



Universidad de Oviedo

Memoria del Trabajo Fin de Máster realizado por

**Wílmар Dewin Rodríguez Moreno**

para la obtención del título de

Máster en Ingeniería de Automatización e Informática Industrial

**Integración de un sistema de control de procesos tipo  
gemelo digital para industrias agroalimentarias.**

Tutores Académicos

Oscar Jesús Cosido Cobos

José María Enguita González

Tutor Empresa

Olaya Muñoz Azcarate (UpIntelligence)

JULIO de 2022

# Tabla de Contenido

<b>TABLA DE CONTENIDO</b>	<b>2</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>4</b>
<b>1.1. OBJETIVO DEL PROYECTO</b>	<b>5</b>
1.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
<b>1.2. JUSTIFICACIÓN</b>	<b>6</b>
<b>1.3. ALCANCE</b>	<b>7</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>8</b>
<b>2.1. LA FABRICACIÓN DE EMBUTIDOS TRADICIONALES</b>	<b>8</b>
2.1.1. EL PROCESO DE MADURACIÓN DE EMBUTIDOS	9
2.1.2. LA EVALUACIÓN Y EL CONTROL DE CALIDAD EN LA FABRICACIÓN DE EMBUTIDOS TRADICIONALES	11
<b>2.2. SISTEMAS INDUSTRIALES Y EL INTERNET DE LAS COSAS IIOT</b>	<b>12</b>
2.2.1. INDUSTRIA 4.0	12
2.2.2. EL MODELO RAMI 4.0	13
2.2.3. IOT: DISPOSITIVOS INTELIGENTES COMO BASE DEL DESARROLLO INDUSTRIAL.	14
2.2.4. SISTEMAS DE COMUNICACIÓN EN IIOT	16
2.2.5. ASPECTOS DE SEGURIDAD EN SISTEMAS IIOT	18
2.2.6. LOS SISTEMAS DE INTEGRACIÓN DE IIOT	20
<b>3. DESCRIPCIÓN DE SISTEMAS</b>	<b>21</b>
<b>3.1. SISTEMA IOT</b>	<b>22</b>
3.1.1. APLICACIÓN MIDDLEWARE UMB GATEWAY	24
<b>3.2. SISTEMA DE TRAZABILIDAD</b>	<b>27</b>
3.2.1. GESTIÓN DE RECETAS	28
3.2.2. GESTIÓN DE MATERIAS PRIMAS	29
3.2.3. ADMINISTRADOR DE MEZCLAS	31
3.2.4. INTERACCIÓN CON EL PROCESO DE AHUMADO	33
3.2.5. MONITOR DE PROCESO	35
3.2.6. FUNCIONALIDADES COMPLEMENTARIAS	35
3.2.7. MÓDULO DE MONITOREO Y CONTROL	36
<b>3.3. API DE INTEGRACIÓN</b>	<b>41</b>
3.3.1. EL PARADIGMA REST	42
3.3.2. ENDPOINTS	43
3.3.3. MODELO DE DATOS	48
<b>4. ANÁLISIS DE DATOS DEL PROCESO DE AHUMADO</b>	<b>50</b>
<b>4.1. SELECCIÓN DE LAS VARIABLES DE ESTUDIO</b>	<b>50</b>

<b>4.2. ADQUISICIÓN DE DATOS</b>	<b>51</b>
<b>4.3. LIMPIEZA DE DATOS</b>	<b>52</b>
<b>4.4. ANÁLISIS DE DATOS DEL PROCESO</b>	<b>54</b>
4.4.1. ANÁLISIS DE TEMPERATURA	54
4.4.2. EVALUACIÓN DE LA TEMPERATURA DE PRODUCTO	58
4.4.3. ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD DEL AGUA	58
4.4.4. ANÁLISIS DE PH	60
4.4.5. EVOLUCIÓN CONJUNTA DE AW – PH	61
4.4.6. ANÁLISIS DISPERSIÓN DE LA ACTIVIDAD DEL AGUA (AW) Y PH	62
4.4.7. ANÁLISIS DE HUMEDAD	64
<b>5. PLANIFICACIÓN</b>	<b>67</b>
<b>5.1. PROGRAMACIÓN DE TAREAS</b>	<b>67</b>
<b>5.2. PRESUPUESTO ESTIMADO</b>	<b>67</b>
<b>6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS</b>	<b>69</b>
<b>7. REFERENCIAS</b>	<b>70</b>

## 1. Introducción

La producción de embutidos cárnicos tradicionales en Asturias se realiza generalmente por el método de ahumado en atmosfera controlada; el cual se realiza una vez hecha la mezcla de carnes y otros ingredientes. El ahumado produce en el producto una conservación natural por largos periodos de tiempo incluso cuando se mantiene a temperatura ambiente. Diferentes estudios han demostrado que el ahumado o secado ambiental ayuda al control de organismos patógenos, e investigaciones en curso buscan mejorar la productividad (Duma-Kocan P, 2020). u ofrecer productos de mayor calidad y seguridad para los consumidores (Bhuyan, 2018)

El estado de maduración de los embutidos es la variable más importante que los fabricantes tienen en cuenta en la ejecución de su producción, este concepto va ligado a la idoneidad de consumo del producto y la garantía optima de durabilidad de este, en condiciones de almacenamiento estándar, que incluyen temperatura de conservación cercana a los 20 grados y una humedad relativa inferior a 70% sin condensación. Sin embargo, la determinación del estado de maduración se realiza en la actualidad por métodos subjetivos, dependientes de la habilidad de los operarios de la fábrica y bajo la evaluación de algunas características morfológicas de los embutidos como el color, dureza y humedad.

Con el ánimo de ofrecer una mayor precisión en la detección del estado de maduración optimo en los embutidos de fabricación tradicional, El proyecto DT-OPTYDRY de S3FOOD, (avalado por fondos del plan *Horizon 2020* de la Unión Europea) y del cual hace parte este trabajo fin de master, ha propuesto la realización de un gemelo digital del sistema de maduración, que estudie los cambios de variables objetivas medibles de forma física a través de sensores montados en la fábrica y en los productos procesados, y a su vez tenga en cuenta las determinaciones subjetivas de maduración realizada por los operarios actuales. El modelo resultante de gemelo digital, basado en técnicas de inteligencia artificial pretende obtener un comportamiento predecible del estado de maduración de los embutidos procesados en el proceso de ahumado, a partir del análisis de datos, obtenidos con la ayuda de un software de procesamiento y almacenado de señales desde sensores en una infraestructura tipo internet de las cosas (IoT).

Este proyecto hace parte integral de las actividades y tareas del proyecto DT-OPTIDRY de S3FOOD, ejecutado por UpIntelligence S.L, que tiene como objetivo la implementación de un gemelo digital para la industria de embutidos tradicionales en una fábrica asturiana. S3Food es un proyecto que busca acelerar proyectos de digitalización en empresas agroalimentarias en la unión europea, promoviendo la implementación de sistemas y sensores inteligentes en la producción agrícola y transformación de alimentos, promoviendo con ello el desarrollo y mejorando la productividad del sector. S3Food ha recibido fondos de la Unión Europea con el acuerdo 824769-S3FOOD bajo el programa *Horzon 2020*. La duración total del proyecto DT-OPTIDRY es de 14 meses y ha sido en él participan 3 actores: Up Intelligence S.L como empresa integradora, Universidad de Oviedo como colaborador para el desarrollo de algoritmos y Embutidos Maybe S.L. como fábrica de alimentos el proyecto fue dirigido por la Dra: Olaya Muñoz Azcarate de UpIntelligence.

## 1.1. Objetivo del proyecto

Modelar e implementar un sistema de seguimiento IoT, capaz de recoger las variables ambientales y de producción necesarias para el funcionamiento continuo de un gemelo digital que permita el seguimiento y mejora en el control del proceso de ahumado en la producción de embutidos tradicionales.

### 1.1.1. Objetivos específicos

- Analizar los datos y señales del proceso de ahumado en diferentes producciones y perfiles de proceso para validar las variables de entrada de un modelo de sistema de producción primario del proceso de ahumado, con la suficiente robustez técnica para implementar un gemelo digital, que permita el seguimiento y mejora del control en la producción de embutidos.
- Integrar medidores de variables de proceso de distintos tipos en un solo sistema IoT, este a su vez debe integrarse con el sistema de seguimiento, específicamente el módulo de logística de producción de ahumado; recogiendo de esta manera, toda la información importante sobre las producciones de ahumado realizadas. Dicha integración debe tener en cuenta la posible incorporación de otras etapas de producción y servir de plataforma para la creación del posible desarrollo futuro de un sistema de información tipo MES aplicado a empresas de fabricación de embutidos tradicionales.
- Construir una API de control de sistema habilitada con comunicación segura, que permita comunicar y controlar los módulos del sistema: el monitor de control y seguimiento, el sistema IoT y la interfaz gráfica de la aplicación de trazabilidad.

## 1.2. Justificación

Las empresas de fabricación de alimentos tienen grandes retos económicos y productivos para competir en mercados protagonizados por actores globales, en especial para pequeñas y medianas empresas con métodos de elaboración tradicionales (ANICE, 2021). Algunos factores que juegan en contra de su desarrollo y sostenibilidad son: el pequeño tamaño del mercado regional; la relativa alta necesidad de mano de obra para los procesos de fabricación, y, el retraso que históricamente la industria alimenticia ha tenido para la adopción de tecnologías de digitalización o la implementación de sistemas informáticos, incluyendo sistemas ciberfísicos y de automatización (Ministerio de Agricultura, 2021).

Sin embargo, con el objetivo de perseguir beneficios como las mejoras de productividad, ampliación de mercados y con el apoyo de ambiciosas políticas públicas (Ministerio de Agricultura, 2021), en conjunto con la explosión del desarrollo de dispositivos y sistemas IoT de bajo coste, ahora es posible integrar sistemas con los que la productividad mejore, se ofrezca un mejor producto para los consumidores y se consolide la producción de productos artesanos, tradicionales y sostenibles, en una economía regional que es de gran importancia e interés para la sociedad Asturiana y también Europea.

En la fabricación de embutidos tradicionales, el subproceso más importante para lograr un producto seguro en términos fitosanitarios es el ahumado (Bhuyan, 2018). El ahumado está íntimamente influenciado por factores ambientales como la humedad relativa y la temperatura de la cámara (Duma-Kocan P, 2020), lo cual hace de él un proceso de gran variabilidad y difícil análisis, en el que la experiencia de los operarios es extremadamente valiosa para la generación de un buen producto. Los procesos de ahumado que usan la técnica tradicional y control manual tienen resultados fiables (Yin X, 2021), pero con grandes riesgos de mantenimiento de la calidad, una repetitividad inestable, y baja escalabilidad-calidad de la información recopilada.

En términos generales el sistema actual de control y seguimiento de la producción es incompatible con los criterios de calidad para el registro y estudio de datos para la inteligencia de negocios y los resultados de los registros manuales son de limitado impacto en una dinámica de fabricación con volúmenes variables de demanda, como la experimentada por la fábrica durante los últimos años. Es por ello que la solución de un gemelo digital, que permita el análisis cuantitativo del proceso de ahumado se hace imprescindible para mejorar la productividad, mitigar o conocer los riesgos de mercado asociados a un producto de baja calidad (sabor, textura, olor y color), y en enfocar los esfuerzos de seguimiento de producción actuales, con gran demanda de mano de obra humana, hacia procesos que necesiten de las habilidades humanas y una dedicación más personalizada como la investigación y mejora de producto, el control progresivo de la calidad de producto, e incluso las labores de estudio y explotación del mercado. Todo con el objetivo final de aumentar el consumo y demanda de los productos fabricados (y de otros posibles a desarrollar con el mismo sistema de producción) en el mercado regional y en otras locaciones de Europa o el exterior.

Otra de los grandes incentivos para el estudio del comportamiento del proceso de ahumado tiene que ver con el control asistido de la calidad de producto, debido a la estrecha relación entre las condiciones de ahumado y la durabilidad e idoneidad (sabor textura y calidad general) del producto embutido final (Yin X, 2021). Con el gemelo digital la correlación entre calidad y optimización de variables de producción espera llegar a una convergencia óptima, especialmente en la humedad relativa máxima y las curvas de temperatura y humo demandado.

### 1.3. Alcance

Este trabajo fin de máster se enfocará en el desarrollo de un sistema IoT para la monitorización y control de variables de proceso en una fábrica de embutidos tradicionales, específicamente detallando la implementación en el subproceso de ahumado. Todas las tareas desarrolladas hacen parte integral del desarrollo del gemelo digital para el proyecto DT-OPTIDRY de F3Food.

Este fin se sintetizará con la construcción de una aplicación que engloba 3 aspectos fundamentales del proyecto DT-OPTYDRY:

- Infraestructura IoT: se realizará el diseño y descripción funcional de la infraestructura de conectividad necesaria para garantizar el funcionamiento continuo y el aprendizaje progresivo del gemelo digital, trayendo información desde sensores inteligentes conectados por diferentes protocolos de comunicación.
- API de conectividad: se diseñará e implementará una API, necesaria para centralizar el tráfico y almacenamiento de datos y ejecutar de forma organizada el control sobre la configuración del sistema.
- Aplicación de trazabilidad: así como brindar la lógica de funcionamiento que es usada por la aplicación web que realiza la configuración del sistema y permite llevar a cabo la trazabilidad de producto en la fábrica.

Esta aplicación informática, realizará la interconexión de sistemas, y de cara al usuario facilitará el seguimiento de las producciones de ahumado con fines estadísticos y de seguimiento de la calidad, incluyendo la disponibilidad y consulta de mediciones organizadas de los sensores en línea y otras mediciones muestrales en cada lote de ahumado.

Como parte complementaria a la aplicación y haciendo parte del análisis de datos para el funcionamiento del gemelo digital, este trabajo también incluirá:

- Preparación de datos: brindando las pautas para la preparación de las distintas señales de procesado y otras tomas discretas, y las transformaciones necesarias para facilitar el análisis de datos.
- Validación de Variables de Proceso: se realizará un análisis de factibilidad e idoneidad de uso por parte de las variables de proceso disponibles en la fábrica y las obtenidas a través de los equipos adquiridos a través del proyecto DT-OPTIDRY; buscando aquellas que realicen una descripción óptima del proceso de ahumado y que sirvan como entradas para los algoritmos de aprendizaje automático del gemelo digital.

## 2. Marco Teórico

### 2.1. La fabricación de embutidos tradicionales

El proceso de fabricación de embutidos es uno de los procesos de transformación de alimentos históricamente más explotados en esta industria. Si bien la fabricación de embutidos de tipo industrial, fiambres y embutidos tradicionales tienen algunos aspectos diferenciales, los principios de transformación y las etapas de proceso son equiparables y comparten un orden secuencial: en los tres casos aparece un comienzo por la selección y corte de las carnes, la condimentación, el embutido propiamente dicho; luego los procesos de conservación (cocido, deshidratado o ahumado), para terminar con los procesos de empaque y logística. En el caso particular de la fábrica de embutidos tradicionales evaluada, se realiza curado por ahumado, que ha sido históricamente usado por las comunidades asturianas y en muchas regiones en que la humedad del aire no permite un deshidratado efectivo del producto.

- Mezclado de materias primas: en este proceso distintos tipos de carne, especias y colorantes son molidos y añadidos a una mezcla ligeramente uniforme por un proceso de mezcla industrial, como particularidades se tiene que es el único proceso en el cual se adicionan materias primas consumibles al producto, y que su entorno de fabricación cuenta con estrictas normas de higiene.
- Embutido: en el embutido se toma la mezcla y se añade dentro de tripa animal o tela sintética de origen vegetal, formando los chorizos salchichas o embutidos con el diámetro requerido por el tipo de producto. Es un proceso rápido una vez finaliza la mezcla y se realiza con maquinaria de automatización básica.
- Ahumado: una vez listas las ristras de chorizos (tiras de varios chorizos unidos longitudinalmente), estas son acomodadas colgando perpendicularmente en estantes, que son llevados a la cámara de curado (Ilustración 1).
- Empaque y conservado: El proceso final de fabricación consiste en separar los productos ya curados, retirando las ristras de los estantes y empacándolos al vacío o en bandejas plastificadas, listas para su distribución, de forma genérica el producto es conservado en temperatura de refrigeración o en un ambiente fresco y seco para su mejor conservación.



*Ilustración 1: Estantes/carros de chorizos en la sala de ahumado.*

El proceso completo de elaboración de embutidos es particularmente más largo según el tipo de producto a fabricar y puede llegar a tener etapas independientes de almacenamiento, clasificación de



materias primas y distribución como se muestra en el siguiente diagrama (Ilustración 1) Este proceso completo ha sido simplificado para la implementación del sistema debido al tamaño de la empresa intervenida y teniendo en cuenta solamente los procesos establecidos previamente en la empresa hasta la actualidad.

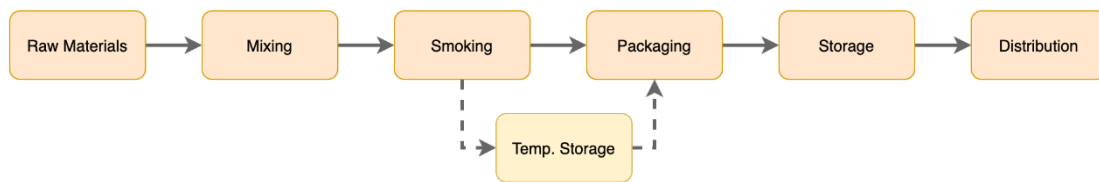


Ilustración 2: diagrama de flujo de procesos completo para la fabricación de chorizos.

### 2.1.1. El proceso de maduración de embutidos

Los principales indicadores de la maduración de chorizos y morcillas son principalmente los relacionados con la humedad, dureza, color y olor. Estos productos presentan de forma inicial, un aspecto húmedo en el exterior (la tripa) y en el interior. El interior del chorizo y morcilla tienen una apariencia y textura pastosa, heterogénea, suave y fácilmente desmontable y deformable. El color de la masa en el chorizo es muy similar al producto final, siendo un color naranja ligeramente más claro. En cuanto a la morcilla, el color del producto crudo es rojo al principio, debido al alto porcentaje de sangre fresca, volviéndose de un color rojizo oscuro / negro durante la maduración a medida que la sangre se oxida.

En cuanto a la textura, su evolución se caracteriza por el endurecimiento de la masa interior y la cubierta externa del producto. Esto ocurre principalmente debido a la pérdida de agua. Además, se produce un proceso de unificación entre los diferentes componentes, obteniendo un producto más "homogéneo" y sólido. Al final del proceso de maduración, los productos presentan un tamaño reducido y numerosas irregularidades superficiales.

El último rasgo "observable" durante la maduración es el cambio de olor. Ambos productos tienen inicialmente un olor característico de la materia prima (chorizo o morcilla) que se vuelve ligeramente ácido y ahumado.

Existen numerosas opciones a la hora de cuantificar o registrar los cambios en el producto en proceso cuando se realizan ahumados en embutidos tradicionales, las variables se clasifican según su tipo de medición (directa o indirecta) en el producto, según el tiempo de medición (continuo en el proceso o discreto en tomas puntuales durante y después del ahumado) y según su naturaleza cualitativa o cuantitativa. En el registro, cada una de ellas tomará un tipo de dato estándar en el procesamiento de datos (continuo, discreto, nominal u ordinal) según corresponda.

En un estudio comparativo de los efectos del ahumado tradicional (Yin X, 2021) enfocado en la diferenciación entre 5 características de alto impacto en la calidad percibida por los consumidores, entre los ahumados tradicionales y los ahumados aplicados por procesos industriales en masa, se llegó a la conclusión de que las principales características que interesan al consumidor tienen variaciones casi imperceptibles en los 3 tipos de métodos de ahumado usados. No obstante, el sabor percibido, siendo una de las características más importantes a la hora de evaluar el producto, tiene una elevada complejidad de evaluación que sale de los límites de este trabajo, y solo será tomada en cuenta a partir de medidas indirectas como la dureza, el pH y la humedad.

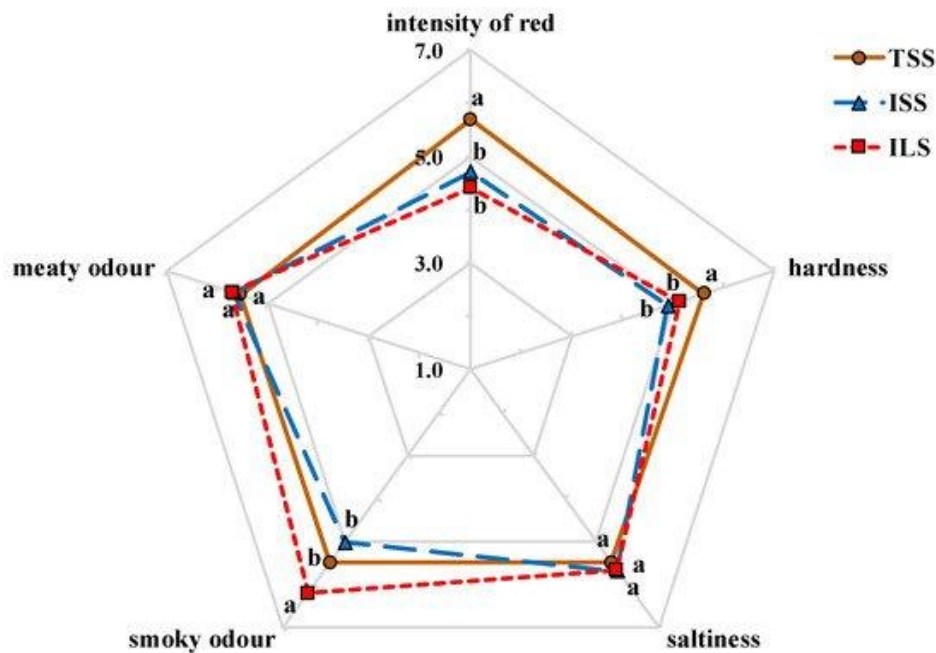


Ilustración 3 Comparativa de características del proceso de ahumado en 3 técnicas de fabricación, TSS (Ahumado gaseoso tradicional), ISS (Ahumado gaseoso Industrial), ILS (Ahumado Industrial líquido) - (Yin X, 2021)

En el caso específico del proyecto, las variables listadas a continuación son las que, de acuerdo a la experiencia de la fábrica, los datos arrojados por la literatura y los estudios de caracterización existentes caracterizan el producto en proceso; las variables listadas se pueden medir objetivamente y utilizarse como indicadores de maduración:

Variables cualitativas de producto:

**Color:** Esta es una de las características que más cambia en el proceso de curación y, por tanto, un buen indicador de las diferentes fases de maduración, sin embargo, está íntimamente relacionada con el tipo de materias primas usadas.

**Morfología microscópica:** Obtenido mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), se utiliza para determinar de forma precisa el estado y condiciones de la estructura de la masa de chorizo y morcilla, aunque puede dar información de interés para la fábrica es excesivamente costosa e imposible de aplicar en grandes volúmenes de producción.

**Textura y dureza:** utilizadas para rastrear la curación y el aumento de cohesión de la masa, una masa con baja presencia de aire se relaciona con mayor durabilidad, mientras que una dureza demasiado elevada es frecuentemente indeseada por los consumidores.

Variables cuantitativas de producto:

**Humedad absoluta:** Se determina de forma precisa generalmente por gravimetría, aunque también se utiliza la medida de **la actividad del agua**, esta variable indica el contenido de humedad disponible para la proliferación de microorganismos en la muestra, por lo cual es de especial interés en el desarrollo del estudio, sin embargo, se realiza por muestreo y el tiempo de realización de la prueba es elevado.

**pH:** La disminución del pH indica el correcto curado y ahumado del producto por acción de la microbiota presente (Hernández González, 2018). Es necesario, por tanto, que el producto esté entre determinados valores de pH para garantizar su seguridad y calidad. Es una variable de fácil medición pero que requiere muestreo.

VARIABLES CUANTITATIVAS DE PROCESO:

**CO<sub>2</sub>:** es un indicador principal de la presencia de humo en la sala de ahumado. Es importante controlar este parámetro para saber si el ahumado se está realizando de forma correcta y mantener el control de los HAP (Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos).

**Peso (mermas de producto):** Dependiendo del tipo de producto, existe una pérdida de peso desde el inicio del ahumado hasta que se obtiene el producto terminado. De esta manera, conocer el porcentaje de pérdida de peso desde el inicio del proceso hasta el final podría indicar la idoneidad del producto, ya que las pérdidas de peso son debidas en a la evaporación de agua.

**Temperatura de las salas de ahumado y de los productos:** Aunque no pertenecen a un lazo de control cerrado la temperatura de ahumado es el facilitador de secado de producto, y por tanto su evolución está íntimamente relacionada con un correcto curado. Temperaturas demasiado altas, o demasiado bajas pueden afectar negativamente el resultado final de curado del producto o los tiempos de procesamiento.

### 2.1.2. La evaluación y el control de calidad en la fabricación de embutidos tradicionales

Las características anteriormente nombradas son usadas de forma frecuente como criterios de clasificación de calidad en los embutidos tradicionales, en particular variables como el color, dureza y olor son usadas por los operarios día a día como primer filtro de calidad, seguido de inspecciones de acidez o humedad realizadas de forma aleatoria muestral entre los lotes. O a productos de especial interés.

Las complejas correlaciones entre los factores que alteran la calidad final del producto son controladas por decisiones humanas que son difíciles de transformar en un algoritmo. Estos mecanismos de control y clasificación son aprendidos gracias la capacidad humana de resolver problemas complejos, sin embargo, frecuentemente las personas involucradas terminan aprendiendo de la experiencia sin comprender las causas o los mecanismos de funcionamiento de los procesos de fabricación (Allais, 2016).

Sin embargo, la condición *sine-qua-non* de calidad en la transformación de productos cárnicos es la ausencia de organismos patógenos y la optimización de condiciones en el producto para que estos no se desarrollen en el tiempo de vida del alimento hasta su de consumo, usando barreras, empaques, o a través de conservantes y antioxidantes. La bibliografía relacionada con fabricación segura de alimentos y transformación de cárnicos menciona estrategias ampliamente conocidas como la cocción, ahumado, secado y empaque para llegar a tal fin (Betina, 2003). Aunque las condiciones para que los productos cárnicos se contaminen puedan estar influidas por el estado de los animales antes del sacrificio (Hernández González, 2018), los mayores riesgos para un crecimiento microbiano son la temperatura, humedad y exposición durante el tiempo de procesado. Es por ello que gobiernos y entidades privadas generalmente emplean reglamentos y directrices que guían en la fabricación segura de alimentos, y que frecuentemente están disponibles de forma abierta y sin restricciones, debido a la importancia para la salud pública de este tema en particular.

La gran variedad de productos derivados del procesamiento cárnico y sus distintos métodos de fabricación, envasado, almacenamiento y distribución traen consigo numerosos métodos para detectar microorganismos en el producto final. Dentro de este tipo de sistemas de detección se encuentran también los modelos predictivos, que integran el comportamiento de los microorganismos en los productos cárnicos, y ayudan a identificar los componentes que afectan en mayor o menor medida su proliferación, a la vez que pueden ayudar a identificar factores de riesgo relacionados con la aparición y desarrollo de las especies consideradas como peligrosas. El estudio particular de estas técnicas de detección está fuera del alcance de este trabajo, pero en nuestro caso, es de particular interés, aquellos estudios y pruebas que son usados y han mostrado resultados fiables en la detección de patógenos (Hernández González, 2018), con el uso de variables que podemos medir en la fábrica de procesamiento: pH, acidez, actividad hídrica y la temperatura de procesado.

## 2.2. Sistemas Industriales y el internet de las cosas IIoT

### 2.2.1. Industria 4.0

El término de industria 4.0 (I4.0) fue presentado por primera vez en la feria de Hannover de 2011, como parte de una iniciativa del gobierno alemán para la ejecución del plan estratégico de alta tecnología con horizonte 2020. En su tiempo la I4.0 fue definida como un concepto que representa la evolución de los sistemas productivos actuales con la unión entre las nuevas tecnologías de la automatización industrial y el mundo de las tecnologías de la información (IT), de acuerdo con (T. Bangemann, 2016) la I4.0 presenta un escenario con respecto a la producción industrial con tres aspectos:

- un nuevo nivel de organización y control de toda la cadena de valor en el ciclo de vida del producto.
- La disponibilidad de toda información relevante en tiempo real, siendo posible a través de la interconexión de todas las instancias que realizan procesos de creación de valor o transformación en el producto.
- La creación de redes de valor entre compañías auto-organizadas, dinámicas, ágiles y a través de la conectividad de humanos, “cosas” y sistemas, de acuerdo a sus habilidades.

Según la arquitectura del modelo RAMI (Y. Wang, 2017), a través del análisis de las características de las tres primeras revoluciones industriales, la innovación técnica de la I4.0 está preconditionada por: la integración horizontal y vertical del proceso de fabricación, ingeniería y ciclo de vida del producto, y la descentralización computacional.

La estandarización en la Industria 4.0 es uno de los ejes fundamentales que buscó desde el principio facilitar la intercomunicación y disponibilidad de datos entre todos los agentes participantes usando estándares, métodos y acercamientos ya existentes. Este principio debería trascender a las distorsiones producidas por las compañías, naciones y estados; para que se pueda generar una verdadera integración de los datos y el conocimiento generado en cada uno de los eslabones de la cadena de producción.

Para soportar las aplicaciones y efectos de la I4.0, se requiere un modelo común que reúna todas estas condiciones en una arquitectura referencial, de esta manera, en abril de 2015 se presentó en la feria de Hannover la arquitectura de referencia de la industria 4.0, llamado el modelo RAMI 4.0. el modelo RAMI 4.0 integra los elementos de la industria en un cubo de capas tridimensional, desde donde las tecnologías que hacen posible la integración se pueden clasificar y desarrollar de forma organizada,

asimismo debido a la inspiración en estándares conocidos permiten la migración rápida desde las condiciones del mundo real de la producción hasta el estado actual de desarrollo y el paso a la I4.0 con la definición de dominios de aplicación, configuración y requerimientos especiales. Schulte y Colombo insisten en como RAMI 4.0 no propone un acercamiento nuevo y desconocido, sino que utiliza tecnologías de control y comunicación desarrolladas y actuales para soportar la flexibilidad en configuración y la evolución de sistemas compatibles interconectados. (Schulte, 2017)

RAMI 4.0 se introdujo por la organización para la estandarización alemana DIN con el ánimo de apoyar a todos los miembros interesados de la cadena de valor en la industria general, que incluye diseñadores de tecnología, fabricantes, integradores de tecnología, empresas creadoras de maquinaria, desarrolladores de software, y usuarios y proveedores de productos y servicios.

El gran desafío en la adopción del modelo RAMI 4.0 se encuentra en el desarrollo de soluciones que soporten las funcionalidades de cada capa y las interacciones requeridas por cada uno de sus elementos. RAMI, al igual que I4.0 representa un concepto sin especificar por ejemplo las tecnologías de comunicación, herramientas de integración o estándares de programación que se deben usar en cada elemento. Por tanto, se puede encontrar más de una solución a un sistema, a través del uso de múltiples tecnologías y diferentes acercamientos en cada una de ellas, este último concepto ha hecho que la mayoría del trabajo de la I4.0 recaiga sobre la integración y el nivel de implementación de cada una de estas tecnologías para proveer el nivel de funcionalidad requerido por los demás elementos del sistema en las aplicaciones industriales en que se aplique la solución provista. Con ello no es de sorprender que gran parte del esfuerzo mundial de desarrollo en este sector se ha enfocado en desarrollar soluciones de integración multiplataforma, compatibles con tecnologías y estándares múltiples y manteniendo el núcleo del sistema RAMI 4.0 agnóstico (Schulte, 2017).

### 2.2.2. El modelo RAMI 4.0

El corazón de la industria 4.0 es la conectividad de dispositivos, máquinas, sistemas informáticos y personas; todo ello gracias a los servicios de internet en la nube y el análisis de datos y la aplicación de todo tipo de algoritmos de aprendizaje automático y estadísticos para la mejora de servicios a la industria general.

El beneficio potencial de tener la mayor cantidad de información acerca de los procesos de la industria es enorme y permitirá según las promesas de la llamada Industria 4.0:

- Marcar un salto de productividad,
- Permitir el desarrollo o mejorar la oferta de productos altamente personalizables
- Disminuir errores en las fases de producción.
- Aportar información para mejorar costes en el proceso de mantenimiento.

Todas estas características dando un beneficio adicional a los paradigmas de industria que se solían tener como estándar en las fábricas de comienzos de siglo.

En el modelo grafico RAMI 4.0 de 3 dimensiones se visualiza la arquitectura orientada a servicios del ecosistema IIoT y se pueden segmentar procesos complejos de control y monitorización en sistemas de automatización que integren sistemas IT a partir de capas fáciles de conceptualizar y trabajar por subsistemas o equipos, manteniendo la integridad de la estandarización (IEC 62890 e IEC 62264). Se resalta la capa de integración y comunicación, transversal en el plano de ciclo de vida y niveles de jerarquía, es en esta donde las API como la propuesta en este trabajo se utiliza como medio de comunicación particularmente entre los dispositivos de control, los dispositivos de campo y las estaciones de trabajo.

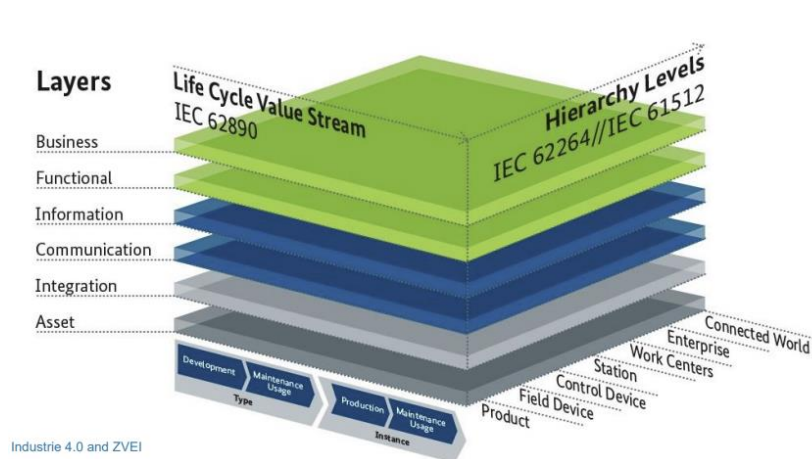


Ilustración 4: Grafico de capas en 3 dimensiones del modelo RAMI 4.0 (Schweichhart)

### 2.2.3. IoT: dispositivos inteligentes como base del desarrollo industrial.

IoT significa a grandes rasgos la red de “las cosas”, cosas que pueden ser electrodomésticos, vehículos, o máquinas, pero más comúnmente en el entorno industrial son sensores subsistemas o sistemas embebidos con un objetivo de monitorización o actuación. Hoy en día los desafíos de IoT se centran en resolver la comunicación entre esas “cosas” no solo actuando como clientes de un servidor central, sino como servidores propiamente dichos o en sistemas de comunicación cliente-cliente. Este concepto se topa con varios inconvenientes como los problemas de direccionamiento del protocolo TCP/IP versión 4, que necesitaría para una implementación más transparente el uso de TCP/IP versión 6. En este capítulo se mostrarán algunas soluciones dadas a la conectividad de los dispositivos IoT desde una perspectiva industrial, o IIoT (*industrial Internet of Things*).

La importancia de los dispositivos IoT en la nueva industria radica en la recolección de datos; analizar sistemas productivos, generar gemelos digitales o mejorar sistemas robóticos necesitan una ingente cantidad de observaciones de señales físicas e indirectas, estados, bitácoras, y todo tipo de información que permita buenos resultados en la modelización de sistemas no lineales con enormes cantidades de variables de entrada y normalmente no explicables (modelos de caja negra). La desconfianza general de los puristas a este tipo de modelos ha sido remplazada por la confianza de los administradores, que inspirados generalmente por el uso masificado de soluciones de aprendizaje automático ya consolidadas en la industria de software, por ejemplo con los modelos de publicidad en internet, pero también presentes en sistemas de visión por computador, en modelos económicos, climatológicos y muchos otros que salen del ámbito de estudio de este trabajo y son objetos de estudio de la aplicación de la inteligencia artificial en el mundo físico.

El concepto de IoT en sí, se ejemplifica en la sociedad actual en la proliferación de dispositivos inteligentes, como tablets, TVs inteligentes, teléfonos inteligentes, electrodomésticos, entre otros. En cuanto a su aplicación en la industria, los sensores interconectados, los sistemas de automatización modernos con redes TCP/IP, y los actuadores interconectados, son el común denominador de todas las empresas de automatización industrial y la base del IoT industrial. Este IoT industrial se caracteriza por dar parámetros específicos de fiabilidad durabilidad y precisión a estos dispositivos inteligentes, que normalmente les permite tolerar todo tipo de agentes externos extremos (altas temperaturas, presencia de polvo, humedad condensable, o agentes químicos, entre otros), mientras se mantienen las características de conectividad, interoperabilidad y autonomía típicas del IoT tradicional.

Sin embargo, la mayor diferencia entre el IoT tradicional y el IIoT radica en cómo se realiza el manejo de los datos, mientras en un dispositivo de hogar, perder paquetes puede ser algo trivial o

automanejado, sin embargo, en los sistemas industriales los requisitos de fiabilidad y de tiempo real son vitales para los sistemas autónomos. Los dispositivos IIoT normalmente generan un volumen gigantesco de datos, que requieren sistemas de comunicación, almacenamiento y análisis cuidadosamente diseñados.

De acuerdo con una conferencia clave en el mundo IoT ofrecida por Tom Bradicich, los siete principios del IIoT son los siguientes (Bradicich, 2020):

- Gran cantidad de datos analógicos: sensores de todo tipo en varias etapas del ciclo productivo, en variables ambientales o embebidos en máquinas generan una cantidad ingente de datos debido al habitual muestreo a frecuencias elevadas, esos datos necesitan ser transportados, almacenados y analizados.
- Conectividad perpetua: los dispositivos IIoT siempre están conectados, normalmente en la industria las máquinas están encendidas de forma continua y aquellos de variables ambientales o seguimiento de procesos siempre están activos. Hay 3 beneficios de este modelo: monitorización en tiempo real, posibilidad de actualizaciones de software o firmware en línea, y la motivación de individuos y empresas a consumir productos personalizables.
- Transmisión de datos en tiempo real: en la industria hay numerosos mecanismos de seguridad en uso que también están generando datos de forma continua, estos dispositivos o mecanismos son críticos para el funcionamiento y control de la operación, los retardos en transmisión pueden ser fatales para algunas industrias y ocasionar desastres en otras que mantengan procesos de delicado control.
- Conocimiento de datos: el valor potencial de la información recolectada, basado en la pregunta maestra de ¿Qué está usted intentando alcanzar con el sistema?
- El paradigma inmediatez-vs-profundidad del conocimiento: mientras los requerimientos de control trabajan con datos inmediatos, los analistas y científicos de datos no trabajan con datos en línea sino con históricos para generar más conocimiento sobre los procesos.
- Visibilidad desde el Big Data: El almacenamiento de grandes volúmenes de datos suele incorporar estrategias de visualización de datos o explotación de estos.
- Computación periférica: los procesos industriales suelen funcionar de forma descentralizada, esto en conjunto con la optimización de costes relacionados con el manejo de datos e información (almacenamiento, anchos de banda, seguridad, soberanía, etc.) implican un traslado de sistemas centralizados a procesamiento parcial o total en la periferia.

La mejora de las capacidades y la democratización de los procesos relacionados con el Big Data, ha permitido que sea cada vez más fácil para las empresas explotar sus datos usando algoritmos de inteligencia artificial, aprendizaje automático y métodos estadísticos avanzados en la industria 4.0. Las aplicaciones de esta industria de los datos se centran en los sectores de aviación, medicina y la industria pesada, pero esas mismas tecnologías están disponibles y posibilita a que pequeñas y medianas empresas hagan su uso, con técnicas maduras y probadas para optimizar sus procesos; dentro de las explotaciones más comunes en ese aspecto se encuentran:

- El uso de sistemas de visión artificial para la mejora de procesos relacionados con la calidad de los productos.
- El diseño de pantallas de explotación, diferentes a los sistemas SCADA, denominados *dashboards*, que son útiles por su filosofía multiplataforma y de gran accesibilidad y fácil manejo para consulta de todo el personal de la empresa que pueda necesitar visualizar estados del sistema en cualquier momento.
- El desarrollo de sistemas predictivos, normalmente basados en algoritmos de aprendizaje automático y aplicados a procesos abstractos como la variabilidad de la demanda, la detección temprana de problemas en maquinaria, entre otros.



- El desarrollo de sistemas de control complejos como el coche autónomo, o la gestión de redes eléctricas inteligentes, que necesitan un aprendizaje continuo, necesitan una ingente cantidad de datos y cuya mejora continua depende del uso continuo y repetitivo de dichos sistemas.
- Uso de dispositivos antes no aplicables en la industria, con tecnologías normalmente orientadas a la gestión de calidad de producto, como el LIDAR, sistemas de radar, rayos X, ecografías, entre otros.
- El uso ampliado de dispositivos o sensores móviles, que incluyen sensores y actuadores simples, en sistemas embebidos con tecnologías de comunicación avanzadas y con un nivel de madurez y desarrollo formidable como BLE (Bluetooth *low energy*), LoRA, NFC, ZigBee, LTE, WiFi, entre otros.

#### 2.2.4. Sistemas de comunicación en IIoT

Sin entrar en los detalles de implementación del modelo OSI de comunicaciones, en el mundo de IIoT se diversan tecnologías que han emergido y se encuentran en un nivel de desarrollo formidable o son estándares de mercado. Cabe aclarar que en un sistema completo de IIoT, aun en implementaciones relativamente simples, pueden coexistir varios protocolos o tecnologías de comunicación, cada uno aplicado casi siempre de forma exclusiva a un nivel de abstracción (del modelo OSI u otro, véase Ilustración 5), y normalmente dependiente a lo cerca que esté dicha etapa de comunicación a la interacción con el mundo físico. De forma trivial podemos diferenciar 3 de estos niveles: los buses de campo, los buses de comunicación industrial y los protocolos de red e Internet.

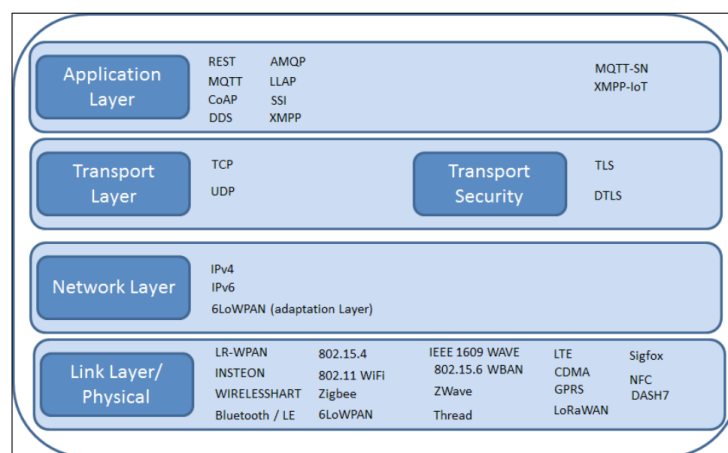


Ilustración 5: Protocolos de comunicación en el mundo IoT (Serpanos, 2018)

En los buses de campo es común encontrarse con sistemas basados en I2C, OneWire, y SPI, que conectan PLCs o sistemas embebidos con sensores remotos. En la comunicación industrial los protocolos más fuertes son ModBus RTU y TCP, CANopen, Profibus y EtherCAT, entre otros; estos se encargan de comunicar PLCs, o sistemas embebidos para su comunicación federalizada o distribuida. Por otro lado, en las redes de alto nivel el protocolo TCP/IP es el estándar por defecto, sobre este, existen protocolos exclusivos del mundo IoT como MQTT, AMQP, STOMP y OPC-UA. No obstante, pueden existir sistemas de comunicación o implementaciones que usen activamente protocolos de otro nivel de abstracción, por ejemplo, es relativamente común encontrar sensores con conexión directa a TCP/IP a través de protocolos propietarios o con *sockets* o sistemas de sincronización entre microcontroladores o embebidos a través de buses de campo.



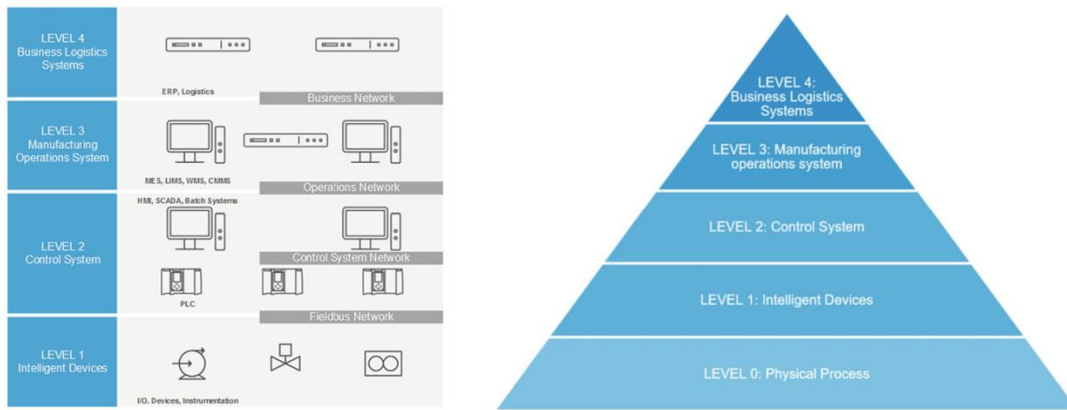


Ilustración 6: tipos de red aplicadas a la pirámide de automatización en IIoT (Buton, 2020)

Uno de los grandes avances del IIoT es el uso estandarizado de dispositivos móviles con comunicación inalámbrica, en este nivel de abstracción del modelo OSI (capa física y de enlace), encontramos tecnologías diversas, con protocolos que pueden funcionar como buses de campo o como capa física de redes TCP. El mercado actual está lleno de posibilidades en cuanto a la disponibilidad de sensores o sistemas inalámbricos pero cada uno de ellos tiene ventajas específicas para ciertas aplicaciones. La importancia de escoger el protocolo adecuado y el sistema de comunicación inalámbrica adecuado no solo influirá en el costo económico de la implementación y funcionamiento del sistema, sino que tendrá repercusiones sobre las capacidades propias establecidas por las tecnologías. En la Ilustración 7 se muestra el resumen de cómo realizar una selección asertiva de las tecnologías de comunicación inalámbrica en el mundo IIoT.

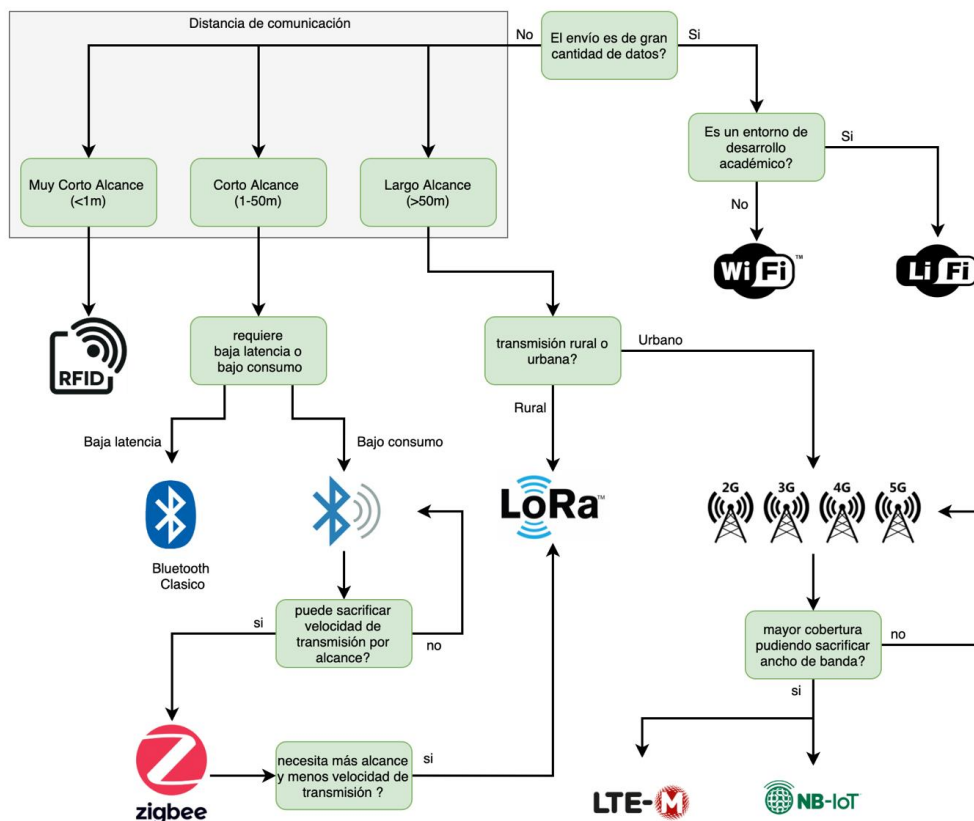


Ilustración 7: diagrama de selección de protocolos de IIoT.

Los aspectos a tener en cuenta a la hora de escoger un protocolo de comunicación inalámbrica se pueden sintetizar en los siguientes requisitos:

- Distancia de operación: el sistema inalámbrico puede ser de muy corta distancia como 1-90cm, media 1m-50m, o larga (mayor a 50 metros).
- Ahorro de energía: ¿qué tan importante es el ahorro de energía para el funcionamiento de la comunicación?, existen casos en los que incluso se trabaja sin energía a través de activación remota (RFID). En contraste, dispositivos con baterías generosas o conectados tienen márgenes mucho más elevados de consumo energético.
- Latencia: determinada por los requisitos de tiempo real del sistema a implementar, en sistemas de baja latencia pueden necesitarse tiempos de décimas de segundo, mientras que en sistemas remotos de monitorización latencias de 1 hora pueden ser asumibles, si el costo lo amerita.
- Ancho de banda, ¿cuántos datos se necesitan enviar en la comunicación inalámbrica?: aunque la enorme mayoría de sensores o embebidos necesitan un ancho de banda muy pequeño, en sistemas complejos o con un gran número de variables de monitorización, el ancho de banda puede ser un factor importante por prever.
- Costo de Implementación, operación y mantenimiento: algunos protocolos tienen un costo de virtualmente cero para su operación mientras otros necesitan el pago de licencias, equipos de pasarela, alquiler de infraestructura, etc.

#### 2.2.5. Aspectos de Seguridad en sistemas IIoT

Los sistemas de IIoT son vulnerables a varios tipos de ataques debido a varias causas como:

- la dificultad para operar eficientemente a tasas de transmisión en tiempo real.
- la ausencia de una línea de defensa física en los sistemas industriales
- ausencia absoluta de sistemas que protejan a la intrusión en muchos de los protocolos usados en buses de campo y buses industriales.

La seguridad es, por tanto, una de las grandes preocupaciones a la hora de implementar sistemas de comunicación industrial, y grandes esfuerzos de investigación y desarrollo están enfocados en este frente.

Sin embargo cualquier revisión exhaustiva del estado del arte en temas de seguridad IoT aún resultará en muchas oportunidades de mejora; una fotografía de la situación actual en ciberseguridad para sistemas IIoT se puede ver en las siguientes estadísticas (Buton, 2020): 25 vulnerabilidades son detectadas en promedio por dispositivo comercializado (COTS), 60% de los dispositivos tienen firmware con vulnerabilidades conocidas explotables, 70% de las comunicaciones o dispositivos no se encriptan, y un 80% no conciben la autenticación por contraseña de una longitud segura.

La ciberseguridad en sistemas IIoT es bastante particular, ya que va más allá de los aspectos comunes de infraestructura de IT de datos y servidores. Se adquieren los riesgos propios de sistemas de comunicación, pero también aquellos derivados de la computación distribuida y altamente acoplada que no son comunes en otro tipo de sistemas. Por todo ello, las soluciones de ciberseguridad en sistemas industriales de IoT no se basa únicamente en la aplicación de protocolos y la configuración de reglas como en los sistemas cliente servidor, sino que requiere una cuidadosa aplicación de criterios por cada nivel de comunicación, lo cual hace del sistema de seguridad un entrañado complejo en sí mismo (Delsing, 2017) que requiere planificación y estudio. Normalmente los conjuntos de reglas aplicados van ligados a sistemas ciberfísicos, que articulan grupos de sensores y actuadores en máquinas o subsistemas más o menos autónomos, y que prestan servicios; estos, en conjunto tienen una enorme interacción tanto en nivel de datos como en el ecosistema físico de funcionamiento.

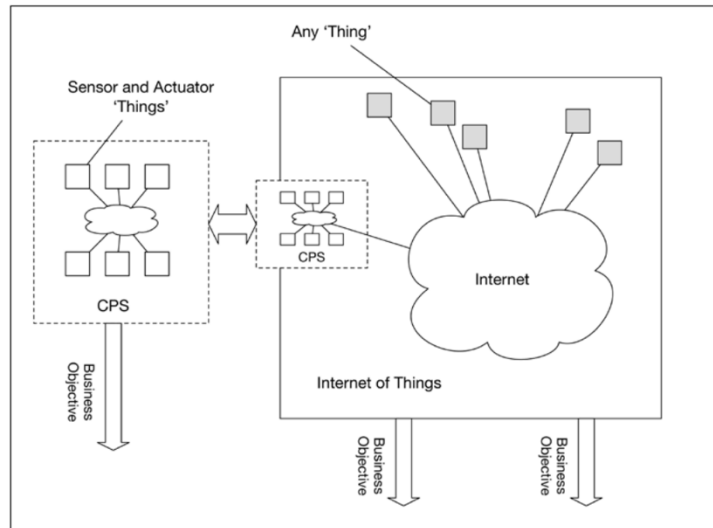


Ilustración 8: Interacción típica de sistemas ciberfísicos (CPS) interconectados en IIoT (Buton, 2020)

Para resolver los desafíos de ciberseguridad en los sistemas ciberfísicos (*Ciber Physical Systems - CPS*) y en general en el ecosistema IIoT hace falta la interacción de un equipo multidisciplinario, incluyendo ingenieros de automatización, expertos en redes de comunicaciones, y expertos en seguridad de datos, en general algunas recomendaciones para contrarrestar los riesgos de la seguridad son:

- Entrenar a todo el personal relacionado con énfasis en la responsabilidad compartida de la seguridad de los sistemas.
- Minimizar los riesgos capturando solamente la información necesaria en el tiempo necesario; cuantos menos datos existan, más sencillo será el esquema de seguridad.
- Entender la ciberseguridad como un problema de seguridad industrial (*cybersecurity affects safety*)
- Usar buenas prácticas en el desarrollo de sistemas, protocolos actualizados, sistemas operativos actualizados, contraseñas seguras, controles de acceso, sistemas de usuarios unipersonales e intransferibles, usar redes desmilitarizadas, evitar accesos innecesarios de las “cosas” interconectadas desde y hacia internet general, limitar los flujos de carga de los servidores MQTT/AMQP, etc.
- Si la infraestructura es compleja se debe evaluar la implementación de un monitor de infraestructura, con técnicas *push* o *pull* o combinado, según sea necesario. En este ámbito tecnologías como los sistemas de monitorización de infraestructura IT son útiles y aplicables (por ejemplo, *Prometheus, Grafana, InfluxDB*, entre otros).

En todo el proceso de evaluación y diseño, es útil recordar los pilares de la seguridad de la información:

- Confidencialidad: mantener la información importante de forma secreta y protegida.
- Integridad: asegurar que la información no pueda ser modificada de forma arbitraria, accidental o a propósito, sin que estos cambios sean detectados.
- Autenticación: asegurar que las fuentes de datos provengan de una entidad conocida (esta entidad puede ser una persona, una “cosa”, un sistema o un *endpoint* (subsistema API http).
- No repudiación: asegurar que una identidad no pueda a posteriori negar la ocurrencia de una acción realizada.
- Disponibilidad: asegurar que la información estará disponible cuando se necesita.

## 2.2.6. Los sistemas de integración de IIoT

A medida que diversas empresas y organizaciones continúan desarrollando nuevos dispositivos y sistemas de IoT, y que la complejidad de estos sistemas crece, se comienzan a necesitar capacidades de integración mejoradas. Empresas de integración (como Xively, Thingspeak, Accella y SCOPE) ofrecen soluciones de desarrollo flexibles para integrar “cosas” nuevas en arquitecturas empresariales o en ciudades inteligentes.

Las plataformas de integración basan su funcionamiento en el desarrollo de APIs, que los fabricantes y desarrolladores de dispositivos IoT pueden aprovechar para crear nuevas funciones y servicios. En el ecosistema empresarial, se puede decir que es cada vez más común encontrar el tipo de integración con APIs que los integradores de sistemas usan o desarrollan de forma propietaria, para incorporar funcionalidades en los entornos de IT empresariales nuevos o preexistentes. Como ejemplos: la API de Thingspeak, puede utilizar integrar dispositivos IoT a través de comunicaciones HTTP a sistemas ERP. Esto permite a las organizaciones capturar datos de sus sensores, analizar esos datos y luego tomar medidas sobre esos datos. Otro ejemplo sucede con AllJoyn, un proyecto de código abierto de AllSeen Alliance, que se centra en gran medida en la interoperabilidad entre dispositivos de IoT, incluso cuando estas “cosas” o dispositivos utilizan diferentes protocolos de comunicación. A medida que el ecosistema de IIoT llega a un estado de madurez en el desarrollo, se espera que los distintos componentes, protocolos y API de IoT se estandaricen para crear potentes sistemas aptos para todo tipo de empresas.

Dentro de la arquitectura general de los sistemas de IIoT dentro de las empresas, generalmente el gran acoplamiento entre los sistemas dificulta abstraer el flujo de información y control (Ilustración 9), diferentes estándares como ISA 95 y el IEC 60947 (5-6) han abarcado este problema históricamente y en la actualidad son algunos de los acercamientos recomendados al hacer una implementación que abarque sistemas de control y flujos de información en varios niveles de la empresa. En términos generales las recomendaciones al realizar una implementación de un sistema de integración son las siguientes:

- Evalúe las iniciativas y hojas de ruta actuales de IIoT. Estudie detenidamente el estándar ISA-95 sin sesgos sobre el estado actual del sistema a implementar.
- Preste especial atención a los proveedores de IoT, El soporte de los productos que pueda necesitar puede requerir una desviación planificada de ISA-95. El resultado de este estudio debe ser una documentación de las iniciativas de IIoT, incluida la gestión de datos, los flujos de datos, la infraestructura y la ciberseguridad.
- Realice un análisis de brechas respecto a la especificación de ISA-95. Una vez que se completa el análisis, analice las desviaciones que pueden ser de dos tipos: brechas e implementaciones alternas. Las brechas son áreas en las que ISA-95 especifica un enfoque, pero sin solución específica, ya sea tecnología o proceso. Las implementaciones alternas son soluciones que se desvían del enfoque especificado por ISA-95; tenga en cuenta que los requerimientos comerciales o funcionales pueden ser más ambiciosos que los cubiertos por ISA 95, en estos aspectos realice una hoja de ruta para la normalización de estos requerimientos y aplíquelo de forma disciplinada durante toda la implementación. Algunas estrategias para cubrir aspectos no cubiertos en la norma son: evaluar normas alternativas, seguir las recomendaciones de fabricantes o proveedores de IIoT en implementaciones exitosas, y por último planificar su propia implementación.
- Durante todo el proceso valide cuidadosamente aquellos aspectos que no sean cubiertos por la norma y donde sea posible adáptelos al estándar, esto ahorrará costos significativos y tiempo de implementación.
- ISA-95 es agnóstica respecto del hardware y la infraestructura física, incluida la red, la seguridad, la computación y el almacenamiento de los datos. Una división fundamental y maliciosa divide el personal IT de software y la infraestructura. Aunque las tecnologías modernas permiten

implementar infraestructura a través de software; la logística de llevar los datos del punto A al punto B y luego procesarlos y almacenarlos de manera efectiva aún comprende puntos importantes de la infraestructura que deben ser tenidos en cuenta. En este aspecto, el uso de máquinas virtuales y las aplicaciones en contenedores han reemplazado a los servidores, y las redes definidas por software y las WAN definidas por software reemplazan las redes tradicionales basadas en dispositivos físicos.

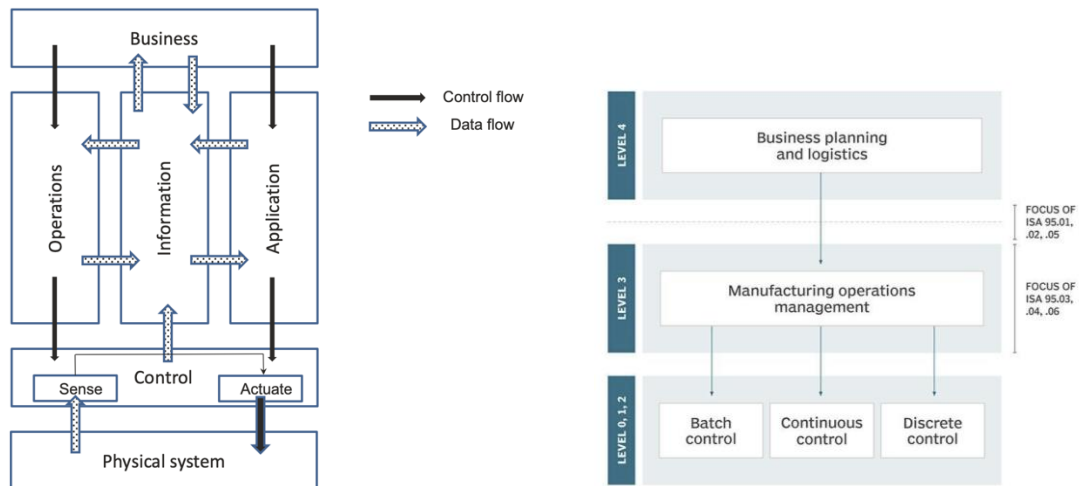


Ilustración 9: flujos de información y control en la infraestructura de IIoT tradicional (izq), Abstracción en modelo ISA95 (derecha) - (Serpanos, 2018, pp. 48,49).

### 3. Descripción de sistemas

Para lograr un sistema integrado de monitorización y seguimiento de producto en el proyecto se han desarrollado tres subsistemas (Ilustración 10):

- 1) un sistema IoT para la monitorización de procesos industriales.
- 2) un sistema de trazabilidad para producción de alimentos multietapa.
- 3) un sistema de integración de datos API ligado un sistema de almacenamiento en base de datos (DT-Optydry API).

A pesar de ejercer como un sistema distribuido, el corazón del funcionamiento viene dado por el sistema de integración y API, a través de este se realizan las conexiones y el procesamiento de datos que traen el sistema de trazabilidad, con la información de pedidos, y el subsistema IoT con las medidas de proceso.

El sistema de trazabilidad se encarga de realizar el seguimiento de la producción desde el almacén de materias primas, a través de los diferentes procesos, incluyendo el mezclado, ahumado y empaque. También cuenta con un generador de reportes y visualizaciones y controles para las etapas de producción de mezcla y ahumado. Además de ello, cuenta con la capacidad de adaptarse a diferentes productos e incluir otras etapas de producción no nombradas, como refrigeración, curado en frío o despiece, que son comunes en algunos productos embutidos cárnicos.

El sistema de trazabilidad incluye la visualización de las variables leídas en los procesos y en las condiciones ambiente posibilitando su seguimiento en tiempo real (*soft-realtime*) y los históricos que estén disponibles. Asimismo, cuenta con opciones para visualizar las variables tomadas fuera de línea como el control de PH o el control de temperatura en la sala de mezclado.

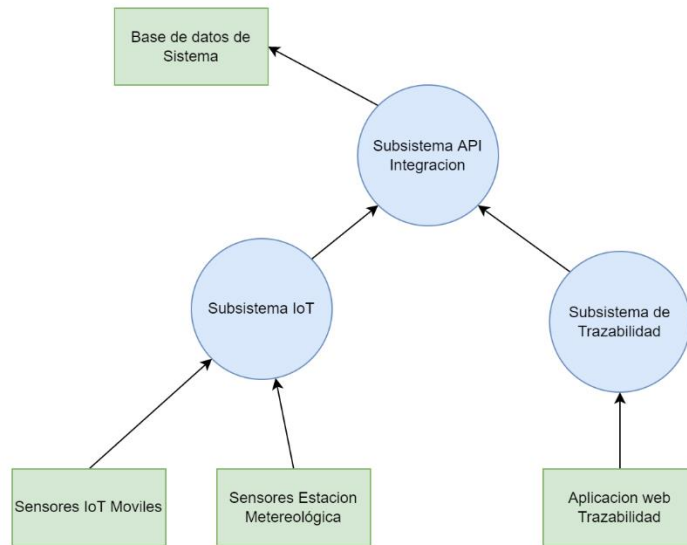


Ilustración 10: diagrama de contexto del Sistema de Integración

En una vista detallada de los procesos de la Ilustración 10 se pueden ver las implementaciones específicas realizadas para este trabajo, así como las interacciones entre sistemas, esto se detalla en el diagrama de nivel 2 de la Ilustración 11, donde en particular se detalla la interacción entre la API de integración y la API del sistema IoT externo (sensores ZigBee de temperatura y humedad), así como la interfaz UMB-binary realizada específicamente para los sensores de la estación meteorológica. También se observan detalles de implementación del modelo de datos con la base de datos SQL, con dos canales de comunicación a través de ORM para modelos estándar y un canal alternativo para consultas SQL avanzadas. Respecto al sistema de trazabilidad su funcionalidad se puede ver completamente independiente del sistema IoT hasta el procesado por el ORM en la API de integración.

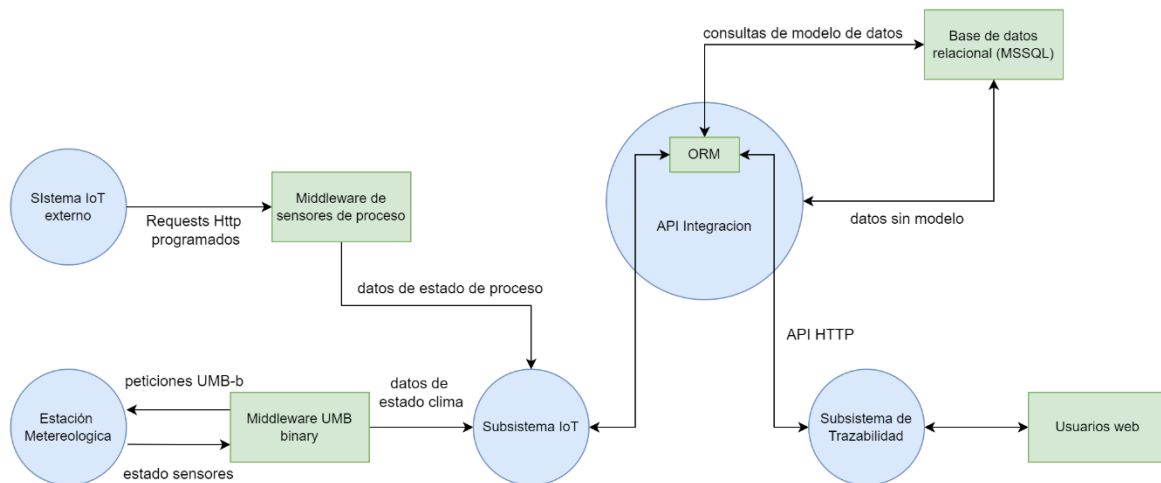


Ilustración 11: diagrama de nivel 2 del Sistema de Integración.

### 3.1. Sistema IoT

Dentro del sistema de IoT se engloban dos módulos con el objetivo común de recolección de datos, pero con esquemas de funcionamientos diferenciados:

- Un módulo de monitorización de variables de proceso se encarga de realizar las lecturas de temperatura y humedad en los sensores ZigBee en línea del proceso de ahumado.
- Un módulo de monitorización de variables ambientales, que se encarga de realizar lecturas y desde la estación meteorológica del proyecto; el **software middleware de gestión de mensajes UMB Gateway**, que brinda capacidades a la estación meteorológica de sensor IoT autónomo.

Existe una estrecha relación entre el sistema IoT y el sistema de integración API, aunque cada uno cuenta con diferentes objetivos y roles, y puede funcionar de forma relativamente autónoma. En el siguiente diagrama (Ilustración 12) se muestra el flujo de información entre los componentes de los diferentes sistemas y sus relaciones. En colores se diferencian, el subsistema IoT (azul) del subsistema de trazabilidad (verde) y el sistema API de integración (naranja). En el diagrama también se resalta la integración entre los subsistemas de IoT y trazabilidad, ya que ambos tienen como fuente de información el proceso productivo, siendo el principal diferencial que el sistema IoT trabaja con señales o series temporales, mientras que la información procesada por el sistema de trazabilidad es orientada a documentos y tomas puntuales.

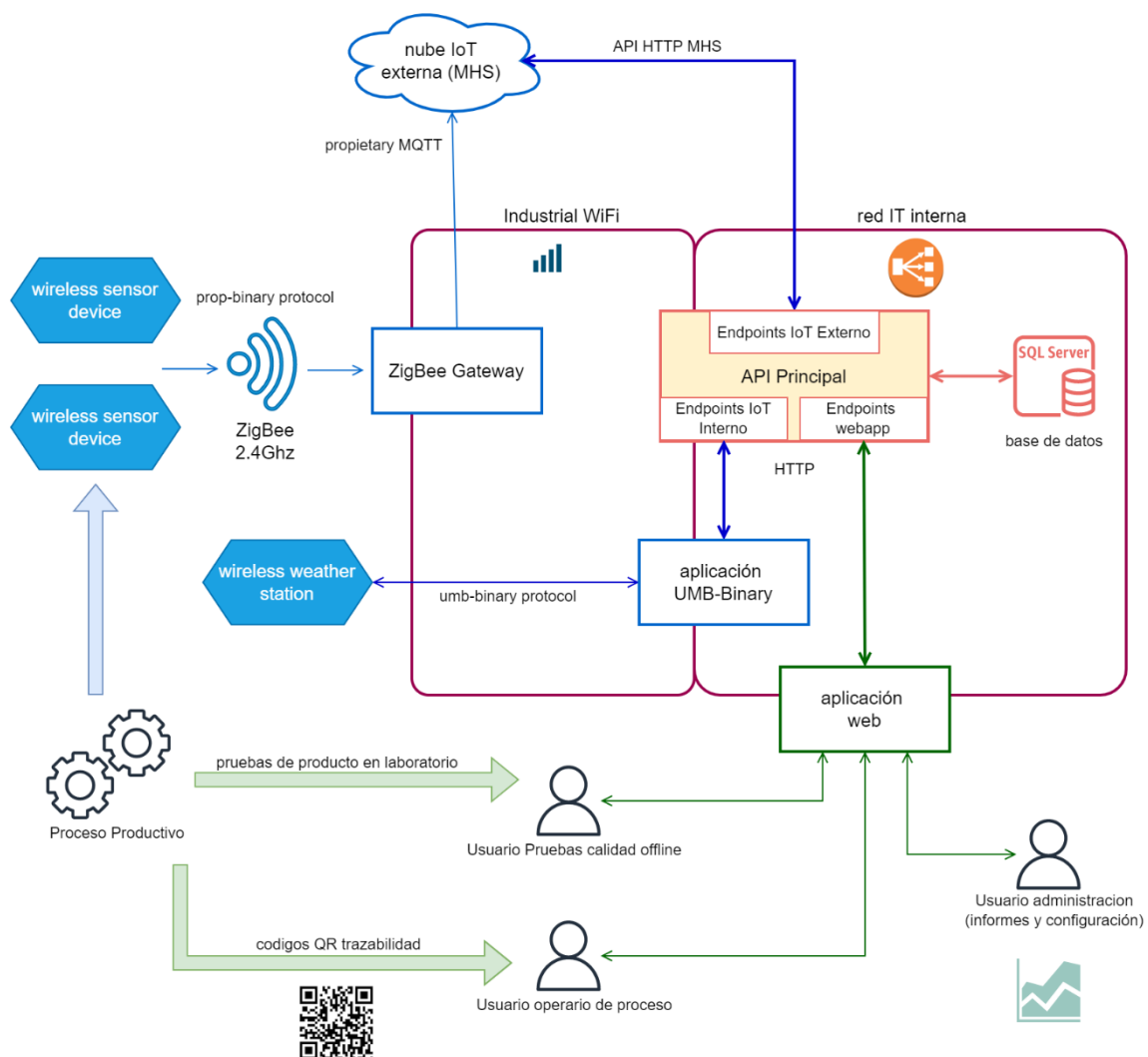


Ilustración 12: diagrama de comunicaciones entre entidades, aplicaciones y subsistemas.

Uno de los casos de uso menos comprensibles en el diagrama de flujos de información de la Ilustración 12, y que hace parte del sistema IoT, es el que ocurre en la lectura de las variables ambientales desde la estación meteorológica. Ya que las acciones se distribuyen entre el subsistema de IoT y el subsistema de API, sin embargo, todo el control de la función se realiza enteramente desde el módulo de monitorización de variables ambientales, que se ejecuta en el software UMB-gateway, detallado en el numeral 3.1.1.

En el siguiente diagrama de caso de uso detallando esta actuación (Ilustración 13) se observa la adquisición por protocolo binario controlada por el UMB-gateway, estos datos son interpretados por el Umb-gateway y después redirigidos a la API principal usando un cliente REST de con HTTP. El desencadenamiento de la acción se realiza a través de un proceso cíclico con periodo regulable, y configurable en el propio umb-gateway.

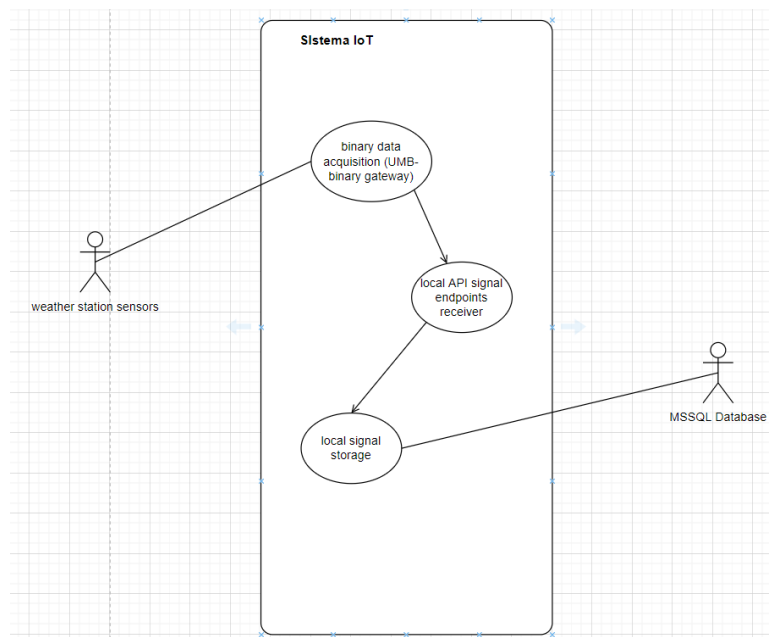


Ilustración 13: diagrama de caso de uso para lectura de señales de la estación meteorológica

### 3.1.1. Aplicación Middleware UMB Gateway

Uno de los componentes más importantes del sistema IoT es el middleware UMB Gateway, este se usa para capturar los datos de la estación meteorológica y hace parte del módulo de monitorización de variables ambientales, que tiene un protocolo de comunicación propietario llamado UMB (Universal Measurement Bus – Binario), para ello fue desarrollada una aplicación de tipo servidor de consola funcionando como servicio de red, en la cual se realiza la comunicación entre el sistema de la estación meteorológica y la API de integración principal.

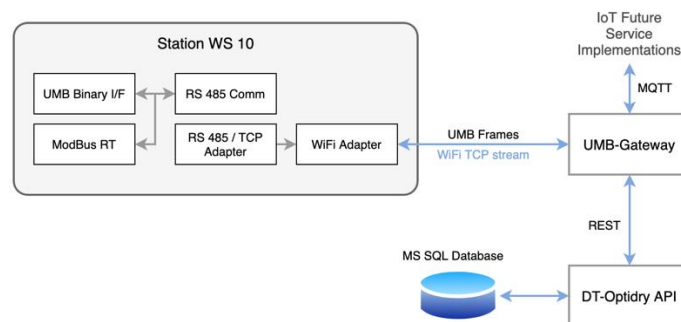


Ilustración 14: diagrama de comunicación del servicio UMB Gateway.



La aplicación fue desarrollada en el lenguaje de programación GoLang e implementa el protocolo de comunicación UMB-binary, propietario de LUFFT para sus dispositivos de monitorización de clima. El diagrama de la Ilustración 15 muestra en términos globales el algoritmo de funcionamiento de alto nivel del servicio de red.

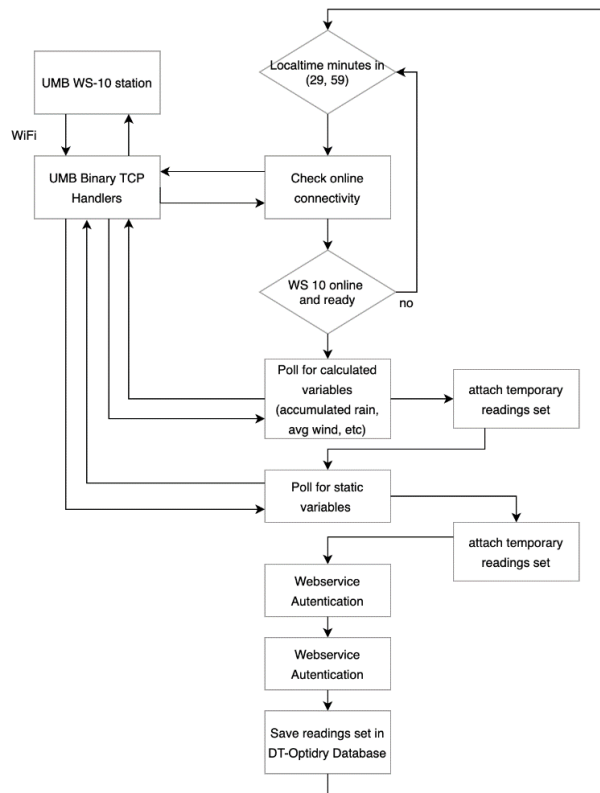


Ilustración 15: diagrama de flujo de la aplicación UMB-Gateway para obtención de datos de la estación meteorológica

En el desarrollo se usó un modelo simplificado de objetos coincidente con las estructuras de datos mencionadas en las especificaciones del protocolo UMB-binario de Lufft (Lufft, OTT Hydromet, 2021), para la revisión de código hay que tener en cuenta que el lenguaje de programación GoLang no cuenta con soporte explícito para clases, por tanto, la implementación de las mismas es realizada por estructuras de datos y definiciones de métodos en tipos.

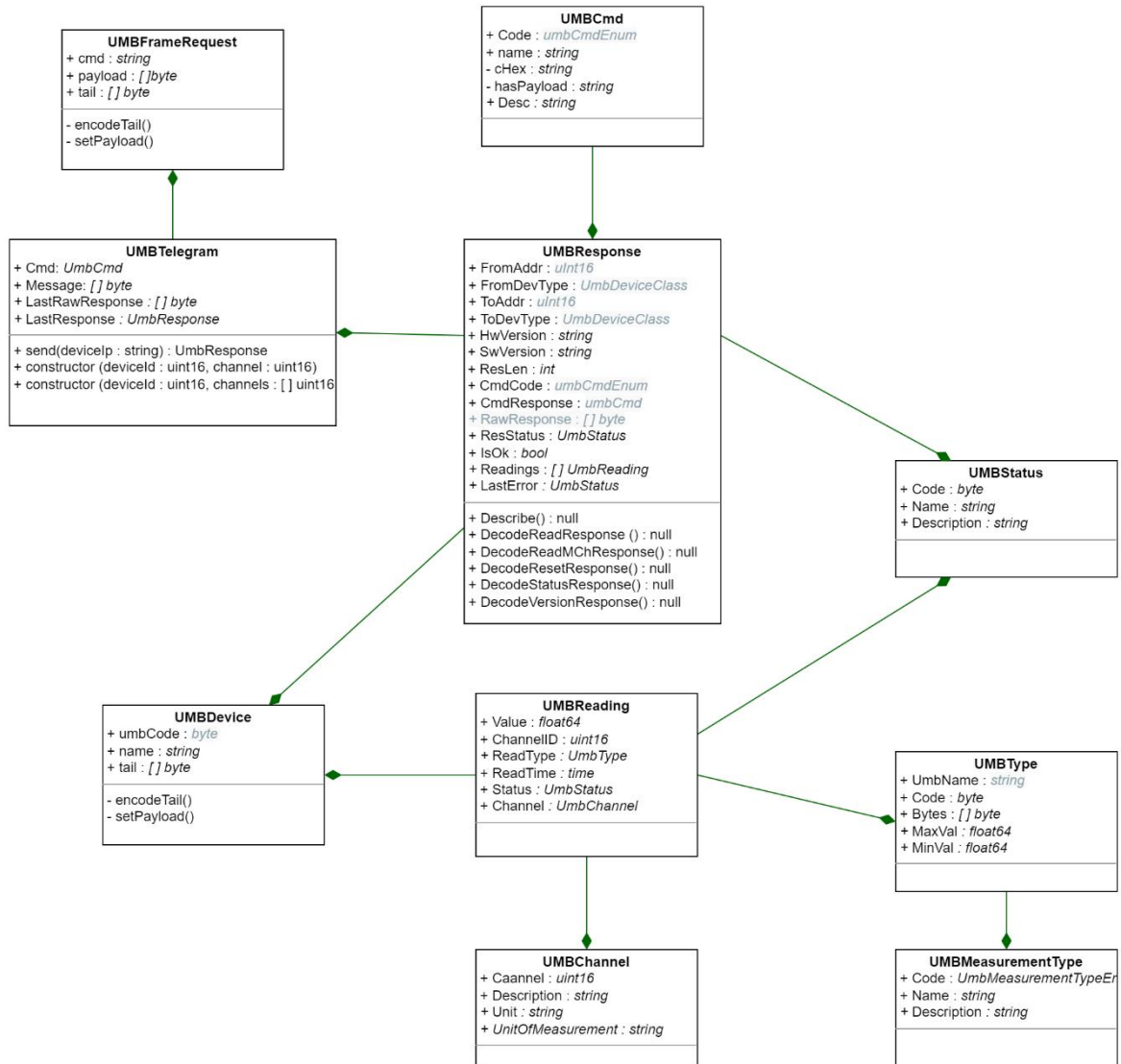


Ilustración 16: Diagrama de clases simplificado para el software de UMB-Gateway

En el desarrollo del sistema de comunicación se aprovechan las facilidades del lenguaje para implementar protocolos de comunicación usando conexiones TCP directamente a través de sockets de sistema. A partir de allí se definen cada uno de los objetos pertenecientes a cada una de las capas del modelo OSI para establecer la comunicación y crear las tramas de UMB-Binary.

1	2	3 - 4	5 - 6	7	8	9	10	11 ... (8 + len) optional	9 + len	10 + len 11 + len	12 + len
SOH	<ver>	<to>	<from>	<len>	STX	<cmd>	<verc>	<payload>	ETX	<cs>	EOT

**Response Frame:**

1	2	3 - 4	5 - 6	7	8	9	10	11	12 ... (9 + len) optional	10 + len	11 + len 12 + len	13 + len
SOH	<ver>	<to>	<from>	<len>	STX	<cmd>	<verc>	<status>	<payload>	ETX	<cs>	EOT

Ilustración 17: Tramas ejemplo de petición y respuesta completas del protocolo UMB-binary

## 3.2. Sistema de trazabilidad

Todos los sistemas de fabricación en líneas buscan la estandarización para llegar al ideal de las economías de escala. Para ese fin los sistemas de información han sido aliados de las mejoras de productividad sin importar el tipo de fabricación (discreta, continua o en *batches*), en particular porque permiten verificar la capacidad funcional (*throughput*) en tiempo real y, haciendo el símil de un sistema de control lineal, dar el punto de medición y la retroalimentación o *feedback* a través del cual se puedan hacer ajustes en la entrada para llegar a la capacidad deseada.

En las líneas de fabricación de productos alimenticios las características principales con la gran industria se mantienen, y también la necesidad del sistema de seguimiento, en el caso de la fabricación por lotes que tenemos en el proyecto actual en el ahumado; el seguimiento de fabricación de lotes, los consumos de materias primas y la salida de productos finales, brinda todos los parámetros necesarios para controlar la producción y llegar a las capacidades de salida requeridas a tiempo. La recopilación de toda esta información es una excelente fuente para rastrear posibles problemas de calidad o de productividad de la línea en relación con cada lote individual. Estas características además, son especialmente importantes en la industria alimentaria, debido a la naturaleza de los productos ofrecidos, ya que los comestibles necesitan asegurar procedencia de sus materias primas, llevar un registro de productos consumidos en cada proceso y en algunos casos hacer seguimiento de las condiciones de fabricación con registros comprobables, para evitar o ayudar en casos de lotes con defectos o problemas para el usuario, por posibles fuentes de contaminación, calidad no deseada, etc.

La fábrica intervenida solía realizar estas tareas manualmente, antes de la ejecución del proyecto, para ello utilizaba formatos y registros escritos a mano, donde los operadores mantenían el control de las fórmulas de fabricación, números de lote, fechas de ejecución y personal encargado. Por ello como parte del proyecto global se propuso un software para digitalizar este trabajo, en el cual se pudiera almacenar, pero también rastrear fácilmente datos históricos y a su vez sirviera como punto de integración en el Gemelo digital a propuesto ya que la información de producción será la que ejerza de fuente de datos para la construcción y ejecución del modelo.

El software de trazabilidad cuenta con varias funcionalidades, que pueden ser usadas por operarios de varios tipos o administradores, según su necesidad. Para ello el software cuenta con un sistema de autenticación que sigue las mejores recomendaciones para construcción de software seguro de tipo corporativo:

- Autenticación con contraseña segura.
- Inicio de sesión para usuarios independientes y accesos filtrados a través de roles de usuario.
- Contraseñas cifradas en el almacenamiento y durante la transmisión.
- Compatibilidad con SSL y protocolo HTTPS, en caso de usar el modo HTTP, las contraseñas son enviadas como hash.
- Control de sesiones, con renovación a través de base local y tokens.
- Libre de cookies.
- Operación completamente ejecutada a través de API, que permite el desarrollo de aplicaciones paralelas para móvil, web y pasarelas como las definidas en los demás módulos del proyecto.

Aunque interfaz de usuario (ui + ux) del sistema de trazabilidad, no es parte de este proyecto, se nombra a continuación algunas funcionalidades, ya que están íntimamente relacionadas con acciones en la API principal, y que interactúan con el sistema de IoT. El software descrito a continuación ha sido desarrollado como una interfaz web, 100% cliente de la API principal y comunicándose a través de HTTP; es compatible con dispositivos móviles, por ordenadores, o tabletas a través de conexión a red local o internet según la infraestructura de montaje IT.

A continuación, del numeral 3.2.1 al 3.2.7 se nombrarán funcionalidades de la aplicación web que tienen que ver con uno de los casos de uso más importantes del proyecto, la interacción con operarios de planta para la digitalización del proceso (Ilustración 18).

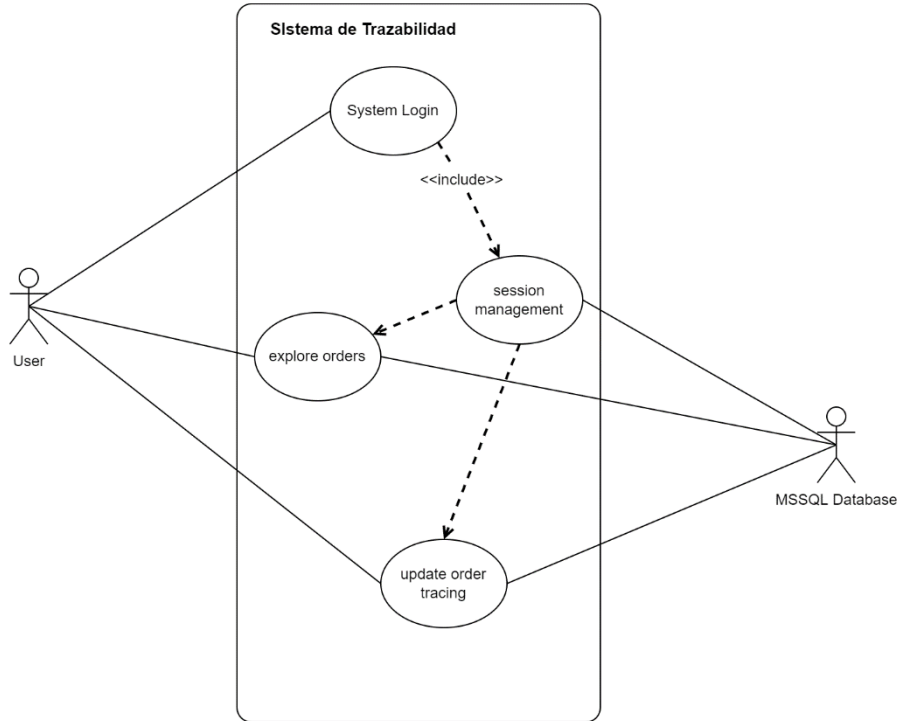


Ilustración 18: caso de uso usuario operador – datos - con sistema de trazabilidad

### 3.2.1. Gestión de recetas

El sistema de trazabilidad realizado se basa en un administrador de recetas simplificado para el usuario, donde los productos finales se configuran de acuerdo con sus necesidades de materia prima y los pasos de procesamiento.

Las materias primas están parametrizadas por tipo y los pasos de procesamiento pueden ser también editables, para por ejemplo añadir etapas de producción nuevas.

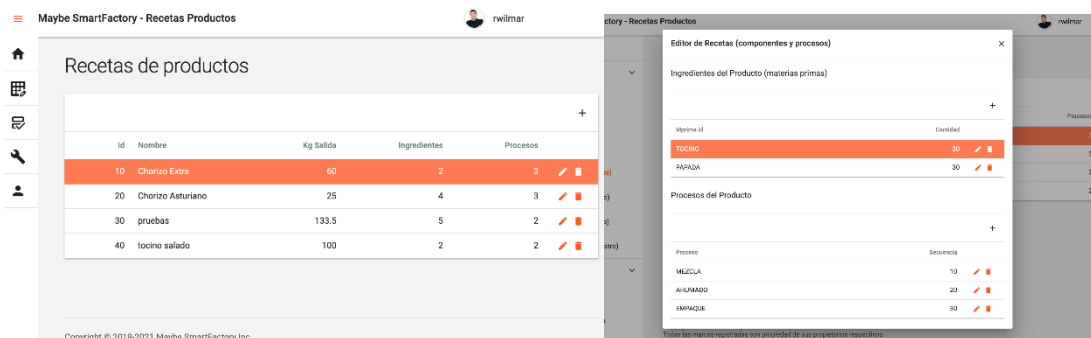


Ilustración 19: capturas de pantalla del subsistema de trazabilidad – gestión de recetas

Las transacciones o modificaciones de productos se muestran a través de la aplicación en menús desplegables activos para los usuarios autorizados en cada sección. El sistema es lo suficientemente flexible para adaptarse a una cantidad variable de productos con diferentes secuencias de proceso y necesidades de materia prima, incluso se pueden preparar recetas para el mismo producto y una cantidad objetivo diferente.

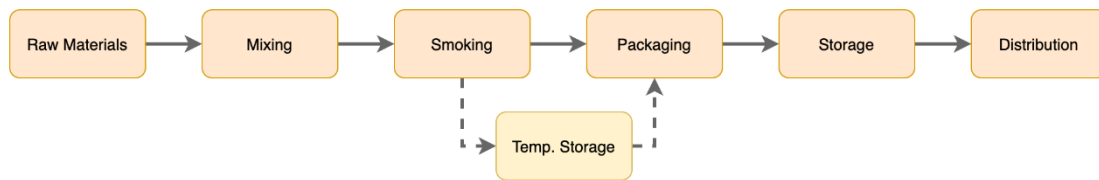


Ilustración 20: diagrama de flujo de procesos completo para la fabricación de chorizos.

La aplicación incluye un menú de fabricación, para interactuar con los principales procesos. Para realizar las actividades de este proyecto, se han implementado las etapas de: almacén de materias primas, mezclado y ahumado.

Por un lado, los operadores pueden hacer seguimiento, consultando los productos y cada etapa de producción para estar informados y tomar decisiones asertivas en relación con el rendimiento del proceso o el aumento de la producción para un lote de producto determinado. Por otro lado, también se pueden integrar muestreos para control de calidad y caracterización. Por ejemplo, un chorizo recién producido se somete a un análisis de humedad contenida, textura, evaluación de color, etc. para determinar si ese lote cumple con los requisitos de calidad; estos datos se pueden incluir como un sensor fuera de línea utilizando la interfaz del software y directamente al sistema a través de la API del sistema de control de monitoreo.

### 3.2.2. Gestión de materias primas

El inventario y trazabilidad de materias primas y el seguimiento es una parte crucial en la fabricación de alimentos. La aplicación cuenta con herramientas para administrar el inventario clasificando productos de materia prima por tipos de producto, proveedores, lotes, fechas de recepción y vencimiento. Cuenta además con tablas para la organización de tipos de materia prima, proveedores, productos finales, y etapas de fabricación que se pueden acceder editar y seguir en las tablas maestras y de configuración del sistema.

El sistema también cuenta con la posibilidad de utilizar y crear entradas de inventario (albaranes de compra) que incluyen información referente a cada transacción con los proveedores, como el precio de compra, el número de lote, el proveedor y las fechas de vencimiento.

En el inventario el stock en cantidades y precios puede ser solicitado en cualquier momento por el módulo de inventario, (almacén y Kardex) donde se guardan todas las transacciones por Entrada de inventario / orden de compra y consumo en cada fabricación de producto a través del número de lote de mezcla (Ilustración 21). De esta manera, las materias primas se rastrean cada vez que pasan por una fase de fabricación, por lo que es posible saber qué ingrediente se utilizó y cuándo se añadió a la mezcla. Esto se refleja en las tablas de Kardex de forma inmediata.

El sistema cuenta con la posibilidad de generar códigos QR para cada producto que ingresa al inventario, los cuales se pueden utilizar para organizar y visualizar físicamente el almacén de víveres y para actualizar en tiempo real las transacciones de inventario mientras los operadores están haciendo las mezclas. Estas transacciones se muestran y actualizan de forma instantánea en el

inventario, que está disponible para todos los usuarios del sistema. Estos códigos QR se pueden imprimir fácilmente a través de la aplicación, que genera reportes para impresión en pdf, para inkjet o impresoras de etiquetas.

Dichos reportes pueden incluir información complementaria en cada etiqueta como el nombre del proveedor, la fecha de vencimiento, fecha de recepción u otros campos del albarán o la transacción de inventario que sean de interés para el administrador del almacén físico. De esta forma se agilizan las transacciones de inventario entre la oficina y la fábrica; cabe aclarar que los códigos QR de estas materias primas son diferentes de los QR que se utilizan para identificar las mezclas y los procesos de ahumado, o los códigos QR que se utilizan para identificar los estantes / carros. Para ello, la aplicación detecta de forma inteligente el tipo de código QR y las acciones disponibles a través de un filtro de referencia interna.

The screenshot shows the 'Almacén' (Warehouse) management interface. The main content area displays a table of inventory items with the following data:

Proveedor	Lote	Disp	↓ 2 Cant Disp(Kg)	Valor Disp(€)	Fecha Caducidad	Ultima transac
> M.Prima: AGLO 611LR AL		1	10 0			29/4/2021 12:06
> M.Prima: EUROPIMENTON		1	8.2 0			29/4/2021 12:06
▼ M.Prima: FOSFOSAL		1	49.5 247.5		30/9/2021	27/4/2021 20:54
▼ AGRUPASAL.SA	213d	<input checked="" type="checkbox"/>	49.5 247.5		30/9/2021	27/4/2021 20:54

Below the table, a detailed view for 'FOSFOSAL (10046) - Lote: 213d' is shown, including a table of movements:

Movimiento	Albarán	Mezcla	Cantidad	Precio unit	Precio transac	Notas	Fecha
Entrada	343		50	5	250		27/4/2021 11:25
Consumo		10	-0.5	5	-2.5		27/4/2021 20:54

Ilustración 21: captura de pantalla del Sistema de trazabilidad – gestión de almacén

Los códigos QR se generan con sencillos pasos en la aplicación y se pueden imprimir en cualquier dispositivo de impresión disponible. Las actualizaciones futuras podrían enviarse a una impresora de embalajes de la empresa. Los códigos pueden contener información adicional según las necesidades de la fábrica, simplemente modificando el diseño de impresión. Para las materias primas, los campos disponibles incluyen ID de materia prima, el número de lote / lote, proveedor, número de lote de origen. Estas tarjetas se pueden utilizar para obtener rápidamente información físicamente detallada sobre el producto.



Ilustración 22: vista de etiquetas de materia prima, con información de albarán de entrada

La generación de códigos QR se puede realizar directamente desde el navegador mientras se crean las entradas de inventario o albaranes de compra en la gestión de inventario. Después de crear el pedido que incluye información sobre su proveedor, fecha de entrada y materiales, con solo presionar un botón se genera el trabajo de impresión (Ilustración 22, Ilustración 23). La generación se realiza mediante documento *pdf*, siendo compatible con la mayoría de las impresoras de etiquetas e impresoras de sobremesa del mercado. También se puede utilizar cualquier dispositivo (pc / mac / tableta / teléfonos móviles) para imprimir siempre que el dispositivo y la impresora tengan disponibles los controladores de dispositivo adecuados.

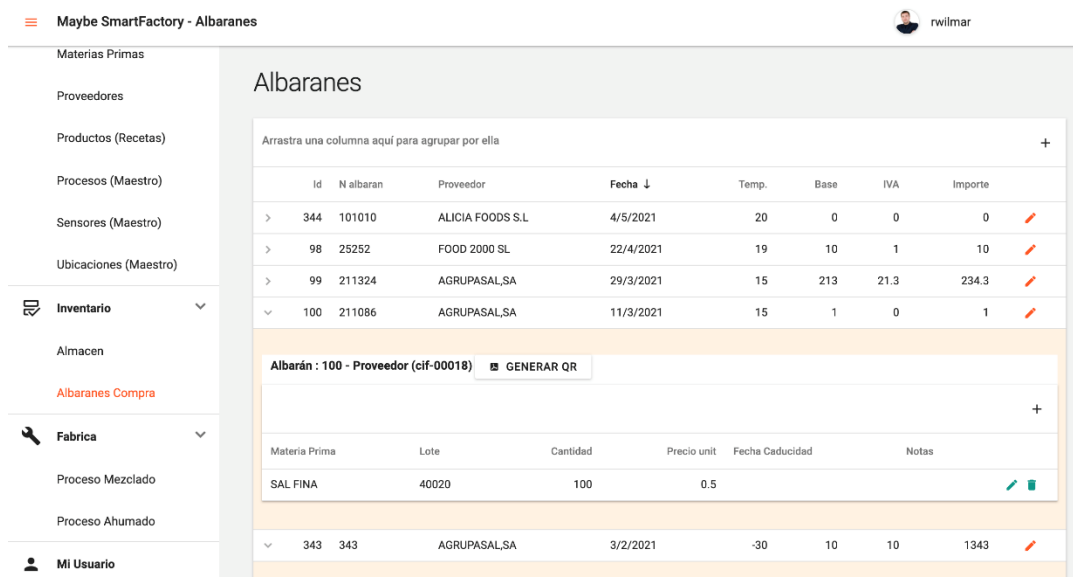


Ilustración 23: captura de pantalla del Sistema de trazabilidad – gestión de ingresos de materia prima / albaranes de entrada

### 3.2.3. Administrador de mezclas

Uno de los pasos más importantes es el mezclado para la fabricación. En esta etapa, la primera de la línea de producción y segunda en el manejo de la fábrica, se seleccionan las materias primas y se crea un lote de mezclado. En la aplicación de este proyecto, estos números han continuado la misma

codificación que la manejada históricamente por la fábrica en sus registros manuales, de tal forma que pueda hacerse un seguimiento transparente con los lotes de mezclado ya realizados en la fábrica.

La digitalización de este proceso incluye la integración con el administrador de materias primas y el administrador de recetas en una interfaz simple pero que incluye la adición de campos con información complementaria sobre las mezclas.

Para comenzar un proceso de mezclado, los operadores pueden elegir un producto para fabricación, debido a la pre-parametrización de recetas, por ello, la transacción se llenará automáticamente con la lista de materias primas y las cantidades requeridas para realizar este producto. De esta forma que el operador solo necesitará completar el número de lote y confirmar las cantidades de acuerdo con las necesidades específicas de la mezcla y su experiencia (Ilustración 23). Al final del proceso de mezcla, el operador puede generar códigos QR e imprimirlos para seguir el mezclado a través de las siguientes etapas de producción.

El generador de códigos QR cuenta con dos opciones: “generar e imprimir nueva plantilla” y “imprimir todos los QR de mezcla”. La primera opción y por defecto hace dos pasos a la vez, crea los lotes de ahumado para el numero de estantes pre-parametrizados, y genera códigos QR en una plantilla que contiene tiene tanto el lote de mezclado como el lote del proceso de ahumado (antes de activarse). La segunda opción simplemente imprime todos los códigos QR que ya se hayan generado para el proceso de mezclado. De esta forma se pueden tanto consultar los QR ya existentes, consultar los procesos de ahumado que ha tenido cada proceso de mezclado, y en caso de ser necesario aumentar el número de lotes de ahumado para la mezcla realizada, sin necesidad de modificar los parámetros de preconfiguración.

El creado automático de los procesos de ahumado en la etapa de mezclado ocurre porque cada mezcla va a varios estantes / carros de ahumado, generando de esta forma varios lotes de ahumado, ya que cada uno puede por ejemplo ir a una cámara de ahumado diferente o tener diferentes condiciones de procesado, con diferentes días de curado o temperaturas de procesamiento. También existe la posibilidad de que este número de lotes de ahumado sea variable respecto a las cantidades de mezclado, por ejemplo; dependiendo de algunas condiciones climatológicas, podría ser ideal colocar menos productos en cada estante si el clima es muy húmedo, cambiando así el número de procesos de ahumado por cada proceso de mezclado. Esta caracterización del proceso fue adaptada específicamente para cubrir las necesidades de la fábrica de embutidos y sus productos de elaboración tradicional, pero puede no ser necesaria en procesos o productos de tipo más estandarizado.

Maybe SmartFactory - ProcesoMezclado rwillmar

Materias Primas  
Proveedores  
Productos (Recetas)  
Procesos (Maestro)  
Sensores (Maestro)  
Ubicaciones (Maestro)

Inventario  
Almacén  
Albaranes Compra  
Fabrica  
Proceso Mezclado  
Proceso Ahumado  
Mi Usuario

### Procesos de Mezclado

INFORME MEZCLAS

Lote	Producto	Unidades	Fecha inicio	Notas	Operario	M.P.	PAhu
2007	tocino salado		6/5/2021		Eduardo	2	1

Producto: tocino salado - Lote: 2007 - Procesos Hijos: 1

GENERAR QR -

- Generar e Imprimir Nueva Plantilla
- Imprimir todos los QR de Mezcla

Materia Prima	Lote	Cantidad	Notas	Fecha Caducidad
SAL FINA	1sdt (960 Kg)	10		6/5/2021
TOCINO	8256 (190 Kg)	90		6/5/2021

Lote	Producto	Unidades	Fecha inicio	M.P.	PAhu	
2006	Chorizo Extra	2	29/4/2021	0	11	
2005	pruebas	1	27/4/2021	2	7	
2001	Chorizo Extra		26/2/2020	Wilmar	1	3

Ilustración 24: captura de pantalla del Sistema de trazabilidad – procesos de mezclado.



### 3.2.4. Interacción con el proceso de ahumado

El proceso de ahumado en la fábrica es un proceso dual, en el que los operadores embuten chorizos a partir de mezclas, los organizan en estantes/carros para colocar en las salas de ahumado. Luego, colocan estos estantes a ahumar en cámaras de ahumado. Una vez dentro de la cámara de ahumado, cada estante es localizado en una posición de la cámara y puede ser movido de acuerdo con las necesidades del proceso, la climatología, el tipo de producto y las necesidades logísticas de la fábrica. La duración total del proceso de ahumado varía entre 4 y 10 días dependiendo de los tamaños (diámetro del producto) y el tipo de producto a fabricar (por ejemplo, una morcilla tarda notablemente más días en curado que el resto de productos).

Cada carro contiene un identificador único, que tiene un código QR, al igual que las tarjetas impresas que tienen la información de mezcla y los QR de Ahumado, los operadores colocan una tarjeta en cada carro / estante y luego, a través de la aplicación, vinculan la información del par carro-lote\_ahumado usando estos códigos QR de las tarjetas en el estante / carro y del lote de ahumado; el software detecta automáticamente el tipo de código y vincula los productos en consecuencia (Ilustración 25). Estos códigos se pueden leer desde cualquiera de los dispositivos que utilicen los operadores (ordenadores, teléfonos inteligentes, tabletas) simplemente usando un navegador web.

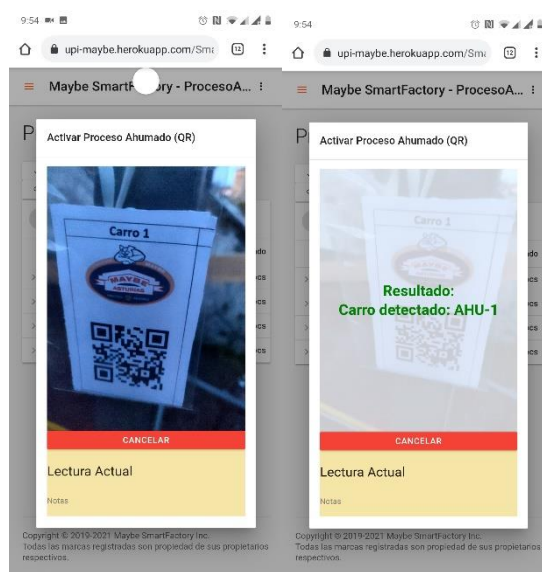


Ilustración 25: Ejemplo de lectura de código QR en la aplicación de trazabilidad – lotes de ahumado

Para efectuar la activación de cada lote de ahumado hace falta leer los códigos QR o vincular cada proceso de ahumado con un carro para procesado. La aplicación cuenta con ambas opciones, accesibles a través del menú de proceso de ahumado; en caso de usar el detector de códigos QR, se activa la cámara del dispositivo con un formulario que visualiza los códigos ya leídos y las activaciones (los pares carro-proceso) ya realizadas. Para realizar la lectura una vez en la vista de lectura de QR con la cámara activada, basta con acercar un código al dispositivo y verlo en la cámara, entonces se leerá el código y se decodifica automáticamente.

Se puede acceder al lector de QR a través del botón "activar proceso de ahumado" en la pantalla del proceso de ahumado (Ilustración 27). Al leer, el sistema identifica el tipo de código y cada vez que se detecta un par, el ID de carritos / estantes se vincula a un proceso de ahumado durante el tiempo de

proceso predeterminado. Esto se sobrescribe automáticamente cuando se saca un carrito de una cámara de ahumado. El algoritmo que describe este proceso de automatización está disponible en la Ilustración 26.

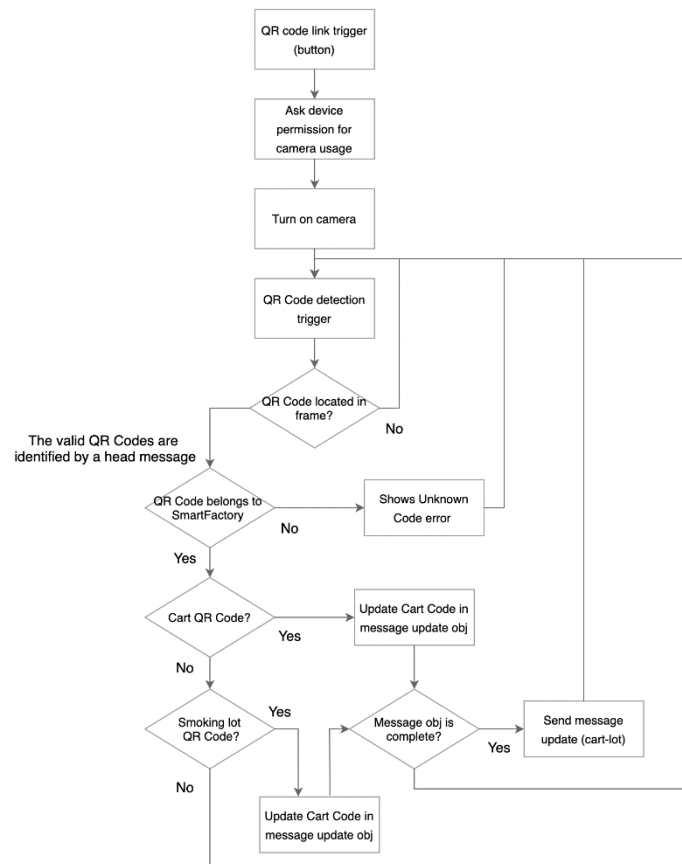


Ilustración 26: diagrama de flujo del lector de códigos QR para la automatización de los procesos de ahumado

La pantalla principal del proceso de ahumado muestra información sobre los procesos de ahumado de los últimos 30 días, el ID del lote de ahumado, el ID del lote de mezcla, el nombre del producto, la duración del proceso (fecha de inicio y fecha de finalización) y el personal que trabaja con cada lote (Ilustración 27).

Maybe SmartFactory - Home. rwilmar

### Procesos de Ahumado

✓ ACTIVAR PROCESO AHUMADO (CON QR) 🔍 IR A VISOR DE PROCESO

Mezcla ↑

Producto	↓ Ahumado	Carro	Notas	Operario	Fecha inicio
> Mezcla: 2001 (Chorizo Asturiano, 0 Act)	1Procs			Juan	26/4/2021
> Mezcla: 2005 (pruebas, 0 Act)	7Procs			Wilmar	27/4/2021
✓ Mezcla: 2006 (Chorizo Extra, 0 Act) (Continúa en la página siguiente)	11Procs			Wilmar	30/4/2021
Chorizo Extra	7114			Wilmar	30/4/2021
Chorizo Extra	7113			Wilmar	30/4/2021
Chorizo Extra	7112			Wilmar	30/4/2021
Chorizo Extra	7111			Wilmar	30/4/2021
Chorizo Extra	7110			Wilmar	30/4/2021

### 3.2.5. Monitor de proceso

Cada proceso de ahumado captura la actividad de los sensores a medida que cada carro pasa por las salas de ahumado en cada una de sus áreas de seguimiento parametrizadas. La temperatura y la humedad de los sensores equipados en el carro o los carros vecinos se registran y se pueden rastrear y solicitar. De esta manera, la información sobre las mezclas que se fuman se puede actualizar y almacenar. Además, los procesos históricos se pueden revisar sobre lotes de producción específicos.

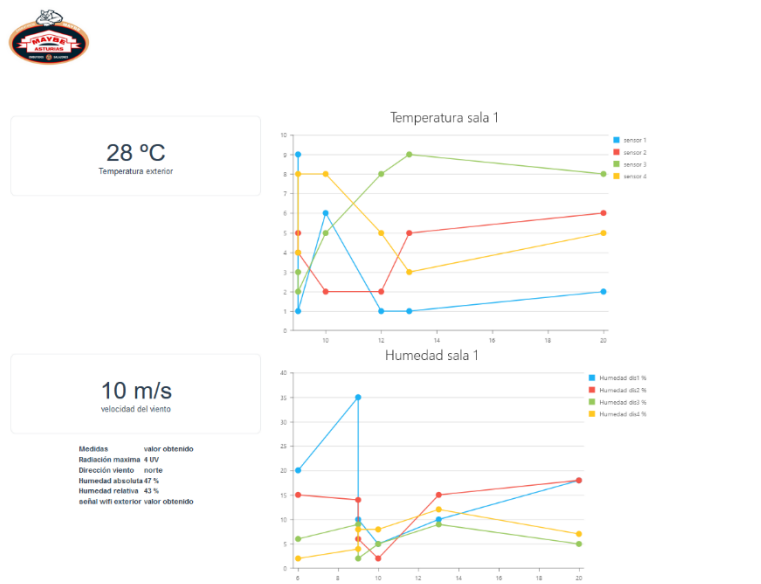


Ilustración 28: captura de pantalla del Sistema de trazabilidad – monitor de procesos

### 3.2.6. Funcionalidades complementarias

La apariencia de pantallas adicionales y complementarias de la aplicación en ordenadores o tabletas se muestra a continuación. La aplicación de muestra se puede encontrar en la dirección pública <https://upi-maybe.herokuapp.com/SmartFactory>, por su parte se ha instalado una versión final de la aplicación en el servidor de fábrica de Embutidos Maybe con la dirección IP fija local, con todos los requisitos necesarios para trabajar de forma segura como una solución *on-premise* que incluye:

- Servidor Microsoft SQL.
- Servidor web SmartFactory basado en Node.js que incorpora interfaces frontales realizadas en VUE.js, instalado como un servicio de Microsoft Windows.
- Sistema de control de seguimiento integrado en el servidor web.
- Servicio UMB-Binary instalado como un servicio de Microsoft Windows.
- Servidor de puerta de enlace MHS integrado en el servicio de puerta de enlace UMB-Webserver.
- Certificados y servicios https seguros.

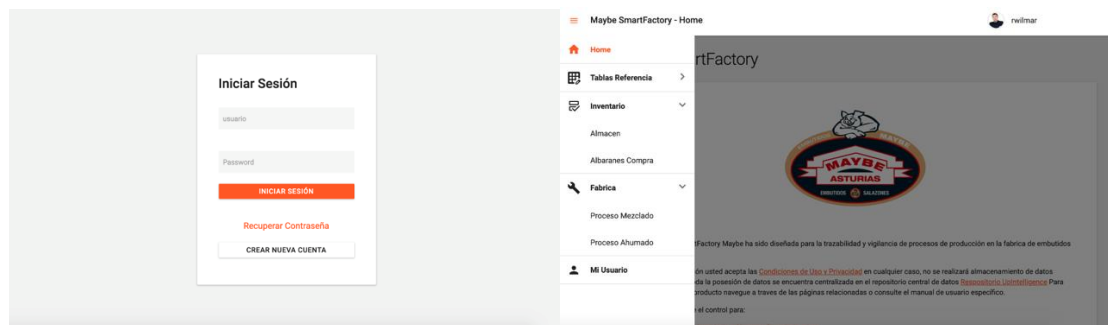


Ilustración 29: captura de pantalla del Sistema de trazabilidad – inicio de sesión y menú principal

La pantalla de inicio de sesión del sistema identifica de forma única cada usuario mapeando los permisos según los perfiles de usuario, de esta manera se pueden restringir accesos a pantallas completas a través de la gestión por medio de tablas en la base de datos o directamente a través de la API principal.

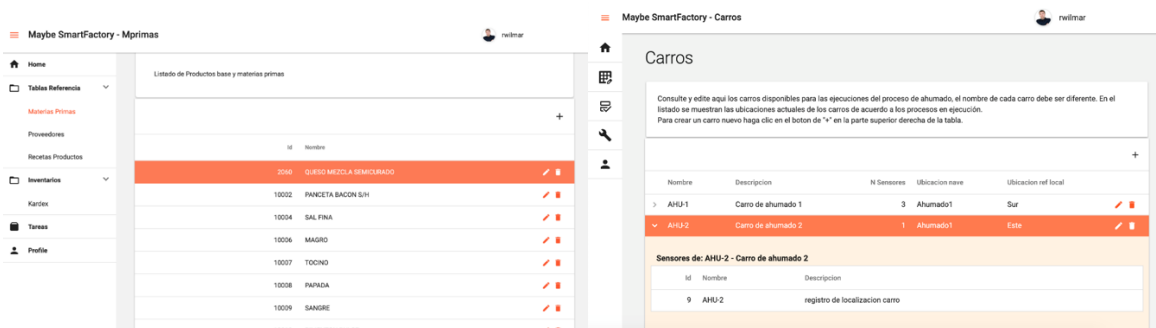


Ilustración 30: captura de pantalla del Sistema de trazabilidad – pantallas de configuración.

Las pantallas de configuración sirven para configurar parámetros importantes de la aplicación y los procesos, por ejemplo, se pueden añadir datos a las tablas maestras de productos de fabricación, añadir detalles sobre las recetas, editar los procesos de fabricación y sus etapas dentro de las recetas de producto y añadir o editar proveedores y materias primas. Todos los modelos de pantallas de configuración tienen la misma interfaz de manejo en forma de tablas editables en línea (Ilustración 44)

### 3.2.7. Módulo de monitoreo y control

El módulo de control y monitoreo engloba las acciones de la aplicación web que son entradas de datos de proceso, importantes en 4 casos de uso de la aplicación: el consumo de materias primas (Ilustración 31), la creación de procesos de ahumado (Ilustración 32), el seguimiento de los lotes de ahumado o finalización de procesos (Ilustración 37). En este, los operarios actúan como fuente de datos y desencadenadores de las acciones de actualización, al agregar procesos o asignar procesos a lotes de producto.

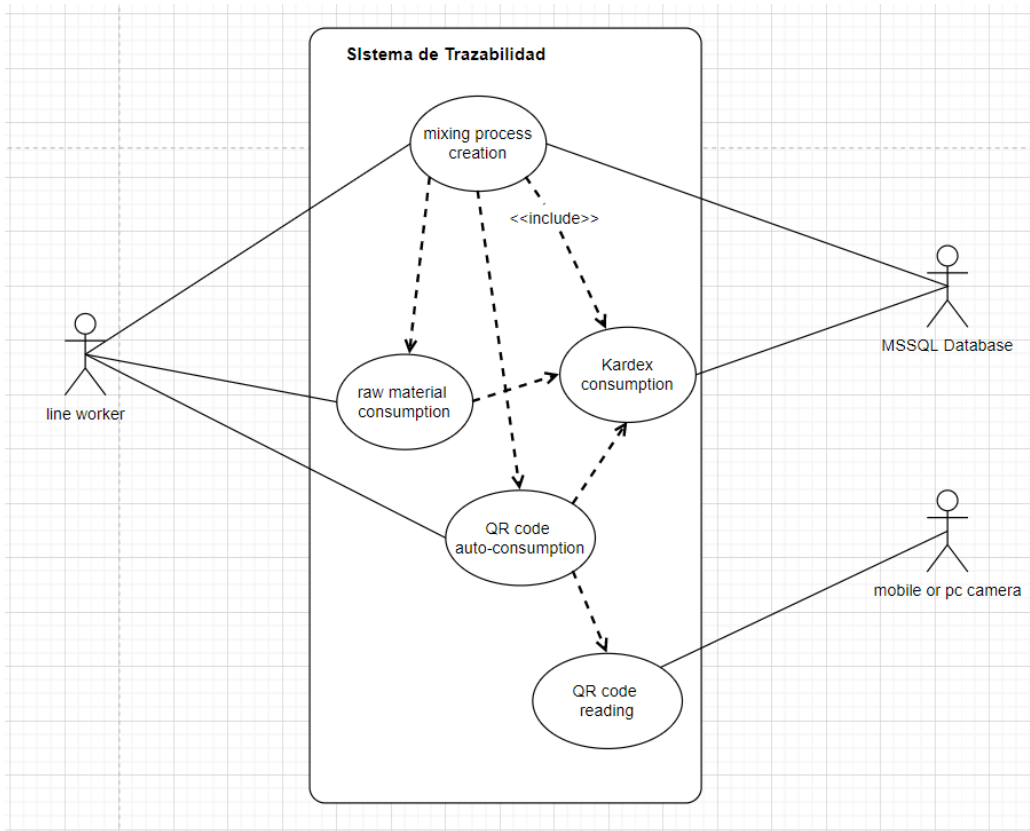


Ilustración 31: diagrama de caso de uso para registro de consumo de materias primas.

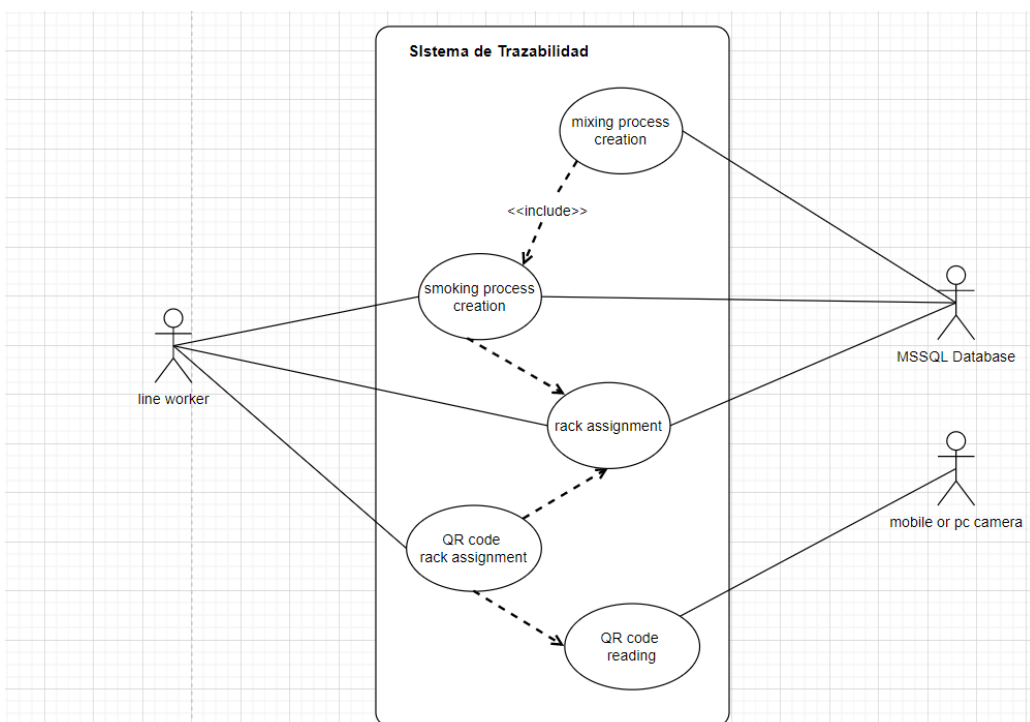


Ilustración 32: diagrama de caso de uso para creación de procesos de ahumado y asignación de racks.

El módulo de monitoreo y control también ejecuta acciones en la base de datos cuando la interfaz gráfica (aplicación de trazabilidad) del software activa eventos como la adición de lecturas de sensores fuera de línea (pH y actividad del agua). Estos eventos tienen acciones simples, pero con

procesamientos específicos e importantes para el sistema, tal como se muestra en la arquitectura propuesta en el sistema IoT y el modelo de almacenamiento de datos por el software de trazabilidad.

Eventos gestionados por el módulo de monitoreo y control:

- Autoconsumo de lotes de materia prima en el proceso de mezclado.
- Asignación de lotes de mezcla a procesos de ahumado por códigos de barras.
- Seguimiento fuera de línea de los movimientos de cada carro de ahumado en la rejilla de cada sala, para obtener información de la ubicación en el proceso de ahumado. Debido a la naturaleza del proceso de ahumado, los carros / estantes de ahumado que sostienen cada ristra del producto, se mueven para dentro, hacia afuera y entre cámaras de ahumado o se reposicionan dentro de la misma cámara según necesidades del proceso y la experiencia de los operarios al vigilar el producto.
- Finalización del proceso de ahumado y liberación de carros para su uso posterior.

En el módulo de API integración, toda la información recopilada se almacena en una base de datos relacional desarrollada con MSSQL mediante conexiones a través de *endpoints* predispuestos en la API de comunicación diseñado en Node.js utilizando autenticación por token y comunicaciones https seguras.

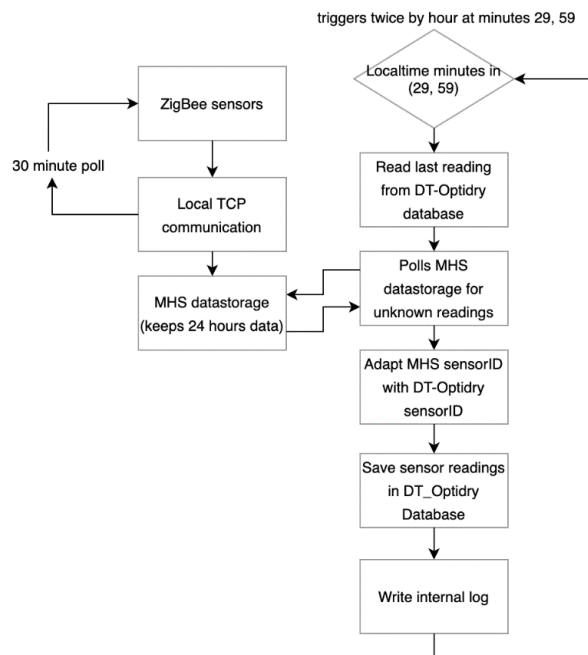


Ilustración 33: diagrama de flujo de la aplicación de lectura y almacenamiento de sensores de proceso.

Para la solución de seguimiento de los movimientos de los bastidores/carros, en lugar de cargar cada bastidor/carro con sensores de posicionamiento, temperatura y humedad (que es un proceso costoso y con algunas problemáticas de comunicación, almacenamiento de datos y mantenimiento del hardware), se implementó un sistema de sensores inalámbricos cliente y un monitor manual de posicionamiento (a través de la aplicación de trazabilidad) Esto permite un equilibrio entre la precisión mejorada en el seguimiento del proceso (temperatura y humedad por los sensores móviles), con la posibilidad viable de actualización de movimientos y el desarrollo evolutivo de las variables de control (dureza, maduración y en especial pH y actividad del agua) recolectadas fuera de línea, específicamente con pruebas de laboratorio para estimación de pH / Aw.

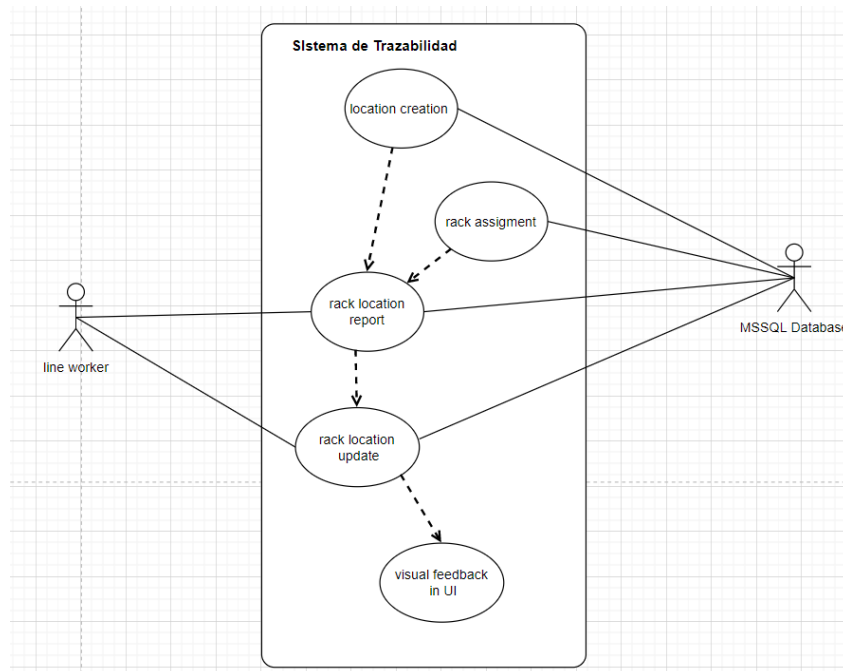


Ilustración 34: diagrama de caso de uso actualización de ubicación de carros

Cada cámara de ahumado se divide en 5 ubicaciones internas (véase detalle en la Ilustración 35), suficiente para acomodar 8 estantes por ubicación, y hace que sea un número de fácil interacción por los operarios. Esta separación en áreas internas puede cambiarse según necesidad editando las tablas de configuración del sistema. Durante el proceso de ahumado, todos los sensores en una ubicación particular se utilizarán para rastrear las variables disponibles del proceso de ahumado para todos los sensores publicando datos en dicha posición. Si un bastidor/carro y sus sensores se mueven a otra ubicación (en la misma cámara de ahumado o en una diferente), las próximas lecturas de los sensores se vinculan a esta nueva ubicación, sin alterar las variables ya leídas anteriormente. Del mismo modo, cuando uno de los bastidores se saca de la cámara de ahumado, los sensores relacionados pasaran las nuevas lecturas a la nueva ubicación, en este caso la zona de transporte.

Este enfoque tiene varias ventajas:

- Precisión mejorada, al promediar múltiples sensores cuando varios bastidores / carros que tienen un sensor comparten la misma ubicación;
- Evita la necesidad de equipar cada bastidor / carro con un dispositivo inalámbrico y sensores, ya que la ubicación tendrá información de proceso múltiple y dinámica de los bastidores / carros vecinos que si estén equipados. Esto también significa menos costos iniciales y de mantenimiento y menos ruido en el espectro inalámbrico al mantener la cantidad de dispositivos inalámbricos por debajo de un umbral problemático para *Cross fading*.
- Si un sensor está dañado, los sensores vecinos aún pueden adquirir información para realizar un seguimiento de la producción en dicho carro.
- Por otro lado, incentiva en los operadores la interacción con el producto y proceso, usando la tecnología de una forma interactiva y recibiendo información para una mejor retrospectiva de su trabajo; si la interfaz gráfica es intuitiva existe la posibilidad de rastrear históricamente los movimientos de los bastidores/carros con productos en fabricación.

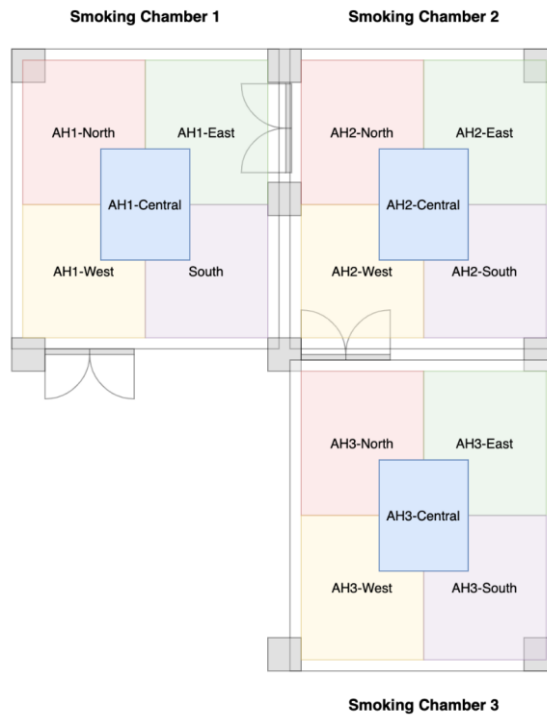


Ilustración 35: plano detalle de zonas de monitorización para los sensores ZigBee

En la solución implementada, solamente un tercio de los bastidores/carros ensamblados están equipados con un sensor móvil con capacidad de lectura de temperatura y humedad. Esto es suficiente para asegurar el posicionamiento de al menos un sensor en cada lugar ocupado con productos, véase capítulo de análisis de datos (Análisis de datos).

Para identificar fácilmente cada carro/estante por parte de los trabajadores de la fábrica, se ha propuesto el uso de una tarjeta con el número de cada estante y un código QR correspondiente, estas tarjetas estarán dispuestas en forma visible en cada estante, y son de fácil remplazo en caso de daño por manchas o daños físicos en el entorno industrial véase Ilustración 36.



Ilustración 36: Diseño y fotografía de las tarjetas con Código QR dispuestas en los carros / bastidores de chorizos en la sala de ahumado.

El último proceso relevante en el sistema de trazabilidad es la liberación de carros y finalización de procesos de ahumado (Ilustración 37). Consiste en liberar los carros de cada proceso cada vez que se quiten los productos ya terminados, y se lleven los carros al almacenamiento central, fuera de las



cámaras de ahumado; de esta manera en el sistema de trazabilidad aparecerán disponibles para usarse con otros lotes de mezclado.

Como detalle importante de implementación, desde el modelo de datos como se podrá detallar más adelante, un proceso de ahumado se identifica como la combinación entre una mezcla y el recorrido realizado por uno de los carros entre las cámaras de ahumado, hasta señalar su terminación.

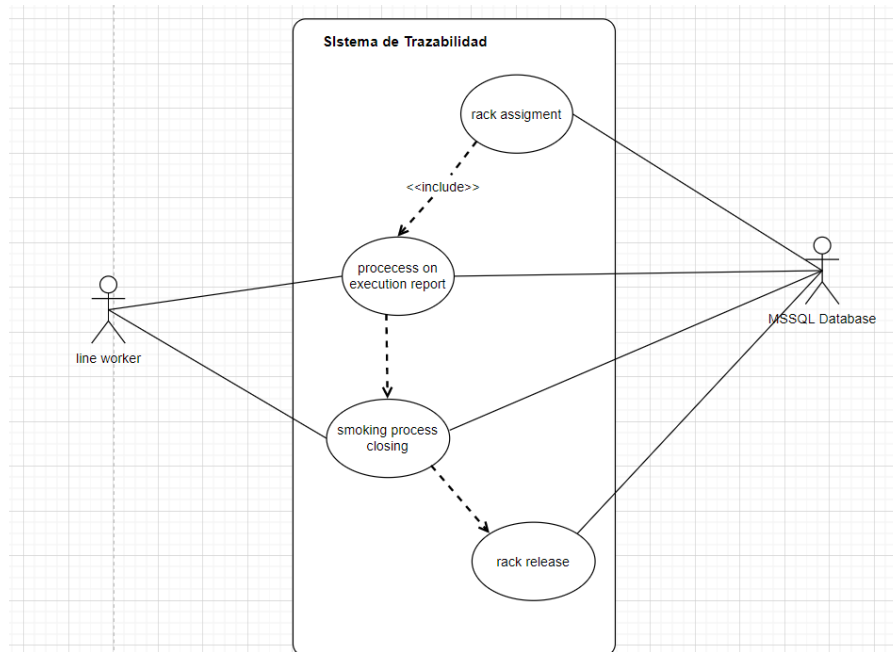


Ilustración 37: diagrama de caso de uso liberación de carros y finalización de proceso de ahumado.

### 3.3. API de integración

La API de integración es la aplicación que contiene la mayor parte de la lógica de negocio del sistema, y a su vez sirve para interconectar los demás subsistemas y actores y dar una interfaz simple a un sistema de almacenamiento en base de datos a través de un modelo de datos implementado en un ORM.

La API recibe peticiones http a través de conexiones estándar o seguras y cuenta con un sistema de autenticación que utiliza JsonWebTokens, de esta manera se tiene acceso a todas las *endpoints* disponibles. En la API, el método de comunicación, para leer datos o para desencadenar acciones se realiza mediante por el paradigma de REST, que consiste en enviar peticiones http a URL conocidas, que en algunos casos necesitan datos adjuntos para procesarse. La API se encuentra documentada a través del estándar OpenAPI, esta documentación se encuentra en la documentación adjunta y está disponible para consulta a través de cualquier navegador web.

En este capítulo se realizará una numeración de los *endpoint* disponibles en la API, la descripción del modelo de datos, y una guía de uso general de la API; debido a la gran extensión de parámetros, respuestas y descripciones, la documentación completa se expondrá en el adjunto de OpenAPI.

### 3.3.1. El paradigma REST

Las API REST han explotado su popularidad y uso debido a la flexibilidad de información y el uso de internet como sistema de procesamiento distribuido, el funcionamiento de las API REST sin embargo resulta confuso para algunas aplicaciones, este aparte busca explicar la naturaleza de REST y cómo funciona como parte de un subsistema de procesamiento. Para comprender qué es una API REST y cómo funciona, se puede hacer un símil a una biblioteca con libros (recursos), un bibliotecario (API) y personas (clientes) que desean tomar prestados (GET), agregar (POST), actualizar (PUT) o eliminar (DELETE) esos libros. Por un lado, tenemos a los clientes.

Por otro lado, tenemos el almacén de datos, normalmente una base de datos, un servidor de bases de datos o algún otro tipo de servidor de datos estáticos o dinámicos. En el medio se encuentra la API REST, que recibe, procesa y maneja solicitudes y respuestas. Cuando el cliente envía una solicitud, en este caso para obtener un recurso (GET), la API REST recibe esa solicitud, identifica el recurso solicitado, determina qué datos deben recopilarse y en qué formato de entrada, crea una representación de los datos que coinciden con los solicitados, realiza el formato de salida, lo agrupa todo con el encabezado de la respuesta que contiene metadatos (como la identificación del recurso y los hipervínculos a las acciones disponibles, los formatos de datos que tiene esta respuesta, el tiempo cuando se envió la respuesta y otra información) y lo envía todo al cliente. El cliente recibe los datos y los analiza en algo significativo para su parte, mientras que la API REST espera en silencio la siguiente solicitud.

Más adelante, cuando el cliente, su usuario, quiere cambiar algo (PUT). Estos cambios se aplican al contenido recibido en la respuesta original y se devuelven como una solicitud utilizando el ID original. La API REST recibe la solicitud, la reconoce como una solicitud de colocación de un recurso existente, anota el formato de medios solicitado, identifica el recurso solicitado, convierte los datos solicitados en un formato de medios que funcione para el almacén de datos, realiza los cambios enviados y devuelve la nueva representación del recurso junto con un mensaje de éxito para notificar al cliente que todo salió como se esperaba.

En las peticiones de creación y eliminación suceden el mismo sistema de pasos, consulta, recopilación de información, formato, procesamiento, modificaciones en los datos de origen y espera.

REST y API son siglas de *Representational State Transfer* y *Application Programming Interface*. Las API REST son parte integral del desarrollo de aplicaciones web y se están convirtiendo en los pilares del desarrollo web. REST se refiere a un grupo de restricciones de diseño de arquitectura de software que generan sistemas eficientes, confiables y escalables. Por lo tanto, REST no es una tecnología específica, sino una arquitectura de datos y una metodología de diseño que produce resultados y comportamientos predecibles y consistentes al recibir un conjunto de métodos estándar llamados verbos y devolver datos estructurados estandarizados, generalmente JSON o XML, llamados recursos.

La transferencia de estado representacional es una descripción literal de lo que está sucediendo. Realizamos la transición entre representaciones de estados y estas representaciones se transforman de un lado a otro entre la aplicación y el servidor. Esta actuación se puede entender en el proceso de un sitio web típico. Cada página consta de un solo documento HTML que contiene el contenido, además de cualquier elemento de referencia como imágenes, a su vez una o más hojas de estilo (css) que describen cómo se presenta el documento en el navegador y posiblemente código JavaScript que manipula el documento o los estilos. Cuando el visitante navega de una página a otra, envía una solicitud de URL, *Universal Resource Locator*, al servidor que apunta a un recurso web en forma de un documento HTML específico. El servidor responde devolviendo el documento junto con sus archivos adjuntos al navegador, que reemplaza el contenido anterior con todo el contenido nuevo. Esto

funciona bien, pero requiere muchos recursos. Cada nueva página requiere un documento HTML completo y el documento debe ser escrito por un desarrollador o generado por un sistema de administración de contenido antes de que se descargue y se represente en el navegador.

Ahora en el caso de una aplicación WEB, esta es descargada en el navegador que se ejecuta y se completa con datos de la web a través de documentos. En esta aplicación, cada página es una vista que representa el estado actual. Cuando el visitante carga el sitio por primera vez, se descargan todos los componentes que conforman la aplicación, incluido un marco HTML, elementos de referencia, una o más hojas de estilo y código común de JavaScript. Luego, la aplicación envía una solicitud de URI para un recurso web que representa el siguiente estado de la aplicación que se transferirá y utiliza los datos resultantes para crear la vista actual. Es decir, la aplicación no se vuelve a transferir sino los cambios de estado que esta genera, Que se detallan en los datos que se necesitan para hacer una visualización.

Cuando el visitante navega de una vista a otra, la aplicación envía una nueva solicitud de URI para el recurso web que representa el siguiente estado de la aplicación que se transfiere y se usa para agregar, modificar, reemplazar o eliminar los datos anteriores. La clave es que este estado de representación se transfiere como un objeto de datos, no como el nuevo conjunto completo de archivos. Y la aplicación puede actualizar sus datos sin renderizar la página completamente nueva.

Este paradigma de comunicación permitió el desarrollo de las aplicaciones web y las aplicaciones móviles mejorando notablemente la experiencia de usuario y es la base de las denominadas aplicaciones de una sola página. Sin embargo, el paradigma de REST es usado en múltiples aplicaciones distribuidas en servicios más complejos como los ofrecidos por procesamientos en la nube.

En el contexto de las API de REST, la API es la colección de herramientas que se utilizan para acceder y trabajar con los recursos de REST a través de sus verbos, incluidos GET, PUT, POST y DELETE. Se puede sintetizar en el recurso REST como los algoritmos de control y la API como el lenguaje utilizado para hablar con ellos.

### 3.3.2. Endpoints

Los *endpoints* de una API REST son un grupo de puntos de acceso en los cuales una API realiza la comunicación entre el código de la aplicación interna y las aplicaciones cliente que puedan estar conectadas, en este caso, las aplicaciones cliente son la aplicación web que sostiene gráficamente el programa de trazabilidad, y los servicios cliente web de umb-gateway. En otras palabras, los *endpoint* de API son la ubicación digital específica donde un programa envía solicitudes de información para recuperar un recurso digital que existe allí. Las definiciones de los *endpoint* dicen las direcciones dónde las API pueden acceder a estos recursos y los parámetros de funcionamiento.

Los sistemas que se comunican a través de API son sistemas integrados, que pueden tener procesamiento distribuido. La API funciona como servidor (en un paradigma de comunicación cliente-servidor), mientras que las aplicaciones que se comunican a ella se desempeñan como clientes; los clientes realizan solicitudes HTTP y manipulan los datos que envían y reciben a la API. Mientras que del lado servidor, se proporciona la información solicitada, los recursos solicitados, o se realizan procesamientos según el tipo de *endpoint* pedido. Las API REST y la API de este proyecto usan 4 verbos de HTTP:

- GET: para realizar lecturas de tablas o información plana (incluye archivos como imágenes o códigos QR).
- POST: para realizar creaciones de documentos o información.

- PUT: para realizar modificaciones de registros
- DELETE: para eliminar registros.

Las API REST implementan el reportar el estado de las peticiones a través de enviar respuestas con los códigos de estado estándar de HTTP, en la implementación de este proyecto se utilizan los siguientes códigos con su significado general:

- 200: procesamiento correcto de la petición, puede estar acompañado de la respuesta completa de datos en *endpoints* de tipo tabla o registro, o de un archivo JSON con información sobre el procesamiento.
- 201: confirmación de creación de registro, normalmente acompañado de un archivo JSON con información sobre el procesamiento.
- 400: solicitud errónea, debido a una falta de parámetros, parámetros incompletos o inválidos. Siempre incluye un mensaje que ayuda a depurar el error en caso de ocurrencia.
- 401: acceso no autorizado, ocurre cuando se realizan peticiones a *endpoints* que solo pueden ser consultados cuando hay autenticación por JWT (JsonWebToken)
- 404: petición inválida por ruta inexistente, ocurre cuando se realiza una solicitud a una URL no válida o utilizando un verbo HTTP no implementado.
- 500: error interno del servidor mientras se procesa la petición; normalmente va acompañado de un error con información adicional para facilitar la depuración.

Para que el punto final procese una solicitud efectiva, el cliente debe proporcionar una URL válida, un método (verbo HTTP), una lista de encabezados y un cuerpo de mensaje (datos adjuntos). Los encabezados proporcionan metadatos sobre una solicitud, como el tipo de contenido y la autenticación JWT, y el cuerpo contiene los datos enviados por el cliente al servidor, que en este caso van codificados por JSON.

Los puntos finales funcionan en conjunto con los métodos API. Los métodos son solicitudes permitidas que se pueden realizar, como GET, DELETE, PATCH o POST. Los métodos, a menudo llamados verbos en la sintaxis de las comunicaciones, a menudo se colocan justo antes del punto final especificado en una URL completa.

En el diagrama siguiente Ilustración 38 se listan los *endpoints* con su función general, su URL raíz y el tipo de verbo HTTP implementado en cada caso. En *endpoints* tipo GET de listados, es posible que exista la posibilidad de ejecutar filtros con parámetros de URL, si tal es el caso se puede observar gráficamente con un paralelogramo en la parte superior del *endpoint*.

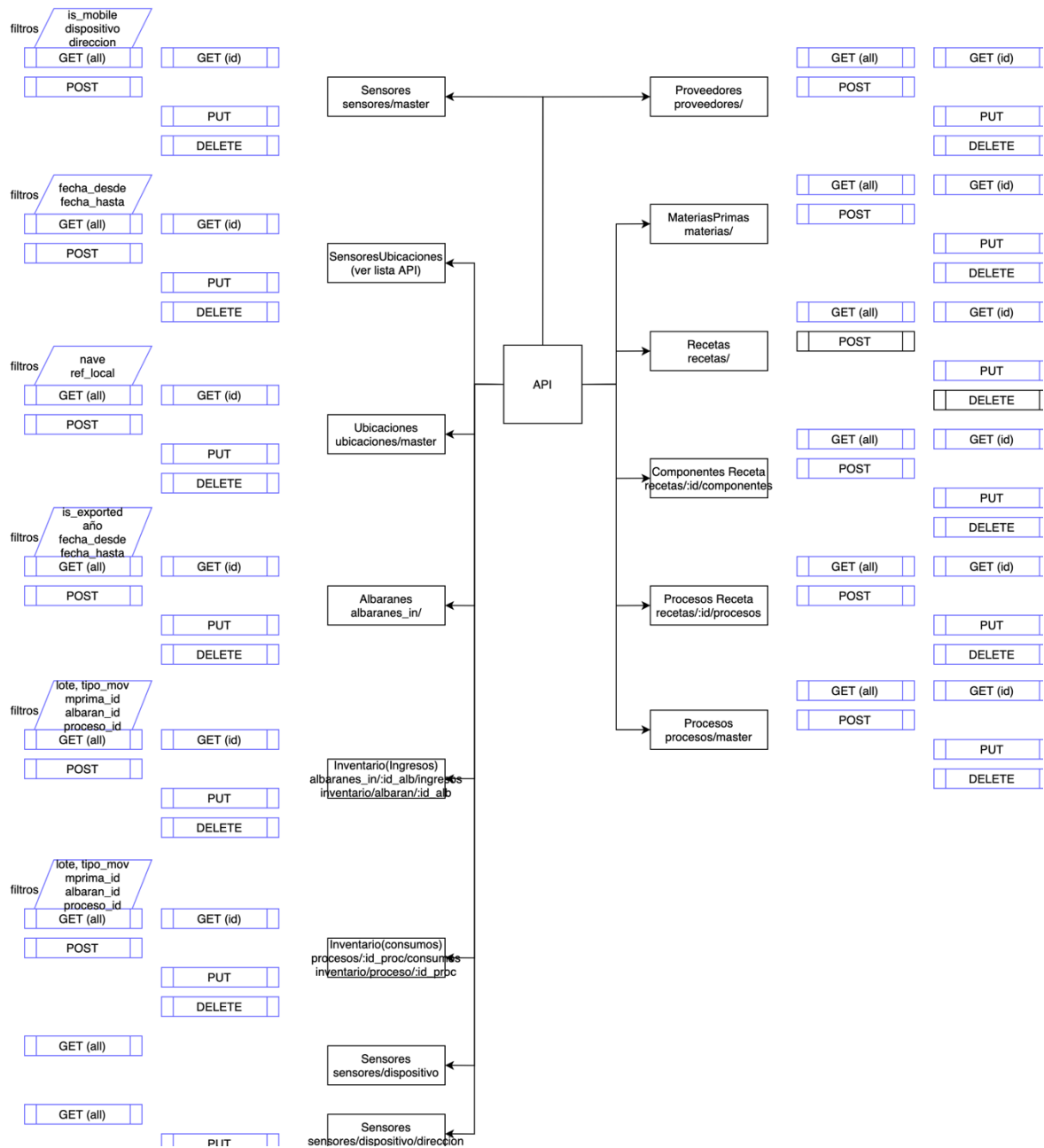


Ilustración 38: diagrama de implementación de endpoints de la API principal con verbos HTTP y filtros de consulta.

Para conocer en detalle los parámetros y requeridos por cada *endpoint* se puede usar la documentación de OpenAPI, en esta se detalla el funcionamiento de cada punto y verbo y su acción en la API, en el caso de los listados como la lista de sensores o de ubicaciones, se pueden aplicar filtros a través de parámetros de url.

En la Ilustración 39 se muestra el detalle de documentación para un endpoint, que se divide en 4 secciones:

- en el encabezado se encuentra la descripción del punto, los datos que se recuperarán o las acciones que realiza, el verbo (en el ejemplo POST) y la URI de acceso,
- en los ejemplos se encuentran ejemplos de implementación en CURL (estándar Linux) o en algunos lenguajes de programación usando las librerías de OpenApi-Swagger, en los ejemplos de

implementación se incluyen las cabeceras necesarias y opcionales (en el caso de login se excluye la cabecera de autenticación que si está presente en los endpoints seguros)

- la siguiente sección detalla los parámetros y localización, en el caso de BODY, estos deben ser incluidos en el cuerpo del mensaje, cuando el punto soporte búsqueda en listas se especifican las variables de búsqueda compatibles y la localización en URL.
- La última sección detalla los ejemplos de respuestas (Ilustración 40), con el código de estado y algunos JSON ejemplo de respuestas satisfactorias o erróneas (400, 404, 500)

## loginclear

Login endpoint for usage with clear password in the user in body.

The API provides endpoints for clear and hashed password login and account creation, clear password usage is discouraged to improve user information in unsafe environments. This endpoint responds with the header information required to use the API as well as the token and user information for the session opened

POST

/auth/loginClear

### Usage and SDK Samples

Curl Java Android Obj-C JavaScript C# PHP Perl Python

```
curl -X POST \
-H "Accept: application/json" \
-H "Content-Type: application/json" \
"http://192.168.1.116:8080/api/auth/loginClear"
```

### Parameters

Body parameters

Name	Description
body *	<pre>{   username: string   email: string   password: string }</pre>

Ilustración 39: detalle de documentación de API para endpoint de inicio de sesión loginClear.

Es importante resaltar que no todos los *endpoints* generan el mismo tipo de respuestas ante errores, por ejemplo, algunos errores de datos faltantes se detallarán como errores con estado 400 (error en petición) mientras que otros errores de datos faltantes pueden arrojar errores 404, este comportamiento sucede por ejemplo en casos de peticiones GET a detalles de registros que no existen.

En algunos casos muy específicos es posible generar errores de tipo 500 (error interno de servidor) a peticiones con parámetros inválidos, lo cual puede suceder por ejemplo en casos en que haya problemas en el formato de los json enviados en el cuerpo de mensaje.

Status: 404 - Login Error - probably due to username or password error, or by inexistant account, check error message for detailed information.

```
Schema Response Example
{
  Required: code,message
  isOk: boolean
    can be used to identify explicit error responses in some API clients, is always false
    in error responses like 500 or 401
  code: integer (int32)
  message: string
  source_message: string
    description of originating error, made by source module, if any.
}
example: [object Object]
```

Ilustración 40: detalle de documentación de API, respuesta estándar o errónea para endpoint de inicio de sesión

Detallando el funcionamiento del sistema de autenticación, como ya se ha mencionado se utilizan JsonWebToken para autenticar las peticiones, este paradigma de autenticación ofrece una gran flexibilidad y opciones configurables disponibles para los administradores del sistema, así como permite usar la API en desarrollos futuros como otras aplicaciones web, comunicaciones versátiles con otras API, y el desarrollo de aplicaciones móviles.

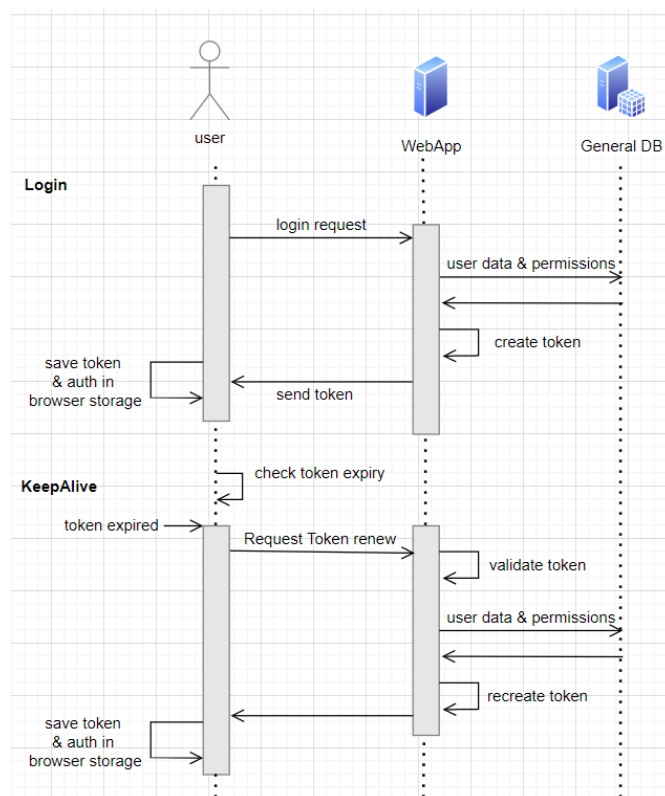


Ilustración 41: diagrama de secuencias del proceso de autenticación

Los token Json deben almacenarse por los clientes y son generados al iniciar sesión (Ilustración 41), para el inicio de sesión se usa el endpoint LoginClear o Login, la diferencia entre ambos es que loginclear recibe contraseñas en claro, lo cual está pensado para dispositivos que no soporten hash y

no puedan usar HTTPS, o cuando se usan conexiones HTTPS pero el dispositivo cliente no cuenta con librerías de criptografía, en contraste la versión LogIn predeterminada no usa contraseñas en claro sino HASH SHA-256, esta también está disponible en HTTP o HTTPS para mayor seguridad. Un Token se genera internamente y vincula la cuenta del usuario a las peticiones, estas sesiones tienen un tiempo de vencimiento predeterminado de 6 horas (configurable).

```
{
  "name": "Sarah",
  "lastName": "Thunder",
  "username": "MyUsername",
  "email": "myusername@domain.es",
  "avatar-ImgPath": "webapp/default-user-online.png",
  "sessionId": "75577bf392725280eb69",
  "expiryDate": "2022-03-22T22:01:17.556Z",
  "accessToken": "eyJhbGciOiJIUzI1NiIsInR5cCI6IkpXVCJ9.eyJpZCI6InVzZiIjOiJzZm9udW8iLCJpYXQiOiJlY2N0c5Njg4MDsImV4cCI6MTY0Nzk4NjQ3N300LWZ7ruFiE71395e2w5LwzjoJmhXFN9sy3CZr0x7HZA",
  "permissions": [
    {
      "code": 1,
      "value": 1
    },
    {
      "code": 100,
      "value": 1
    }
  ]
}
```

Ilustración 42: ejemplo de JSON respuesta de inicio de sesión exitoso

La respuesta exitosa de un inicio de sesión será un JSON que tendrá el token (accessToken en el objeto de respuesta) para adjuntar en los encabezados de solicitud (x-access-token en encabezado HTTP) para cada solicitud al sistema. La sesión se puede renovar periódicamente mediante una simple solicitud al extremo de mantenimiento de sesión keepAlive.

```
{
  "accessToken": "eyJhbGciOiJIUzI1NiIsInR5cCI6IkpXVCJ9.eyJpZCI6InVzZiIjOiJzZm9udW8iLCJpYXQiOiJlY2N0c5Njg4MDsImV4cCI6MTY0Nzk4NjQ3N300LWZ7ruFiE71395e2w5LwzjoJmhXFN9sy3CZr0x7HZA",
  "sessionId": "75577bf392725280eb69",
  "expiryDate": "2022-03-22T23:06:40.302Z",
  "transactionReport": {
    "affectedRows": 1,
    "message": "",
    "info": "Rows matched: 1 Changed: 1 Warnings: 0"
  }
}
```

Ilustración 43: ejemplo de respuesta JSON de mantenimiento de sesión

### 3.3.3. Modelo de datos

El almacenamiento de datos es uno de los aspectos más importantes de este proyecto, se ha seleccionado una base de datos de SQL server para centralizar todos los datos, incluidas las series temporales de las señales obtenidas.

EN particular la selección del almacenamiento de series temporales en SQL, aunque no siendo el acercamiento más habitual es beneficioso en este caso debido a las bajas frecuencias de muestreo que existen y a la nula necesidad de procesamiento como señal de este tipo de señales; por ejemplo, no se requieren hacer operaciones entre señales ni tampoco remuestreos en línea, siendo esas dos de las características principales que tienen las bases de datos de almacenamiento de series temporales NoSQL.



Además, el contar con un único sistema de almacenamiento facilita el despliegue de la solución y el mantenimiento de la misma.

El modelo de datos del ORM es sencillo y tiene solamente 6 tablas transaccionales, una tabla de señales y 6 tablas maestras, lo cual se puede apreciar en el diagrama de entidad relación simplificado de la Ilustración 44, en él se observan las relaciones existentes entre las tablas y se infieren las claves foráneas del modelo.

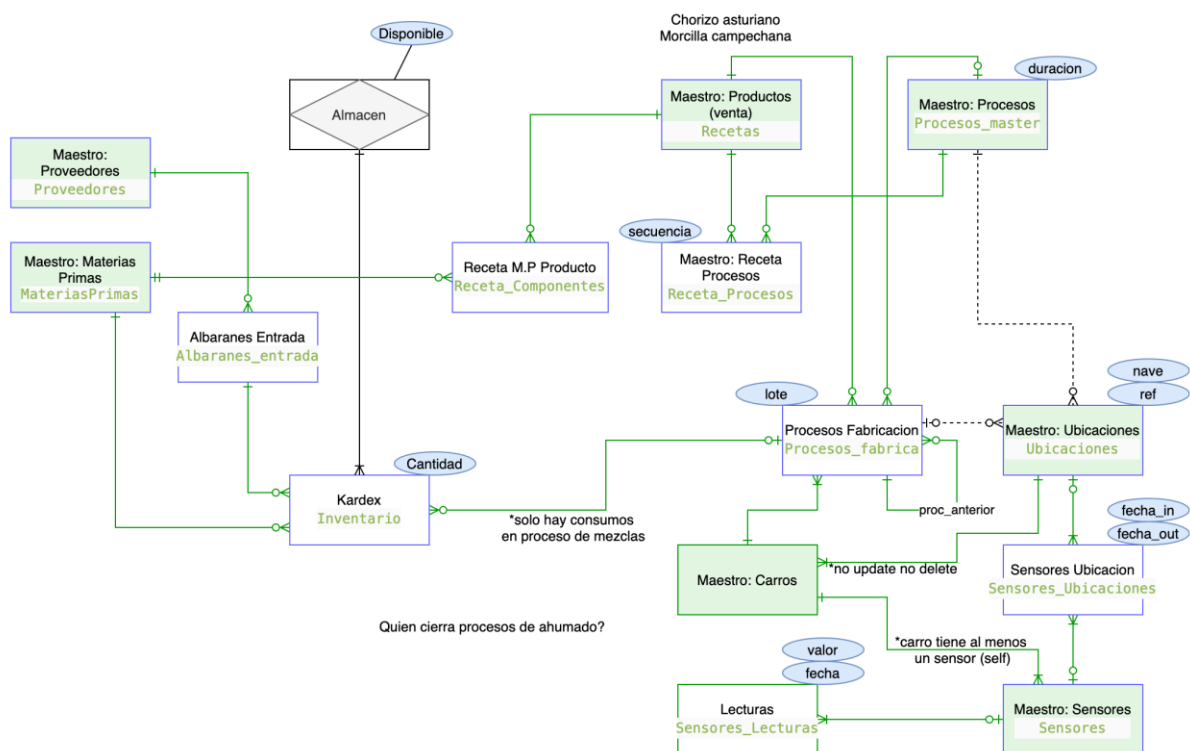


Ilustración 44: diagrama de entidad relación del modelo de datos implementado en el sistema.

Este modelo ha sido implementado en ORM en *JavaScript* en la API de integración, que centraliza la comunicación con el servidor SQL en un único punto transaccional, lo cual facilita el mantenimiento, las migraciones e incluso el cambio de tipo de servidor SQL en el futuro. Los detalles de implementación SQL se pueden encontrar en los archivos de código adjunto, específicamente en los archivos de construcción de SQL.

Como características generales del modelo de datos tenemos:

- Es posible guardar información de proveedores como registro, con datos públicos y sencillos y que no necesitan tratamiento especial en el reglamento actual.
- Es necesario almacenar registros de cada tipo de materia prima para facilitar la velocidad de llenado de formatos y estandarizar los reportes.
- Los albaranes de entrada engloban uno o más registros de movimiento de inventario, registrados en una tabla de Kardex general.
- Los consumos de materia prima son registros negativos en el Kardex general y son agrupados a través de procesos (en este caso exclusivamente por el proceso de mezclado)

- Los ajustes de inventario son realizados como registros directamente en la tabla de Kardex, apuntando a lotes específicos que tengan desviaciones detectadas en auditorias de inventario.
- El sistema permite almacenar recetas para productos de venta, que consisten en una serie de pasos numerados de etapas de producción, esta característica permite la concatenación y rastreo de lotes de inventario con lotes de producción o de venta específicos.
- El sistema permite registrar sensores y medidas con dos tablas simples.
- Para implementar el movimiento de los carros se encuentran las tablas de carros, ubicaciones (maestras) y la de sensores ubicación.
- Los lotes de fabricación se ligan a las lecturas de sensores a través de los movimientos que estos hacen en las ubicaciones en que se realicen procesos.
- Los procesos de ahumado están determinados por una hora de ingreso y salida y un numero de lote, permitiendo que existan múltiples lotes de materias primas, en múltiples lotes de mezclado, en múltiples lotes de producción, con traslapes posibles en todas las combinaciones de estas características.

## 4. Análisis de datos del proceso de ahumado

Este capítulo describe la transformación y análisis de datos de los sensores instalados en la fábrica con el fin de realizar una descripción del proceso y validar el uso de las variables medidas, a través de un estudio preliminar al modelado del gemelo digital del proyecto global.

El gemelo digital tendrá mayor probabilidad de ser exitoso al utilizar variables en su modelado que sean descriptivas del proceso de interés en parte debido a que el desarrollo de los modelos se realiza a través de aprendizaje automático y también debido a las transformaciones físicas y químicas que se producen.

En particular, el proceso de ahumado tradicional es altamente dependiente de factores ambientales como los cambios de presión atmosférica, humedad del entorno y la temperatura media ambiental, estos tres factores tienen un efecto directo en el gradiente de secado del producto, y son además de difícil control debido a las condiciones de procesamiento y la infraestructura física de la fábrica. Además, intervienen otros factores como la demanda de producto (más producto en los ahumaderos hacen que se produzcan procesos más largos debido a la saturación de humedad), además de las intervenciones de operarios para cambiar los carros de posición o el proceso manual de encendido de la leña para el ahumado.

Para tener un estudio cuantitativo de las propiedades del proceso de ahumado con características estándar, verificar la variabilidad en la evolución del proceso de ahumado, y establecer un vínculo entre las condiciones ambientales y de la cámara en contraste con los cambios en el producto, se realizó un estudio técnico de datos que se describe a continuación.

### 4.1. Selección de las variables de estudio

De las variables nombradas en el capítulo 2.1 se han escogido para el análisis solo aquellas que por capacidad técnica pueden ser medibles y solamente aquellas que dejan resultados de tipo continuo para su análisis matemático.

Se han descartado variables como color y apariencia debido a la gran subjetividad y la carga de experiencia de los operarios necesaria, que no puede ser garantizada por todo el tiempo de estudio de este trabajo, según las conclusiones halladas en (Allais, 2016) .

También se han descartado variables cuantificables como dureza o colorimetría por el costo inasumible de los equipos para este proyecto.

Las variables seleccionadas en acuerdo con la empresa fabricante han sido:

- **Actividad del agua:** con equipo adquirido para el desarrollo de este proyecto específicamente, es una prueba que tarda 90 minutos en realizarse por muestra, por lo cual solo puede hacerse una por lote por día, máximo 5 días a la semana.
- **pH:** con equipo previamente adquirido para prueba en laboratorio, solo puede ser tomada en muestras discretas y se realizó en producto con la misma frecuencia que la actividad de agua.
- **Temperatura de salas de ahumado:** seleccionada por la relativa facilidad de uso y el amplio mercado en sensores de temperatura de tipo industrial, se realiza de forma continua conectado a IoT con muestreos cad 30 minutos.
- **Humedad de las salas de ahumado:** aprovechando los sensores duales de temperatura y humedad, se realiza a la misma frecuencia de muestreo.

#### 4.2. Adquisición de datos

Los datos se recopilaban de 3 tipos de fuentes: estaciones inalámbricas de temperatura y humedad de sensores IoT con comunicación ZigBee, estas mediciones se realizaron en las cámaras de ahumado en carros que seguían todo el proceso en conjunto con los productos, al igual que se realizaría de forma estándar en el proyecto final. Los carros equipados con sensores son distribuidos de forma uniforme y aleatoria en cada proceso y ubicación de la cámara de ahumado. Para complementar estas mediciones, se realizó la medición de factores ambientales mediante una estación meteorológica, con soporte para mediciones de viento, temperatura y humedad en los alrededores de la fábrica. Además, con el fin de caracterizar la evolución del proceso de ahumado en el producto, se efectuaron mediciones de laboratorio, realizadas por trabajadores de control de calidad en la fábrica. El siguiente diagrama muestra la arquitectura aplicada a la adquisición de datos en el proyecto.

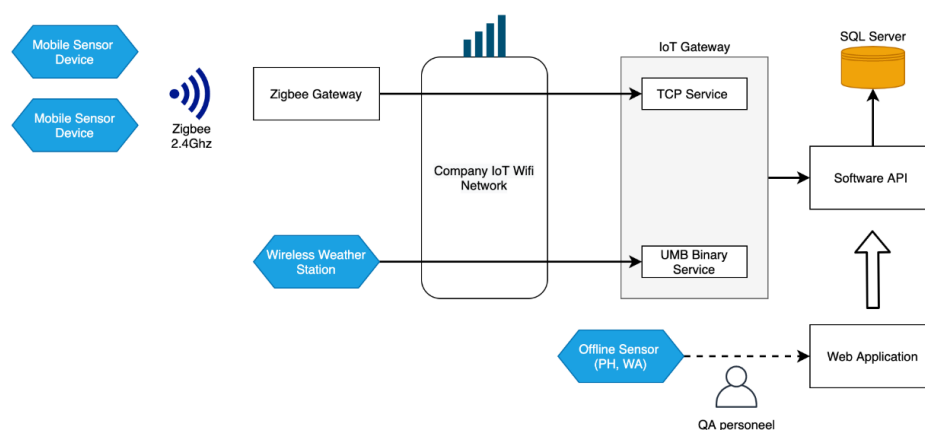


Ilustración 45: diagrama de comunicación de servicios y adquisición de datos para el análisis de predicciones.

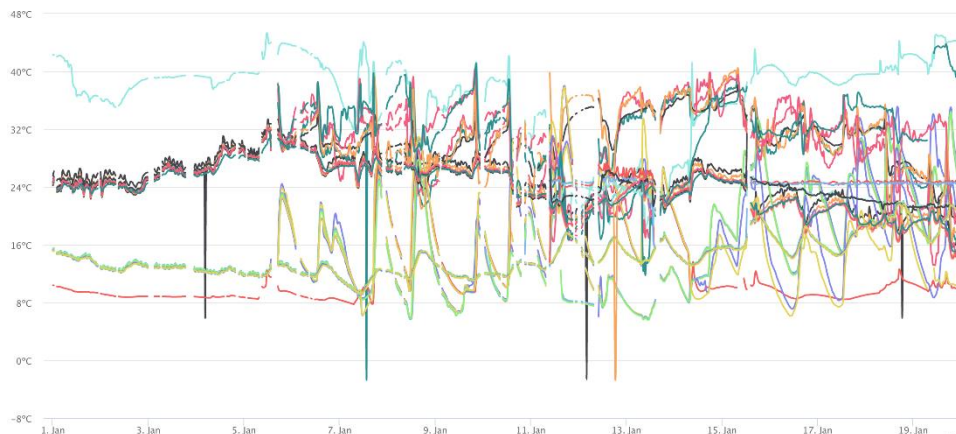
La frecuencia de muestreo varía según la disponibilidad y las limitaciones físicas: para los sensores en línea se ha elegido un período de muestreo de 30 minutos, mientras que para las mediciones fuera de línea, estos están limitados por el equipo y el protocolo de muestreo y toma de laboratorio a 1-3

muestras por día por proceso. Todos los datos están centralizados en una base de datos. Para la construcción de este estudio, se han adquirido datos directos de la base de datos del sistema IoT, del almacenamiento temporal en servidores MHS para sensores ZigBee y mediante tablas de datos recolectadas manualmente para las pruebas de laboratorio. En el capítulo de descripción del sistema IoT se pueden encontrar más detalles sobre la implementación de la integración de software + IoT.

Se utilizaron un total de 14 sensores inalámbricos de temperatura y humedad, que envían información en tiempo real al servidor IoT de MHS (protocolo propietario de ZigBee a IoT). La estación meteorológica utilizada fue una estación inalámbrica de LUFFT GmbH WS10P, que monitorea 36 variables relacionadas con el clima, con mediciones de temperatura, humedad, lluvia, radiación solar e iluminación más 9 variables de estado. La estación es compatible con ModBus RTU y UMB (Universal-Measurement-Bus). Después de la instalación, se desarrolló una puerta de enlace IoT especializada para el protocolo UMB-Binary para servicios web.

### 4.3. Limpieza de datos

Debido a la detección de huecos (discontinuidades) en algunas series temporales del sistema IoT, especialmente dentro de los primeros días después de la instalación (ver Ilustración 46), se han realizado algunos pasos de procesamiento adicionales. Los huecos son de corta duración y carácter aleatorio, pudiendo deberse a la pérdida de paquetes de transmisión de los dispositivos ZigBee al servicio ZigBee TCP o por avería puntual del servidor IoT de MHS según la información proporcionada por el proveedor de hardware. Esos problemas se resolvieron verificando las conexiones TCP, el canal de internet y se tomaron medidas correctivas para garantizar que estas amenazas no vuelvan a ocurrir en tiempo de trabajo, incluida la migración del servicio ZigBee TCP a la puerta de enlace de IoT local, en lugar de utilizar el servidor MHS a través de Internet.



*Ilustración 46: sensores de temperatura instalados y el comportamiento de lectura de huecos durante los primeros días después de la instalación*



Ilustración 47: sensores de temperatura instalados y el comportamiento de lectura estable sin huecos después de los ajustes realizados en las comunicaciones.

Los huecos en las señales generan una no-linealidad en el período de muestreo. Sin embargo, no ocasionarán problemas serios para las fases de análisis, modelado y predicción, debido a su comportamiento puntual y aleatorio. No obstante, se ha realizado un estudio que busca el equilibrio entre precisión y coste computacional de las siguientes técnicas de interpolación: interpolación lineal, *spline*, cúbica por partes y ajuste de curvas. Para este estudio, el MHS proporcionó una serie de temperatura y humedad relativa con años de duración tomados de otros proyectos en curso.

Como primer paso, se eligió un fragmento de una serie temporal de temperaturas sin espacios. Luego, se agregaron artificialmente brechas de 2 horas como máximo, que representan el 10% de la serie. Se reconstruyó la serie con las 4 técnicas mencionadas anteriormente y se midieron los errores máximos y acumulados cometidos con cada método (Ilustración 48). Los resultados, mostrados en la siguiente tabla, indicaron que la interpolación basada en *splines* presenta el error más pequeño con espacios iguales o menores a 2 horas. El error acumulado es levemente mayor que el realizado con la interpolación cúbica por partes, pero en este caso es más importante que los valores instantáneos interpolados estén más próximos a los reales. Se encontró además que la interpolación lineal, que es más simple en términos computacionales, también es un buen método para imputar datos en intervalos de menos de 2 horas y fue la técnica aplicada a las series que requirieron tal procesamiento adicional en este estudio.

Método	máx. error absoluto	min. error absoluto	Error acumulado
Linear interpolation	0.2144	0.0	1.1802
Spline interpolation	0.1691	0.0	1.1247
Cubic interpolation	0.1913	0.0	1.0519
Curve adjustment	0.2117	~0.0	3.2707

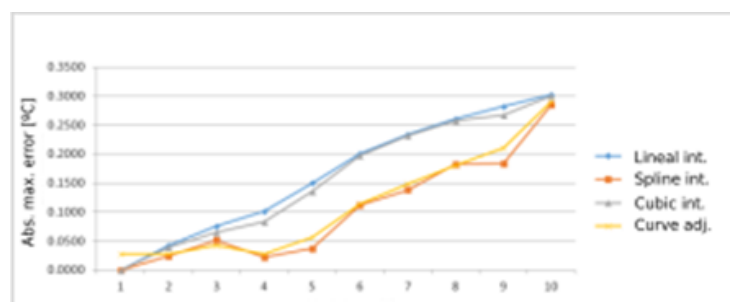


Ilustración 48: Resultados de error máximo obtenido (°C) para 4 métodos de limpieza de huecos en señales de temperatura.

#### 4.4. Análisis de datos del proceso

El gemelo digital se centrará en el análisis y simulación del proceso de ahumado, el paso más destacable en el proceso de fabricación de embutidos realizado por la empresa. El proceso de ahumado se realiza en una cámara (ahumadero) de dos pisos separados por un piso de malla industrial. En la planta baja es donde se colocan las parrillas de combustión (donde se quema la leña produciendo el humo), y la parte superior es la sala de ahumado en la que se coloca el producto a secar, en carros o estantes. Estos carros con producto (y que pertenecen a un lote de ahumado) se ubican en zonas diferentes, es posible que en el ahumadero existan además de distintos lotes de ahumado pertenecientes a un mismo lote de mezclado, diferentes tipos de embutidos (diferentes lotes de mezclado) mezclados en un mismo ahumadero. En 12 de los carros o estantes (de aproximadamente 80 disponibles en la fábrica) se han colocado sensores de temperatura y humedad inalámbricos ZigBee (uno por carro).

Dada la naturaleza del proceso de fabricación, como ya se mencionó, las salas de ahumado pueden contener uno o más lotes de fabricación para uno o más productos, y los carros se pueden mover por la sala según los requerimientos del proceso (más calor, o menos calor directo). Para monitorear todos estos movimientos durante un proceso, se integrará un sistema de códigos QR con el software de trazabilidad y con una aplicación de interfaz visual para la ubicación de los carros, para relacionar cada lote con la posición del estante/carro. Consulte el capítulo 3.1 (Sistema IoT) para obtener más detalles sobre la solución de software propuesta.

Como hay varios sensores disponibles en las salas de ahumado y cada proceso en cada punto cuenta con carros aleatorios de los equipados con sensor, un número variable de sensores está disponible para el análisis de cada proceso. La función del personal de calidad es comprobar la evolución del producto y tomar muestras cada día para evaluar la actividad del agua y el pH de los productos en las ristras. Consulte el anexo de procedimientos para obtener más detalles sobre este proceso.

Ambos sistemas, los datos de IoT, y los tomados fuera de línea (actividad del agua pH), son las variables principales propuestas para crear el modelo del sistema, donde las entradas del sistema son temperatura y humedad, y la salida se expresa en términos de calidad y preparación del producto y medido por medio de el pH y la Actividad del Agua.

El análisis de datos en este informe se ha realizado mediante el estudio del comportamiento de cada una de esas variables, para todos los procesos disponibles con lecturas de datos, y luego mostrando los *insights* a evaluar en la fabricación del modelo de sistema para el gemelo digital. Los datos del proceso se seleccionaron para cada proceso (lote de fabricación) de forma independiente y luego se unieron para obtener las conclusiones del estudio.

##### 4.4.1. Análisis de temperatura

Para el análisis de temperatura, una de las principales incógnitas iniciales fue conocer la incidencia de la diferencia de temperatura ambiental externa versus temperatura de la cámara a lo largo del proceso y cuán importante es este dato para el secado del producto, otra variable surge de forma trivial al evaluar la temperatura ambiente externa absoluta y como esta impacta el proceso. Para obtener respuestas a estas sentencias, se estudiaron muestras de diferentes procesos para obtener las variabilidades de temperaturas dentro de la habitación.

En la Ilustración 49 se observa una muestra de procesamiento de 3 días para un lote de producción con 6 sensores y 20 carros de producto en la cámara de ahumado.

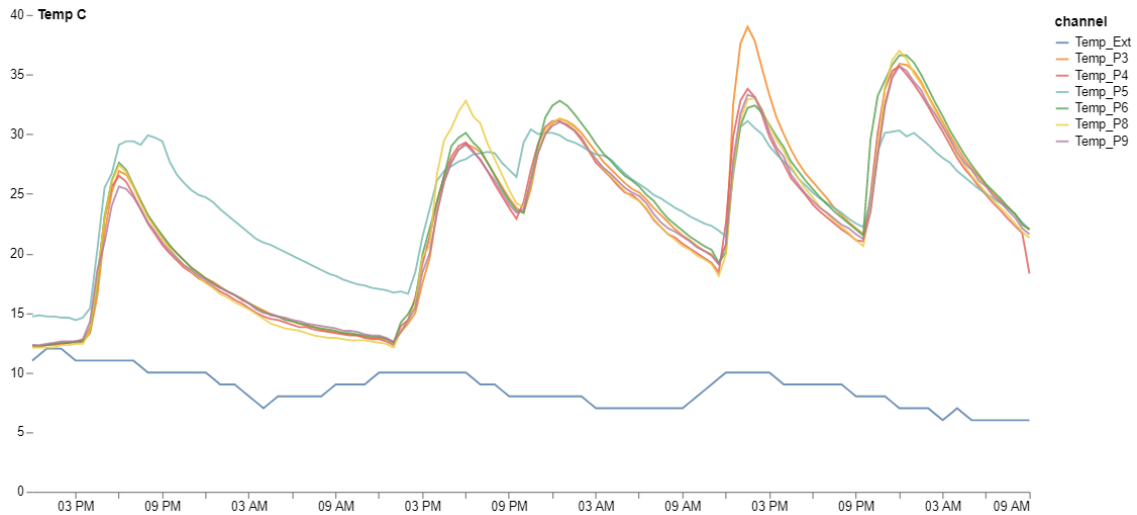


Ilustración 49: observaciones de temperatura para los sensores presentes en un proceso aleatorio y temperatura ambiental

Al observar la gráfica se pueden notar algunas particularidades del proceso:

- Se observan diferencias muy leves entre los sensores que realizan lecturas en diferentes partes de la habitación, lo que sugiere que la temperatura de proceso es casi igual en un proceso estable.
- La T<sub>min</sub> del proceso después del inicio (día 1-2) se mantiene por encima de los 20 °C.
- T<sub>max</sub> es de 36 °C con picos habituales en torno a los 25-30 °C.
- La temperatura en la cámara tiene una fuerte correlación con la temperatura externa, como se puede ver en todas las muestras de datos. Esto, sin embargo, solo es evidente al comparar procesos.

Continuando con el análisis, se calcula la temperatura media de cada muestra en la sala y se asume esta como la temperatura media de la cámara de ahumado  $T_{room} = AVG(T_i)$ . Luego, se calcula el gradiente de temperatura entre la temperatura de la cámara y la temperatura exterior  $dT = |T_{ext} - T_{room}|$ .

Además, como medida sensible de la dispersión, se toma la distancia euclídea entre las temperaturas de la habitación. Esta se eligió debido a la alta sensibilidad de las distancias euclídeas a pequeñas variaciones en comparación con la desviación estándar o el análisis de varianza.



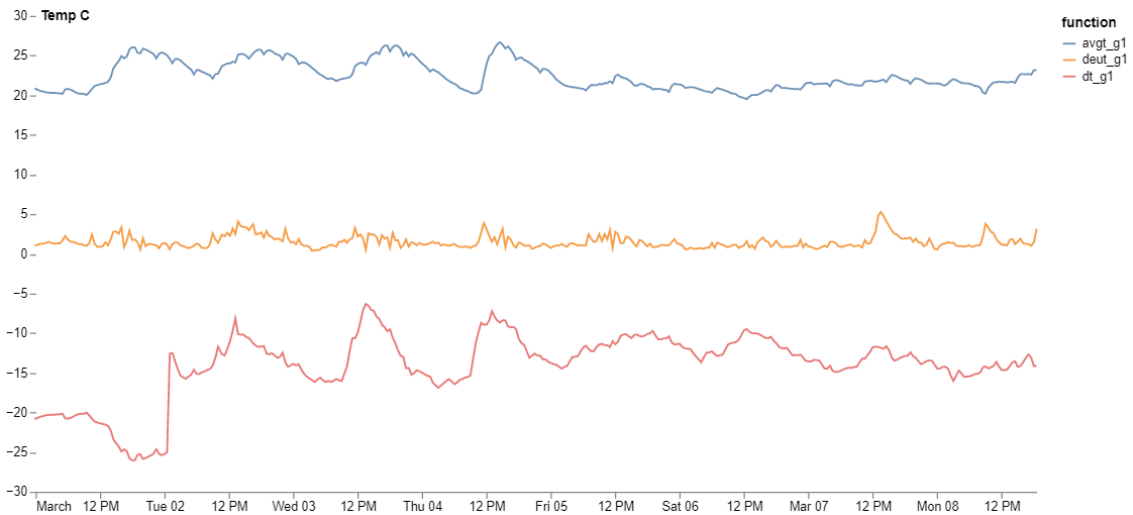


Ilustración 50: señales calculadas estadísticamente de delta T (rojo), temperatura media en la cámara (azul), y distancia euclídea de los sensores en la cámara (naranja). Para de un proceso aleatorio del 1 al 8 de marzo de 2021

Se encontró que, en los procesos estables, la distancia euclídea entre sensores es casi constante con una fuerte estabilidad y tendencia a cero, por lo que las temperaturas en la cámara son muy uniformes, con variaciones leves entre el día y la noche incluso cuando se encuentran picos de gradiente de temperatura por encima de los 15°C. No obstante, este comportamiento se observa una vez que el proceso se ha estabilizado según la mayoría de las muestras de procesamiento.

En la Ilustración 51 se muestra el papel de la distancia euclídea con respecto a la temperatura media de la cámara, y al gradiente de temperatura (int/ext) para un proceso. Como se observa para este proceso, la mayoría de las muestras se ubican a la derecha en una zona de estabilidad de la dispersión de temperatura dentro de la cámara. Al inicio del proceso es común encontrar alteraciones en la uniformidad, que desaparecen a medida que el proceso evoluciona hacia la estabilidad, entonces las muestras se van a la región izquierda. La evolución del proceso se puede observar en la figura derecha a través de cambios de color, azul claro para el inicio del proceso y azul más oscuro para el proceso estable (últimos días).

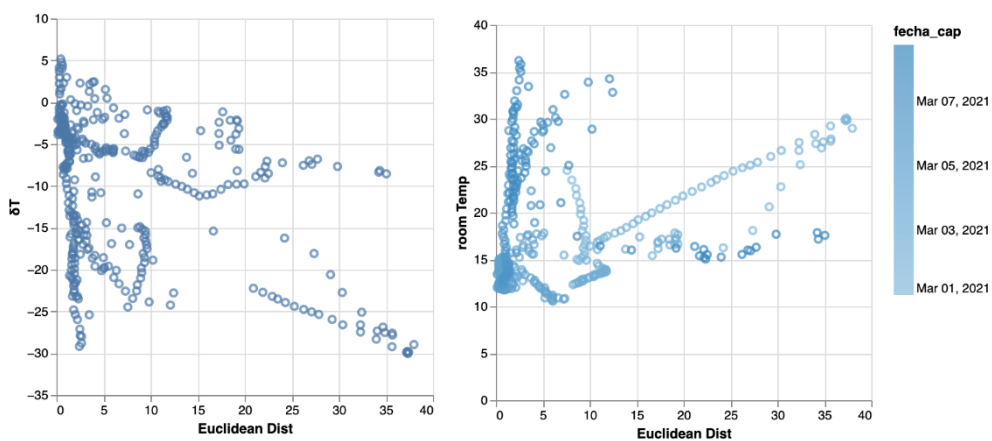


Ilustración 51: distancia euclídea con respecto a la temperatura media de la cámara (derecha), y al gradiente de temperatura (int/ext) (izquierda)

Respecto a la distribución estadística de la distancia euclídea en los procesos, esta se muestra en la Ilustración 52.



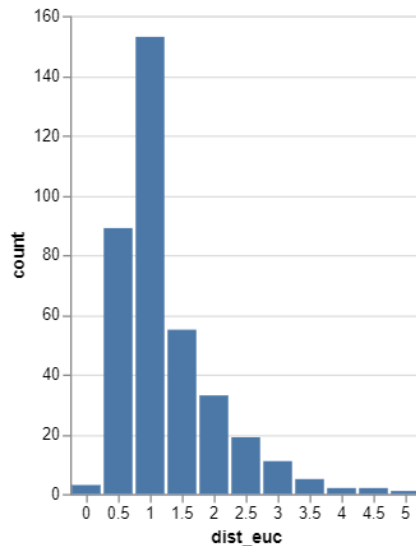


Ilustración 52: distribución estadística de la distancia euclídea de temperaturas ( $^{\circ}\text{C}$ ) para procesos estables

Se realizó un análisis estadístico de series de temperatura ambiente promedio para obtener información sobre el comportamiento de la evolución de la temperatura del proceso. Los resultados se muestran para 4 procesos del producto tradicional chorizo en la Ilustración 53, donde los *boxplots* muestran la temperatura media por día, la dispersión de datos y valores atípicos.

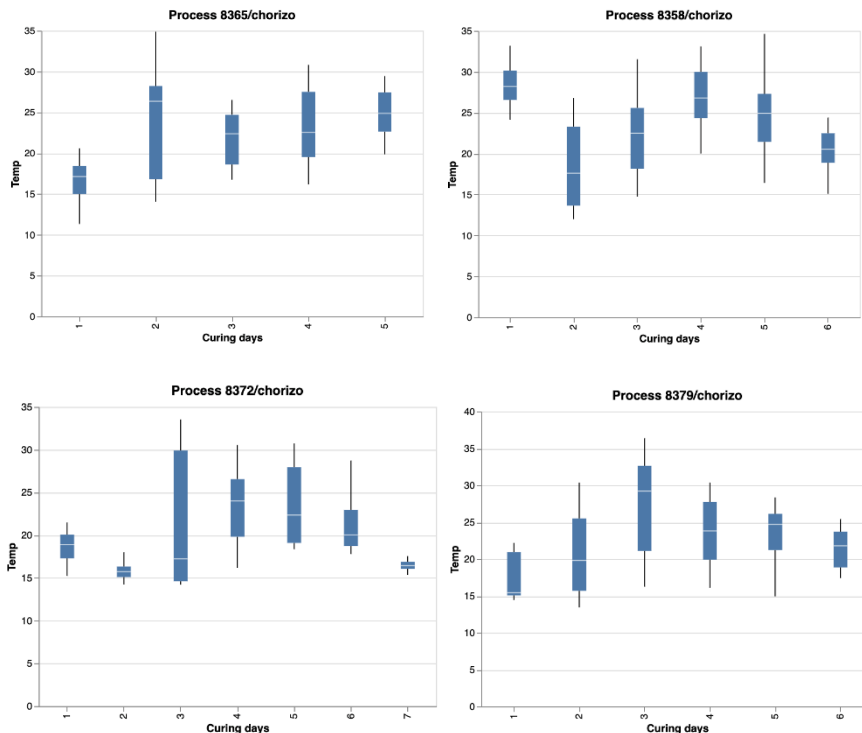


Ilustración 53: evolución estadística de la temperatura del proceso para 4 procesos por cada día de procesado.

Los datos mostrados anteriormente, aunque no describen un perfil de temperatura concurrente (curva de temperatura relacionada con el día de procesamiento), revelan algunas características importantes del proceso, confirmando las afirmaciones inferidas de la Ilustración 50 y la Ilustración 51:

- La temperatura mínima del proceso normal ronda los 20 °C.
- La temperatura ambiente casi nunca alcanza los 40 °C (incluso en los días de verano)
- Los días de elaboración varían entre 3 y 8 días para el producto tradicional chorizo.
- Las variaciones en la temperatura del proceso están relacionadas con la temperatura interna.
- Una completa ausencia de valores atípicos, lo que confirma que no se han producido mediciones fuera de rango ni eventos como ruido o variaciones extremas de temperatura en la habitación.

#### 4.4.2. Evaluación de la temperatura de producto

Se realizó una pequeña muestra de validación de la temperatura de producto para confirmar el comportamiento de la temperatura entre la cámara y el producto según las medidas de temperatura de la cámara traídas por los sensores. Se realizaron 33 días de mediciones de temperatura del producto fuera de línea, tomados en para varios productos y procesos.

Como era previsible, hubo una variabilidad muy pequeña con respecto a las temperaturas ambientales y entre las propias temperaturas de producto a lo largo del tiempo de las mediciones, sin un protagonismo formidable debido al día de procesamiento y la ubicación en la sala. También se observó que la temperatura de producto es más estable que la temperatura ambiente media, debido al contenido de agua del producto y a su masa, también una fuerte correlación con la temperatura de la cámara, gracias a la convección asistida por humo y la naturaleza longeva del proceso. Consulte la Ilustración 54 para más detalles sobre las mediciones realizadas.

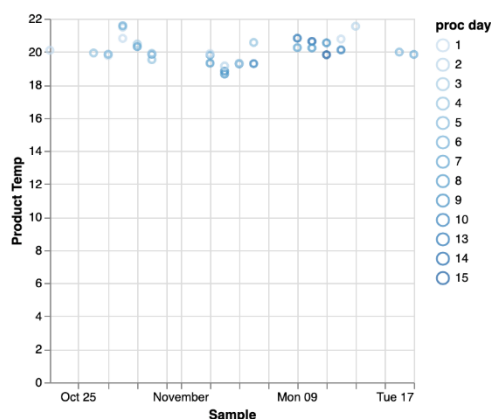


Ilustración 54: evolución de la temperatura de producto en las cámaras de ahumado por medición directa con método de laboratorio.

No se tomó ningún registro adicional de la temperatura del producto para este proyecto después del 20 de noviembre de 2020, ya que no se demostró una relación valiosa con las temperaturas de la cámara y la dificultad para medir de forma precisa la temperatura de producto. Para conocer la metodología de las mediciones manuales, incluidos pH, Aw y temperatura, consulte los detalles del procedimiento en el **Anexo** de procedimientos.

#### 4.4.3. Análisis de la actividad del agua

La actividad del agua se ha determinado como una de las variables más importantes a seguir que determina la madurez del producto y lo idóneo que este se encuentra para consumo humano. Se han realizado muestras diarias de cada proceso desde el 23 de octubre de 2020 siguiendo las prescripciones detalladas en la guía de medición de Aw y pH (**anexo** de procedimientos). Estas muestras se realizan de acuerdo con el plan de producción. Debido a las características de pequeña

empresa, los cambios de producción de acuerdo con la demanda del producto son notables con el paso del tiempo, y en algunas ocasiones la sala de ahumado no se utiliza continuamente durante los días en que el almacenamiento de stock está lleno, en caso contrario (picos de demanda), varios lotes se encuentran simultáneamente en producción continua y algunas veces, en dos o más cámaras de ahumado.

Muestras realizadas para mediciones de pH y Aw:

- Aw muestras: 137
- Muestras de PH: 104
- Muestras totales: 137

Los datos de la actividad del agua se analizan para cada proceso tomando el lote y fecha para obtener información sobre la evolución de este parámetro a medida que evoluciona el proceso. Con estos datos, las muestras se organizan por día de procesamiento para cada procesado y de esta manera se obtienen los análisis de seguimiento, que se pueden observar en la Ilustración 55.

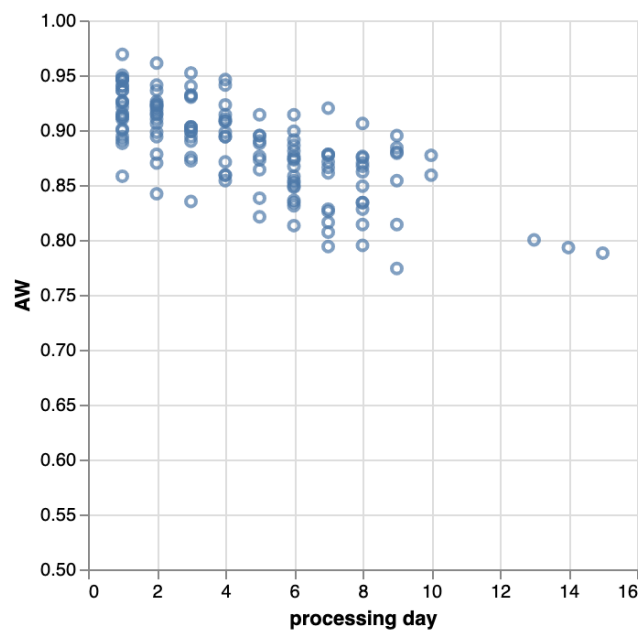


Ilustración 55: grafica de seguimiento de actividad del agua (AW) por día de procesado.

La actividad de Agua muestra una tendencia descendente a medida que avanzan los días de procesamiento, como era de esperar según la bibliografía y experiencia del sector. Para obtener información más detallada, se realizó un estudio estadístico que arrojó los siguientes resultados.

day	Aw max	Aw min	Aw media	Aw mediana	Aw Q1	Aw Q3
1	0.969	0.858	0.922923	0.9255	0.9105	0.94375
2	0.961	0.842	0.911056	0.9165	0.9	0.92375
3	0.952	0.835	0.9038	0.902	0.892	0.9305
4	0.946	0.854	0.8985	0.903	0.87675	0.913
5	0.914	0.821	0.8754	0.8882	0.86625	0.89375
6	0.914	0.813	0.863111	0.8625	0.85825	0.87975

7	0.92	0.794	0.851833	0.8635	0.8235	0.87725
8	0.906	0.795	0.850833	0.8555	0.8325	0.87125
9	0.895	0.774	0.854286	0.879	0.834	0.882
10	0.877	0.859	0.868	0.868	0.8635	0.8725

El estudio muestra variaciones entre los procesos evaluados para todos los productos procesados en la sala de ahumado, con medidas de Aw disponibles. Un análisis de datos inicial (con datos tomados entre octubre y febrero) sugirió que se necesitaban más muestras para obtener una tendencia más detallada. En el momento de este informe, con suficientes muestras analizadas, la tendencia es perceptible y la varianza se ha estabilizado a lo largo de los días de procesamiento, como se puede ver en la Ilustración 56. Sin embargo, la mediana todavía tiende a tener un desplazamiento respecto del centro de las muestras promedio, especialmente en días. 3-4. La tendencia descendente parece estable después del día 9 de ahumado.

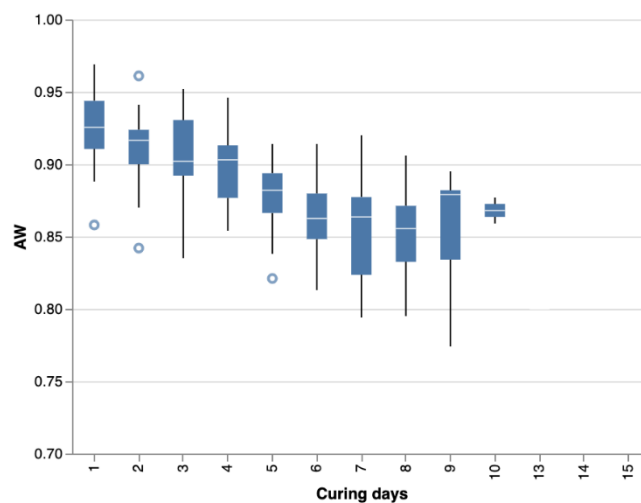


Ilustración 56: análisis estadístico del seguimiento de Aw por días de curado

#### 4.4.4. Análisis de pH

la misma técnica de estudio realizada en las mediciones y estudio de Aw se ha utilizado en el análisis de pH. En este caso solo se ha detectado una ligera tendencia descendente, especialmente después del día 3, aunque es evidente que el producto curado suele ser 1-2 puntos más ácido que el producto en crudo. Dicha acidez es parte de las características que protegen el producto y alargan su vida véase capítulo de descripción del proceso de embutido.

Otras características del análisis de pH (Ilustración 57) son:

- Hay una alta probabilidad de que el pH inicial sea superior a 6.
- Después del día 3, el producto se acidifica generalmente por debajo de 5,5
- Para los procesos evaluados en la fábrica, el pH rara vez desciende por debajo de 5.0

En las gráficas de *boxplot* el comportamiento se observa bastante irregular con el paso de los días, aunque siempre siguiendo la tendencia a disminuir el PH en el producto a medida que aumenta el tiempo de ahumado.

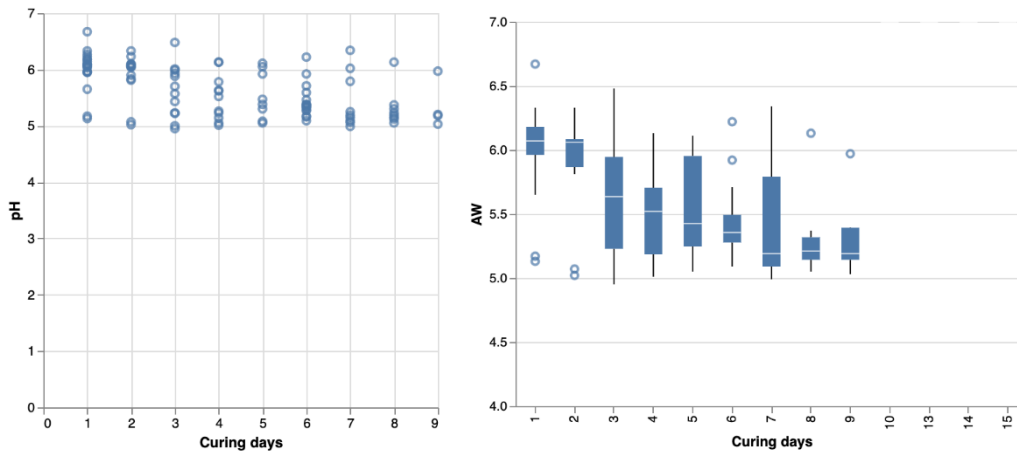


Ilustración 57: análisis estadístico de la evolución de pH por días de procesamiento.

Processing Day	pH max	pH min	pH avg	pH median	pH Q1	pH Q3
1	6.67	5.13	6.01238	6.07	5.96	6.18
2	6.33	5.02	5.916	6.06	5.865	6.085
3	6.48	4.95	5.61583	5.635	5.2275	5.945
4	6.13	5.01	5.5	5.52	5.185	5.705
5	6.11	5.05	5.545	5.425	5.245	5.952
6	6.22	5.09	5.43687	5.355	5.2775	5.492
7	6.34	4.99	5.4311	5.19	5.09	5.79
8	6.13	5.05	5.3175	5.21	5.1425	5.317
9	5.97	5.03	5.345	5.19	5.1425	5.392

#### 4.4.5. Evolución conjunta de Aw – pH

Como se mencionó, se espera que Aw y pH sean los indicadores más precisos de la calidad y el estado del producto para el gemelo digital, por lo que se realizó un estudio aislado para visualizar su evolución a medida que evoluciona el proceso de curado. En la Ilustración 58 se muestran el resultado del análisis de 2 factores y la tendencia de evolución del proceso: dado que las muestras de color azul claro son los primeros días del proceso y el azul más oscuro son los días finales, es fácil diferenciar dos grupos, uno de puntos claros en la parte superior derecha y oscuro en el abajo a la izquierda.

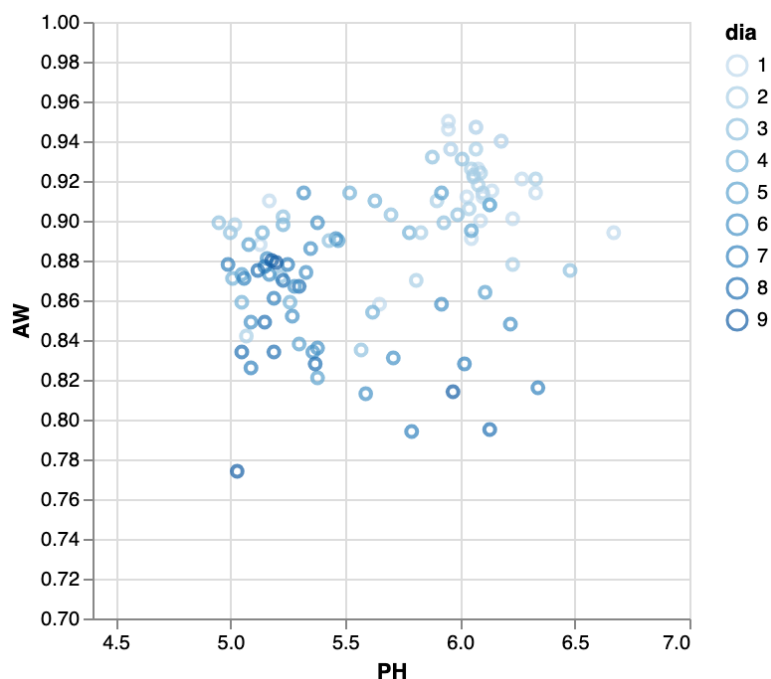


Ilustración 58: análisis de 2 factores (pH – Aw) y la tendencia de evolución del proceso

En conclusión, aunque no se ha encontrado una correlación lineal fuerte para la evolución conjunta de PH-Aw a lo largo de los días, y luego de haber analizado por separado los datos estadísticos de Aw y pH, su análisis conjunto muestra una correlación importante y complementaria con el estado del proceso y la preparación del producto para continuar con el siguiente paso de procesamiento.

#### 4.4.6. Análisis dispersión de la actividad del agua (Aw) y pH

Una de las principales preocupaciones de tener una frecuencia de muestreo muy baja para las mediciones de la actividad del agua está relacionada con la evolución del AW en diferentes partes de la cámara de ahumado / posición en el carro en la cámara de ahumado. Para abordar este problema y obtener resultados tangibles, se ha realizado un estudio durante el mes de abril, midiendo 44 muestras de diferentes carros y posiciones para el mismo lote / día de procesamiento para comparar las dispersiones entre medidas de diferentes carros para ambas variables. Este estudio también sirve para profundizar en la precisión y repetibilidad de los equipos y sensores utilizados en las mediciones fuera de línea del laboratorio.

Processing day	Process Lot	date	Average Aw	Deuc Aw	Cov. Aw	Average PH	Deuc. PH	Cov. PH
1	8445	07/04/2021	0.9480	0.0000	8.00E-06	5.95	0.0000	0.0000
1	8452	12/04/2021	0.9360	0.0000	0.00E+00	5.96	0.0000	0.0000
1	8460	20/04/2021	0.9400	0.0000	0.00E+00	6.18	0.0000	0.0000
1	8468	28/04/2021	0.9470	0.0000	0.00E+00	6.07	0.0000	0.0000
2	8445	08/04/2021	0.9240	0.0000	8.00E-06	6.06	0.0001	0.0000
2	8460	21/04/2021	0.9120	0.0001	7.20E-05	6.06	0.0016	0.0008
2	8468	29/04/2021	0.9235	0.0000	5.00E-07	6.08	0.0009	0.0005
3	8445	09/04/2021	0.9010	0.0000	8.00E-06	5.96	0.0036	0.0018
3	8460	22/04/2021	0.8960	0.0001	7.20E-05	5.33	0.0400	0.0200

3	8468	30/04/2021	0.9315	0.0000	5.00E-07	5.95	0.0169	0.0084
4	8452	15/04/2021	0.9080	0.0000	0.00E+00	6.13	0.0000	0.0000
4	8460	23/04/2021	0.8960	0.0000	8.00E-06	5.19	0.0081	0.0041
4	8468	01/05/2021	0.9120	0.0000	8.00E-06	5.58	0.0121	0.0061
5	8452	16/04/2021	0.9045	0.0004	1.81E-04	5.99	0.0169	0.0084
6	8445	12/04/2021	0.8835	0.0000	1.25E-05	5.26	0.0361	0.0180
6	8452	17/04/2021	0.8950	0.0001	3.20E-05	5.42	0.0064	0.0032
6	8468	03/05/2021	0.8595	0.0002	1.13E-04	5.28	0.0001	0.0001
7	8445	13/04/2021	0.8775	0.0000	5.00E-07	5.20	0.0100	0.0050
7	8460	26/04/2021	0.8660	0.0001	5.00E-05	5.13	0.0169	0.0085
8	8445	14/04/2021	0.8580	0.0003	1.62E-04	5.23	0.0225	0.0112
8	8452	19/04/2021	0.8725	0.0000	1.25E-05	5.18	0.0121	0.0061
9	8452	20/04/2021	0.8795	0.0000	5.00E-07	5.19	0.0004	0.0002

Para obtener la dispersión entre mediciones, se ha calculado la distancia euclídea y la varianza para cada día / proceso, también se ha calculado la desviación estándar promedio y la distancia euclidiana promedio de acuerdo con las fórmulas:

$$Variance_j = \frac{\sum(p_i - \bar{p})^2}{n - 1}$$

$$\bar{s} = \frac{\sqrt{\sum Variance_j}}{m} \Rightarrow 0.00583(Aw); 0.0682(PH)$$

$$Eu. Dist = \sqrt{\sum_{j=1}^m [(q_j - p_j)^2]} \Rightarrow 0.3868(Aw); 0.4524(PH)$$

Según las observaciones, la dispersión promedio entre el mismo proceso, el mismo día, diferentes ubicaciones de carritos en la misma sala de fumadores es muy baja para ser significativa en las condiciones de evolución de ambas variables. Como sugerían los resultados del estudio de PH, los resultados observados para la variabilidad del pH son más altos que los de AW (este comportamiento se puede ver en la Ilustración 58).

Al comparar los resultados con la evolución del proceso, utilizando los valores de la mediana como referencia para la evolución del proceso y la desviación estándar promedio (siguiente tabla), la dispersión entre muestras tiene diferencias entre 0.2 a 0.5 días de procesamiento (AW) y 0.16 y 6 días de procesamiento para pH. Esto confirma que el pH es un buen indicador de la preparación del producto, aunque la fuerte y errática variabilidad entre las muestras no se ajusta para ser un buen candidato para medir la evolución del proceso de ahumado a lo largo del tiempo.

day	Med. AW	Δ AW	Med. PH	Δ PH
1	0.9255		6.07	
2	0.9165	-0.009	6.06	-0.01
3	0.902	-0.0145	5.635	-0.425
4	0.903	0.001	5.52	-0.115
5	0.882	-0.021	5.425	-0.095
6	0.8625	-0.0195	5.355	-0.07
7	0.8635	0.001	5.19	-0.165

8	0.8555	-0.008	5.21	0.02
9	0.879	0.0235	5.19	-0.02

#### 4.4.7. Análisis de humedad

La siguiente variable por evaluar y una de las candidatas más fuertes para establecer correlaciones entre evolución del proceso es la humedad en la cámara. El análisis se realizó siguiendo los mismos principios que el análisis de temperatura. Asimismo, en condiciones de proceso estables (Ilustración 59), la estabilidad de las lecturas es muy alta, y se observan pocas variaciones en las lecturas de humedad en la sala para la misma muestra (tiempo de medición), para cada sala y proceso. Además, se logró determinar que la humedad tiene un perfil más estable que la temperatura a lo largo del tiempo cuando el proceso es controlado y estable, con una notable independencia de la humedad y temperatura externas. La humedad generalmente se mantiene en las condiciones internas para gradientes de humedad de hasta 55% de HR.

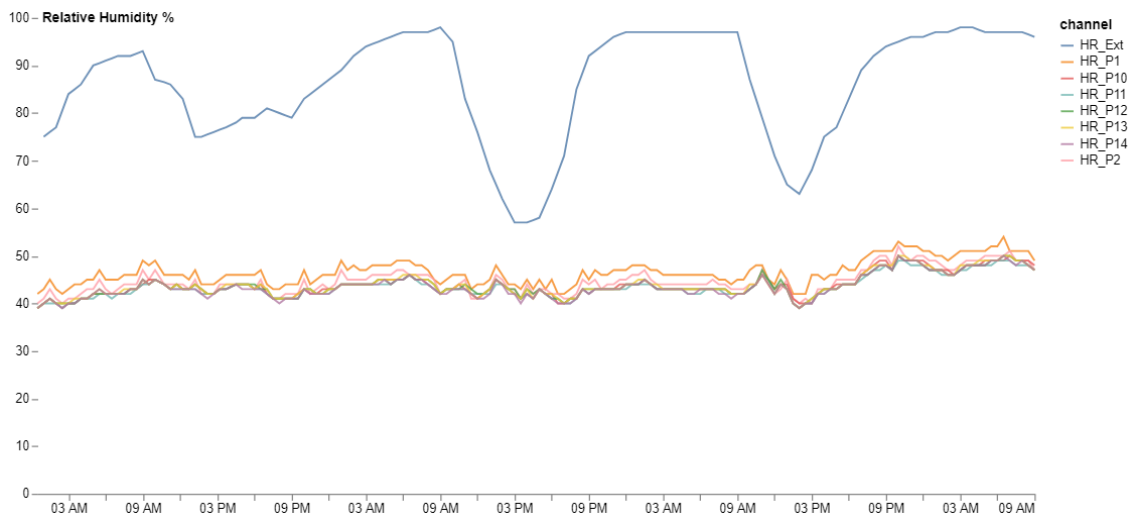


Ilustración 59: evolución de la humedad de proceso y humedad ambiental para 4 días de un proceso estable.

En las observaciones, la temperatura y la humedad en la habitación son casi iguales a los valores ambientales exteriores al inicio del proceso. Después de iniciar la producción de ahumado se observan cambios incrementales, con tendencia a estabilizar el proceso (a través de la disminución de la humedad y el aumento de temperatura), ya que la combustión y ahumado se activan a lo largo del tiempo de proceso.



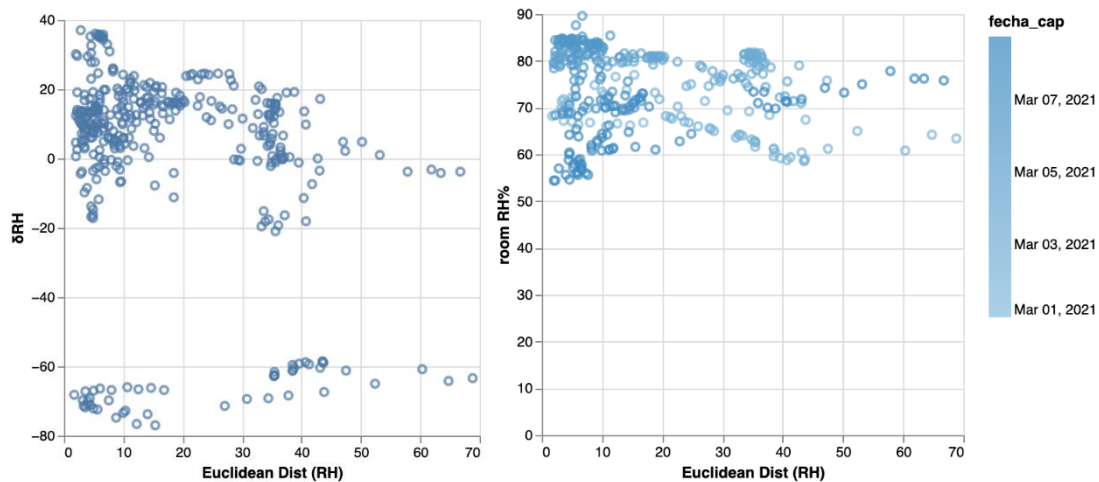


Ilustración 60: distancia euclídea con respecto a la humedad relativa media de la cámara (derecha), y al gradiente de humedad (int/ext) (izquierda)

De acuerdo con las observaciones en la Ilustración 60, esos cambios en la evolución del proceso crean rutas con una trayectoria que expresa el comportamiento del proceso, generalmente terminando en una pequeña distancia euclidiana para la HR.

En condiciones transitorias, esto es, al inicio de cada proceso de ahumado (Ilustración 61), la humedad habitual en la habitación es muy alta y casi igual a la del ambiente exterior. Una vez que comienza el proceso, la humedad en la habitación se reduce y luego se mantiene constante mientras se estabiliza el ambiente de la habitación. Con estos datos se sugiere que la variable de control más importante para el proceso es la humedad relativa, la cual se mantiene constante cuando el proceso está bajo control y tiene un efecto directo en el curado del producto.

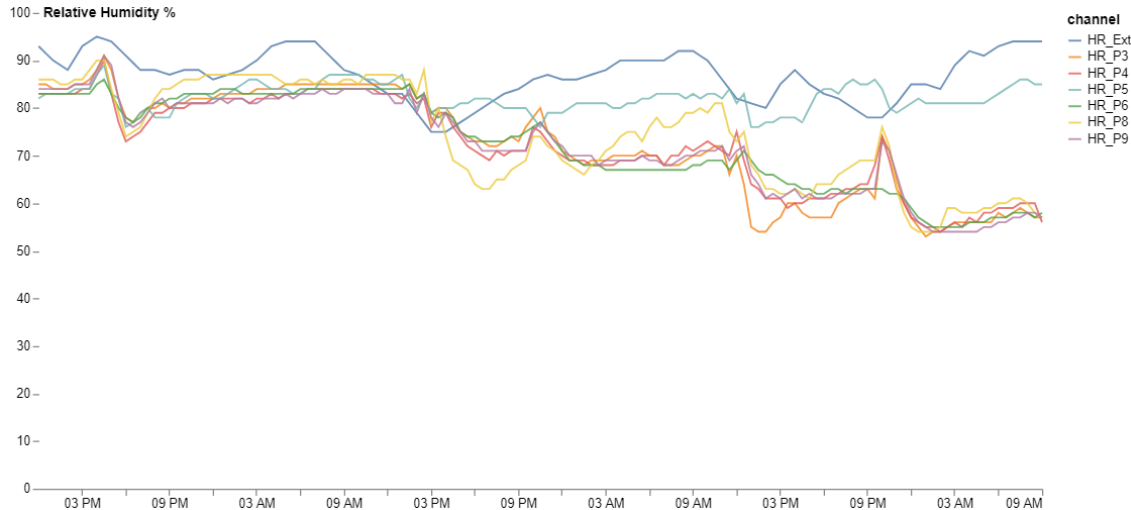


Ilustración 61: lecturas de humedad relativa para un proceso en fase de estabilización.

La tendencia de la humedad a lo largo de la evolución del proceso puede ser variable, como se puede ver en la Ilustración 61, pero un proceso más seco siempre se relaciona con tiempos de ahumado más cortos. Al realizar la comparación en varios procesos el comportamiento de Aw es el mismo, con tendencia a la reducción, mientras la humedad relativa de las cámaras se mantiene estable. En procesos con humedad relativa mas alta se observa una mayor latencia en la disminución de Aw y valores ligeramente superiores a los promedios.

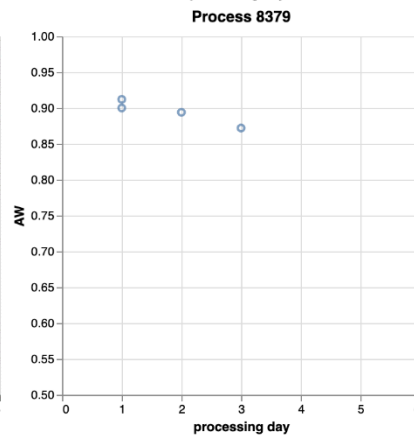
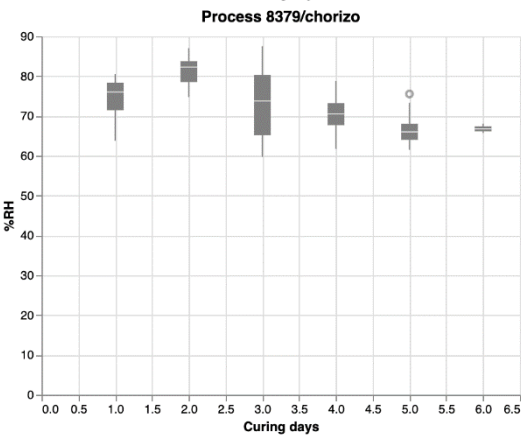
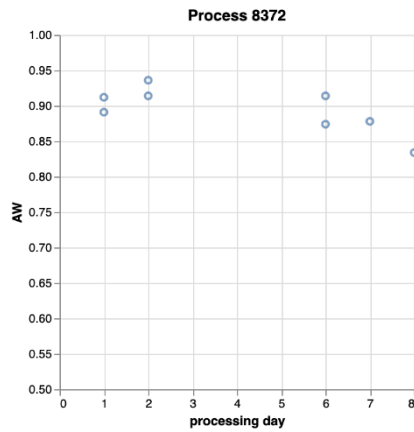
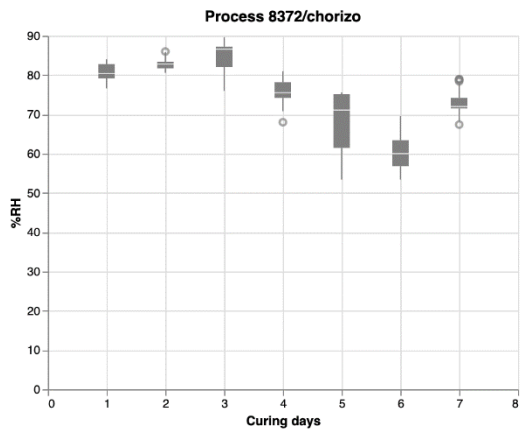
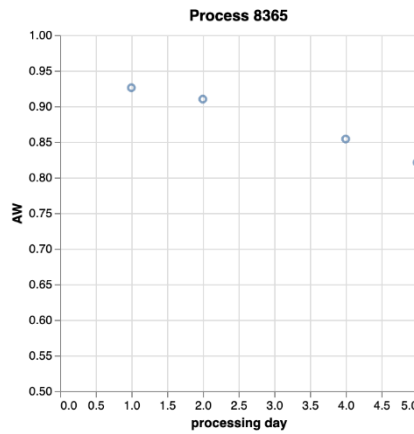
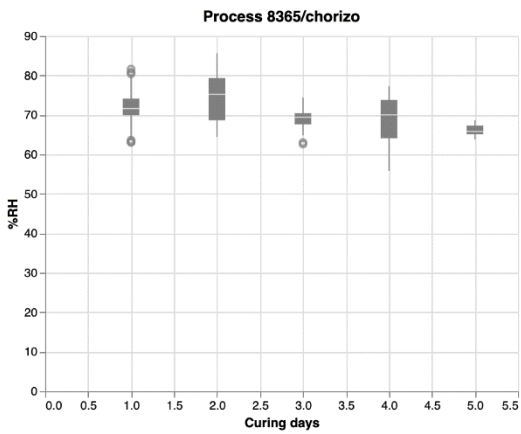
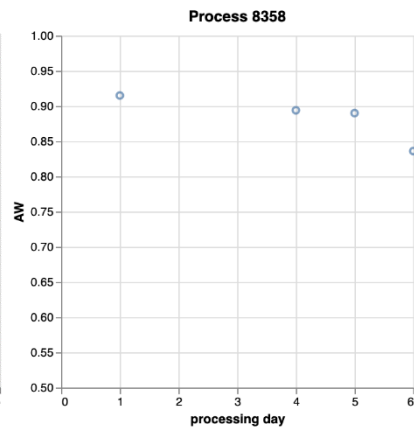
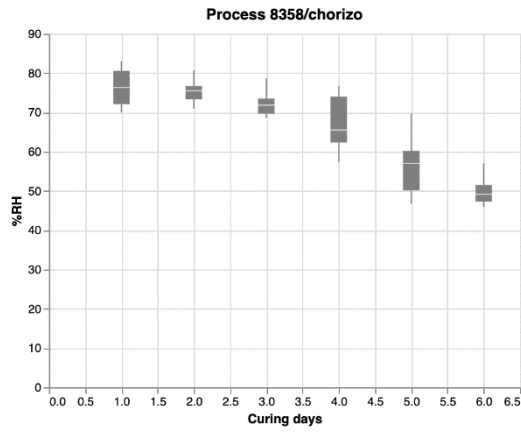


Ilustración 62: evolución estadística de la humedad y AW del proceso para 4 procesos por cada día de procesado.

## 5. Planificación

### 5.1. Programación de Tareas

Este proyecto se distribuyó en tareas distribuidas en 6 meses de trabajo, que coinciden con los 6 meses de trabajo iniciales del proyecto DT-OPTYDRY, todas las presentes tenían alguna flexibilidad para su realización, con excepción de las tareas T1, T2.3, T 5.1 y 7, ya que tienen coincidencias con la planificación de hitos interconectados en el proyecto general, y necesitan la sincronización de varios equipos de trabajo.

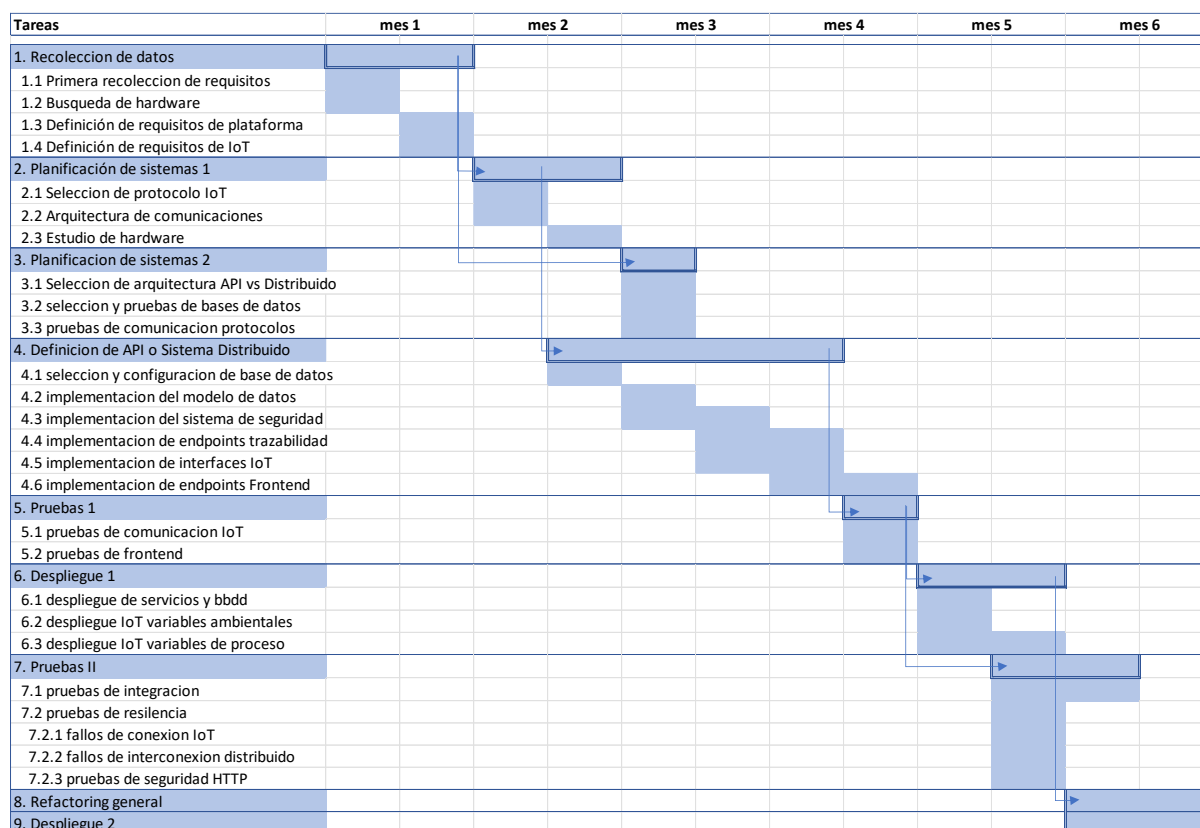


Ilustración 63: Gráfico de cascada para las tareas generales del proyecto, con cajas de duración quincenal.

### 5.2. Presupuesto Estimado

EL presupuesto por tarea y subtarea se muestra en la siguiente tabla, el listado de tareas es coincidente con la planificación y consecuente con las horas de trabajo planificadas en cada caso. En la tabla se encuentran los detalles de costo relacionado con herramientas o servicios externos correspondientes a cada ejecución.

Se dispuso adicionalmente un presupuesto de reserva en algunas tareas para aquellas labores que requieran un esfuerzo adicional de desarrollo u horas de trabajo.

A su vez, el presupuesto expuesto es consecuente con el presupuesto asignado a este proyecto por parte del proyecto DT-OPTYDRY

Tareas	Recursos	Labor			Herramien tas	Servicios	Reservas	Total
		Costo hora	Cant	Costo				
<b>1. Recoleccion de datos</b>			<b>32</b>	<b>960,00 €</b>	<b>0,00 €</b>	<b>150,00 €</b>	<b>0,00 €</b>	<b>1.110,00 €</b>
1.1 Primera recoleccion de requisitos		30,00 €	6	180,00 €				180,00 €
1.2 Busqueda de hardware	Busqueda Proveedores UpIntelligence	30,00 €	2	60,00 €		750,00 €		810,00 €
1.3 Definición de requisitos de plataforma		30,00 €	18	540,00 €				540,00 €
1.4 Definición de requisitos de IoT		30,00 €	6	180,00 €				180,00 €
<b>2. Planificación de sistemas 1</b>			<b>28</b>	<b>840,00 €</b>	<b>0,00 €</b>	<b>0,00 €</b>	<b>0,00 €</b>	<b>840,00 €</b>
2.1 Seleccion de protocolo IoT		30,00 €	6	180,00 €				180,00 €
2.2 Arquitectura de comunicaciones		30,00 €	10	300,00 €				300,00 €
2.3 Estudio de hardware	analisis datasheets - compatibilidad	30,00 €	12	360,00 €				360,00 €
<b>3. Planificación de sistemas 2</b>			<b>42</b>	<b>1.260,00 €</b>	<b>0,00 €</b>	<b>80,00 €</b>	<b>0,00 €</b>	<b>1.340,00 €</b>
3.1 Seleccion de arquitectura API vs Distribuido		30,00 €	12	360,00 €				360,00 €
3.2 seleccion y pruebas de bases de datos		30,00 €	18	540,00 €				540,00 €
3.3 pruebas de comunicacion protocolos	incl. alquiler nube pruebas	30,00 €	12	360,00 €		80,00 €		440,00 €
<b>4. Definicion de API o Sistema Distribuido</b>			<b>172</b>	<b>5.160,00 €</b>	<b>5.400,00 €</b>	<b>0,00 €</b>	<b>600,00 €</b>	<b>11.160,00 €</b>
4.1 seleccion y configuracion de base de datos		30,00 €	18	540,00 €				540,00 €
4.2 implementacion del modelo de datos		30,00 €	30	900,00 €				900,00 €
4.3 implementacion del sistema de seguridad	reserva horas desarrollo	30,00 €	38	1.140,00 €			300,00 €	1.440,00 €
4.4 implementacion de endpoints trazabilidad	reserva horas desarrollo	30,00 €	36	1.080,00 €			300,00 €	1.380,00 €
4.5 implementacion de interfaces IoT	incl. dispositivos IoT fabrica	30,00 €	38	1.140,00 €	5.400,00 €			6.540,00 €
4.6 implementacion de endpoints Frontend	incl. alquiler nube despliegue pruebas	30,00 €	12	360,00 €				360,00 €
<b>5. Pruebas 1</b>			<b>26</b>	<b>780,00 €</b>	<b>1.250,00 €</b>	<b>570,00 €</b>	<b>520,00 €</b>	<b>3.120,00 €</b>
5.1 pruebas de comunicacion IoT	incl. instalacion estacion meterológica	30,00 €	14	420,00 €	1.250,00 €	450,00 €	520,00 €	2.640,00 €
5.2 pruebas de frontend		30,00 €	12	360,00 €		120,00 €		480,00 €
<b>6. Despliegue 1</b>			<b>58</b>	<b>1.740,00 €</b>	<b>680,00 €</b>	<b>0,00 €</b>	<b>550,00 €</b>	<b>2.970,00 €</b>
6.1 despliegue de servicios y bbdd	incl. servicio hosting cloud basico 24m	30,00 €	26	780,00 €	680,00 €			1.460,00 €
6.2 despliegue IoT variables ambientales		30,00 €	16	480,00 €				480,00 €
6.3 despliegue IoT variables de proceso	reserva sensor defectuoso	30,00 €	16	480,00 €			550,00 €	1.030,00 €
<b>7. Pruebas II</b>			<b>32</b>	<b>960,00 €</b>	<b>0,00 €</b>	<b>0,00 €</b>	<b>1.200,00 €</b>	<b>2.160,00 €</b>
7.1 pruebas de integracion	reserva horas desarrollo	30,00 €	18	540,00 €			1.200,00 €	1.740,00 €
7.2 pruebas de resiliencia			<b>14</b>	<b>420,00 €</b>	<b>0,00 €</b>	<b>0,00 €</b>	<b>0,00 €</b>	<b>420,00 €</b>
7.2.1 fallos de conexion IoT		30,00 €	3	90,00 €				90,00 €
7.2.2 fallos de interconexion distribuido		30,00 €	9	270,00 €				270,00 €
7.2.3 pruebas de seguridad HTTP		30,00 €	2	60,00 €				60,00 €
<b>8. Refactoring general</b>	reserva horas desarrollo	30,00 €	42	1.260,00 €			720,00 €	1.980,00 €
<b>9. Despliegue 2</b>		30,00 €	12	360,00 €				360,00 €
							<b>Gran TOTAL</b>	<b>25.040,00 €</b>

Ilustración 64: Tabla de presupuesto por tarea

## 6. Conclusiones y Trabajos futuros

- El sistema de integración a través de API ha demostrado tener la robustez necesaria para implementar prácticamente todos los desafíos que aparecieron en la etapa de diseño del sistema.
- El modelo de datos es un importante factor de diseño a la hora de implementar el sistema de integración, la API, la aplicación de trazabilidad y las comunicaciones con los sistemas de monitoreo, pequeños cambios en el modelo de datos hacen imposible la implementación de funcionalidades en el sistema final.
- Para la construcción del modelo del sistema predictivo, las principales variables de entrada recomendadas incluyen temperatura y humedad ambiente, temperatura y humedad del proceso y tendencia del pH, teniendo los resultados más robustos observados con la humedad del proceso. La actividad del agua se eligió variable objetivo de salida para monitorear el estado del proceso de ahumado.
- Más datos de proceso serán útiles para reducir la incertidumbre y dar a la herramienta predictiva o al modelo de aprendizaje automático la solidez suficiente para predecir el comportamiento en condiciones desconocidas, también porque será útil obtener datos en los meses de verano para que se ajusten mejor a todo el clima del año.
- El trabajo realizado en este representa una aplicación novedosa de la tecnología IIoT al sector de la alimentación, fue llevado a término por parte de UpIntelligence en la implementación completa del proyecto DT-OptiDry para la empresa fabricante asociada y se encuentra en funcionamiento y producción obteniendo ganancias en el tiempo de digitación, veracidad y oportunidad de la información y una exacta trazabilidad de los lotes de venta con los lotes usados en las materias primas.

## 7. Referencias

- Allais, I. &. (2016). Modelling the operator know-how to control sensory quality in traditional process. *Journal of Food Engineering*. 83, 156-166.
- ANICE. (2021). *Memoria de actividades 2021*. Madrid: Asociación Nacional de Industrias de la Carne de España.
- Betina, E. (2003). *Todo sobre embutidos y fiambres*. Buenos Aires, Argentina.
- Bhuyan, D. D. (2018). Effect of different smoking methods on the quality of pork sausages. *Veterinary world*, 11(12), 1712–1719.
- Bradicich, T. (2020). *Managing Big Analog Data from the Internet of Things*. Retrieved from Padtronics: <https://padtronics.com/managing-big-analog-data-from-the-internet-of-things/>
- Buton, I. (2020). *Industrial IoT Challenges, Design Principles, Applications and Security*. Springer.
- Delsing, J. (2017). *IoT Automation, arrowhead framework*. CRC press.
- Duma-Kocan P, R. M. (2020). The Influence of Temperature Differences in Smoking Chamber and Furnace and Smoking Time on the Quality of Medium-Ground Sausages. *Molecules*; 25(23), 5515.
- Hernández González, A. (2018). *La microbiología predictiva en la industria cárnica*. Retrieved from Repositorio institucional de la Universidad de La Laguna: <http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/7260>
- Lufft, OTT Hydromet. (2021). *UMB Protocol 1.0 - Universal Measurement Bus Communication Protocol FOr Metereological Sensors*. OOT Hydromet.
- Ministerio de Agricultura, P. y. (2021). *Estrategía de digitalización del sector agroalimentario, forestal y del medio rural*. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Schulte, D. a. (2017). RAMI 4.0 based digitalization of an Industrial Plate Extruder System: Technical and Infrastructural Challenger. *IECON- 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Beijing, China.
- Schweichhart, K. (n.d.). *Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0)*. Retrieved from Europa.eu: [https://ec.europa.eu/futurium/en/system/files/ged/a2-schweichhart-reference\\_architectural\\_model\\_industrie\\_4.0\\_rami\\_4.0.pdf](https://ec.europa.eu/futurium/en/system/files/ged/a2-schweichhart-reference_architectural_model_industrie_4.0_rami_4.0.pdf)
- Serpanos, D. (2018). *Internet-of-Things, (IoT) Systems, Architectures, Algorithms, Methodologies*. Springer .
- T. Bangemann, C. B. (2016). *Industrie 4.0 – Technical Assets: basic terminology concepts, life cycles and administration models*. Fraunhofer.
- Y. Wang, T. T. (2017). Topological Approach for Mapping Technologies in Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0). *World Congress on Engineering and Computer Science, vol II WCECS*. San Francisco, USA.
- Yin X, C. Q. (2021). Influences of Smoking in Traditional and Industrial Conditions on Flavour Profile of Harbin Red Sausages by Comprehensive Two-Dimensional Gas Chromatography Mass Spectrometry. *Foods* 10(6), 1180.