además Siemens propuso el desarrollo de los modelos de las máquinas, así como su integración y la implementación en la nube con lectura de datos en tiempo real. Además, siendo los autómatas que hay a nivel de campo de Siemens, el desarrollar la aplicación con ellos hace más sencilla la interacción entre la plataforma y el nivel de campo. Por tanto, Siemens será el proveedor, no solo del software de simulación, sino que también del sistema simulado y de los algoritmos necesarios para que el sistema funcione.

También es necesario estudiar los proveedores de otros servicios que se van a requerir en este proyecto. Estos proveedores serán de sistemas de ciberseguridad y de los

Trabajo de Fin de Máster

Estudio para la implementación de un gemelo digital en una fábrica de cerveza

sensores para la obtención de datos no disponibles. En materia de ciberseguridad, no se va a contratar a un nuevo proveedor, sino que se establecerá por contrato que Siemens se debe encargar de todo el despliegue de seguridad que su servicio vaya a requerir. Una vez desplegado, el propio cliente se encargará de mantener los sistemas actualizados y recordar las buenas prácticas a los usuarios. Se deja a criterio del cliente si, tras el proyecto cree necesitar una auditoría de seguridad, realizarla o no.

En cuanto al aprovisionamiento de hardware, se necesita un sensor de vibraciones para las cintas transportadoras, ya que éstas han sufrido averías por culpa de las vibraciones del sistema, y una cámara de visión artificial para detectar la correcta colocación de las etiquetas.

En cuanto a sensores de vibración, hay muchas marcas en el mercado, con muchos productos de muy diversas características. La elección de este tipo de hardware lo llevaría a cabo el proveedor de los servicios de instalación de hardware que pueda hacer falta en este proyecto, en este caso, Siemens.

En cuanto a visión artificial, si bien es una tecnología más nueva, la aplicación buscada no es en absoluto novedosa. Ya existen varios fabricantes que comercian con cámaras de visión artificial capaces de detectar el correcto posicionamiento de las etiquetas, como son [e2m](#) o [Mettler Toledo](#). Conseguir un proveedor de este tipo sería una opción un poco más cara, pero que ahorraría la necesidad de tener que desarrollar un algoritmo para la detección de etiquetas mal puestas. Otra opción sería añadir esta aplicación al proyecto de Siemens, que probablemente hayan trabajado en este problema antes.

Desarrollo del gemelo digital

A lo largo de esta etapa se realizarán tres funciones principales: el diseño del gemelo digital, el aprovisionamiento de material de hardware y software que pueda hacer falta y la preparación de la fábrica para recibir el gemelo.

Durante el aprovisionamiento, se realizan las compras de los elementos mencionados anteriormente y otros elementos que el proveedor del gemelo pueda etiquetar

como necesarios, como sería una ampliación de los sistemas de servidores o la compra de material mejor condicionado para ejecutar el gemelo. Este aprovisionamiento también incluye los programas de simulación, las suscripciones a servicios de la nube, la compra de software y hardware de ciberseguridad para evitar ataques contra la línea de producción etc.

La preparación de la planta consiste en instalar todo el material recibido en la parte anterior en su lugar correspondiente en la planta, así como preparar los sistemas digitales con los programas necesarios para gestionar el gemelo e instalar todas las protecciones que puedan hacer falta. Esta fase no tiene por qué ocurrir únicamente en la línea de producción, es posible que alguno de estos sistemas se deba instalar en controles remotos, fuera de la fábrica, o en elementos portátiles de algún operario.

Finalmente, el diseño del gemelo digital que será llevado a cabo íntegramente por Siemens. Para que se pueda desarrollar este CPS será necesario hacer una etapa de recolección de datos, en la que Siemens estudia todos los elementos de la línea, para conocer perfectamente el proceso. Una vez conocido el proceso, se procede a la digitalización de los elementos como unidades y, una vez estén todos, se integrarán en la misma línea virtual. Sobre esta línea virtual se comenzarán a hacer algunas pruebas, para asegurarse de que el sistema funciona como el real, y se empezarán a recoger datos.

Con los datos recogidos de la fábrica, históricos que ya tiene el cliente, se comenzará también a desarrollar la inteligencia para las máquinas. Esta inteligencia tiene como objetivo principalmente predecir las fallas de los activos, para poder llevar a cabo un mantenimiento predictivo de las máquinas más críticas, a saber, la enjuagadora, la llenadora y taponadora, la pasteurizadora, la etiquetadora y las cintas transportadoras. La simulación del proceso no requiere un modelo de machine learning para funcionar, ya que se puede ejecutar directamente sobre el modelo matemático desarrollado anteriormente.

Es importante no olvidar uno de los elementos más relevantes de cualquier sistema digital: la ciberseguridad. Con el aumento de la potencia de las aplicaciones digitales, se han conseguido muchos logros que han hecho progresar inmensamente a la industria, sin embargo, el precio de tener estas aplicaciones digitalizadas es el coste de asegurarlas para

que no supongan una vulnerabilidad. Mientras que las amenazas tradicionales de los sistemas cibernéticos no han desaparecido del todo, el aumento de la superficie de exposición, así como del número de aplicaciones digitales hacen que cualquier sistema sea mucho más vulnerable. Estas aplicaciones generalmente se utilizan de forma deslocalizada, es decir, no están en un servidor central de las instalaciones sino que están en un servidor externo, y a través de ellas es posible el acceso a infraestructura crítica de la compañía, es decir, todos estos riesgos hay que tratarlos si no se quiere ser víctima de un ciberataque con un gran impacto [42].

El proyecto de estudio tiene la gran vulnerabilidad de que está digitalizando una línea completa, es decir, toda la producción de botellas de una fábrica, que se está permitiendo que sea controlada desde internet. Esto es un activo muy importante para el cliente, y una vulnerabilidad en este sistema podría ser devastadora para todos los sistemas, no solo de esta fábrica, sino del resto de fábricas que pueda tener.

A falta de la arquitectura final que vaya a tener el proyecto, es difícil teorizar acerca de los mejores sistemas de ciberseguridad para asegurar el funcionamiento de la aplicación sin riesgos, sin embargo, algunos sí que se pueden destacar algunos elementos. La única conexión nueva que se generará entre la planta y el exterior será aquella que comunica al gemelo digital con la nube, por tanto, es importante tener todos los archivos en la nube bien asegurados y, posiblemente, cifrados. Esta nube contiene información confidencial acerca de la planta y puede actuar sobre la misma, por lo que se refuerza la criticidad de la aplicación que se alojará en Azure. Esta plataforma tendrá que estar, por tanto, correctamente aislada de la fábrica y del resto de la compañía, para que sí se ve comprometida, los agentes maliciosos no puedan acceder. Al nivel de conocimiento de la arquitectura del sistema que se tiene ahora mismo, no se puede teorizar mucho más acerca de los requisitos de seguridad que tendrá la aplicación, sin embargo, como concepto general se puede resumir en la protección de todos aquellos activos que tengan comunicación con el exterior y el cifrado de todos aquellos datos que vayan a salir de la fábrica y puedan ser confidenciales. Como referencia, se deja el documento [43], en el que se propone un software capaz de dar seguridad a los datos en CPS.

Implementación

Con la simulación diseñada y tras comprobar que funciona, así como los algoritmos para el mantenimiento predictivo, llega el momento de implementarlo todo en la fábrica. Durante esta etapa, el proveedor del servicio, Siemens, generará la interfaz entre la fábrica y los programas desarrollados hasta ahora, de tal manera que el resultado sea un gemelo digital propiamente dicho.

En esta etapa se pondrán a prueba todos los sensores, se asegurará el funcionamiento del flujo de datos hacia la nube, se verá que la simulación es capaz de asimilar los datos y obtener una conclusión, aunque la conclusión no se valide todavía, y se comprobará que las órdenes enviadas desde la plataforma alcanzan a los actuadores a nivel de campo. Al finalizar esta etapa se debería tener un gemelo digital en la línea que, si bien los resultados que dé no están validados, sea perfectamente funcional.

Comisionado, formación y pruebas

El gemelo digital ya está instalado en fábrica, pero el proyecto no puede terminar hasta que la aplicación implementada funcione de forma robusta y sea capaz de interactuar con los operarios. Por tanto, como en cualquier proyecto de ingeniería, hay una última etapa de comisionado, en la que se pone en marcha por primera vez el gemelo funcionando la fábrica. Formación, ya que la aplicación desarrollada probablemente no sea básica ni intuitiva, será necesario formar a los operarios para que sean capaces de acceder a la herramienta e interpretar los resultados. Además deben comprender el proceso que realiza la máquina para asegurar que la última decisión acerca del sistema la tiene alguien con razonamiento crítico, no matemático. Por tanto, en esta formación se enseña también como desactivar el gemelo para que la línea funcione bajo el mando de los operarios como hace actualmente. Por último, ya se ha comentado la importancia de la ciberseguridad. Dentro de las jornadas de formación se impartirán nociones de ciberseguridad relacionadas con el funcionamiento de la máquina para asegurar que el factor humano no sea una vulnerabilidad más del sistema.

Con la máquina en marcha y el personal formado, se puede proceder a las pruebas, para comprobar que los resultados dados son los esperados. Esta etapa se puede continuar

tras el cierre del proyecto, ya que muchas veces la validación de los datos requiere de varias ejecuciones y no daría tiempo a hacerlas en una etapa corta, pero las primeras pruebas sí que se harían con el fabricante delante.

Una vez terminada esta etapa, se puede considerar que el proyecto está terminado y la fábrica tiene un gemelo digital funcional.

Planificación temporal

El OTS (Overall Time Schedule) es la agenda que, en principio, seguirá el desarrollo del proyecto siempre que no haya cambios de alcance. Este OTS sigue los conceptos desarrollados en el apartado anterior y tendría la forma mostrada en la Tabla 14 y la Figura 44.

Tabla 14. Planificación del desarrollo del proyecto

| Entregable - Actividad | Comienzo (meses) | Duración (meses) | Desviación posible (meses) | Entrega (meses) | FINAL (meses) |
|--|------------------|------------------|----------------------------|-----------------|---------------|
| Diseño conceptual del gemelo digital | 0 | 2 | 1 | 2 | 2 |
| Auditoría de datos y mapa del proceso | 2 | 2 | 1 | 4 | 4 |
| Comparación de proveedores | 4 | 1 | 1 | 5 | 5 |
| Aprovisionamiento de Hardware y Software | 5 | 2 | 1 | 7 | 7 |
| Diseño del gemelo digital | 7 | 3 | 1 | 10 | 10 |
| Preparación de la planta | 7 | 1 | 1 | 8 | 8 |
| Implementación del hardware | 7 | 1 | 1 | 8 | 8 |
| Implementación del software | 10 | 1 | 2 | 11 | 11 |
| Comisionado, formación y pruebas | 11 | 1 | 2 | 12 | 12 |
| Cierre del proyecto | 12 | 1 | 0 | 13 | 13 |

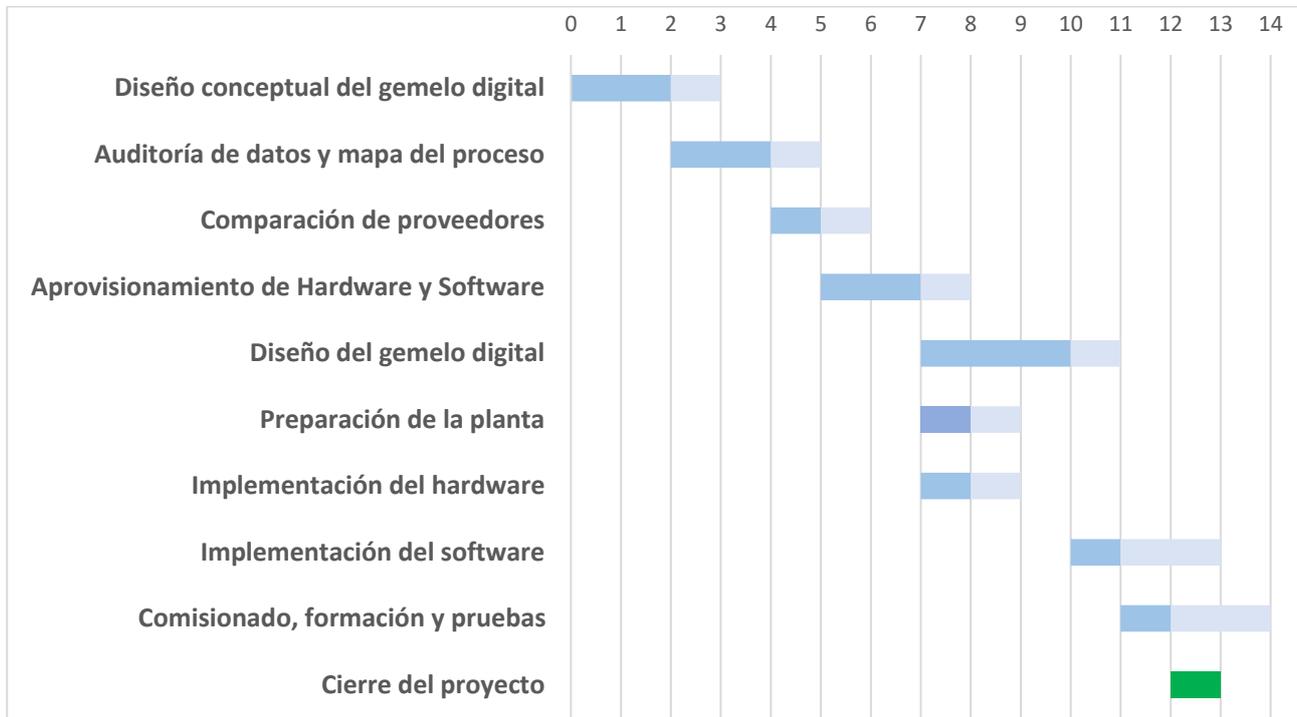


Figura 44. OTS del proyecto de implementación

La etapa que se está desarrollando actualmente formaría parte del diseño conceptual, sin embargo, este informe no contiene la información suficiente como para poder afirmar que el resto de las etapas están finalizadas. La auditoría de datos necesita ser más profunda, y toda la parte relacionada con proveedores se centra en Siemens, pero habría que estudiar otras necesidades del proyecto que puedan requerir proveedores diferentes. En conclusión, este proyecto se terminará realizando en trece meses mientras no ocurran imprevistos.

Análisis de riesgos

Como cualquier proyecto, es necesario hacer un análisis de riesgos para poder prever aquellos inconvenientes que puedan surgir a lo largo de los trabajos. Este análisis establece una nota del 1 (bajo) al 5 (alto) a la probabilidad de que el riesgo ocurra y los impactos que éste puede tener en tiempo y en coste del proyecto. Finalmente, se propone un plan de mitigación o de prevención para reducir la probabilidad y el impacto de cada uno de los riesgos. En la Tabla 15 se pueden ver los riesgos y la forma de gestionarlos.

Tabla 15. Análisis de riesgos

| IDENTIFICACIÓN DEL RIESGO | | | | | GESTIÓN DEL RIESGO | | | | | |
|---------------------------|--|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| ID | Riesgo | IMPACTO | | | | Acciones para mitigar/transmitir/prevenir el riesgo | IMPACTO REVISADO TRAS LA ACCIÓN | | | |
| | | Probabilidad 1 (bajo) 5 (alto) | Coste 1 (bajo) 5 (alto) | Tiempo 1 (bajo) 5 (alto) | Impacto total 1 (bajo) 5 (alto) | | Probabilidad 1 (bajo) 5 (alto) | Coste 1 (bajo) 5 (alto) | Tiempo 1 (bajo) 5 (alto) | Impacto total 1 (bajo) 5 (alto) |
| 1 | Brecha de ciberseguridad | 2 | 5 | 2 | 20 | Estudiar al proveedor y asegurar que cumple con estándares internacionales | 1 | 3 | 1 | 3 |
| 2 | Falta de capacidad del proveedor | 1 | 3 | 3 | 9 | Estudiar al proveedor y su portfolio de proyectos anteriores | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 3 | Error en selección de proveedores | 2 | 1 | 5 | 10 | Hacer una comparación global y minuciosa de los posibles proveedores, con historial de proyectos, estudio económico de la empresa etc. | 1 | 1 | 3 | 3 |
| 4 | Estimación incorrecta del coste del proyecto | 3 | 4 | 1 | 12 | Recurrir a profesionales con experiencia para presupuestar el proyecto | 2 | 2 | 1 | 4 |
| 5 | Bancarrota del proveedor | 1 | 5 | 5 | 25 | Estudiar al proveedor y su situación financiera | 1 | 2 | 2 | 4 |

| | | | | | | | | | | |
|----|--|---|---|---|----|--|---|---|---|---|
| 6 | Huelga | 2 | 2 | 2 | 8 | Establecer buena relación con el sindicato y realizar tratados contractuales favorables | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 7 | Malos resultados en pruebas | 3 | 1 | 4 | 12 | Realizar controles a lo largo del proyecto para solucionar problemas en etapas tempranas del proyecto | 2 | 1 | 2 | 4 |
| 8 | Especificación incorrecta de parámetros | 3 | 3 | 2 | 18 | Trabajar junto con el proveedor para asegurarse de que se conoce bien el sistema y los parámetros relevantes de éste | 1 | 2 | 2 | 4 |
| 9 | Retrasos en entregas de hitos | 2 | 2 | 4 | 16 | Tener en cuenta los posibles retrasos con contingencias dedicadas | 1 | 1 | 3 | 3 |
| 10 | Nivel de digitalización insuficiente | 2 | 1 | 5 | 10 | Hacer un estudio del cliente con entrevista a los encargados en la inicialización del proyecto | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 11 | Recolección de datos poco precisa | 4 | 3 | 3 | 36 | Trabajar de la mano del cliente para obtener la información necesaria al nivel de precisión necesaria | 2 | 2 | 2 | 8 |
| 12 | Personal trabajando mal con actualizaciones de fábrica | 3 | 3 | 2 | 18 | Preparar al personal antes de las formaciones para que pueda aceptar el cambio y saber a qué se enfrentará. | 2 | 2 | 1 | 4 |

Y en la Tabla 16 y la Tabla 17 se pueden ver los riesgos y los riesgos mitigados de forma mucho más visual en una tabla que enfrenta la probabilidad con el impacto.

Tabla 16. Riesgos en tabla Probabilidad frente a Impacto

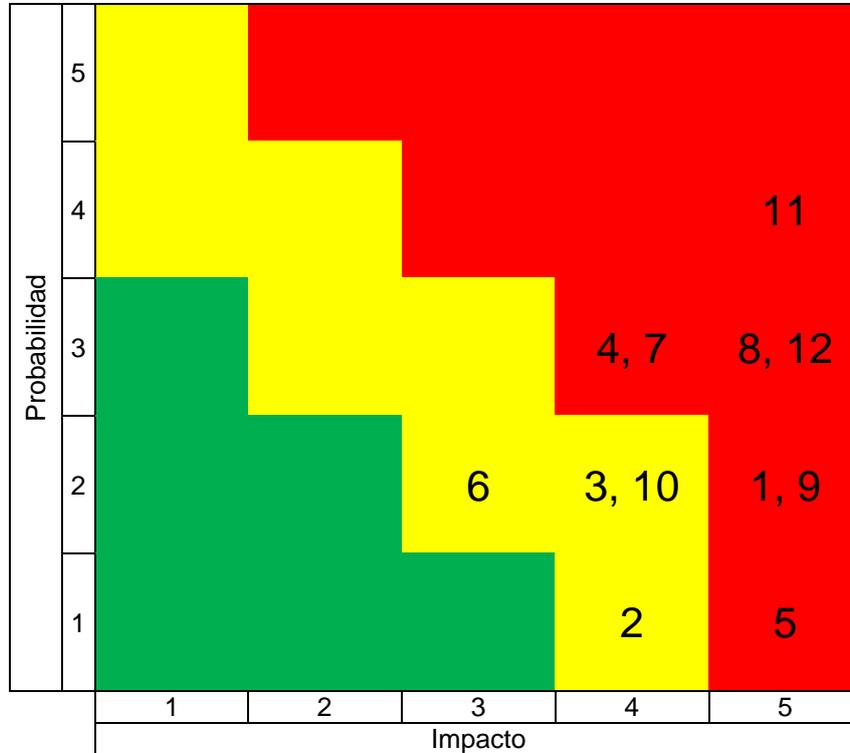
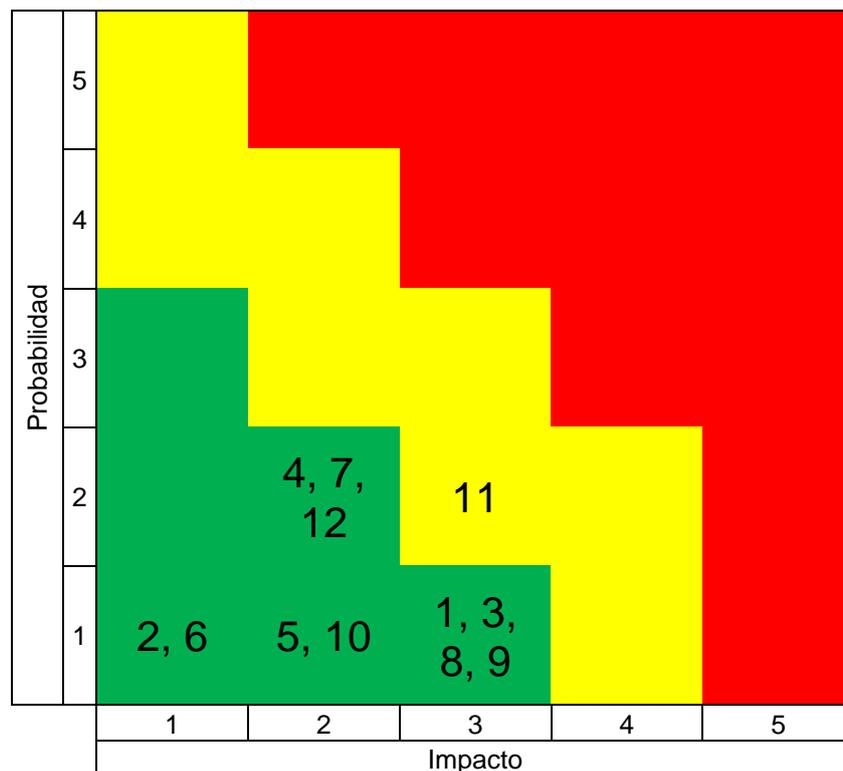


Tabla 17. Riesgos tras su gestión en tabla Probabilidad frente a Impacto



A partir de este análisis se puede concluir que los riesgos, en general, no es muy complicado mitigarlos salvo el número 11. Recolección de datos poco precisa. Este riesgo, debido a su alta probabilidad inicial, ya que el cliente no tiene por qué saber el objetivo de la recolección de algunos datos, es el más importante y en la etapa de recolección de datos en la auditoría digital será muy importante ir con cuidado y hacerlo de forma muy minuciosa.

Operación

En este apartado se explicará brevemente la operación que tendrá el gemelo digital. Esto incluye todas las interacciones que tendrá el gemelo con la planta, es decir, la lectura de datos, la actuación sobre los controles y la interacción con los operarios, bien sean acciones sobre el gemelo o salidas de la aplicación hacia el personal.

El CPS desarrollado durante este proyecto podrá leer los datos mencionados en la Tabla 13 directamente de la planta. Para ello, los PLC de cada una de las máquinas pueden, o bien leer la información del PLC general de la línea o del rack de servidores, se deja a criterio del instalador. Si el desarrollador del gemelo fuera otra empresa, probablemente sería más sencillo leer directamente del rack, sin embargo, dado que tanto los autómatas como el software de simulación son de Siemens, la lectura de datos en la plataforma es prácticamente directa, así que las restricciones quedan a un nivel físico, de comunicaciones. También es importante que el gemelo tenga acceso a los planes de producción, ya que algunos parámetros de entrada como el formato o el tipo de cerveza, que pueden ser relevantes, vienen de la configuración de la línea, no de sensores o de cálculos sobre parámetros.

Lo mismo ocurre con la actuación sobre la línea: queda a criterio del desarrollador si se envía la orden a los racks para que los racks actúen sobre los PLC o si se envía directamente a los PLC. En el primero de los casos, sería necesario configurar los servidores para que puedan dar órdenes a los autómatas, ya que actualmente esos servidores solo funcionan como base de datos. Es por esto por lo que se recomienda actuar directamente sobre los PLC.

La actuación que tendrá el gemelo sobre la línea no será excesivamente invasiva, sin embargo sí que se pretende desarrollar alguna funcionalidad para control en tiempo real. Este control se realizaría principalmente sobre la velocidad de producción, tanto de las cintas como de las máquinas, por lo que afectaría directamente a parámetros de control de los PLC ya instalados. De cara a lograr mayor escalabilidad, se dejará la posibilidad de actuar sobre otros controles para que, si en futuros trabajos se quiere desarrollar aplicaciones nuevas, se pueda hacer sobre la misma plataforma.

En cuanto a la interacción con operarios, el gemelo constará de entradas y salidas manuales. Como entradas, se establecerá la opción de anular el control del gemelo, así como eliminar algunas de sus funciones. Además, para la simulación se podrán utilizar parámetros de entrada directamente de la planta o realizar simulaciones personalizadas con formatos, velocidades de producción, etc. de máquinas diferentes e inicializados manualmente. Por último, el gemelo digital puede actuar directamente sobre la planta pero también ofrecerá informes detallados sobre cada una de sus decisiones, y otros resultados que no sean de interacción con la línea. Estos informes pueden incluir un historial de acciones que ha tomado el CPS con la justificación de cada acción, una predicción del mantenimiento y de la producción, una historia de parámetros relevantes y de acciones de operarios etc.

Capítulo 5. Impacto económico y ODS

En este capítulo se hará un breve análisis del impacto económico que tendrá el gemelo sobre las operaciones del proyecto y, después, un análisis de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS).

Impacto económico

En conversaciones con Siemens, se comenzó a comentar el coste que tendría el desarrollo de un proyecto como el descrito arriba. Sin un análisis por parte de Siemens más exhaustivo, lo único que se pudo obtener fue una aproximación del coste de digitalización de las máquinas y de la implementación del gemelo. Las cifras de las que se habló en dicha reunión fueron de alrededor de los 200.000€, pero Siemens no se quiso comprometer a más datos. Tras una investigación, se encontraron referencias de proyectos similares al aquí presente pero de una fábrica completa por cerca de 1,2 millones €. Suponiendo que las botellas forman una cuarta parte de la fábrica completa, esto sería cerca de 300.000€ por la línea completa. Para reducir riesgos y ser un poco más conservador, este será el dato considerado para el coste de los servicios ofrecidos por Siemens, a los que habría que añadir los 2.000€ de la suscripción del primer año al software de simulación y 6.000€ para la suscripción a la nube de Azure, otros gastos en hardware de 5.000€, con una instalación de 2.000€ y 30.000€ para el comisionado, la formación y las pruebas en planta. Se ha supuesto que se parte de un servicio de la nube completamente nuevo, ya que no se sabe qué servicio tiene el cliente actualmente, sin embargo ese valor de 6.000€ probablemente se vea reducido con un estudio más profundo de los activos. Los gastos de nube y software son gastos de operaciones, ya que se repiten de forma anual, a lo que hay que añadir un gasto por el mantenimiento del equipo nuevo de hardware. Este valor se ha obtenido de otras experiencias en el sector y vuelve a ser un valor muy conservador, 1.500€ anuales, ya que no hay tanto hardware nuevo en la planta, pero no se tiene la información suficiente para obtener un resultado preciso.

Los ahorros generados por el proyecto son dos principalmente: aquellos debido a las mejoras de productividad, reduciendo las paradas y con un mantenimiento predictivo, y aquellos debidos a la mejora del rendimiento de la línea, relocalizando los buffers, haciendo la producción más dinámica y permitiendo un control de la velocidad de producción para lograr objetivos. Éstos no comienzan a dar rendimiento hasta que no está el proyecto implementado, por tanto hasta el año 2 no se empieza a percibir los ingresos.

En cuanto al mantenimiento predictivo, existen dos conceptos diferentes, el coste las paradas no planeadas y el coste de mantenimiento. Para las paradas no planeadas, según los cálculos del cliente se podrían evitar el 90% de las paradas debidas a fallos mecánicos y eléctricos, que suponen 190,2 horas al año. Teniendo en cuenta que el algoritmo no funcionará al 100%, y que los sistemas de aprendizaje requieren su tiempo de perfeccionamiento, se ha supuesto que de esas 190,2 horas, el primer año tras la implementación del gemelo se puede ahorrar el 30%, el segundo el 40% y desde el tercero, el 50%, lo que se corresponde con 57 horas, 76 horas y 95,2 horas respectivamente. Al coste mencionado en la Tabla 11 de 2.960€/hora no trabajada, los ahorros anuales por productividad serían de 168.897€ el primer año, 225.197€ el segundo año y 281.496€ a partir del tercero. El coste de mantenimiento actual de la línea de botellas es de cerca de 276.000€, considerando la media de todas las líneas de envasado de 1,50€/HL en mantenimiento. Optimizando recambios y otras labores de mantenimiento se podría llegar a ahorrar un 10% de este valor, dejando el envasado en 1,35€/HL y ahorrando 27.600€ al año. Por tanto, en total, por mantenimiento predictivo se podría ahorrar desde 196.497€ el primer año hasta 309.096€ el tercero.

En cuanto a la fluidez de la producción, en otras aplicaciones de este tipo se han visto mejoras de alrededor del 5% en la velocidad de fabricación [44]. Sin embargo, aunque el gemelo puede actuar directamente sobre planta, alguna inversión se requeriría en cambios de disposición para alcanzar incrementos tan altos. Sin desembolso alguno, se va a suponer, siendo conservadores, una mejora del 1%, y que toda esa mejora se puede vender. Sobre los 184kHL que tiene la demanda actualmente, esto supone 1,84 kHL más al año. El precio del HL en botella no es constante, depende del mercado en el que se

venda, sin embargo, es aceptable la aproximación de 54,97€/HL. Por tanto, supondría un incremento de los ingresos de alrededor de 100.000€ anuales.

En la Tabla 18, se pueden ver estos conceptos desglosados y en la Figura 45 la representación gráfica del retorno de la inversión. Esta inversión comienza a dar beneficios poco después del primer año tras la inversión, el tiempo de retorno es de un año y 63 días. Se ha considerado que, si se tarda cerca de un año en realizar el proyecto, como se muestra en Planificación temporal, este año es el año cero y se comienza a recoger beneficios en el año 1.

Tabla 18. Flujos de caja del proyecto.

| | Año 0 | Año 1 | Año 2 | Año 3 |
|--------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1 Inversión inicial (CAPEX) | 337.000 € | | | |
| 1 1 Servicios | 300.000 € | | | |
| 1 2 Hardware | 5.000 € | | | |
| 1 3 Instalación | 2.000 € | | | |
| 1 4 Comisionado, formación y pruebas | 30.000 € | | | |
| 2 Gastos operativos (OPEX) | 9.500 € | 9.500 € | 9.500 € | 9.500 € |
| 2 1 Software | 2.000 € | 2.000 € | 2.000 € | 2.000 € |
| 2 2 Servicios en la nube | 6.000 € | 6.000 € | 6.000 € | 6.000 € |
| 2 3 Mantenimiento | 1.500 € | 1.500 € | 1.500 € | 1.500 € |
| 3 Ingresos | | 296.497 € | 352.797 € | 409.096 € |
| 3 1 Mantenimiento | | 196.497 € | 252.797 € | 309.096 € |
| 3 2 Mejora de producción | | 100.000 € | 100.000 € | 100.000 € |
| 4 Total | 346.500 € | 59.503 € | 283.794 € | 683.390 € |

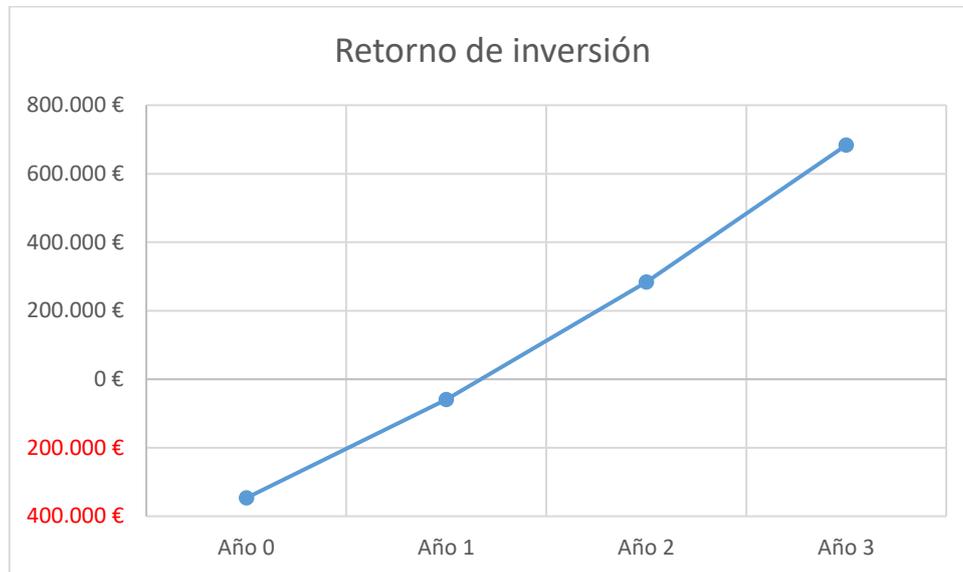


Figura 45. Retorno de la inversión.

Cabe destacar lo rápidamente que suben los ingresos en cuanto el proyecto comienza a dar beneficios, ya que los ahorros en mantenimiento son realmente altos y hacen que la curva se dispare. Por tanto, en términos económicos es un proyecto muy recomendable, ya que una vez está en marcha el proyecto, los gastos de la línea bajan drásticamente y además se añade la posibilidad de mejorar la producción y las ventas.

Objetivos de desarrollo sostenible

Los objetivos de desarrollo sostenible u ODS son unos objetivos acordados por varios jefes de estado de miembros de la ONU mediante los que se pretende ampliar los objetivos establecidos para el milenio y retomar aquellos que no se llegaron a cumplir. Son 17 objetivos desarrollados para la agenda 2030 con el fin de mejorar la convivencia y la prosperidad de la sociedad y a cuidar al medio ambiente. Estos 17 objetivos se muestran en la Figura 46.



Figura 46. Objetivos de desarrollo sostenible. Fuente: un.org

A continuación se van a mencionar aquellos objetivos con los que el proyecto se alinea.

Salud y bienestar

Si bien no es un ambiente realmente peligroso, la digitalización colabora de manera activa con todos los temas relacionados con seguridad laboral. Las soluciones de digitalización buscan promover un ambiente seguro para que los empleados trabajen y, aunque no forme parte del objetivo de este gemelo digital, existen simulaciones orientadas a optimizar la seguridad en el trabajo. En menor medida, se reducen las interacciones entre empleados y planta, por lo que los riesgos de accidente se reducen. Además, aunque no se haya mencionado directamente, si es necesario simular el trabajo de los operarios, esto se hará y se procurará ofrecer el ambiente de trabajo más seguro posible.



Figura 47. ODS Salud y bienestar

Trabajo decente y crecimiento económico

Uno de los objetivos de la automatización es reducir el número de trabajos repetitivos y repetitivos para añadir puestos de trabajo más estimulantes y necesarios. Este tipo de puestos de trabajo ofrecen, además, la posibilidad de formarse en sistemas nuevos y desconocidos y que pueden servir para el trasfondo profesional del empleado. Este proyecto pretende eliminar trabajos de micro gestión para formar operarios a nivel más alto, en análisis de datos u operación de producción.



Figura 48. ODS Trabajo decente y crecimiento económico

Además de puestos de trabajo más decentes y estimulantes, el objetivo principal del proyecto es implementar una forma de producción más optimizada, para crecer como compañía y mejorar el mercado local e incluso global si el proyecto se lleva a otras fábricas.

Industria, innovación e infraestructura

El objeto de trabajo del proyecto es, precisamente, una de las herramientas más innovadoras del momento. Este proyecto desarrollara una herramienta que está a la orden del día en industria y desarrollo y pretende utilizarla para estimular la economía de otras industrias similares.



Figura 49. ODS Industria, innovación e infraestructura

Además, este proyecto está sirviendo de proyecto piloto para futuros trabajos en el mismo tema, por lo que es una forma de investigar nuevas tecnologías, nuevas formas de trabajo para seguir creciendo e innovando en la industria.

Reducción de las desigualdades

Como parte de este proyecto, todos los operarios de la línea de embotellado de la fábrica serán formados en materias de digitalización y gestión de producción digital. Por tanto, este proyecto colabora en reducir las desigualdades debidas a falta de oportunidad de formación, para integrar a los trabajadores en un mundo cada vez más virtual. Además, la reducción de mano de obra de carácter físico para ser sustituido por necesidades de índole más intelectual permite el acceso a más puestos de trabajo a operarios con movilidad reducida u otras discapacidades para trabajar o acceder a la planta.



Figura 50. ODS Reducción de las desigualdades

Ciudades y comunidades sostenibles

Digitalización y sostenibilidad van mucho de la mano. Una oportunidad de digitalización suele ir acompañada de un proyecto de sostenibilidad, y este proyecto no es una excepción. La virtualización de la línea supone un progreso en sostenibilidad, ya que permite entre otras cosas, la integración de operarios de movilidad reducida al minimizar las necesidades físicas y estimular las intelectuales o integrar herramientas más modernas y eficientes al espacio de trabajo. Además, aunque en este proyecto no se desarrolle, sí que se deja la puerta abierta a realizar proyectos en un futuro para minimizar consumos y emisiones.



Figura 51. ODS ciudades y comunidades sostenibles

Producción y consumo responsables

Como productor de cerveza, con materia prima agrícola y altos consumos de agua, el cliente está especialmente interesado en este objetivo. Un gemelo digital orientado a la optimización de la producción funcionaría perfectamente en línea con este ODS. En el presente caso la relación no es directa, sin embargo sí que se controlará el consumo de agua en el lavado y aclarado de botellas, o de CO₂ en el llenado. Además, se busca



reducir la cantidad de etiquetas mal puestas o de botellas rotas por culpa del proceso en sí mismo, que colabora a la reducción de consumos de vidrio y etiquetas. El uso de botellas retornables es otra forma de consumo responsable, ya que el vidrio es un producto que se recicla muy bien pero se desecha muy mal, por lo que ya se está trabajando en este ODS actualmente. Por último, si bien no se ha puesto como objetivo de la herramienta por ahora, si que la escalabilidad del gemelo permitiría desarrollar más aplicaciones relacionadas con la minimización de consumos de recursos como electricidad o vapor.

Figura 52. ODS Producción y consumo responsables

Acción por el clima

Muy de la mano del objetivo anterior, la digitalización permite optimizar el uso de ciertos recursos que emiten muchas sustancias nocivas al medio ambiente. No se ha establecido como objetivo de este proyecto, pero la escalabilidad de la herramienta permitiría desarrollar aplicaciones de reducción de consumo de electricidad o de vapor, obtenido a partir de la combustión de ciertos elementos. Además, dentro de la producción de cerveza son especialmente interesantes las aplicaciones de reutilización de CO₂, por lo que sería interesante una aplicación orientada a este tipo de utilidades.



Figura 53. ODS Acción por el clima

Alianzas para lograr los objetivos

Este proyecto se terminará desarrollando con el cliente en colaboración con Siemens, que son dos grandes referentes en la industria. Entre los conocimientos digitales de Siemens y los de la industria cervecera y de envasado del cliente, se establece una alianza muy afín con el desarrollo sostenible, la innovación de la industria y otros objetivos mencionados anteriormente.



Figura 54. ODS Alianzas para lograr los objetivos.

Capítulo 6. Conclusiones y trabajo futuro

Conclusiones

La tendencia a la digitalización es un hecho innegable. Hasta hace no muchos años, era un lujo que se podían permitir únicamente las empresas con más recursos, sin embargo, a medida que se abaratan los dispositivos, progresa la tecnología, se vuelve de acceso más público etc. la digitalización y automatización de cualquier activo se acerca más al alcance de cualquier empresa o persona.

Si a esto se le añade la necesidad de ser cada vez más competitivo, reduciendo costes y tiempos de respuesta y prediciendo demanda, la digitalización de los activos deja de ser opcional para convertirse en una necesidad. La Industria 4.0 ha permitido a las empresas actualizarse y entrar en mercados hasta el momento imposibles, trabajando de forma deslocalizada, aprovechando todos los datos generados, minimizando mano de obra y, por tanto, error humano, la fábrica inteligente conduce, inevitablemente, a un futuro más práctico y optimizado.

Este proyecto tiene dos partes principales muy ligadas a toda esta tendencia a la optimización: en primer lugar, el análisis de la compañía para encontrar sus desventajas competitivas, en segundo lugar, el estudio para el desarrollo de una herramienta que dote de un principio de inteligencia a esa parte que carece de la capacidad de gestionar una producción mejor optimizada.

La primera parte, ha desvelado como un sistema de producción aparentemente funcional, y que incluso da unos beneficios importantes, siempre puede mejorarse. Se ha analizado el proceso de producción de cerveza, el proceso de envasado de cerveza y los consumos globales que tiene la fábrica. Se ha terminado concluyendo que, entre la topografía del terreno y la falta de digitalización, los costes de mantenimiento eran demasiado altos.

Por tanto, el proyecto pretende partir de una línea de embotellado de cerveza con demasiadas horas de mantenimiento, muchas de ellas no planeadas, y desarrollar algún tipo de herramienta (como dice el título, un gemelo digital) que busque reducir la cantidad de paradas que esta línea experimenta. Aprovechando la escalabilidad de un sistema de este tipo, se va a plantear que el mismo sistema ofrezca más salidas, para obtener mayor rendimiento. Estas salidas incluirán una predicción de la producción, estudio del ritmo de funcionamiento de las máquinas, según su estado, para establecer una línea más fluida mediante el posicionamiento estratégico de buffers, la posibilidad de probar formatos diferentes de manera virtual, para validar otras ideas.

La segunda parte busca estudiar el desarrollo de una herramienta que logre todos estos objetivos: el gemelo digital. Este gemelo digital estará basado en una simulación que se alimentará en tiempo real a partir de los PLC de la planta. Además de la simulación, se pretende desarrollar algoritmos en algunas de las máquinas más críticas, para reducir la cantidad de paradas de mantenimiento que necesitan. Estos algoritmos buscarían predecir cuándo una de estas máquinas necesitan mantenimiento, para realizar un plan de mantenimiento personalizado para cada máquina y basada en hechos analizados, no en una experiencia poco fiable.

Para el desarrollo de este gemelo digital se han estudiado varias posibilidades en términos de proveedores de software. Finalmente, se ha concluido que Siemens sería el mejor proveedor, ya que no solo ofrece un software, sino que es el mismo fabricante que los autómatas de la línea por lo que la interfaz sería más sencilla. Además, como proveedor de servicios de digitalización en varias industrias, entre ellas la de alimentación, se han ofrecido también a desarrollar la herramienta completa, desde el estudio previo para iniciar el diseño hasta la implementación y la formación final tras la puesta en marcha. Este servicio supondrá un coste superior en el desarrollo, pero garantiza la terminación en una serie de fechas declaradas y al coste indicado, además de un resultado aceptable.

Mediante el desarrollo de esta herramienta, se pueden reducir los costes de mala productividad en hasta un 50%, aumentando la eficiencia de la línea en un 1% sin necesidad de modificar la planta en absoluto, y hasta un 5% si se realizan pequeños cambios de

disposición en fábrica. Esto implica un proyecto con un tiempo de retorno poco superior a 2 años, teniendo en cuenta que uno de esos dos años se está desarrollando el proyecto en sí mismo.

Problemas encontrados

Los principales problemas encontrados durante el desarrollo del proyecto han sido:

- La falta de un acuerdo con el cliente. Cuando se desarrolla un proyecto de cara a realizar una oferta, todavía no existe un acuerdo entre el cliente y el desarrollador del proyecto. Esto ha sido un problema importante a lo largo del trabajo ya que no se ha podido realizar una etapa de recolección de datos bien hecha, sino que se han ido recogiendo datos de proyectos anteriores y haciendo reuniones con el cliente de vez en cuando. Además, la falta de una meta clara propuesta por el cliente ha generado la necesidad de cambiar el alcance del proyecto en varias ocasiones, por lo que su desarrollo se ha visto bastante estancado en ciertos momentos.
- La falta de información concreta. Dado que esto es una tecnología realmente innovadora, muchas empresas se la guardan como información confidencial, de cara a evitar plagios. Por tanto, la mayoría de las fuentes de información especializadas que se han consultado a lo largo de este proyecto ofrecían soluciones poco concretas. Además, dado que es una aplicación que puede servir en infinidad de industrias diferentes, con formas de aplicarse muy variadas, mucha de la información concreta que se encuentra no podía ser válido.

A esto se le suma el hecho de que el gemelo digital no es una tecnología consolidada, con una definición única y un esquema fijo de aplicación. No existe un tipo de software con unos pasos designados capaz de ejecutar un gemelo digital, sino que cada aplicación tiene sus propias peculiaridades y se puede desarrollar de formas muy diferentes. Esta es una de las características del gemelo digital que hacen que sea un activo tan complejo, que no hay un estándar de gemelos al que ceñirse para desarrollarlo, sino que cada uno es

diferente a los demás. Además, esto hace que sea más complicado ser capaz de hacer una aplicación escalable. A pesar de esta dificultad, las conversaciones con Siemens como proveedor han facilitado los aspectos más técnicos del proyecto.

- El exceso de información genérica. Ya se ha mencionado que no hay una definición concreta, y que esta herramienta se aplica a todas las industrias, no solo a fabricación. Esto hace que se genere una gran cantidad de información muy superficial, nada científica, acerca del gemelo. Es importante contrastar bien esta información, porque para un término tan poco definido muchas veces se contradice y puede ser complicado realizar un trabajo consistente. Además, las fuentes de información tan divulgativa no daban los datos lo suficientemente académicos como para ser incluidos en este estudio, por lo que hubo que descartar muchas fuentes de información.
- La falta de un activo físico con el que interactuar. A nivel un poco más personal, el carácter teórico, casi filosófico de este proyecto ha resultado un pequeño obstáculo. Sin un objeto físico con el que interactuar, al que observar, las divagaciones se quedan en meras teorías filosóficas sin confirmar, o que se pueden confirmar únicamente en base a trabajos de otros investigadores. Esto ha supuesto un reto en ciertas etapas del proyecto, sobre todo aquellas en las que el estancamiento era más patente.

Trabajo futuro

A lo largo del proyecto ya se han ido mencionando trabajos que se podrían desarrollar tras la finalización de este proyecto. Los más importantes serían:

- Por supuesto, el primer trabajo futuro sería la implementación del gemelo digital aquí estudiado, siguiendo todos los pasos del apartado Desarrollo del gemelo digital, desde la auditoría hasta la puesta en marcha y las pruebas.
- Una vez implementado el gemelo, éste ofrecerá pequeñas optimizaciones de las que la fábrica podría sacar provecho, y mejorar su producción. El primer

paso tras obtener estos informes sería llevar a cabo estas reformas para asegurar que se saca el máximo partido de la nueva herramienta.

- Tras probar la herramienta durante unos meses, o años, se podría hacer una mejora para desarrollar más aplicaciones. Lo bueno de tener una planta digitalizada, es que esa digitalización se puede replicar de forma prácticamente gratuita. En este estudio, se ha dado mucha importancia a la escalabilidad del gemelo ya que, si los elementos virtuales se desarrollan con la suficiente precisión, se podría intentar realizar la toma de más datos. Una vez se genera una interfaz, es cuestión de leer esos datos. Otras aplicaciones serían la optimización del consumo de servicios como electricidad o vapor, la automatización de los cambios de formato etc.
- Ampliar la superficie digitalizada. No se ha querido digitalizar más que la línea de envasado de botellas, sin embargo, con la experiencia de la primera línea, el resto de las de envasado son relativamente parecidas, sobre todo la de latas. Finalmente, se procedería con la digitalización de la producción y, con la fábrica entera digitalizada, se podría sacar mucho más partido a toda la información generada.

Capítulo 7. Bibliografía

- [1] C. Vadillo Conesa, «www.riunet.upv.es,» Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, 2016.
- [2] Aspromec, «Aspromec,» 05 Marzo 2019. [En línea]. Available: aspromec.org. [Último acceso: 06 Mayo 2021].
- [3] R. Schmidt, M. Möhring y R.-C. Härting, «Industry 4.0 -Potentials for Creating Smart Products: Empirical Research Results,» de *BIS 2015 18th International Conference on Business Information Systems*, Poznan, Polonia, 2015.
- [4] C. Zhang y Y. Chen, «A Review of Research Relevant to the Emerging Industry Trends: Industry 4.0, IoT, Blockchain, and Business Analytics,» *Journal of Industrial Integration and Management*, vol. V, nº 1, pp. 165-180, 2020.
- [5] R. Drath y A. Horch, «Industrie 4.0: Hit or Hype?,» *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 8, nº 2, pp. 56-58, 18 Junio 2014.
- [6] H. Gill, «From Vision to Reality: Cyber-Physical Systems,» de *HCSS National Workshop on New Research Directions for High Confidence Transportation CPS: Automotive, Aviation, and Rail*, 2008.
- [7] Deloitte, «www.deloitte.com,» 24 10 2014. [En línea]. Available: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ch/Documents/manufacturing/ch-en-manufacturing-industry-4-0-24102014.pdf>. [Último acceso: 13 05 2021].
- [8] M. N. Sishi y A. Telukdarie, «Implementation of Industry 4.0 technologies in the mining industry: A case study,» de *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Singapore, 2017.
- [9] M. Russmann, P. Gerbert, M. Waldner, P. Engel, M. Harnisch y J. Justus, «www.bcg.com,» BCG, 09 04 2015. [En línea]. Available: https://www.bcg.com/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries. [Último acceso: 13 05 2021].

- [10] I. Ali, A. Arslan, K. Zaheer y S. Y. Tarba, «The Role of Industry 4.0 Technologies in Mitigating Supply Chain Disruption: Empirical Evidence From the Australian Food Processing Industry,» *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. Early Access, pp. 1-11, 2021.
- [11] N. W. Grady, J. A. Payne y H. Parker, «Agile big data analytics: AnalyticsOps for data science,» de *2017 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, Boston, 2017.
- [12] P. Stone, «Efficient Robot Skill Learning: grounded Simulation Learning and Imitation Learning from Observation,» de *2021 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions*, Santa María da Feira, 2021.
- [13] L. Wallis y M. Paich, «Integrating artificial intelligence with anylogic simulation,» de *2017 Winter Simulation Conference (WSC)*, Las Vegas, 2017.
- [14] C. Mbohwa y K. S. Anoop, «Performance Assessment of Companies Under IIoT Architectures: Application of Grey Relational Analysis Technique,» de *2018 International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*, Coimbatore, India, 2018.
- [15] F. A. Barrio Juárez, «Ciberseguridad en un entorno de Internet de las Cosas Industrial (IIoT),» de *2019 8th International Conference On Software Process Improvements (CIMPS)*, León, Mexico, 2019.
- [16] V. Todorovic, N. Milic y M. Lazarevic, «Augmented Reality in Food Production traceability - use case,» de *IEEE EUROCON 2019 - 18th International Conference on Smart Technologies*, Novi Sad, Serbia, 2019.
- [17] M. Á. Rojo, «deloitte.com,» Deloitte, [En línea]. Available: <https://www2.deloitte.com/es/es/pages/technology/articles/blockchain-vision-tecnologica.html>. [Último acceso: 10 07 2021].
- [18] Siemens, «www.plm.automation.siemens.com,» Siemens, [En línea]. Available: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/our-story/glossary/digital-twin/24465>. [Último acceso: 13 05 2021].
- [19] General Electric, «ge.com,» General Electric, [En línea]. Available: <https://www.ge.com/digital/applications/digital-twin>. [Último acceso: 10 07 2021].
- [20] IBM, «ibm.com,» IBM, [En línea]. Available: <https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin>. [Último acceso: 10 07 2021].

- [21] K. M. Alam, A. Sopena y A. El Saddik, «Design and Development of a Cloud Based Cyber-Physical Architecture for the Internet of Things,» de *2015 IEEE International Symposium on Multimedia (ISM)*, Miami, USA, 2015.
- [22] W. Xiaolei, «Research on the Application of BIM Concept and BIM Software in Architectural Design,» de *2018 International Conference on Engineering Simulation and Intelligent Control (ESAIC)*, Hunan, China, 2018.
- [23] M. Alahmad, W. Nader, A. Brumbaugh, Y. Cho, S. Ci, H. Sharif, J. Shi y J. Neal, «The “BIM's 4D+” dimension: Real time energy monitoring,» de *2011 IEEE GCC Conference and Exhibition (GCC)*, Dubai, UAE, 2011.
- [24] A. Luque, M. Estela Peralta, A. de las Heras y A. Córdoba, «State of the Industry 4.0 in the Andalusian food sector,» *Procedia Manufacturing*, vol. 13, pp. 1199-1205, 2017.
- [25] S. Otles y A. Sakalli, «15 - Industry 4.0: The Smart Factory of the Future in Beverage Industry,» *Production and Management of Beverages*, vol. 1, pp. 439-469, 2019.
- [26] P. Köbnick, C. Velu y D. McFarlane, «Preparing for Industry 4.0: digital business model innovation in the food and beverage industry,» *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, vol. 13, nº 1, pp. 59-89, 2020.
- [27] N. Z. Noor Hasnan y Y. M. Yusof, «Short review: Application Areas of Industry 4.0 Technologies in Food Processing Sector,» de *2018 IEEE Student Conference on Research and Development (SCORed)*, Selangor, Malasia, 2018.
- [28] G. A. Gericke, R. B. Kuriakose, H. J. Vermaak y O. Mardsen, «Design of Digital Twins for Optimization of a Water Bottling Plant,» de *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Lisboa, Portugal, 2019.
- [29] T. Weaver, «Institution of Mechanical Engineers,» IMECHE, 19 Febrero 2021. [En línea]. Available: <https://www.imeche.org/news/news-article/industry-4.0-reduces-beer-going-down-the-drain-at-craft-brewery>. [Último acceso: 14 05 2021].
- [30] Ab Inbev, «Case Study: How a Large Brewery Uses Machine Learning for Preventive Maintenance (Cloud Next '18),» Google Cloud Tech, 2018.
- [31] R. Ellen y M. Lees, «Reducing the Configuration Burden in Automation Systems - Case Study in a Modern Brewery,» de *2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Vienna, Austria, 2020.

- [32] J. Blackman, «enterprise iot insights,» 20 08 2018. [En línea]. Available: <https://enterpriseiotinsights.com/20180820/data-analytics/beer-cars-robots-smart-use-cases>. [Último acceso: 10 07 2021].
- [33] M. Gisbert Verdú, «riunet.upv.es,» 2016. [En línea]. Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/73275/Dise%C3%B1o%20y%20puesta%20en%20marcha%20de%20una%20planta%20elaboradora%20de%20cerveza.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.
- [34] H. Arsham, «ubalt.edu,» [En línea]. Available: <http://home.ubalt.edu/ntsbarsh/simulation/sim.htm>. [Último acceso: 10 07 2021].
- [35] T. W. Mastaglio, «Enterprise simulations: theoretical foundations and a practical perspective,» de *WSC'99. 1999 Winter Simulation Conference Proceedings. 'Simulation - A Bridge to the Future' (Cat. No.99CH37038)*, Phoenix, USA, 1999.
- [36] L. Guo, M. Wang, C. Ruan, T. T. Lin, C. Yang, L. Wei, C. Geng, C. Xing y Y. Xiao, «A Cloud Simulation Based Environment for Multi-disciplinary,» de *2017 IEEE 21st International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD)*, Wellington, Nueva Zelanda, 2017.
- [37] H. Asham, «Input parameters to achieve target performance in stochastic systems: a simulation-based approach,» *Inverse Problems in Engineering* , vol. 7, nº 4, pp. 363-384, 2007.
- [38] J. Lee, B. Bagheri y H. -A. Kao, «A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems,» *Manufacturing Letters*, vol. III, pp. 18-23, 2015.
- [39] D. Guinard, M. Fischer y V. Trifa, «Sharing using social networks in a composable web of things,» de *2010 8th IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops)*, Mannheim, Alemania, 2010.
- [40] H. Ning y Z. Wang, «Future Internet of Things Architecture: Like Mankind Neural System or Social Organization Framework?,» *IEEE Communications Letters*, vol. 15, nº 4, pp. 461-463, 2011.
- [41] A. El Saddik y K. M. Alam, «C2PS: A Digital Twin Architecture Reference Model for the Cloud-Based Cyber-Physical Systems,» *IEEE Access*, vol. V, pp. 2050-2062, 23 Enero 2017.
- [42] H. Abie, «Cognitive Cybersecurity for CPS-IoT Enabled Healthcare Ecosystems,» de *2019 13th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT)*, Oslo, Noruega, 2019.

- [43] L. Mailliet-Contoz, E. Michel, M. Diaz Nava, P.-E. Brun, K. Leprêtre y G. Massot, «End-to-end security validation of IoT systems based on digital twins of end-devices,» de *2020 Global Internet of Things Summit (GloTS)*, Dublin, Irlanda, 2020.
- [44] J. Vachálek, L. Bartalsky, O. Rovny, D. Sisimisova, M. Morhác y M. Loksic, «The digital twin of an industrial production line within the industry 4.0 concept,» de *2017 21st International Conference on Process Control (PC)*, Strbske Pleaso, Eslovaquia, 2017.

Anexo I. Proceso y envasado

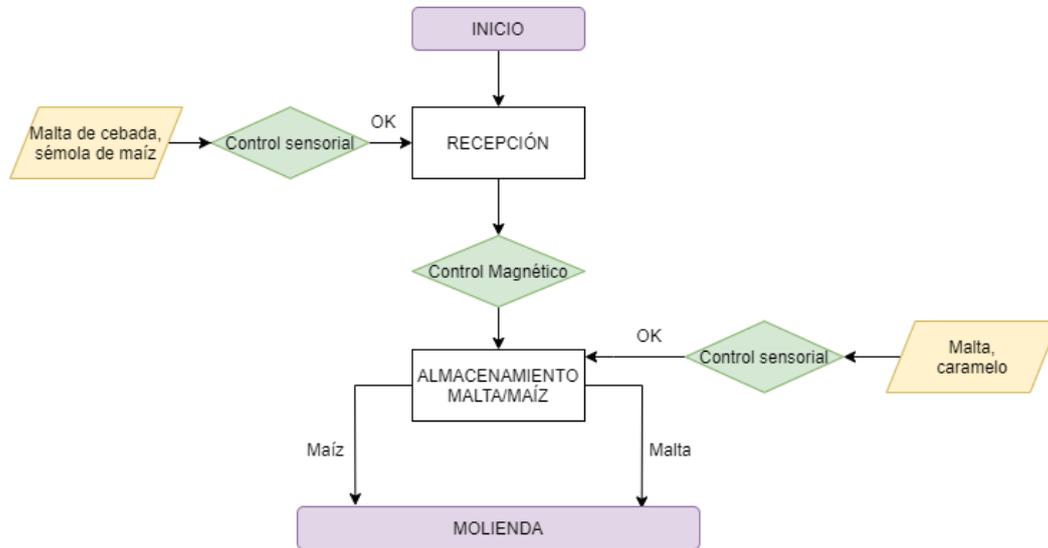


Figura 55. Almacenamiento

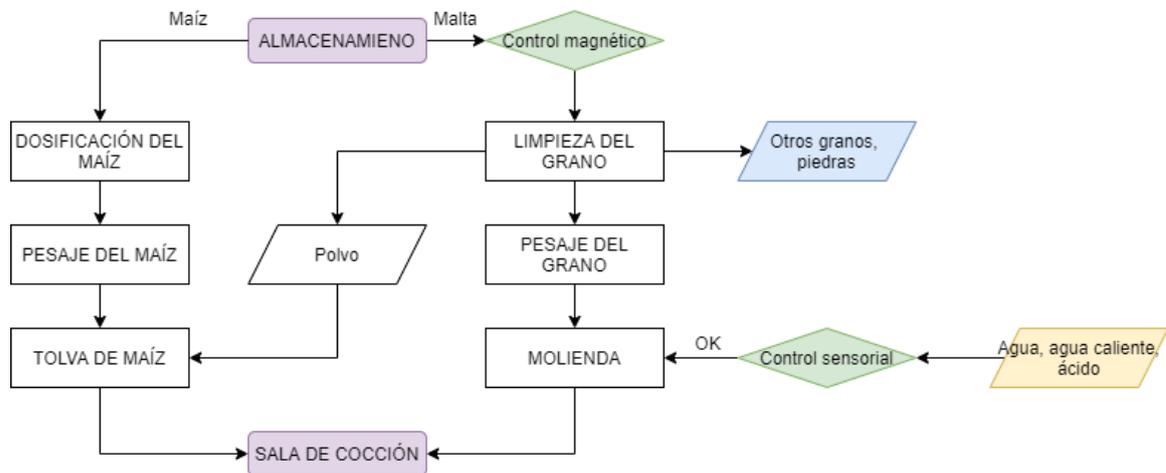


Figura 56. Molienda

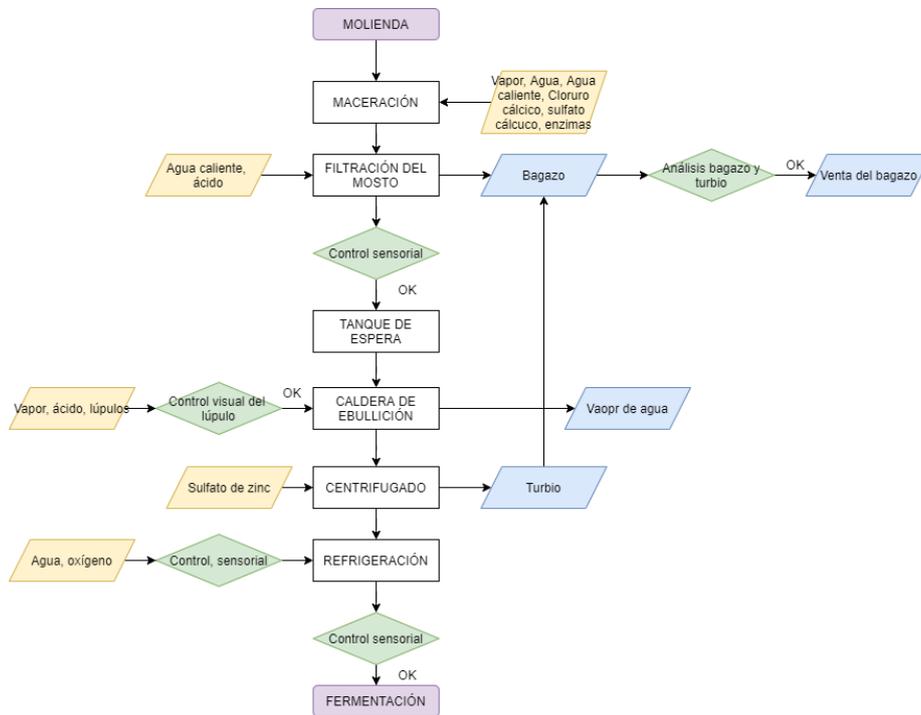


Figura 57. Sala de cocción

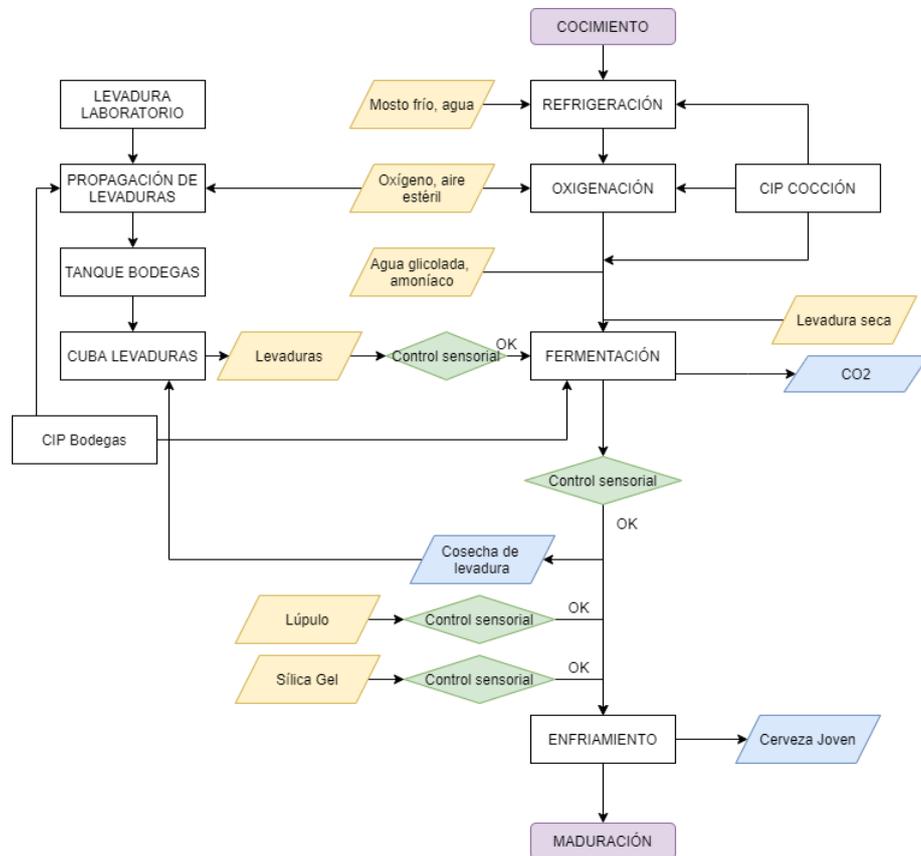


Figura 58. Fermentación

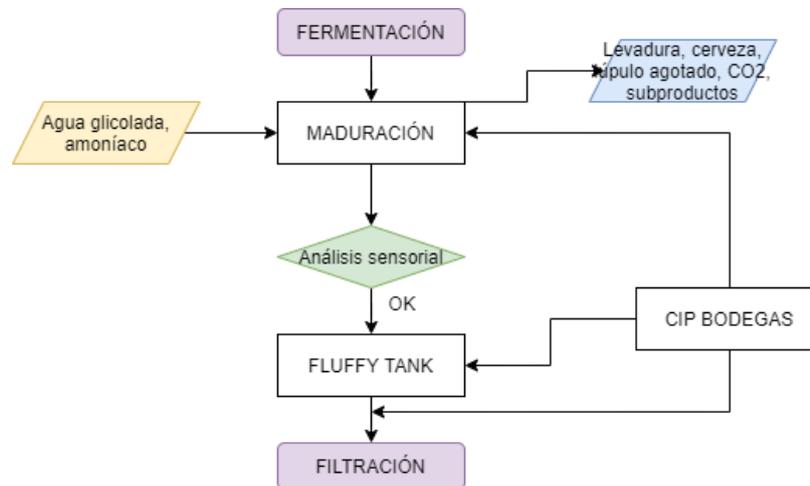


Figura 59. Maduración

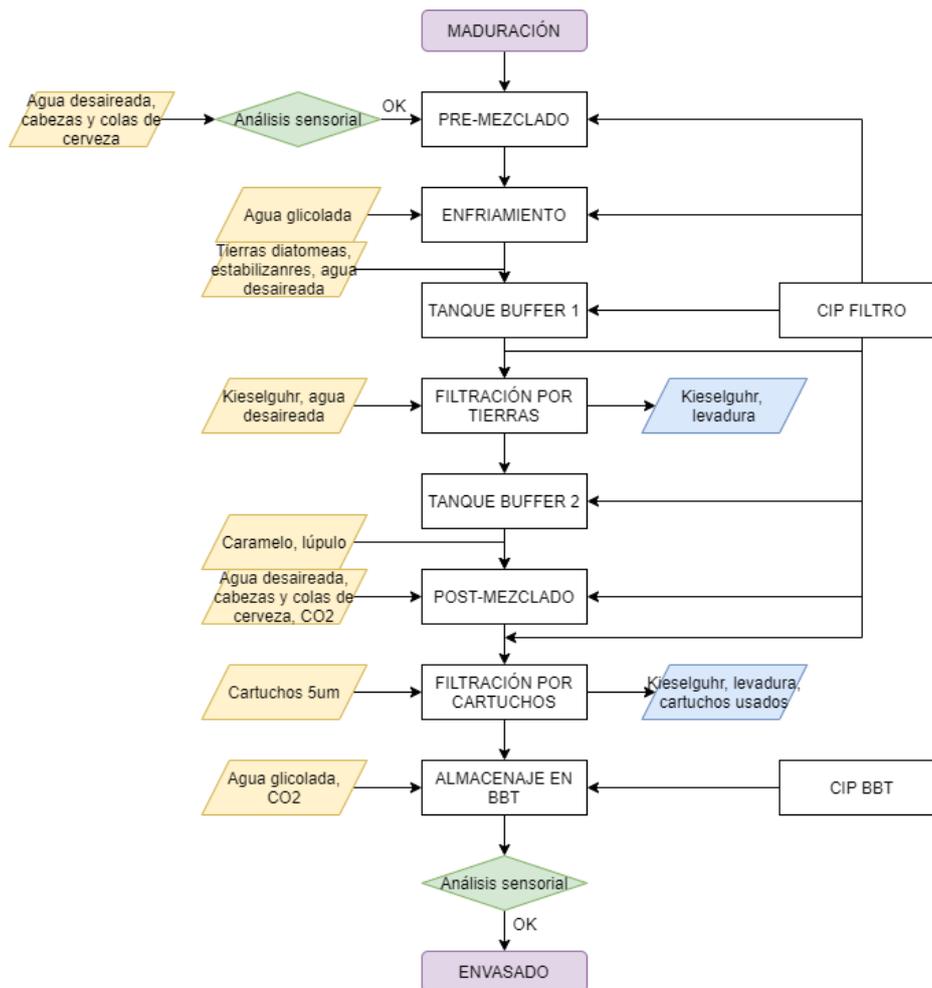


Figura 60. Filtración y BBT

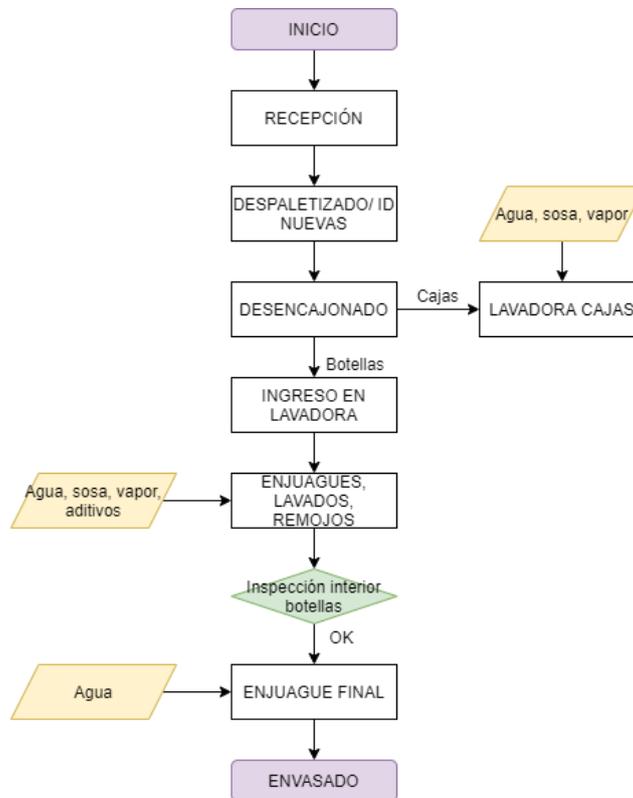


Figura 61. Preparación de botellas RT

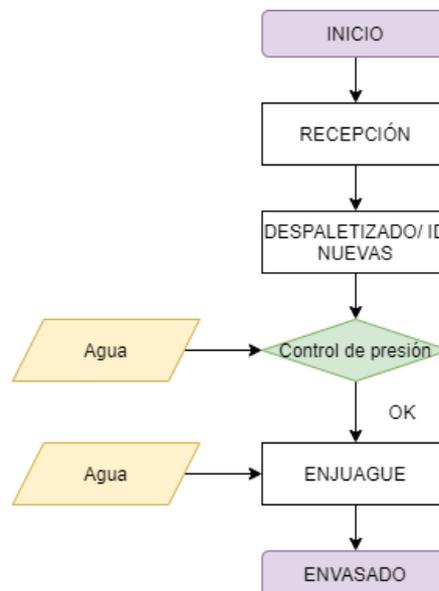


Figura 62. Preparación de botellas NRT

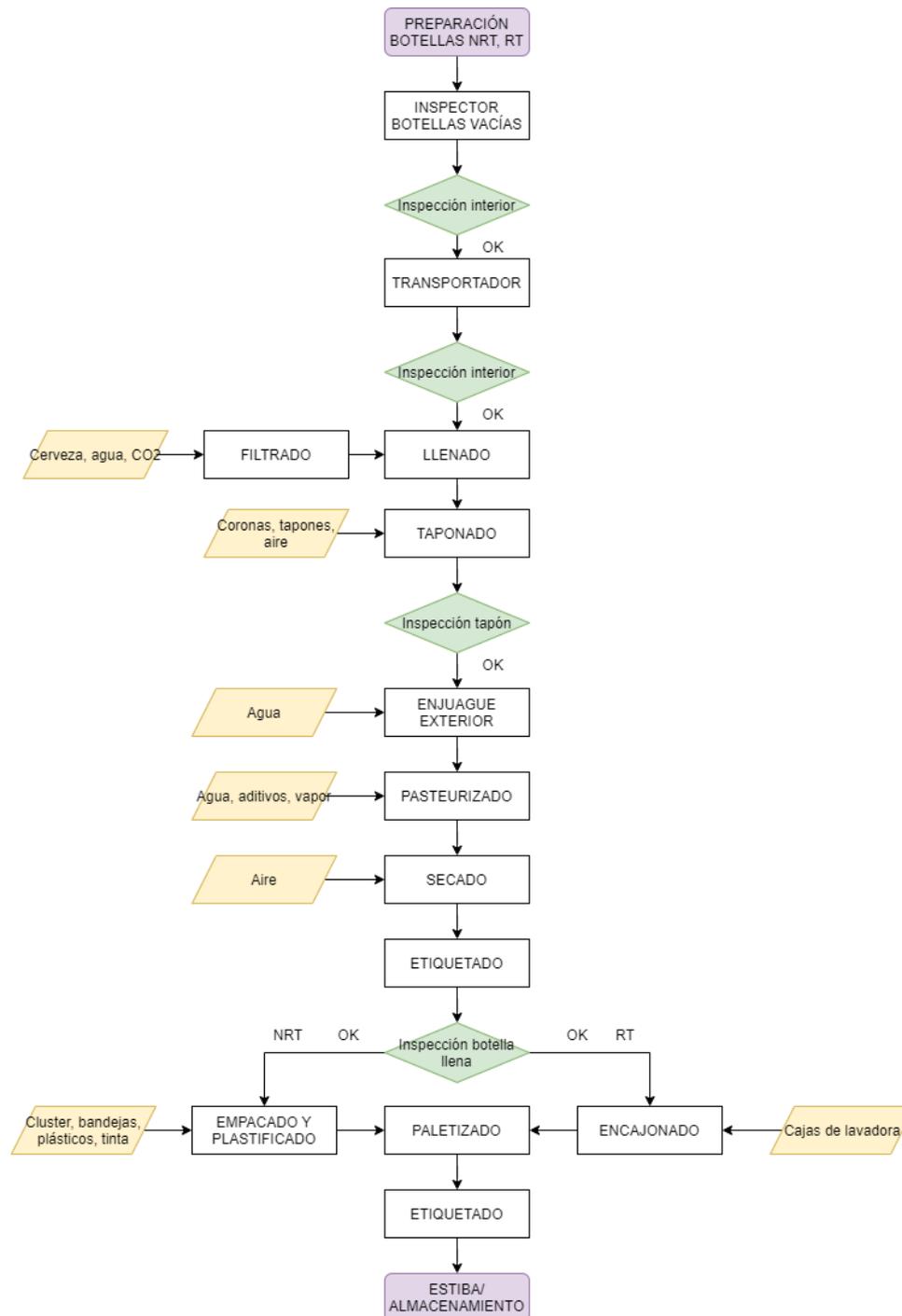


Figura 63. Llenado de botellas

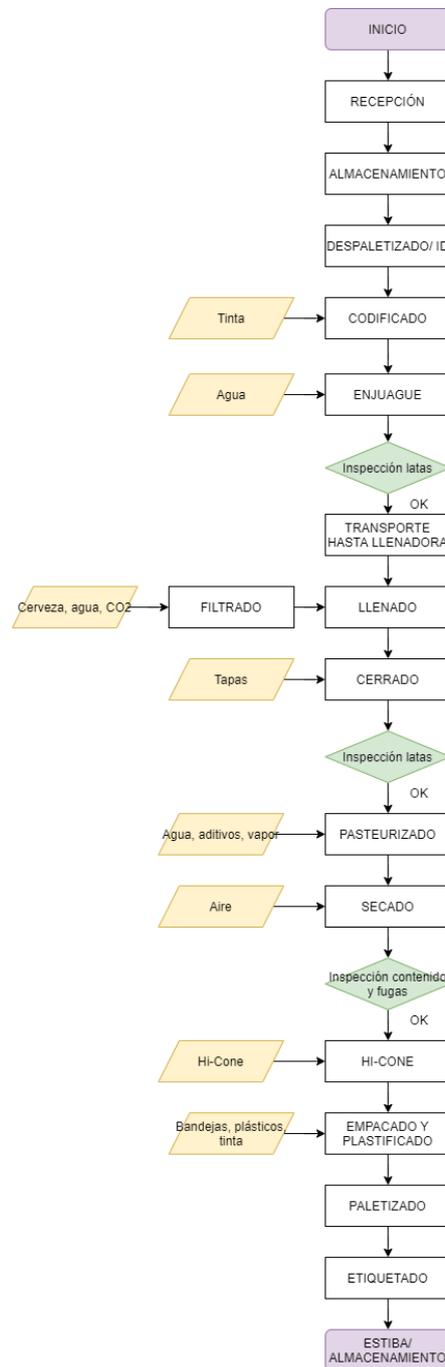


Figura 64. Línea de latas

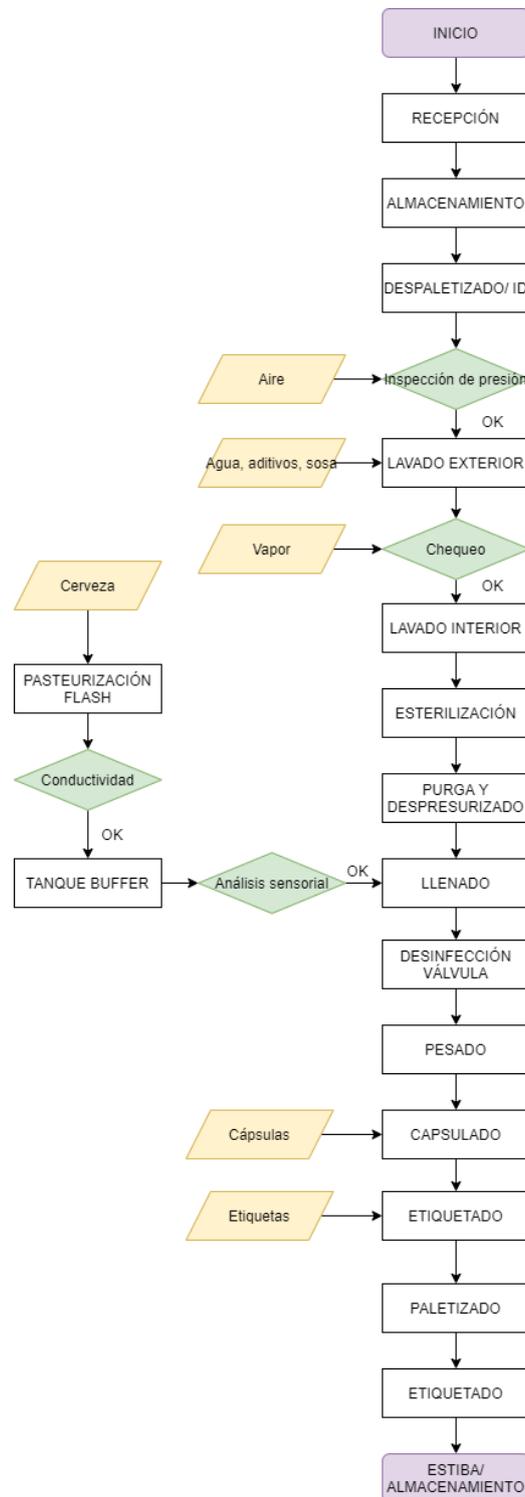


Figura 65. Línea de barriles