

ARMONÍA AMBIENTAL 2.0: PLATAFORMA IOT PREDICTIVA POR IA PARA CUMPLIMIENTO DE LA UE 2024/1275 (EPBD) Y AUDITORÍA DE LA CALIDAD AMBIENTAL (IEQ)

J. M. Caamaño González

COATAC (Colegio Oficial de la Arquitectura Técnica de A Coruña), A Coruña, España

RESUMEN

La presente comunicación expone la evolución disruptiva del proyecto de investigación doctoral "Armonía Ambiental", presentado inicialmente en CONTART 2024. Tras una primera fase de exploración basada en prototipos Do-It-Yourself (DIY), la investigación ha experimentado una transformación radical impulsada por dos vectores principales: la integración de la Inteligencia Artificial Generativa (GenAI) como motor de desarrollo de ingeniería y software; y la alineación estratégica con el nuevo marco normativo europeo, específicamente la Directiva (UE) 2024/1275 (EPBD Recast) o con el índice PMV/PPD (ISO 7730).

El núcleo de esta evolución reside en el cambio de paradigma del investigador, quien ha superado las barreras tradicionales de la programación de sistemas embebidos mediante el uso de Grandes Modelos de Lenguaje (LLMs). Esto ha permitido reescribir desde cero la arquitectura del firmware para microcontroladores y servidores, dando lugar a una plataforma nueva, libre y hecha a medida sin necesidad medios o equipos técnicos profesionales. A diferencia de sus predecesores, estos nuevos dispositivos Open-Source (cuyo esquema, funcionamiento y código se publicará libremente para su divulgación y mejora colaborativa) no se limita al registro pasivo de datos, sino que ejecuta algoritmos de análisis en tiempo real en el edge (borde), optimizados por IA para gestionar múltiples sensores de última generación para medición de PM, VOC, NOx, CO2, temperatura, humedad e iluminancia. Realizando comparaciones en tiempo real con estaciones meteorológicas de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) para desarrollar nuevos conceptos útiles y sencillas de comprender para el usuario final. Tales como brain score, free cooling; proliferación de moho; eficacia de ventilación o incluso porcentaje de la probabilidad de padecer migrañas. La investigación demuestra cómo la IA ha democratizado la creación de herramientas de verificación de alta precisión, permitiendo al arquitecto técnico diseñar tanto el hardware y software según sus necesidades, proyectos técnicos o certificaciones oficiales, pudiendo auditar parámetros críticos de la Calidad Ambiental Interior (IEQ) de estándares de la sostenibilidad cómo la certificación WELL v2, Passivhaus, o sencillamente nuestras actuales residencias.

A nivel normativo, el proyecto se anticipa a la transposición española del RITE actualizado y el Código Técnico de la Edificación (CTE DB-HS 3), ofreciendo una respuesta tecnológica de bajo coste y accesible a las nuevas exigencias de digitalización del mantenimiento y monitorización obligatoria en edificios terciarios. Acercando a toda clase de usuarios la facilidad de la programación orientada a

requerimientos profesionales de la construcción, diseño de dispositivos, almacenamiento, la gestión junto al análisis de los datos y su exposición para conclusiones técnicas. "Armonía Ambiental 2.0" no solo valida una herramienta tecnológica, sino que propone un nuevo modelo de ejercicio profesional mediante la implementación real de IA, actuando como catalizador para garantizar edificios saludables y descarbonizados al alcance de profesionales de la construcción y usuarios finales de los proyectos.

PALABRAS CLAVE: inteligencia artificial, IoT, realidad aumentada y virtual, y otras nuevas tecnologías.

1. INTRODUCCIÓN

El sector de la edificación se encuentra en una encrucijada histórica, presionado simultáneamente por la urgencia climática global y la creciente demanda social por espacios saludables. La aprobación de la directiva UE 2024/1275 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de abril de 2024, relativa a la eficiencia energética de los edificios (refundición), marca un punto de inflexión legislativo. Esta nueva normativa de aplicación no solo endurece los objetivos de descarbonización hacia un parque inmobiliario de cero emisiones (ZEB) para 2050 respecto al actual CTE o el RITE, sino que introduce, con una fuerza inédita, la obligatoriedad de monitorizar y garantizar la Calidad Ambiental Interior (IEQ -Indoor Environmental Quality). Ya no basta con diseñar edificios estancos y energéticamente eficientes; es imperativo demostrar, mediante datos empíricos y monitorización, que estos espacios preservan la salud fisiológica y cognitiva de sus ocupantes.

En este contexto, se ha desarrollado la auditoría ambiental tradicional, basada en mediciones puntuales (spot checks) o en costosos sistemas BMS (Building Management Systems) propietarios, que, en la mayoría de los casos, resulta insuficiente o económicamente inviable para la gran mayoría del parque residencial y terciario existente. Es en base a esta situación, con la intención de hacer asequible este nuevo requerimiento se ha iniciado la investigación académica Armonía Ambiental, que nace para llenar este vacío, proponiendo una metodología que combina la accesibilidad del hardware de bajo coste con la sofisticación de la Inteligencia Artificial (IA) y los Gemelos Digitales. Denominando a este proyecto "Armonía Ambiental 2.0", debido al salto cuantitativo respecto a los recursos disponibles y capacidades alcanzadas cuando se inició la investigación hace dos años. Gracias a los actuales modelos de IA, ha sido posible desarrollar una plataforma on cloud de alojamiento, gestión y análisis de gran cantidad de datos recolectados y producidos. También el ajuste del software empleado en el hardware diseñado y desarrollado; y la capacidad predictiva gracias el análisis mediante sistemas de machine learning adaptados a la normativa de aplicación en el sector de la construcción. Suponiendo un gran avance respecto al proyecto inicial. Y anticipándose a las nuevas exigencias.

En la presente comunicación se procederá a contextualizar el proyecto con la normativa vigente y futura de aplicación, los objetivos desarrollados y las ventajas y diferencias respecto a las alternativas actuales en el mercado. Tratando de exponer como trasfondo general, cómo gracias a los medios actuales, es posible emprender y desarrollar proyectos de manera ágil con recursos ajustados gracias al empleo de las nuevas tecnologías a través de este ejemplo práctico.

2. METODOLOGÍA

La metodología de desarrollo ha seguido un enfoque ágil e iterativo, apoyado masivamente en herramientas de IA para la generación y revisión de código, diseño de experiencia de usuario para la App e incluso de la electrónica y hardware. Con el objetivo de aunar el cumplimiento de diversa normativa y revisión de la información registrada para aprendizaje automático del proyecto.

En primer lugar, se contextualizará el origen del proyecto y como se ha buscado el alineamiento con la actual normativa y la de inminente aplicación y estándares ISO. Posteriormente se detallará los resultados del proceso de desarrollo tanto del Hardware (tanto el diseño y producción de los prototipos como las capacidades a nivel de sensorización, conexión y funciones generales) como de software (de los equipos cómo de la plataforma web para la recolección, gestión y análisis de toda la información, incluso conceptos y funciones desarrolladas).

Esta comunicación detalla la arquitectura de la plataforma, sus algoritmos predictivos (moho, Brain Score y el Sistema Sherlock entre otros), observar un gemelo digital de nuestra vivienda u oficina mediante una visualizador 3D en tiempo real o su capacidad para integrarlos con Google Home y Telegram. Además, analiza cómo permite a los Arquitectos Técnicos superar el CTE y estándares europeos, liderando la digitalización y salud ambiental. Explorando el potencial interdisciplinar de la IA al corroborar cómo es posible el diseño y desarrollo de equipos ac-doc de manera viable.

2.1. Contexto del proyecto

La evolución desde la versión 1.0 (CONTART 2024) [1] ha sido exponencial: de sensores básicos a un ecosistema complejo impulsado por IA generativa y predictiva. Mediante el desarrollo de una App con algoritmos, diseño y exposición de datos ex proceso para el proyecto, así como el rediseño y aplicación de capacidades de dispositivos elaborados durante la fase de investigación, conectados permanentemente a la red, el sistema predice y evita proactivamente alteraciones ambientales. Diseñado íntegramente con IA (electrónica, producto e interfaz), esta tecnología actuó como copiloto de ingeniería. Permitió al autor desarrollar en solitario software avanzado —redes neuronales y gemelos digitales 3D interactivos en tiempo real— que tradicionalmente exigiría un equipo multidisciplinar y una fuerte inversión económica.

2.2. Normativa actual y alineación con los objetivos de la UE 2024/1275 (EPBD)

La validez técnica del proyecto inicial "Armonía Ambiental" se sustentaba en los fundamentos normativos del CTE y RITE de aplicación en las áreas de confort ambiental y calidad del aire interior en los proyectos de construcción. En dichas normativas se concluye y especifica que el confort interior depende sobre todo de mantener una temperatura, humedad y velocidad del aire adecuadas, junto con un buen confort acústico y visual. Mientras que la calidad del aire interior se garantiza mediante ventilación higiénica suficiente, control de contaminantes, buena distribución del aire y mantenimiento de filtros e instalaciones.

En esta nueva fase del proyecto de investigación (denominada "Armonía Ambiental 2.0" para acotar las mejoras y objetivos a alcanzar), se ha procedido a la revisión de la Directiva Europea de Eficiencia Energética de los Edificios (EPBD 2024), que eleva la monitorización del confort interior, conocida como Calidad del Ambiente Interior (IEQ - Indoor Environmental Quality), de una recomendación a un requisito regulatorio obligatorio. La nueva directiva (UE) 2024/1275, vigente desde mayo de 2024 y

con transposición nacional para 2026, situando la salud de los ocupantes en el centro del diseño y rehabilitación de edificios.

El Artículo 13 es particularmente relevante para esta investigación, ya que establece que los Estados miembros deben fijar requisitos para garantizar una IEQ adecuada en los edificios nuevos y en aquellos sometidos a renovaciones importantes. De manera específica, el artículo exige que los nuevos edificios de cero emisiones no residenciales estén equipados con "dispositivos de medición y control para la supervisión y regulación de la calidad del aire interior" [2].

A modo de resumen, La directiva europea EPBD transforma los sistemas de gestión de edificios (BMS/BACS) en una estricta obligación legal para mayo de 2026 en inmuebles no residenciales nuevos o con gran rehabilitación. Exige monitorizar de forma continua y en tiempo real la temperatura, humedad, contaminantes (COV) y CO₂ (fijado en <1.000 ppm en España según el CTE). Esta exigencia arranca para ventilaciones de más de 290 kW y bajará a 70 kW en 2029, introduciendo además el índice SRI para evaluar la "preparación inteligente" del edificio frente al confort y la red eléctrica. Técnicamente, este control continuo de la calidad del aire (IAQ) persigue un triple impacto: optimiza el consumo energético al erradicar la sobre ventilación, protege la envolvente de patologías como condensaciones o moho, y blinda la salud y el rendimiento cognitivo de los ocupantes al garantizar un aire interior de alta calidad. Los equipos y plataforma desarrollada han sido concebidos precisamente tanto para el monitoreo preciso, como para proveer mediante acciones pasivas y activas estos parámetros. La monitorización ambiental pasa de buena práctica a requisito legal, el fundamento de esta investigación es cumplir esta exigencia con medición digital auditable y de gemelo digital.

2.3. Estándares de Confort: ISO 7730 y Modelo de Fanger

Para objetivar la sensación de confort, la app online implementa computacionalmente la norma ISO 7730:2005 [3], basada en el modelo de balance térmico de P.O. Fanger. [4] A diferencia de los termostatos convencionales que solo miden la temperatura del aire (T_a), el algoritmo desarrollado calcula en tiempo real los índices PMV [5] (Predicted Mean Vote) y PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied). El cálculo iterativo del PMV evalúa seis variables: temperatura del aire y radiante media (T_r), velocidad del aire (v_a), humedad (RH), metabolismo (M, asumiendo 1.2 met) y aislamiento de la ropa (I_{cl} , dinámico). Resolviendo el intercambio térmico, la plataforma clasifica el confort de manera visual y sencilla en las categorías normativas A, B o C. Tratando de facilitar al usuario su comprensión.

2.4. Nemo: Hardware desarrollado y capacidades

El sistema Nemo se fundamenta en dos pilares: equipos de hardware monitorización y sensorización, responsables de la obtención y visualización eficiente de datos como prototipos plenamente funcionales. Y una plataforma App-web que almacena y analiza la información, permitiendo a su vez la consulta desde cualquier dispositivo conectado a internet.

El dispositivo de medición, denominado internamente NEMO Sense, representa una evolución significativa respecto a los prototipos anteriores. Se ha optado por la familia de microcontroladores ESP32 (específicamente C3 y S3) debido a su arquitectura de doble núcleo de 32 bits, conectividad Wifi/Bluetooth nativa y bajo consumo. Esta capacidad de procesamiento es fundamental para realizar cálculos de edge computing, reduciendo la latencia y la dependencia de la nube.

La matriz de sensores se ha seleccionado buscando un equilibrio entre coste, precisión profesional, y facilidad de replicación; priorizando componentes digitales con bus I2C para minimizar el ruido analógico para la medición de 10 variables básicas y posterior procesamiento mixto para objetivos y métricas medioambientales englobadas en cuatro grupos de sensorización con lecturas cada minuto:

- **Medición de (CO₂):** mediante tecnología fotoacústica, se ha logrado una precisión de +-30 ppm + 3%, cumpliendo con los requisitos para la certificación WELL [6] y la normativa RITE.
- **Calidad del Aire (VOCs/NOx):** detectando una amplia gama de compuestos orgánicos volátiles, se calcula un Índice de Calidad del Aire (IAQ) basado en la resistencia del gas. Realizando lecturas de temperatura, humedad y presión atmosférica con alta estabilidad a largo plazo.
- **Material Particulado (PM):** Detectando polvo y aerosoles, mediante dispersión láser para cuantificar concentraciones de masa de virus, polen y polvo (PM1.0, PM2.5 y PM10).
- **Iluminancia:** con lecturas de lux, se puede correlacionar el confort visual con el térmico.

El objetivo ha sido desarrollar un equipo plug and play autocalibrado por software fácil de usar. Además, se ha complementado con otro equipo de visualización de datos, NEMO Viewer, que permite visualizar datos, gráficas y avisos de los sensores en un carrusel de pantallas usando solo USB-C y la misma red. Tanto el diseño de los equipos (carcasas impresas en 3D), electrónica (PCB) y grafismos de las pantallas han sido diseñados con ayuda de herramientas de IA, responsables de producir los diseños y modelos.

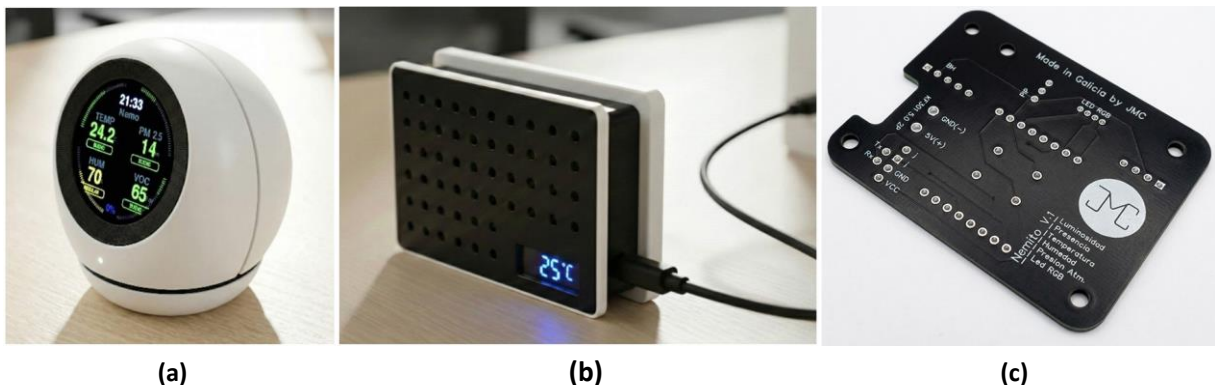


Figura 1. Imágenes de dispositivos: **(a)** Dispositivo Nemo Viewer (monitoreo). **(b)** Dispositivo Nemo Sense (sensorización). **(c)** Placa PCB del prototipo inicial. **Fuente:** Elaboración propia

El firmware, escrito en C++ mediante apoyo de IA, simplifica la visualización de datos a cualquier usuario y ofrece una conexión Wifi de baja latencia mediante portal cautivo, facilitando su integración con apps y plataformas como Home Assistant o Google Home. Esto permite al usuario consultar verbalmente la calidad del aire y cualquier variable registrada, integrando la monitorización en el hogar inteligente. Además, cada NEMO publica una API JSON segura y sincroniza datos en Firebase, lo que permite análisis en la nube, actualización del Gemelo Digital en milisegundos y alertas automáticas.

El sistema incorpora avisos en tiempo real estructuradas en tiempo real al móvil sobre anomalías (ej. riesgo viral) o eficiencia energética a apps de mensajería como Telegram. En conjunto, ofrece un dispositivo profesional, replicable y fácil de usar, plenamente integrable en el hogar inteligente. Siendo su mayor diferenciador y ventaja competitiva la soberanía de los datos: el usuario es el único propietario y puede descargar su historial completo. Este punto fue clave, para reorientar la titularidad de los datos de empresas a los propios usuarios y facilitar su análisis en cualquier otro medio.

2.5. Software y plataforma Online

EL núcleo y evolución del proyecto ha sido el desarrollo de una plataforma cloud descentralizada y altamente escalable que centraliza el almacenamiento, análisis y gestión de la información. Permitiendo el acceso remoto a los datos del inmueble y los sensores mediante una aplicación integrando además notificaciones vía Telegram, MQTT y con agentes domóticos como Home Assistant y Alexa. Su desarrollo y la implementación de las normativas vigentes (y certificaciones) del sector de la construcción se optimizaron significativamente utilizando herramientas de Inteligencia Artificial para ser eficientes en la gestión de los datos recogidos y posteriormente analizados e interpretados.

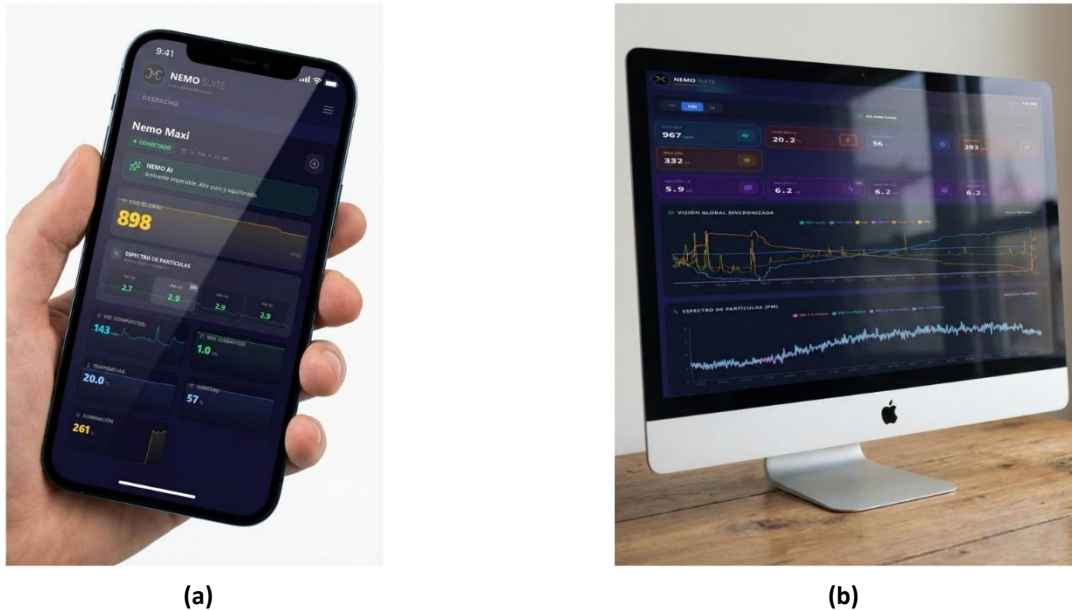


Figura 2. Imágenes de la App Web: **(a)** Vista en smartphone de un dispositivo, **(b)** Vista en ordenador de Dashboard general de una vivienda. **Fuente:** Elaboración propia

2.6. Algoritmos desarrollados, neuroarquitectura y Salud Cognitiva (Brain Air Score)

El núcleo del proyecto puede resumirse en tres grandes procesos debidamente diferenciados para que el desarrollo global haya sido eficiente: que datos registrar (hardware desarrollado), donde almacenarlos (software local y online), y como gestionarlos para producir procesos predictivos para anticipar eventos y situaciones (algoritmos de gestión de la información). Destacado por su capa de "inteligencia científica", un conjunto de algoritmos implementados en JavaScript (science.js) que procesan los datos brutos para extraer conclusiones significativas sobre la salud y el confort.

Más allá del confort térmico, integrando neurociencia arquitectónica (COGfx Study, Harvard) [7], se evidencia que niveles de CO₂ superiores a 950 ppm y altos VOCs disminuyen significativamente la función cognitiva. En contraste, duplicar la ventilación puede incrementar los resultados cognitivos.

El proyecto operacionaliza esta ciencia mediante el "Brain Air Score", una serie de algoritmos que ponderan las variables analizadas para ofrecer una métrica de "productividad ambiental", alineados con los conceptos de "Aire" (A01, A05) y "Confort Térmico" (T01) de la certificación WELL v2), facilitando la precertificación.

A grandes rasgos, el Brain Air Score evalúa la salud ambiental partiendo de 100 puntos y aplicando penalizaciones acumulativas. Su modelo no lineal para el CO₂ establece 4 niveles de ppm de CO₂:

- **≤600 ppm:** 0 pts. (Excelencia cognitiva).
- **600-1000 ppm:** Penalización proporcional hasta -15 pts.
- **1000-1500 ppm:** -15 pts. base + proporcional hasta -35 pts.
- **>1500 ppm:** -50 pts. (Deterioro cognitivo severo).

Simultáneamente, penaliza desviaciones térmicas (>3 pts./°C fuera de 19-24°C), humedad (fuera del 30-60%) y VOCs. Este feedback clasifica la idoneidad intelectual en cinco niveles, desde "Óptimo" (>90) a "Crítico" (<40). Junto al Free Cooling y predicción de demanda, eleva directamente el Indicador de Preparación para Aplicaciones Inteligentes (SRI) del inmueble, promovido por la normativa.



Figura 3. Detalle parcial de gráficos y datos mostrados en la App y Brain Score. Fuente: elaboración propia

Entre los algoritmos desarrollados, se encuentran plenamente funcionales los siguientes, dando lugar a la experiencia de usuario actualmente disponible:

2.6.1. Predicción de Moho y Análisis Psicrométrico

La proliferación de moho es uno de los mayores riesgos para el edificio y sus residentes. Los higrometros tradicionales suelen fallar en la prevención porque miden Humedad Relativa, que depende de la temperatura. En este caso, se realiza el cálculo de la Humedad absoluta en g/m³ mediante la fórmula de Magnus-Tetens para la presión de vapor de saturación, comparando humedad interior y exterior. Lanzando alertas para ventilar si el exterior es un ambiente más seco. Garantizando la eficiencia del tiempo requerido del ventilado mediante el análisis de las bases de datos.

2.6.2. Probabilidad de Migrañas y el Sistema "Sherlock"

En este caso, opera como auditor automatizado mediante machine learning. La App evalúa los datos actuales frente a límites establecidos y propone las soluciones más eficientes según el parámetro que supera valores límite. El usuario solo debe activar la recomendación en el Dashboard; una cuenta atrás, calculada mediante series temporales, indica el tiempo exacto de actuación necesario.

Realizando un registro entre el inicio y el fin de la actuación para mejorar la red neuronal y capacidad de predicción de los tiempos de actuación. Al comparar todos los datos al inicio y fin de ésta. Maximizando la eficiencia con respuestas personalizadas y creando un sistema eficiente.

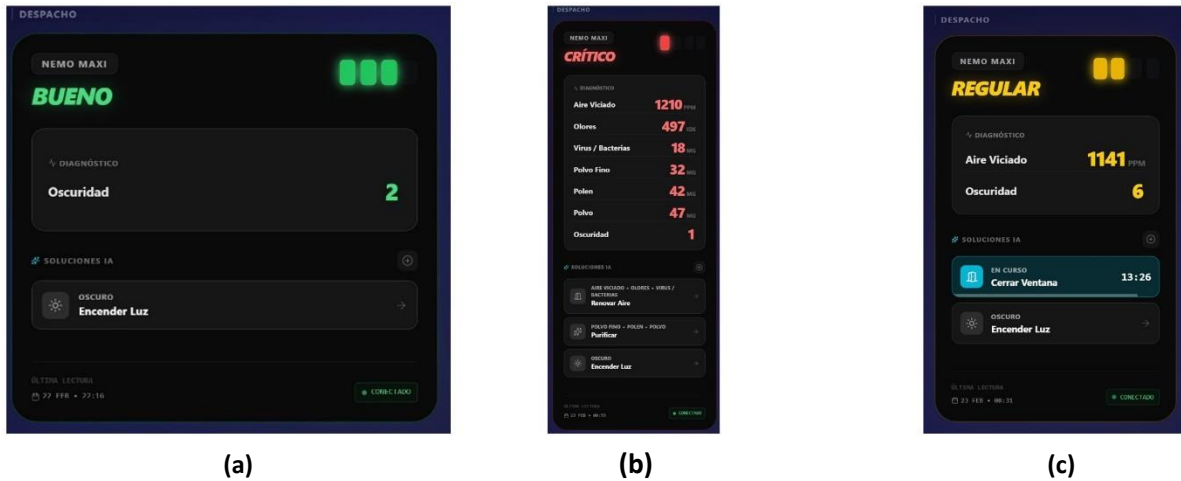


Figura 4. Imágenes de Dashboard App Web: **(a)** Ejemplo de buen ambiente, pero poca luz. **(b)** Mal ambiente interior por múltiples causas. **(c)** Ejemplo de soluciones en curso. **Fuente:** Elaboración propia

2.6.3. Modelo Predictivo de Series Temporales

Para anticiparse a las condiciones adversas, la aplicación integra un modelo de Inteligencia Artificial basado en redes neuronales, implementado mediante la librería TensorFlow.js. La clase MoldPredictor define un Perceptrón Multicapa (M_{LP}) secuencial diseñado para la regresión de series temporales. A modo de resumen, la arquitectura de la red neuronal consta de los siguientes tres elementos:

- **Capa de Entrada:** 32 neuronas. Recibe una "ventana deslizante" (sliding window) de las últimas 60 lecturas normalizadas (t_{-59} a t_0).
- **Capa de Salida:** 1 neurona lineal que predice el valor en t_{+1} .
- **Optimizador:** Algoritmo Adam con una tasa de aprendizaje de 0.01 y función de pérdida de Error Cuadrático Medio.

El modelo se entrena en la propia cloud del proyecto/usuario (*client-side training*) con los datos históricos específicos de la estancia, lo que permite que la IA aprenda la inercia térmica y los patrones de ventilación particulares de cada habitación sin comprometer la privacidad de los datos enviándolos a servidores externos de entrenamiento. Este predictor alimenta las alertas tempranas, avisando al usuario de una tendencia de subida de CO_2 o temperatura antes de que se alcancen los umbrales críticos. Evolucionando de sistemas reactivos a proactivos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La complejidad de los datos ambientales requiere una interfaz que facilite su comprensión intuitiva. Para ello, y encuadrado en los requerimientos de la UE 2024/1275 (EPBD), se ha desarrollado un visor del Gemelo Interactivo Digital (Digital Interactive Twin) capaz de condensar todo lo desarrollado, analizado y procesado. Naciendo de un concepto, el de calcular y unificar gemelo digital e información

ambiental, se ha diseñado y desarrollado dentro de la aplicación un renderizado de modelos 3D Interactivos basados en archivos IFC. El componente ideado HouseTwinView realiza un mapeo semántico automático: recorre la jerarquía de nodos del modelo 3D, normaliza los nombres de las mallas (habitaciones) y los vincula con los identificadores de ubicación de los sensores en Firebase. Generando una experiencia de usuario amigable, sencilla de comprender y manipular.

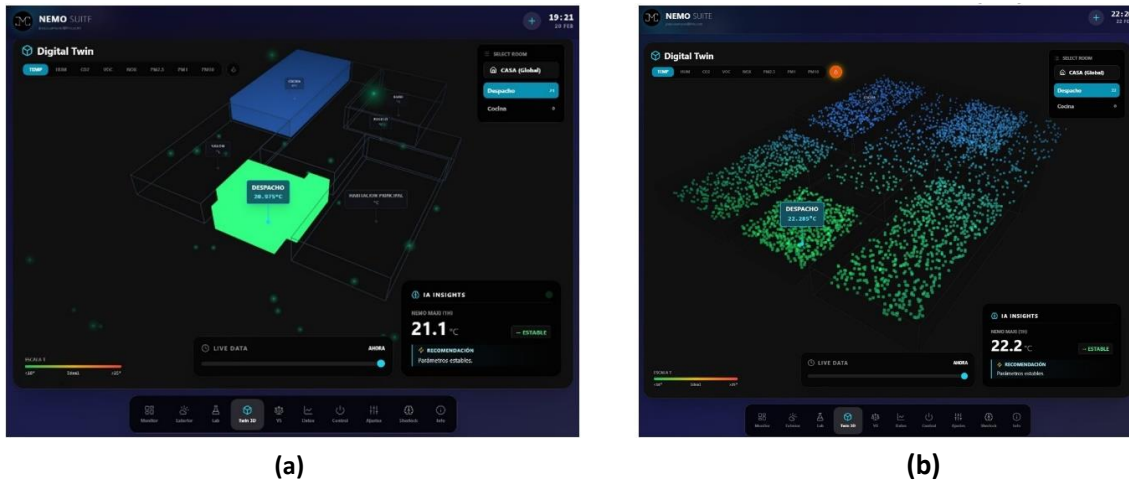


Figura 5. Imágenes del HouseTwinView App Web: **(a)** Vista de datos por estancias. **(b)** Nubes de puntos generada en tiempo real, mostrando como influyen las estancias entre sí. **Fuente:** Elaboración propia

Esto permite que, si un sensor está configurado en el "Salón", el modelo 3D del salón responda visualmente a los datos de ese sensor específico. La visualización cambia el color de los paramentos arquitectónicos según una escala cromática normativa (ej. RITE para CO₂: Azul-Verde-Amarillo-Rojo), proporcionando una visión holística del estado térmico y de calidad del aire del edificio en tiempo real. A mayores se implementó un sistema de partículas para visualizar el aire mismo.

El componente VolumetricHeatmap genera 4.000 puntos estocásticos cuyo color se calcula por Ponderación de Distancia Inversa (IDW) respecto a los sensores. Este gradiente 3D visualiza fenómenos invisibles (difusión de contaminantes o estratificación térmica). Además, incorpora Sparkles, partículas reactivas que revelan la tendencia de los datos según su color y velocidad (rojo/rápido si empeora, azul/lento si mejora), otorgando un carácter orgánico al modelo. A su vez, es capaz de mostrar todos los datos, rebobinar las últimas 24 h, mostrar la predicción de comportamiento de las estancias en las próximas 6h, y ser visualmente atractivo al usuario.

A mayores de esta facilidad de visualización de la información ambiental, quiere destacarse la capacidad de ayudar a usuario al simplificar que ésta sucediendo, y que podrá suceder. Por ejemplo, la gestión de toda la información permite evaluar predictivamente desencadenantes ambientales de migrañas y cefaleas (VOCs, hipoxia por CO₂, deslumbramiento, estrés térmico). Si coinciden, genera alertas ("Riesgo de Niebla Mental" o "Fatiga Leve") y sugiere acciones correctivas inmediatas (ventilación, hidratación) para prevenir síntomas físicos. Aunque la etiología de la migraña es multifactorial, la literatura científica asocia ciertos factores ambientales (olores fuertes/VOCs, hipoxia leve por CO₂, deslumbramiento, estrés térmico) con la precipitación de crisis.

Poder contar con una App equipos funcionales sin interrupción, capaces de mostrar, analizar y almacenar datos recogidos y generados mediante análisis es prueba de que el proyecto ha funcionado. La implementación de los prototipos en un entorno real (vivienda habitada) ha arrojado resultados

que validan la eficacia de la aproximación tecnológica. Y que los objetivos de funcionamiento real, escalabilidad, sencillez visual y margen de mejora son posibles.

4. CONCLUSIONES

El proyecto "Armonía Ambiental 2.0" demuestra que la alta tecnología aplicada a la edificación no es dominio exclusivo de las grandes corporaciones tecnológicas. La democratización de la IA y el hardware libre permite al Arquitecto Técnico tomar las riendas de la digitalización, creando herramientas a medida que responden a las necesidades específicas de la normativa y la salud.

Las principales conclusiones derivadas de este trabajo son:

- **Soberanía Tecnológica:** Es viable y económicamente eficiente desarrollar plataformas de auditoría IEQ completas utilizando herramientas de IA Generativa y hardware Open-Source, rompiendo la dependencia de sistemas cerrados.
- **Del Dato a la Acción:** El valor real reside en la interpretación algorítmica (por ejemplo, Brain Score) que traduce variables físicas en decisiones operativas para el usuario.
- **Anticipación Normativa:** La plataforma no solo cumple con la normativa actual (RITE, CTE), sino que está preparada para los requisitos futuros de la EPBD 2024 (digitalización, SRI, monitorización continua), siendo clave en la transición hacia edificios saludables.
- **Humanización de la Tecnología:** A través del Gemelo Digital y las métricas centradas en el usuario, la tecnología se convierte en un medio para reconectar al habitante con su entorno.

5. BIBLIOGRAFÍA

[1] J. Caamaño González, "Armonía Ambiental análisis climático y confort interior mediante equipos DIY y tecnología de inteligencia artificial", CONTART 2024, Ibiza, 2024, 10 pp.

[2] Rehva, "Model Indoor Environmental Quality regulation aligning with new provisions of the 2024 EPBD recast", Eurovent, Bruselas, 6 de Enero de 2025.

[3] Quadco Engineering, 2025, Determination of PMV and PPD and specification of the conditions for thermal comfort. Available: <https://www.quadco.engineering/en/know-how/cfd-calculate-pmv-and-ppd.htm>

[4] Allen JG, MacNaughton P, Satish U, Santanam S, Vallarino J, Spengler JD. "Associations of Cognitive Function Scores with Carbon Dioxide, Ventilation, and Volatile Organic Compound Exposures in Office Workers: A Controlled Exposure Study of Green and Conventional Office Environments." Environ Health Perspect. 2016 Jun;124(6):805-12. doi: 10.1289/ehp.1510037.

[5] S. Guenther, "What is PMV? What is PPD? Basics of Thermal Comfort," SIMSCALE, 11 de Marzo 2024, <https://www.simscale.com/blog/what-is-pmv-ppd/>

[6] Well Certified, febrero, 2026, "Understand the architecture of WELL v2". Available: <https://support.wellcertified.com>

[7] The COGfx Study, 2025, "How Indoor Air Quality Impacts Cognitive Function? - Caleedo, Available: <https://caleedo.com/blog/how-indoor-air-quality-impacts-cognitive-function/>