

ENTREGABLE PÚBLICO DEL PROYECTO

Entidades: ANFACO-CECOPECA / EMENASA

Duración proyecto: Nov2022 – Oct2025

HIPERQUVO

**SISTEMAS HIPERESPECTRALES PARA CONTROL DE CALIDAD
CUANTITATIVO EN EL PROCESADO DE TÚNIDOS**

REFERENCIA PROYECTO CPP2021-009106

COLABORACIÓN PÚBLICO PRIVADA 2021



Contenido

1. INTRODUCCIÓN	3
2. REQUISITOS DE DISEÑO	4
3. INFORME DE LA METODOLOGÍA ANALÍTICA.....	7
Análisis de humedad por gravimetría	7
Análisis de grasa	7
Análisis de proteína.....	7
Análisis de sodio.....	7
Análisis de sal	7
Análisis de textura.....	7
4. PROTOCOLO DE MUESTREO Y PROCESADO DE MUESTRAS	9
5. INFORME DE RESULTADOS, GRADOS DE CORRELACIÓN ALCANZADOS Y FUNCIONALIDADES LOGRADAS.....	11
Modelo de predicción de Especie para Miga.....	11
Modelo de predicción de parámetros físico-químicos con atún y melva para Miga.....	12
6. PROTOTIPO FINAL	14
7. APP EN REALIDAD VIRTUAL Y APP EN REALIDAD AUMENTADA	17
Aplicación en Realidad Virtual	17
Aplicación de Realidad Aumentada	18

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo general de este proyecto es el diseño, desarrollo e implementación de un sistema industrial de caracterización cuantitativa de parámetros físico-químicos de distintas especies de túnidos cocidos mediante el uso de tecnología fotónica avanzada 4.0 (cámaras hiperespectrales). El sistema hiperespectral puede ser la herramienta clave para afianzar la percepción de calidad y la autenticidad del producto por parte del consumidor.

Este informe compila los resultados y aprendizajes obtenidos en el desarrollo del proyecto HIPERQVO llevado a cabo por EMENASA INDUSTRIA y ANFACO-CECOPECA (actualmente ANFACO-CYTMA), con el propósito de facilitar su difusión y puesta en valor ante la sociedad y el entorno industrial tal como se indicaba en la propuesta del proyecto. Se presenta en cada apartado el contenido que se puede hacer público de los correspondientes entregables desarrollados durante el proyecto.



2. REQUISITOS DE DISEÑO

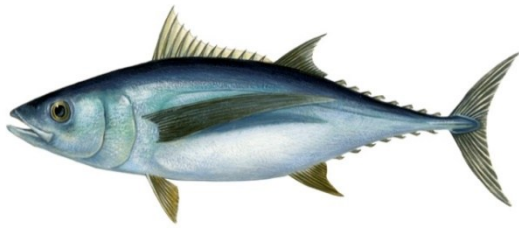
En la primera etapa del proyecto se definen las especificaciones de diseño de la máquina a nivel geométrico, funcional y de integración. Si bien dentro del marco del proyecto no está previsto implementarla en una línea industrial, sí se diseña con el propósito de que sea un prototipo demostrador con capacidad para operar en un entorno industrial real.

Sus requisitos principales de partida fueron los siguientes:

- Máquina compuesta por cinta transportadora alimentaria y campana de visión artificial para caracterizar físico químicamente la muestra de túnido cocido que esté pasando en la cinta transportadora.
- La campana de visión artificial debe:
 - Ser regulable en altura y fabricada en INOX316.
 - Garantizar estancamiento en su interior para poder alojar el sistema óptico de medición.
 - Tener capacidad para alojar un sistema óptico compuesto por cámara hiperespectral y luminarias halógenas en configuración de reflectancia.
- PC industrial para el procesado de la información.
- PLC para el control del proceso.
- HMI táctil donde realizar las configuraciones de funcionamiento de la máquina como para ponerla en marcha.
- Las especies de túnido cocido que se quieren caracterizar son presentados al sistema óptico bien en miga de túnido cocido o lomos, ver Ilustración 1:
 - Thunnus alalunga (ALB – Albacore), conocido en denominación comercial como Bonito de norte, atún blanco o albacora.
 - Thunnus albacares (YFT - Yellowfin tuna) conocido como atún aleta amarilla, rabil y comercializado como Atún claro.
 - Thunnus obesus (BET - Bigeye tuna) conocido como patudo, atún de ojo grande, obeso y comercializado como Atún claro.
 - Katsuwonus pelamis (SKJ - Skipjack tuna) conocido como atún listado, rayado y comercializado como Atún claro.
 - Auxis rochei / Auxis thazard (BLT / FRI) denominación comercial Melva.
- Para cada una de estas especies se quieren desarrollar modelos quimiométricos para los siguientes parámetros:
 - Humedad
 - Grasa
 - Proteína

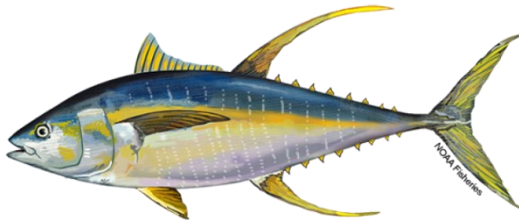


- Sal
- Textura
- Especie



Thunnus alalunga (ALB)
Longitud común: 40 - 100 cm
Longitud máx: 140 cm
Peso máx: 60 kg

BONITO DEL NORTE



Thunnus albacares (YFT)
Longitud común: 90 - 160 cm
Longitud máx: 239 cm
Peso máx: 190 kg

ATÚN CLARO



Thunnus obesus (BET)
Longitud común: 40 - 180 cm
Longitud máx: 250 cm
Peso máx: 210 kg

ATÚN CLARO



Katsuwonus pelamis (SKJ)
Longitud común: 80 cm
Longitud máx: 110 cm
Peso máx: 34 kg

ATÚN CLARO



Auxis rochei / Auxis thazard (BLT / FRI)
Longitud máx: 50 / 60 cm
Peso máx: 1,5 kg

MELVA

Ilustración 1: Especies objeto de estudio: nombre científico y denominación comercial. Fuente: CE; ORPAGU; planetuna.com.

3. INFORME DE LA METODOLOGÍA ANALÍTICA

Previamente a realizar las analíticas de las muestras de tónidos necesarias a lo largo del proyecto se acomete la tarea de la optimización de los métodos de ensayo y la puesta a punto de un método para la textura en la matriz de atún cocido. Todas las analíticas abordadas durante el proyecto se llevan a cabo en los laboratorios de ANFACO-CYTMA. Las características principales de los análisis que se llevan a cabo se indican a continuación.

Análisis de humedad por gravimetría

El método gravimétrico para el análisis de humedad en alimentos es una técnica clásica y precisa que se basa en la medición del cambio de peso de una muestra antes y después de la eliminación de su contenido de agua.

Análisis de grasa

Se realiza la extracción en caliente de la grasa con disolventes orgánicos y su posterior determinación.

Análisis de proteína

El método Kjeldahl es una técnica clásica y ampliamente utilizada para determinar el contenido de proteínas en muestras de alimentos.

Análisis de sodio

Determinación por Espectrometría de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS) tras digestión de la muestra en microondas.

Análisis de sal

Para la determinación de la sal en la muestra se procederá conforme a lo dispuesto en el Reglamento (UE) 1169/2011.

Análisis de textura

Los análisis de textura se realizan con el equipo Texture Analyser TA.XT.PLUS disponible en los laboratorios de ANFACO-CYTMA. Este equipo hace una doble compresión con un reposo intermedio, que simula el proceso de masticación, considerándose las compresiones evaluadas como las primera y segunda mordida en el proceso de masticación. A partir de estas compresiones representando la fuerza ejercida respecto al tiempo se evalúan los siguientes parámetros:

- Dureza
- Cohesividad
- Adhesividad
- Elasticidad / Esponjosidad
- Masticabilidad
- Gomosidad

Lo correcto es reportar masticabilidad para alimentos sólidos y gomosidad en alimentos semisólidos, ya que son excluyentes. En este caso se considerará la masticabilidad.

Se muestran a continuación imágenes de los análisis mencionados:



Ilustración 2: Análisis físico-químicos y de textura.

4. PROTOCOLO DE MUESTREO Y PROCESADO DE MUESTRAS

Se describe a continuación el protocolo de muestreo y procesado de las muestras que se ha llevado para realizar la toma de muestras con las que se conforman la matriz de entrenamiento o calibración. Este protocolo ha de cumplirse con cada una de las muestras que son utilizadas para formar parte del entrenamiento y que posteriormente formarán parte de la validación, ya que desviaciones de este protocolo afectarían a la implementación del modelo. Cualquier ampliación de la matriz de entrenamiento o validación que se quiera realizar debería contemplar el seguimiento de este protocolo.

Las etapas del protocolo son las siguientes:

1. Recepción de la muestra en congelado: se reciben los lomos de túnidos limpios y cocidos de los distintos proveedores.
2. Almacenamiento de la muestras en el congelador a una temperatura aproximada de 20°C negativos hasta que son procesados.
3. Descongelación de la muestra en hace en una cámara de refrigeración industrial con una temperatura entre 0 y 2°C.
4. Atemperado del lote a procesar acondicionándolo en la planta piloto para que alcance una temperatura adecuada para que la muestra pueda ser inspeccionada correctamente por la cámara hiperespectral.
5. Realización de ensayos de textura, después del atemperado en formato lomo y previo a la captura de la imagen espectral, dado que en el prototipo se tomarán imágenes con la muestra en formato lomo y miga. Las muestras están etiquetadas para asegurar su trazabilidad a través de todos los pasos del proceso de muestreo.
6. Captura de la imagen espectral situando la muestra encima de la cinta del prototipo y se procede a ejecutar el algoritmo de captura de la imagen. La muestra se presenta a la cámara en formato lomo y en formato miga, y presentados tanto sobre una bandeja como directamente en la cinta dado que en la industria se pueden dar diferentes presentaciones.
7. Realización de análisis nutricional. Una parte de la muestra se envía al laboratorio para realizar los ensayos analíticos de planteados: humedad, grasa, proteína sodio y sal.
8. Generación de la matriz de calibración. Cada muestra procesada tiene asociada su trazabilidad temporal y naturaleza (fecha, lote, muestra, especie, etc.) su espectro representativo y sus resultados analíticos obtenidos. De esta manera se irá conformando la matriz de calibración, que también podrá albergar muestras para su validación posterior.

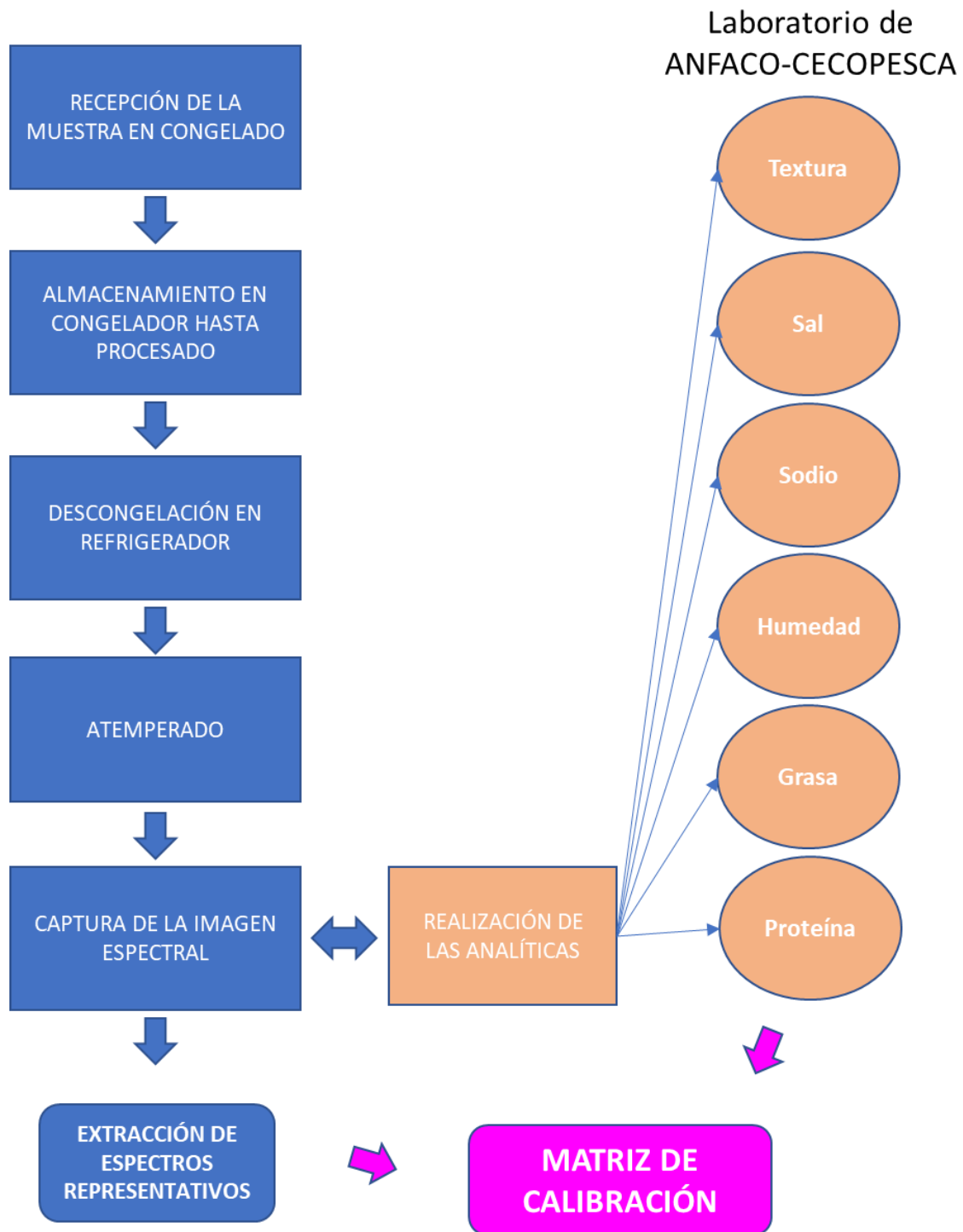


Ilustración 3: Protocolo de trabajo para la obtención de la matriz de calibración.

5. INFORME DE RESULTADOS, GRADOS DE CORRELACIÓN ALCANZADOS Y FUNCIONALIDADES LOGRADAS

Se han desarrollado diferentes modelos de predicción en el curso del proyecto considerando aspectos como la presentación de la muestra en la captura de datos espectrales, y acorde a los objetivos de estudio del proyecto en el campo de los parámetros físico-químicos, textura y especie.

De los diferentes modelos llevados a cabo en la fase de entrenamiento, empleando el software The Unscrambler X, se ha implementado y validado en el Prototipo los modelos con mejores resultados y con mayor potencial interés en la industria. Estos son los de miga presentada directamente en cinta, tanto para los parámetros físico-químicos de humedad, proteína, grasa y sal; y la predicción de especie. Dado que los modelos de predicción desarrollados para la textura no presentan un desempeño satisfactorio.

Para los modelos desarrollados se empleó el método de predicción de Regresión por Mínimos Cuadrados Parciales (Partial Least Squares Regression, PLSR) utilizando métodos de pre-procesado.

Modelo de predicción de Especie para Miga

Se considera las muestras presentadas en formato miga de atún y melva, tanto en bandeja como en cinta, para la predicción de su especie. Aplicando el método de Análisis de Componentes Principales, PCA (Principal Component Analysis), se puede observar cierto agrupamiento entre las diferentes especies, ver Ilustración 4.

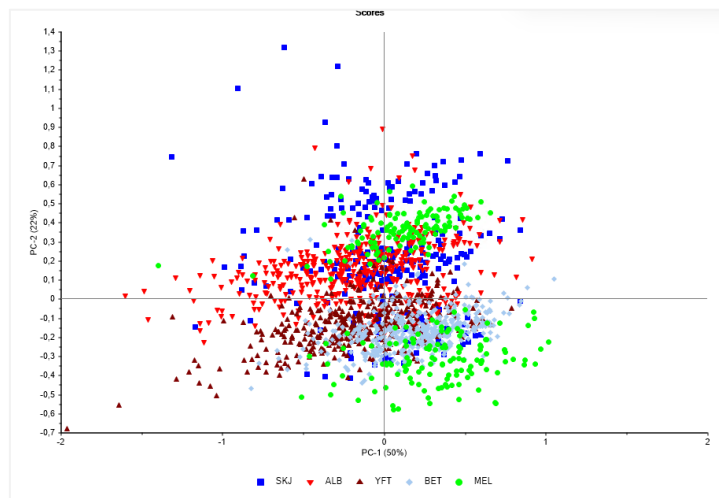


Ilustración 4: Gráfico de puntuaciones (Scores) del PCA para miga mostrando agrupamiento acorde a las especies de atún: skipjack, albacora, yellowfin y bigeye; y melva visualizado en The Unscrambler X.

Se realizan los modelos PLS para cada una de las especies donde generan para cada observación un conjunto de valores que reflejan el grado de pertenencia a cada especie. Posteriormente se le asigna a cada muestra la clase cuyo valor de predicción sea mayor.

Se muestra en la Tabla 1 los valores de RMSE de entrenamiento (validación cruzada) y el coeficiente de determinación R^2 para los modelos de predicción de cada especie.

Tabla 1. Valores estadísticos de RMSE (validación cruzada) y R^2 para las diferentes especies analizadas.

Especie	RMSEC (CV) Error en predicción	R^2 (CV)
ALBACORA	$\pm 0,225$	0,72
BIGEYE	$\pm 0,243$	0,68
SKIPJACK	$\pm 0,255$	0,46
YELLOWFIN	$\pm 0,320$	0,43
MELVA	$\pm 0,232$	0,56

Modelo de predicción de parámetros físico-químicos con atún y melva para Miga

Se consideraron las muestras de atún y melva en presentación en miga, tanto en bandeja como en cinta, para la predicción de los parámetros físico-químicos: humedad, proteína, grasa, sodio y sal; y se realizan los modelos PLS para cada uno de los parámetros físico-químicos.

Se muestran en la Tabla 2 el rango de medida y los valores de RMSE en el entrenamiento (validación cruzada) y el coeficiente de determinación R^2 para los parámetros estudiados: humedad, proteína, grasa, sodio y sal. Y a modo de ejemplo el gráfico de predicción versus referencia para el parámetro de humedad, ver de Ilustración 5.

Tabla 2. Rango de medida y valores estadísticos para los diferentes parámetros físico-químicos obtenidos en la calibración del modelo.

Parámetro Físico-Químico	Rango de medida (g/100g)	RMSEC (CV) Error en predicción (g/100g)	R^2 (CV)
HUMEDAD (g/100g)	62,10 - 71,00	$\pm 0,797$	0,68
PROTEÍNA (g/100g)	27,10 - 33,20	$\pm 0,829$	0,57
GRASA (g/100g),	0,01 - 4,70	$\pm 0,398$	0,76
SODIO (g/100g)	0,04 - 0,95	$\pm 0,099$	0,81
SAL (g/100g)	0,11 - 2,38	$\pm 0,246$	0,81

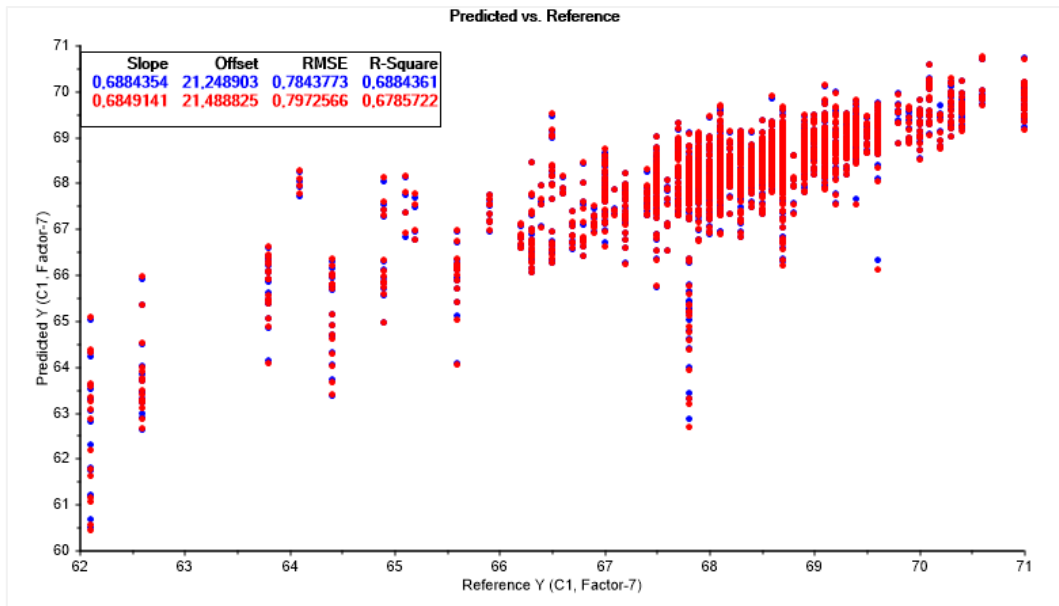


Ilustración 5: Datos estadísticos para predicción de la Humedad en miga, visualizado en The Unscrambler X.

6. PROTOTIPO FINAL

El objetivo general de este proyecto fue el diseño, desarrollo e implementación de un prototipo demostrador con capacidad para operar en un entorno industrial real para la caracterización físico-química del atún cocido, sus características de textura y especie, mediante el uso de tecnología fotónica avanzada 4.0 con cámaras hiperespectrales. Para ello, se recoge la información que captura la cámara hiperespectral en el rango infrarrojo del espectro de las diferentes muestras.

Este prototipo cuenta con una estructura modular, preparada para trabajo en entorno alimentario, sin modificación del producto y que cumple con las seguridades necesarias para su correcto funcionamiento. Los elementos del prototipo y sus características principales son:

- **La campana de visión**
 - Cámara hiperespectral Push-Broom FX17 (SWIR, 900-1700nm).
 - Luminarias halógenas para iluminar la escena.
 - Dispone de un sistema que permite la regulación en altura.
 - Dispone de ruedas para facilitar desplazamiento.
- **La cinta alimentaria**
 - Ancho útil del transportador: 500 mm.
 - Superficie de contacto (banda) específica para poder llevar alimentos (color azul) y soportar limpieza.
 - Material estructura: INOX 316.
 - Dispone de ruedas para facilitar desplazamiento.
- **El cuadro eléctrico y de control.**
 - PLC de control para gobernar todas las entradas y salidas del sistema, así como para comunicación con el PC industrial.
 - PC industrial para realizar la captura y el procesado de la información recogida por la cámara hiperespectral.
 - HMI donde realizar las configuraciones de funcionamiento de la máquina, así como para poner en funcionamiento la misma.
 - Variador de frecuencia para la regulación de la velocidad de la cinta transportadora.
 - Dispone de ruedas para facilitar desplazamiento.

Se muestran en la Ilustración 6 e Ilustración 7 imágenes del prototipo y sus diferentes elementos.





Ilustración 6: Arriba: campana de visión abierta y cinta. Centro: cuadro eléctrico y de control. Debajo: campana de visión con la cámara hiperespectral y las luminarias halógenas colocadas a 45 grados.



Ilustración 7: Prototipo HIPERQVO: campana de visión, cuadro eléctrico y de control; y cinta transportadora.

7. APP EN REALIDAD VIRTUAL Y APP EN REALIDAD AUMENTADA

Aplicación en Realidad Virtual

Se ha desarrollado un entorno de realidad virtual dónde se puede ver de forma sencilla los parámetros físico-químicos de los procesos desarrollados en el proyecto para así evaluar los resultados obtenidos para las diferentes especies de tónidos analizadas y en diferentes formatos (lomo y miga).

La aplicación ha sido desarrollada íntegramente utilizando Unity 6, con un enfoque específico para su funcionamiento en el dispositivo de realidad virtual Oculus Rift S.

En este entorno virtual que simula una sala donde se ubica el equipo principal junto con los distintos paneles y pantallas interactivas necesarios para la manipulación y visualización de información del equipo, ver Ilustración 8.

Este espacio virtual permite al usuario interactuar de manera intuitiva y envolvente con los elementos del equipo, facilitando así la experiencia de uso en realidad virtual, disponiendo de los siguientes recursos que se muestran en la Ilustración 9 e Ilustración 10:

- Una animación en la cinta transportadora que simula su movimiento real, incluyendo una representación visual de una muestra de miga de atún situada sobre ella
- En el panel izquierdo de la sala virtual se muestran dos vídeos de apoyo:
 - Uno donde se puede observar el desplazamiento de una muestra sobre la cinta, en una grabación tomada directamente del equipo real.
 - Otro con la interfaz de la aplicación utilizada para capturar y registrar los datos generados durante cada ensayo.
- En el panel derecho se han incorporado cuatro opciones interactivas para facilitar la manipulación y personalización de la aplicación como:
 - Encender o apagar la cinta.
 - Abrir las puertas de equipo, permitiendo al usuario visualizar los componentes internos.
 - Un desplegable que ofrece la selección entre los históricos de las muestras disponibles.
 - Un desplegable que permite escoger entre las variantes de presentación de la muestra miga y lomo.

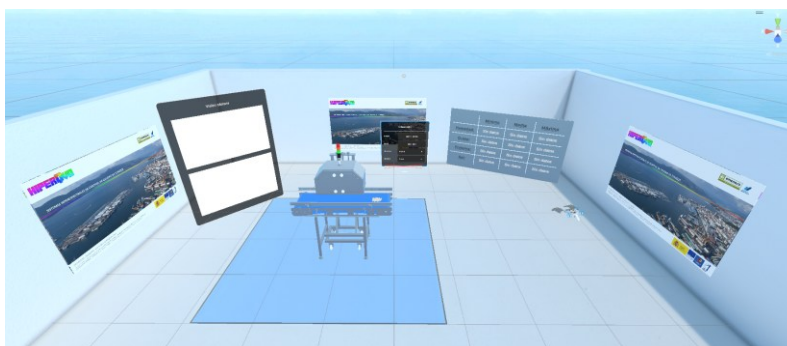


Ilustración 8: Entorno de realidad virtual desarrollado donde se ubica el prototipo y sus paneles interactivos.





Ilustración 9: Animación en la cinta transportadora simulando su movimiento real y vídeos de apoyo.

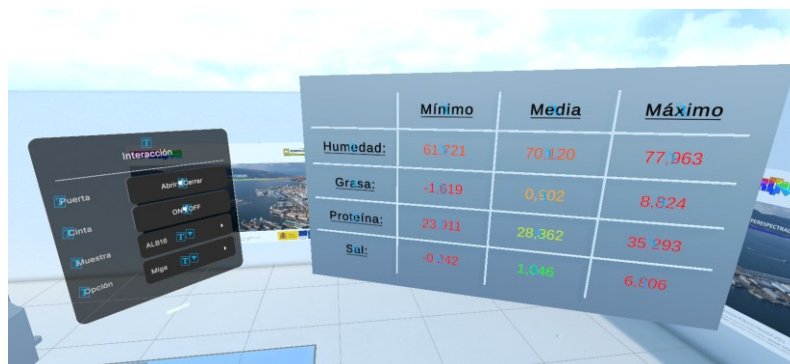


Ilustración 10: Panel disponible en el entorno virtual con opciones interactivas para facilitar la manipulación y personalización de la aplicación.

Aplicación de Realidad Aumentada

Se ha desarrollado una aplicación de realidad aumentada que permite monitorizar y visualizar en tiempo real los parámetros físico-químicos de la muestra escaneada con la cámara hiperespectral.

La aplicación de realidad aumentada se llevó a cabo empleando el software Unity en su versión 2022.3.8f1 y el kit de Herramientas MRTK (Mixed Reality Toolkit) 2.8 de Microsoft. Esta aplicación se despliega en la misma red que la máquina y se comunica con el PLC para obtener los valores de los parámetros físico-químicos de la muestra de producto que se esté procesando.

La aplicación fue testada con la máquina en la planta piloto de ANFACO-CYTMA empleando unas gafas de realidad aumentada Hololens 2 Industrial Edition. Se dispone de un código QR ubicado en la máquina para iniciar la aplicación de realidad aumentada, ver Ilustración 11. De este modo, el usuario se sitúa frente a la máquina con las gafas Hololens2 y una vez que se escanea el QR aparece el panel de visualización de los datos físico-químicos, ver Ilustración 12.



Ilustración 11: QR dispuesto en la máquina para la aplicación de realidad aumentada.



Ilustración 12: Panel de visualización de datos físico-químicos desarrollado con realidad aumentada.