

SISTEMA LEAN DE CONTROL DE CALIDAD PARA LA HERMETICIDAD AL AIRE EN OBRA: METODOLOGÍA OPERATIVA PARA GARANTIZAR ENVOLVENTES ESTANCAS

X. Jaime Novo

Arquitecto Técnico, Termografo Nivel III, Laboratorio Control Calidad (Termografía/Blower Door), Passivhaus Designer, Bisbal D'Emporda, La, España

RESUMEN

La hermeticidad al aire se ha convertido en un parámetro clave para garantizar la eficiencia energética, el confort y la durabilidad de los edificios. Sin embargo, en la práctica habitual de obra sigue tratándose como un elemento secundario, asociado principalmente a la colocación de productos específicos en lugar de gestionarse como un proceso integral que requiere previsión, coordinación y control continuo. Esta aproximación fragmentada conduce con frecuencia a resultados deficientes en los ensayos de estanqueidad, retrasos, sobrecostes y pérdida de rendimiento energético.

La presente comunicación propone un sistema estructurado de control de calidad de la hermeticidad al aire basado en los principios de la metodología Lean. El enfoque combina planificación colaborativa, gestión visual, control progresivo y retroalimentación continua, integrando la hermeticidad como un sistema constructivo que debe diseñarse, ejecutarse y verificarse con el mismo rigor que cualquier otro componente crítico de la obra.

La metodología se articula en cuatro ejes operativos. El primero es la anticipación en fase de diseño, donde se analizan encuentros singulares y se coordinan las interfaces entre estructura, cerramientos y redes de instalaciones. El segundo es la planificación de la ejecución mediante herramientas propias de Lean Construction, como la definición de hitos, la programación visual por sectores y la asignación clara de responsabilidades. El tercero consiste en el control de calidad progresivo mediante inspecciones por zonas, listas de verificación específicas y ensayos intermedios de hermeticidad para detectar fugas antes del cierre de la envolvente. Finalmente, el cuarto eje incorpora la mejora continua a través del análisis de causa raíz, lo que permite corregir problemas recurrentes y consolidar aprendizajes para proyectos futuros.

Los resultados obtenidos muestran, de forma indicativa, una menor prevalencia de fallos típicos asociados a interrupciones de la barrera de aire, incompatibilidades entre materiales y pasos de instalaciones no previstos en los proyectos con control progresivo estructurado. La intervención en fases tempranas de diseño reduce el coste de corrección respecto a modificaciones post-acabados, convirtiendo la inversión anticipada en la estrategia económicamente más eficiente. La ejecución se vuelve más predecible, se minimiza la necesidad de retrabajos y se facilita la trazabilidad documental de la calidad de la envolvente.

La principal conclusión es que garantizar la hermeticidad exige mucho más que la correcta aplicación de cintas o membranas. Requiere un método de gestión que integre personas, procesos y planificación,

y que permita abordar la estanqueidad como un sistema completo, continuo, compatible y verificable. La aplicación de principios Lean proporciona el marco operativo adecuado para estructurar este sistema y asegurar que la hermeticidad se materialice de manera consistente en cualquier tipología edificatoria. Construir estanco no depende de los productos utilizados, sino del método con el que se coordinan y ejecutan.

PALABRAS CLAVE: hermeticidad al aire, Lean Construction, Last Planner System, control de calidad, envolvente térmica.

1. INTRODUCCIÓN

La hermeticidad al aire de la envolvente es un parámetro con implicaciones técnicas múltiples sobre el comportamiento del edificio. Su relevancia energética varía según el clima —resultando especialmente determinante en zonas frías o con grandes oscilaciones térmicas, donde las infiltraciones no controladas pueden representar incrementos entre el 10 % y el 27 % de la demanda de calefacción [6]— pero su alcance trasciende la eficiencia energética. Una envolvente estanca es condición necesaria para el correcto funcionamiento de los sistemas de ventilación mecánica controlada, cuyo rendimiento se ve directamente comprometido por fugas no previstas. Incide asimismo sobre el confort térmico e higrotérmico de los ocupantes, el aislamiento acústico frente a ruido exterior, la calidad del aire interior, y la durabilidad de los materiales constructivos mediante la prevención de condensaciones intersticiales provocadas por flujos de aire húmedo a través de la envolvente [4].

En España, el Real Decreto 732/2019 [1] introduce por primera vez en el CTE DB-HE requisitos explícitos de permeabilidad al aire para el conjunto del edificio, fijando valores de n_{50} entre 3 h^{-1} y 6 h^{-1} según la compacidad (relación V/A). Sin embargo, la verificación mediante ensayo Blower Door según UNE-EN ISO 9972:2019 [2] continúa siendo opcional. Esta situación contrasta con el panorama europeo de referencia: Francia hace obligatorio el ensayo desde la RT 2012; el Reino Unido exige ensayos por muestreo desde 2006 con testadores acreditados ATTMA; y el estándar Passivhaus, con más de 52.900 unidades certificadas a nivel mundial, impone $n_{50} \leq 0,6 - 1 \text{ h}^{-1}$ con ensayo obligatorio [3]. Los requisitos españoles resultan entre 5 y 10 veces más permisivos ($3-6 \text{ h}^{-1}$) que el estándar Passivhaus y sin la obligatoriedad de acreditar el valor mediante el test Blower door.

1.1. Estado real del parque edificado español

Los datos empíricos disponibles revelan una brecha severa entre los requisitos normativos y los resultados reales de obra. En el marco del proyecto INFILES (BIA2015-64321-R), Feijó-Muñoz et al. [6] realizaron ensayos Blower Door en 225 viviendas en clima mediterráneo y Canarias (Alicante, Barcelona, Málaga, Sevilla y Las Palmas de Gran Canaria), obteniendo una n_{50} media de $8,43 \text{ h}^{-1}$ y una q_{50} media de $6,56 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$. A escala energética, la infiltración presenta un impacto estimado de entre $2,43$ y $16,44 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{año}$ en la demanda de calefacción y de entre $0,54$ y $3,06 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{año}$ en refrigeración, según la localización analizada [6]. En el mismo proyecto, el estudio sobre 129 viviendas en clima continental (Madrid y Valladolid) obtuvo valores medios de n_{50} de $6,1 \text{ h}^{-1}$ en unifamiliar y $7,1 \text{ h}^{-1}$ en plurifamiliar [5].

Más significativos son los datos de cumplimiento normativo. Romero Rincón et al. [7], en un estudio sobre 111 ensayos Blower Door en edificios de nueva construcción entre 2020 y 2022, concluyen que únicamente tres resultados cumplen los límites del DB-HE1, con un valor medio de $11,04 \text{ h}^{-1}$. La

investigación de Poza-Casado et al. [8] demuestra además que el procedimiento analítico del CTE solo explica el 4 % de la variabilidad real de los resultados, invalidando la premisa de que el cumplimiento por cálculo garantiza el rendimiento real del edificio.

1.2. Las causas raíz son organizativas, no tecnológicas

Un análisis sistemático de los defectos documentados mediante ensayos e inspecciones termográficas revela que los fallos de hermeticidad no son sólo consecuencia de productos inadecuados ni de mala ejecución puntual. Los defectos recurrentes —pasos de instalaciones sin sellar, encuentros carpintería-fachada con continuidad incompleta, cajas de persiana no tratadas, juntas de forjado sin sellar— responden a causas raíz organizativas: ausencia de definición explícita de la barrera de aire en proyecto, falta de coordinación entre gremios en las interfaces, formación e información de los actores intervinientes, y verificación únicamente al final de obra. La Figura 1 ilustra la relación inversa entre posibilidad de cambio y coste de corrección a lo largo del ciclo del proyecto: la ventana de inversión eficiente se concentra en las fases de anteproyecto y concepción del proyecto, antes de que las decisiones cristalicen en elementos constructivos inaccesibles.

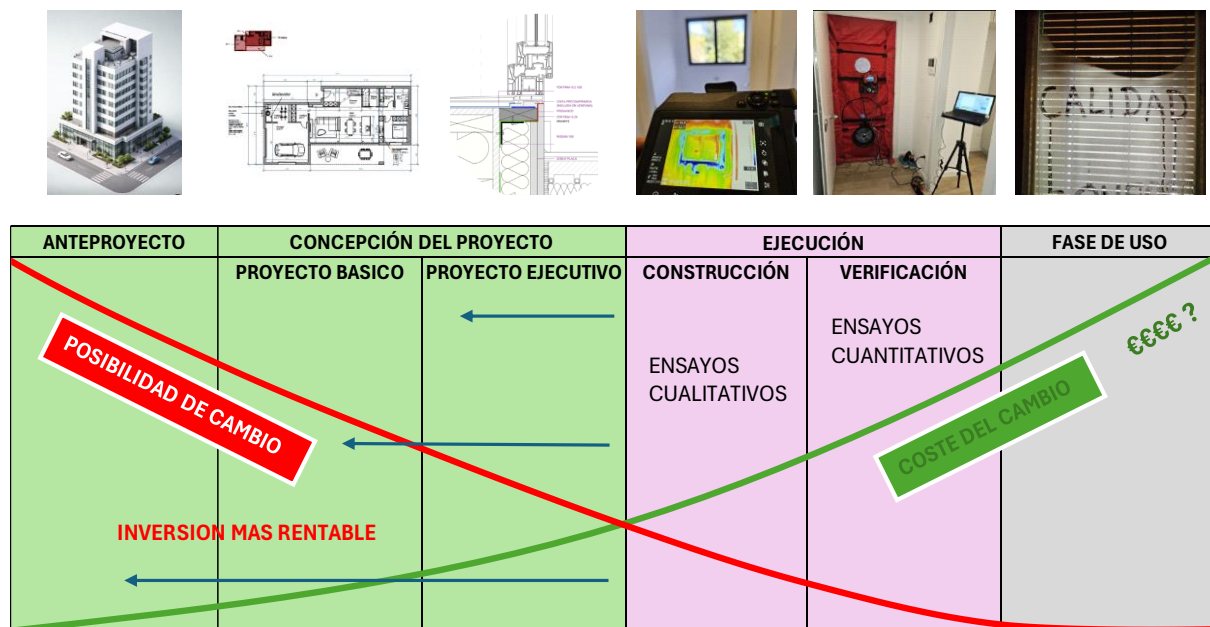


Figura 1. Posibilidad de cambio vs coste del cambio en función de la fase del proyecto. La zona sombreada verde concentra la ventana de inversión más rentable en hermeticidad. Fuente: elaboración propia basado en MacLeamy (HOK). Inspirado en Sean Maxwell ATTMA.

La comparación internacional de Papaglastra et al. sitúa a Noruega entre los valores medios más bajos de hermeticidad en vivienda, con $n_{50} = 1,09 \text{ h}^{-1}$ [10]. Por su parte, el informe ASIEPI concluye que la mejora sostenida de la estanqueidad no se logra únicamente mediante límites normativos, sino a través de estrategias combinadas que integran diseño y ejecución, verificación mediante ensayos, herramientas y procedimientos de aseguramiento de la calidad, y capacitación de los agentes, describiendo su aplicación en distintos países europeos, entre ellos Alemania y Reino Unido [9].

1.3. Lean Construction como marco de respuesta

Lean Construction, apoyado en los trabajos de Koskela [11], [12] y llevado a la práctica mediante el Last Planner System (LPS) de Ballard (y su desarrollo con Howell) [13], aporta un marco para reducir desperdicios, aumentar la fiabilidad del flujo de trabajo y generar valor. En LPS, el Percent Plan

Complete (PPC) se utiliza como indicador clave de fiabilidad del plan, junto con la planificación lookahead y el análisis de restricciones para mejorar la coordinación y el “make-ready” [13], [14]. La aplicación de principios Lean al control de calidad se ha descrito mediante enfoques de aseguramiento y control (Misfeldt y Bonke [15]) y estrategias de mistake-proofing o poka-yoke (Tommelein [16]); no obstante, la relación explícita con el control de hermeticidad de la envolvente sigue siendo limitada en revisiones recientes, por lo que su desarrollo puede considerarse todavía incipiente [17].

1.4. Objetivo del trabajo

El presente trabajo propone un sistema operativo de control de calidad de la hermeticidad al aire articulado sobre principios Lean Construction. El sistema integra planificación colaborativa, control progresivo mediante ensayos intermedios y mejora continua basada en análisis de causa raíz, transformando la hermeticidad de un parámetro evaluado únicamente al final de obra en un proceso gestionado, verificable y mejorable a lo largo de todo el proceso constructivo. La hipótesis de partida es que **construir estanco no depende de los productos utilizados, sino del método con el que se coordinan, planifican, ejecutan y verifican.**

2. DESARROLLO / METODOLOGÍA

2.1. Enfoque de investigación

El trabajo adopta un enfoque de investigación aplicada orientado a la resolución de un problema concreto en el sector de la edificación: la deficiente gestión de la hermeticidad al aire durante el proceso constructivo. La metodología combina tres aproximaciones complementarias.

La primera es la **revisión sistemática documental**, que abarca normativa española y europea, literatura técnica y académica, y guías profesionales internacionales, organizadas en cuatro categorías: normativa española (CTE DB-HE 2019 [1], UNE-EN ISO 9972:2019 [2]); normativa europea comparada (GEG alemán, Building Regulations UK Part L, RT 2012/RE 2020 francesa); estándares Passivhaus [3] y directiva EPBD; y referencias académicas internacionales [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17].

La segunda es el **análisis empírico** basado en la experiencia profesional directa del autor como técnico de laboratorio de control de calidad, con especialización en ensayos de hermeticidad (Blower Door) y termografía infrarroja de nivel III. La base de datos propia comprende 87 ensayos de hermeticidad realizados directamente por el autor entre 2021 y 2026, todos ellos en edificios de obra nueva residencial —unifamiliar y plurifamiliar— en el contexto español, ejecutados según UNE-EN ISO 9972:2019. La categorización en tres grupos (A, B y C) se realizó a posteriori en función del nivel de exigencia de hermeticidad y del sistema de control aplicado en cada proyecto (Tabla 1). Al tratarse de una asignación retrospectiva sobre una base de datos propia, los grupos presentan diferencias no controladas en tipología, complejidad y nivel de exigencia inicial del promotor, lo que limita la comparabilidad directa entre ellos y la posibilidad de establecer conclusiones causales. Los resultados se presentan como evidencia observacional indicativa. El reducido tamaño del Grupo C (n = 8) limita adicionalmente la representatividad de sus valores. La tercera es la **síntesis propositiva**: a partir del análisis documental y empírico se desarrolla un sistema integrado que adapta principios Lean Construction al control específico de la hermeticidad.

Tabla 1. Caracterización de la muestra empírica (n = 87 ensayos, 2021–2026)

Grupo	Tipología	n ensayos	Sistema de control
A	Edificios Passivhaus (PH o EnerPHit, certificados o en proceso)	40	Control progresivo estructurado (ensayos intermedios en obra)
B	Edificios CTE con objetivo n_{50} definido	39	Sin control progresivo (ensayo únicamente al final)
C	Edificios sin objetivo de hermeticidad específico	8	Sin sistema de control

2.2. Marcos de referencia analizados

El sistema propuesto se fundamenta en la convergencia de dos marcos metodológicos internacionales. El primero es Lean Construction, cuya base teórica la proporciona la teoría TFV (Transformation-Flow-Value) de Koskela [11], [12], que reconceptualiza la construcción como gestión de flujos y generación de valor, y cuya herramienta operativa central es el LPS desarrollado por Ballard [13]. Misfeldt y Bonke [15] analizan enfoques de control de calidad coherentes con Lean, y Tommelein [16] desarrolla el concepto de Poka-Yoke aplicado a la construcción.

El segundo marco es el **control de calidad de hermeticidad en edificios**, documentado internacionalmente mediante el Passivhaus Overlay to RIBA Plan of Work [18] —que integra los requisitos de hermeticidad en cada una de las ocho etapas del proceso de proyecto—, las guías BRE [19] [20], los estándares ATTMA TSL1 [21] y el documento CIBSE TM23 [22], que establece la metodología de ensayo y subraya la importancia de las verificaciones intermedias durante la construcción.

2.3. Análisis de defectos y causas raíz

El análisis sistemático de la muestra empírica permite identificar patrones recurrentes de fallo mediante la técnica de los cinco por qué, herramienta Lean de análisis de causa raíz. Los defectos documentados se agrupan en cuatro categorías causales: causas de **diseño** (ausencia de definición explícita de la línea de hermeticidad, falta de detalles en encuentros singulares); causas de **planificación** (no integración de la hermeticidad en la planificación de obra, ausencia de coordinación entre gremios); causas de **ejecución** (pasos de instalaciones no previstos, sellados incorrectos, daños durante trabajos posteriores); y causas de **control** (verificación únicamente al final de obra, ausencia de trazabilidad).

La cuantificación de estas cuatro categorías sobre el total de la muestra (Tabla 2) revela que las causas de ejecución y planificación son las de mayor prevalencia: el 98,9 % de los registros presenta al menos un defecto de ejecución (86/87), y el 96,6 % carece de integración de la hermeticidad en la planificación de obra (84/87). Las causas de diseño afectan al 57,5 % de los casos (50/87), y las de control —verificación únicamente al final o ausencia de trazabilidad— al 46,0 % (40/87). En términos de peso relativo normalizado, planificación y ejecución concentran conjuntamente el 65,4 % del total de impactos, lo que confirma el carácter sistémico-organizativo de los fallos documentados.

Tabla 2. Prevalencia de defecto por categoría

Categoría causal	Registros con defecto	Total registros	Prevalencia (%)	Indicador principal
DISEÑO	50	87	57,5 %	Sin def. proyecto (42) + solo partida hermeticidad (8)
PLANIFICACIÓN	84	87	96,6 %	PLANIFICACIÓN = «No»: 84 de 87 registros
EJECUCIÓN	86	87	98,9 %	≥ 1 defecto en Instal./Ventanas/Conex./Material
CONTROL	40	87	46,0 %	Fase «Final» (25) + Fase «Estado actual» (15)

Este análisis refuerza que el problema es, sobre todo, sistémico y de organización: los defectos detectados se agrupan en fallos de coordinación (interfaces sin resolver y secuencias no planificadas) más que en un “mal producto” o en una ejecución deficiente de sellados aislados. Esta lectura es coherente con McLeod et al. [20], que subrayan la necesidad de definir una barrera de aire única y continua, desarrollar sus encuentros en planos de ejecución y ordenar la secuencia constructiva, incorporando ensayos de verificación en fases intermedias. En consecuencia, las fugas tienden a localizarse en discontinuidades y penetraciones de la envolvente, y su control requiere un enfoque integrado de diseño–obra–verificación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. El sistema propuesto: cuatro ejes operativos

El análisis de causas raíz descrito orienta el diseño del sistema hacia la intervención en cuatro ámbitos interdependientes que abarcan el ciclo completo del proyecto. La hipótesis central —que los fallos de hermeticidad son predecibles y de naturaleza organizativa— implica que el sistema debe actuar antes de que los defectos se produzcan, no únicamente cuando ya son detectables mediante ensayo.

3.1.1 Eje 1 — Anticipación en fase de diseño

El primer eje parte de la constatación documentada en la literatura internacional de que la mayoría de los defectos de hermeticidad tienen su causa raíz en decisiones tomadas —o no tomadas— antes del inicio de la obra [18] [19]. El BRE Good Building Guide 67 [19] y el Passivhaus Overlay to RIBA Plan of Work [18] establecen que la definición temprana de la línea de hermeticidad, la resolución anticipada de encuentros singulares y la designación de un responsable específico de hermeticidad en el equipo de proyecto son los factores críticos que determinan el éxito del proceso constructivo.

Las acciones de este eje incluyen: definición cuantitativa del objetivo n_{50} en función del estándar de eficiencia energética perseguido; elección razonada del plano de ubicación de la barrera de aire compatible con el sistema constructivo; desarrollo de detalles constructivos para todos los encuentros singulares identificados (cubierta-fachada, forjado-fachada, carpintería-cerramiento, pasos de instalaciones); coordinación temprana entre proyectistas de arquitectura, estructura e instalaciones; y especificación de materiales con criterios de compatibilidad y durabilidad. El Passivhaus Overlay RIBA

[18] documenta esta integración en las etapas 0 a 4 del proceso, demostrando que la hermeticidad debe incorporarse desde la definición estratégica.

3.1.2 Eje 2 — Planificación colaborativa de la ejecución (LPS)

El segundo eje aplica el Last Planner System [13] al control de hermeticidad, trasladando la planificación a quienes ejecutan directamente el trabajo e incorporando los hitos de verificación como objetivos que estructuran la planificación inversa (pull planning).

La sesión inicial de pull planning —de 2 a 3 horas con todos los gremios, según la experiencia propia del autor— puede revelar dependencias críticas no evidentes: incompatibilidades entre trazado de instalaciones y espesores disponibles, interferencias entre pasos de conductos y continuidad de membrana, o ausencia de definición en encuentros específicos. La **gestión visual** completa el eje: marcado físico de la línea de hermeticidad con cinta de color en obra —reducción de los daños no intencionados por trabajos de otros gremios—, tableros Kanban por zonas con estados (pendiente / en ejecución / verificado / conforme), y señalización de puntos críticos pendientes de inspección.

3.1.3 Eje 3 — Control progresivo en obra

El tercer eje constituye el núcleo operativo del sistema. La evidencia internacional [19] [20] [21] [22] y el análisis empírico confirman que la estrategia de ensayos intermedios es significativamente más eficaz que limitar la verificación a un ensayo final: actuar en obra abierta —tal como muestra la Figura 1— sitúa la intervención en la zona de coste mínimo y máxima posibilidad de cambio, antes de que los acabados hagan inaccesible la barrera de aire. El sistema establece cuatro hitos de control obligatorios (H1–H4), articulados con los restantes ejes operativos en el cuadro de actuaciones (Figura 2).

La detección de fugas se realiza mediante la combinación de ensayo Blower Door, anemómetro, termografía infrarroja —eficaz con diferencia térmica interior-exterior mínima de 10 °C según UNE-EN ISO 6781-1:2023 [23]— y generadores de humo para espacios confinados (cajas de persiana, trasdosados, falsos techos). Esta combinación permite localizar entre el 85 % y el 95 % de las fugas significativas en edificios residenciales de complejidad media, según la experiencia propia del autor. Las checklists de inspección por zona, específicas del proyecto, junto con el registro fotográfico sistemático de cada punto verificado, garantizan la trazabilidad completa del proceso.

SISTEMA LEAN DE CONTROL DE HERMETICIDAD AL AIRE · CUADRO DE ACTUACIONES POR FASE DEL PROYECTO Y EJE OPERATIVO · Fases 0-7								
FASES EJES OPERATIVOS 1	0 Definición Estratégica	1 Preparación y Entrenamiento	2 Diseño Conceptual	3 Coordinación Español	4 Diseño Técnico	5 Fabricación y Combinación	6 Entrenamiento	7 Uso
EJE 1 ANTICIPACIÓN EN DISEÑO <small>Qué diseñar para construir estanca</small>	<ul style="list-style-type: none"> Incluir n_{50} como KPI en el encargo del proyecto Evaluar compatibilidad VA y riesgo higrotérmico 	<ul style="list-style-type: none"> Fixar target n_{50} en el Brief Seleccionar sistema constructivo compatible con hermeticidad 	<ul style="list-style-type: none"> Definir línea de hermeticidad en planta y sección Estrategia conceptual de puntos singulares Compatibilidad envolvente-instalaciones 	<ul style="list-style-type: none"> Detallar constructivamente puntos singulares y penetraciones Especificar materiales y sistemas de sellado 	<ul style="list-style-type: none"> Planos de hermeticidad completos Especificación técnica de sellados y juntas Mediciones de las partidas Brief técnico para subcontratas Formación del equipo de obra + Responsable de hermeticidad en obra 	<ul style="list-style-type: none"> Supervisión de detalles de hermeticidad en obra Resolución técnica de imprevistos Actualizar documentación as-built 	<ul style="list-style-type: none"> Entregar planos as-built de la envolvente Manual de mantenimiento de la hermeticidad 	<ul style="list-style-type: none"> Seguimiento de degradación de la envolvente Retroalimentación a proyectos futuros
EJE 2 PLANIFICACIÓN COLABORATIVA <small>Cómo: Lean Planner System (LPS)</small>	—	<ul style="list-style-type: none"> Identificar agentes responsables de hermeticidad Definir roles y compromisos Sesión de sensibilización del equipo 	<ul style="list-style-type: none"> Pull Planning con equipo de proyecto Identificar restricciones anti-plantas en la envolvente 	<ul style="list-style-type: none"> Plan de Fase (Phase Scheduling) de la envolvente Planificar trenes de trabajo Acordar secuencia de cierre de hilos H 	<ul style="list-style-type: none"> Plan Maestro con hilos H1-H4 integrados Lookahead 6 semanas Definir métricas PPC Polivista de inspección visual pre-tapado 	<ul style="list-style-type: none"> Reuniones semanales LPS Tracking semanal del PPC Coordinación activa entre oficinas Resolución sistemática de restricciones 	<ul style="list-style-type: none"> Retrospectiva LPS final Análisis PPC global del proyecto Cierre de compromisos pendientes 	—
EJE 3 CONTROL PROGRESIVO <small>Cuando: Hilos H2-H4 Blower Door</small>	—	—	—	—	<ul style="list-style-type: none"> Diseñar protocolo de ensayos intermedios Definir criterios de aceptación H1-H4 Preparar instrumentación y datos volumen, áreas, muestra a ensayar, piso piloto (Blower Door) 	<ul style="list-style-type: none"> H1 post-cerramiento: verificar línea de hermeticidad continua H2 post-inst.: detectar penetraciones sin sellar H3 pre-revest.: confirmación antes de tapar H4 (recepción): ensayo final UNE-EN ISO 9972 	<ul style="list-style-type: none"> Ensayo de recepción definitivo H4 Informe técnico de hermeticidad Certificación del resultado n_{50} 	<ul style="list-style-type: none"> Ensayo de seguimiento (12-24 meses) Verificación de degradación de la envolvente
EJE 4 MEJORA CONTINUA <small>Avanzar / retroalimentación sistemática</small>	<ul style="list-style-type: none"> Consultar lecciones aprendidas de proyectos anteriores Revisar base de datos de desempeño en hermeticidad 	—	—	—	—	<ul style="list-style-type: none"> Registrar no conformidades en obra Análisis de causas raíz (5 porqués) Correcciones inmediatas en lookahead Actualizar detalles constructivos 	<ul style="list-style-type: none"> Informe final de lecciones aprendidas Actualizar biblioteca de detalles constructivos Actualizar base de datos de desempeño 	<ul style="list-style-type: none"> Retroalimentación al sistema Publicación de datos de desempeño Actualización de estándares internos

Figura 2. Cuadro de actuaciones por fase del proyecto y eje operativo — Sistema lean de control de hermeticidad al aire (Elaboración propia adaptada de las fases 0–7 RIBA).

3.1.4 Eje 4 — Mejora continua

El cuarto eje cierra el ciclo mediante la aplicación del ciclo PDCA (Planificar-Hacer-Verificar-Actuar) a tres escalas: por zona o sector, por fase constructiva y por proyecto completo. El análisis de causa raíz mediante la técnica de los cinco por qué [11] permite distinguir entre síntomas —la fuga visible— y causas reales —la ausencia de coordinación en fase de proyecto—, evitando que las acciones correctoras se limiten a reparar el defecto concreto sin prevenir su repetición. Las lecciones aprendidas se documentan y transfieren a proyectos futuros mediante la actualización de catálogos de detalles constructivos validados y de checklists de inspección.

3.2. Validación empírica

Los resultados de la base de datos propia ($n = 87$ ensayos, 2021–2026) muestran diferencias de interés entre grupos (Tabla 3), que deben interpretarse como evidencia observacional indicativa, con la cautela metodológica descrita en el apartado 2.1. El Grupo A —edificios Passivhaus con control progresivo estructurado, $n = 40$ — presenta una n_{50} media de $0,87 \text{ h}^{-1}$ y mediana de $0,66 \text{ h}^{-1}$ (rango $0,30\text{--}2,80 \text{ h}^{-1}$). El Grupo B —CTE con objetivo definido pero sin control progresivo, $n = 39$ — alcanza una media de $5,0 \text{ h}^{-1}$ y mediana de $5,12 \text{ h}^{-1}$ (rango $0,70\text{--}11,33 \text{ h}^{-1}$), con un 33 % de los casos superando el límite normativo de 6 h^{-1} . El Grupo C —sin objetivo específico, $n = 8$ — registra una media de $6,49 \text{ h}^{-1}$ (rango $2,21\text{--}17,22 \text{ h}^{-1}$).

Tabla 3. Resultados comparativos por grupo (base de datos propia, n = 87 ensayos, 2021–2026)

Indicador	Grupo A — PH/EnerPHit (n = 40)	Grupo B — CTE (n = 39)	Grupo C — Sin obj. (n = 8)
n_{50} media (h^{-1})	0,87	5,0	6,49
n_{50} mediana (h^{-1})	0,66	5,12	4,74
n_{50} rango min–max (h^{-1})	0,30 – 2,80	0,70 – 11,33	2,21 – 17,22
Defecto conexiones envolvente	98 % (39/40)	100 % (39/39)	100 % (8/8)
Deficiente definición de hermeticidad en proyecto	15 % (6/40)	92 % (36/39)	100 % (8/8)
Defecto instalaciones sin sellar	55 % (22/40)	100 % (39/39)	100 % (8/8)

Fuente: base de datos propia del autor.

El contraste más relevante es el que emerge del análisis de defectos: las **conexiones a nivel de envolvente** aparece como vía de fuga en el 99 % de los casos de la muestra total (86/87), independientemente del grupo. Este resultado evidencia que se trata de un defecto sistémico e inherente al proceso constructivo español convencional, no de un fallo puntual o de producto. Le siguen los defectos en instalaciones sin sellar (79 %; 69/87) y las ventanas (66 %; 57/87). La diferencia crítica entre grupos radica en la **definición de hermeticidad en proyecto**: solo un 15 % del Grupo A carece de esta definición, frente al 92 % del Grupo B y el 100 % del Grupo C. Este patrón confirma que el control progresivo opera como compensación de la falta de definición anticipada —que es precisamente lo que el Eje 1 del sistema propuesto pretende corregir de raíz.

La eficacia de la detección y corrección intermedia queda ilustrada por los **ensayos post-reparación** de la muestra: los 10 casos —distribuidos entre los Grupos A y B— en que se realizó un ensayo de control en obra, se identificaron fugas y se corrigieron antes del cierre de acabados presentan una n_{50} media de $1,10 h^{-1}$, frente a la media de $3,75 h^{-1}$ del conjunto de ensayos de obra y la media de $2,38 h^{-1}$ de los ensayos finales (datos propios del autor, base de datos 2021–2026).

El **único proyecto de la muestra con planificación estructurada parcial** aplicada —incluyendo definición a nivel de proyecto, sesiones de coordinación previas y durante la obra con todos los intervinientes, tablero de hermeticidad en obra con registro de incidencias y valores de control, designación de responsable de hermeticidad y señalización en obra— es una unifamiliar aislada en proceso de certificación PH (Grupo A). Los tres ensayos de control intermedio realizados en fase de obra arrojaron valores de n_{50} de $0,30$; $0,34$ y $0,46 h^{-1}$ con obras finalizadas, todos por debajo del umbral Passivhaus de $0,6 h^{-1}$. Se presenta como evidencia indicativa y como base para futuros proyectos piloto formalizados con mayor tamaño muestral.

3.3. Discusión: aplicabilidad al contexto español y barreras

El sistema propuesto no requiere cambios normativos ni tecnológicos para su implementación: los productos certificados existen en el mercado español, el marco normativo del CTE es compatible, y los equipos de ensayo Blower Door, así como los laboratorios acreditados están disponibles y normalizados. La barrera principal identificada es de naturaleza cultural y organizativa: resistencia al

cambio en un sector con hábitos constructivos consolidados y escasa tradición de control de hermeticidad.

Las estrategias validadas para superar las tres barreras más frecuentes son: ante la resistencia "esto nunca se ha hecho así", la demostración mediante proyecto piloto con cuantificación del resultado; ante "no tenemos tiempo para tantas inspecciones", la cuantificación del ratio real —1 hora de inspección evita entre 5 y 15 horas de corrección, según la experiencia propia del autor—; y ante "los gremios no entienden de hermeticidad", la formación práctica in situ de 30 a 45 minutos con ejemplos visuales de ejecución correcta e incorrecta, según la experiencia propia del autor.

La coherencia del sistema con marcos internacionales de referencia —Passivhaus Overlay RIBA [18], estándares ATTMA [21] y CIBSE TM23 [22]— y su alineación con la literatura Lean Construction [11]–[17] respaldan su solidez conceptual. En el contexto español, el análisis empírico del autor sugiere una mayor recurrencia de defectos en penetraciones y pasos de instalaciones, asociada a déficits de coordinación entre arquitectura e instalaciones en fase de diseño.

4. CONCLUSIONES

La presente comunicación documenta una situación paradójica en el sector de la edificación español: pese a la introducción de requisitos de hermeticidad en el CTE DB-HE 2019, los datos empíricos disponibles evidencian un fracaso sistemático de cumplimiento. Los 111 ensayos Blower Door analizados por Romero Rincón et al. [7] —de los que solo tres cumplen los límites normativos, con una media de $11,04 \text{ h}^{-1}$ — y los valores documentados por el Proyecto INFILES [5] confirman que el marco normativo vigente, sin verificación obligatoria mediante ensayo, no garantiza por sí solo el rendimiento real del edificio. La base de datos propia del autor ($n = 87$ ensayos, 2021–2026) corrobora esta brecha: el Grupo B —proyectos con objetivo n_{50} definido, pero sin control progresivo— registra una n_{50} media de $5,0 \text{ h}^{-1}$ y un 33 % de casos que superan el límite normativo CTE de 6 h^{-1} .

La principal conclusión del trabajo es que **los fallos de hermeticidad son predecibles, recurrentes y de causa organizativa, no tecnológica**. El análisis empírico revela que la conexión a nivel de envolvente constituye una vía de fuga en el 99 % de los casos (86/87), y que el 57 % de los proyectos carece de definición explícita de hermeticidad a nivel de proyecto. Esta constatación es coherente con McLeod et al. [20], que subrayan la necesidad de definir una barrera de aire única y continua y de resolver y coordinar sus encuentros en proyecto y en obra para evitar discontinuidades y penetraciones que se convierten en vías principales de fuga.

El sistema propuesto, articulado en cuatro ejes operativos —anticipación en diseño, planificación colaborativa mediante LPS, control progresivo con ensayos intermedios, y mejora continua basada en análisis de causa raíz— muestra resultados indicativos en el contexto analizado. Los proyectos Passivhaus con control progresivo (Grupo A, $n = 40$) alcanzan una n_{50} media de $0,87 \text{ h}^{-1}$ frente a $5,0 \text{ h}^{-1}$ del Grupo B, si bien la diferencia de tipología y nivel de exigencia inicial entre grupos limita la comparabilidad directa. Los 10 casos con corrección intermedia en obra presentan una n_{50} media post-reparación de $1,10 \text{ h}^{-1}$ frente a $3,75 \text{ h}^{-1}$ antes de la intervención.

La extensión de esta comparación a una muestra mayor con diseño experimental controlado constituye la principal línea de investigación futura.

La integración de la hermeticidad desde la fase de briefing del proyecto, tal como establece el Passivhaus Overlay to RIBA Plan of Work [18], es condición necesaria y no opcional. La experiencia del

autor sugiere cualitativamente que **el conocimiento acumulado es transferible y que el sistema mejora con su propia aplicación.**

Un hallazgo relevante es que la **resistencia cultural al cambio** constituye una barrera más significativa que las limitaciones técnicas o económicas. La implementación requiere un cambio de mentalidad en todos los agentes: desde la propiedad, que debe definir requisitos exigibles contractualmente, hasta el constructor, que debe asumir la hermeticidad como parámetro crítico de calidad.

Limitaciones y líneas futuras. La propuesta requiere validación cuantitativa estructurada mediante proyectos piloto formalizados. Las líneas de investigación prioritarias incluyen: análisis coste-beneficio con muestra estadísticamente representativa; integración del sistema con metodologías BIM para gestión visual de la barrera de aire; desarrollo de programas formativos estructurados para responsables de hermeticidad en obra equivalentes a los existentes en el Reino Unido (ATTMA) [21] o Francia (Qualibat); e incorporación de requisitos de gestión de hermeticidad en pliegos de condiciones técnicas y en el marco normativo del CTE.

Construir estanco no depende de los productos utilizados, sino del método con el que se coordinan, planifican, ejecutan y verifican. Esta es la aportación central del trabajo: demostrar que los principios Lean Construction proporcionan el marco operativo adecuado para estructurar ese método de forma sistemática, transferible y mejorable.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Real Decreto 732/2019, de 20 de diciembre, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación. BOE-A-2019-18528. Disponible en: <https://www.boe.es/>
- [2] UNE-EN ISO 9972:2019 – Prestaciones térmicas de los edificios. Determinación de la permeabilidad al aire de los edificios. Método de presurización con ventilador. AENOR.
- [3] Passive House Institute, Criteria for the Passive House, EnerPHit and PHI Low Energy Building Standard, Version 10b. Darmstadt: PHI, 2022. Disponible en: <https://passivehouse.com/>
- [4] N. Hurel y V. Leprince, "AIVC Technical Note 73: Overview of the trends in building and ductwork airtightness in 16 countries," AIVC, 2024.
- [5] J. Feijó-Muñoz, R.A. González-Lezcano, I. Poza-Casado, M.Á. Padilla-Marcos, y A. Meiss, "Airtightness of residential buildings in the Continental area of Spain," Building and Environment, vol. 148, pp. 299-308, 2019. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.11.010
- [6] J. Feijó-Muñoz et al., "Energy impact of the air infiltration in residential buildings in the Mediterranean area of Spain and the Canary Islands," Energy and Buildings, vol. 188-189, pp. 226-238, 2019. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.02.023
- [7] M.J. Romero Rincón, F.J. Aguilar Valero, y P.G. Vicente Quiles, "Hermeticidad de edificios de nueva construcción de vivienda. Medición y resultados," en XII Congreso Ibérico | X Congreso Iberoamericano de Ciencias y Técnicas del Frío (CYTEF 2024), Elche, España, 2024. DOI: 10.21134/p3aamw02
- [8] I. Poza-Casado, P. Rodríguez-del-Tío, M. Fernández-Temprano, M.Á. Padilla-Marcos, y A. Meiss, "An envelope airtightness predictive model for residential buildings in Spain," Building and Environment, vol. 223, 109435, 2022. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109435
- [9] G. Guyot, R. Carrié, y P. Schild, "Stimulation of good building and ductwork airtightness through EPBD," ASIEPI Project, 2010. Disponible en: www.asiepi.eu

- [10] M. Papaglastra et al., "International comparison of envelope air tightness measurements," en AIVC Conference Proceedings, 2008.
- [11] L. Koskela, "Application of the New Production Philosophy to Construction," Stanford University CIFE, Technical Report No. 72, 1992.
- [12] L. Koskela, An Exploration Towards a Production Theory and its Application to Construction. VTT Publications 408, Espoo, Finland, 2000. ISBN 951-38-5565-1.
- [13] G. Ballard, "The Last Planner System of Production Control," PhD Dissertation, University of Birmingham, UK, 2000.
- [14] G. Ballard e I. Tommelein, "2020 Current Process Benchmark for the Last Planner® System of Project Planning and Control," Lean Construction Journal, pp. 53-155, 2021.
- [15] E. Misfeldt y S. Bonke, "Quality Control in Lean Construction," en IGLC 12, Helsingør, Denmark, 2004.
- [16] I.D. Tommelein, "'Poka Yoke' or Quality by Mistake Proofing Design and Construction Systems," en IGLC 16, Manchester, UK, 2008, pp. 195-205.
- [17] M.A. Melgar-Morales et al., "A Review of Poka Yoke in Construction Projects: Classification, Benefits and Barriers," en IGLC 32, Auckland, 2024, pp. 214-225. DOI: 10.24928/2024/0152
- [18] M. Siddall, Passivhaus Overlay to RIBA Plan of Work. RIBA/Passivhaus Trust, 2023. Disponible en: <https://www.passivhaustrust.org.uk/>
- [19] M. Jaggs y C. Scivyer, BRE Good Building Guide 67: Achieving Airtightness. IHS BRE Press, Bracknell, 2006.
- [20] R.S. McLeod et al., BRE Passivhaus Airtightness Guide. Passivhaus Trust, 2014. Disponible en: <https://www.passivhaustrust.org.uk/>
- [21] ATTMA, Technical Standard L1: Measuring Air Permeability of Building Envelopes (Dwellings), Issue 4.0, 2021. Disponible en: <https://www.bcta.group/attma/downloads/>
- [22] CIBSE, TM23: Testing Buildings for Air Leakage. CIBSE, London, 2022.
- [23] UNE-EN ISO 6781-1:2023 — Prestaciones térmicas de edificios. Detección de irregularidades de calor, aire y humedad en edificios por métodos infrarrojos. Parte 1: Procedimientos generales (ISO 6781-1:2020). AENOR, 2023.