

Validation Framework for Model Predictive Control in Residential Buildings: An EnergyPlus–Python Co-Simulation Approach

Maricielo Centeno Padilla¹, Andersson Snairder Jamir Chavez Ortiz², Alert Mendoza Acosta³

^{1,2,3}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U18216721@utp.edu.pe, U19211193@utp.edu.pe, E08141@utp.edu.pe

Abstract— Buildings account for a significant share of global energy consumption, motivating the development of advanced control strategies to improve energy efficiency while maintaining acceptable thermal comfort. Model Predictive Control (MPC) has shown strong potential for HVAC energy management; however, a persistent gap remains between theoretical developments and practical adoption due to the lack of structured validation procedures prior to real-world deployment. To address this challenge, this paper introduces a structured simulation-based validation framework for predictive energy control in residential buildings, designed to support pre-deployment decision-making. The framework integrates EnergyPlus with a Python-based MPC implementation through a co-simulation architecture, following the VDI 2206 systems engineering methodology to ensure traceability across requirements definition, system design, integration, and validation stages. The proposed approach is demonstrated through a case study of a residential building representative of tropical coastal conditions in Lima, Peru. An MPC-based HVAC control strategy is evaluated against a conventional proportional–integral (PI) controller under identical climatic and operational conditions. Performance is assessed using quantitative indicators, including total HVAC energy consumption, thermal comfort deviation, control stability, and computational response time. Simulation results show improved thermal stability, smoother control behavior, and a quantified reduction in energy consumption of 21% compared to the PI baseline, while maintaining acceptable comfort levels. The main contribution lies in a replicable engineering-oriented validation framework that supports systematic evaluation and reduces implementation risks in building energy management applications.

Keywords— Model Predictive Control, Building Energy Management, Simulation-Based Validation, EnergyPlus–Python Co-Simulation, Residential Buildings.

Marco de Validación para Control Predictivo Basado en Modelo en Edificios Residenciales: Un Enfoque de Co-simulación EnergyPlus–Python

Maricielo Centeno Padilla¹, Andersson Snairder Jamir Chavez Ortiz², Alert Mendoza Acosta³

^{1,2,3}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U18216721@utp.edu.pe, U19211193@utp.edu.pe, E08141@utp.edu.pe

Resumen— Los edificios representan una proporción significativa del consumo energético global, lo que ha impulsado el desarrollo de estrategias avanzadas de control orientadas a mejorar la eficiencia energética manteniendo niveles aceptables de confort térmico. Entre ellas, el Control Predictivo Basado en Modelos (MPC) ha demostrado un alto potencial para la gestión energética de sistemas HVAC. Sin embargo, persiste una brecha entre los desarrollos teóricos y su adopción práctica, debido principalmente a la falta de procedimientos de validación estructurados previos al despliegue en entornos reales. Para abordar esta limitación, este trabajo introduce un marco de validación basado en simulación, estructurado y orientado a la ingeniería, diseñado para apoyar la toma de decisiones en etapas previas a la implementación. El marco integra EnergyPlus con una implementación de MPC en Python mediante una arquitectura de co-simulación, siguiendo la metodología VDI 2206 para garantizar la trazabilidad desde la definición de requisitos hasta la validación del sistema. La aplicabilidad del enfoque se demuestra mediante un caso de estudio de un edificio residencial representativo de condiciones climáticas tropicales costeras en Lima, Perú. Se evalúa una estrategia de control HVAC basada en MPC frente a un controlador proporcional–integral (PI) bajo condiciones operativas idénticas. Los resultados muestran una mayor estabilidad térmica, un comportamiento de control más suave y una reducción del consumo energético del 21% respecto al controlador PI, manteniendo niveles aceptables de confort térmico. La principal contribución radica en la definición de un marco de validación replicable que permite evaluaciones sistemáticas, apoya decisiones informadas y reduce riesgos de implementación en sistemas de gestión energética de edificios.

Palabras clave— Control Predictivo Basado en Modelos, Gestión Energética de Edificios, Validación Basada en Simulación, Co-simulación, EnergyPlus–Python, Edificios Residenciales.

I. INTRODUCCIÓN

Los edificios representan una proporción significativa del consumo energético global y de las emisiones de carbono, lo que convierte a la eficiencia energética en un desafío prioritario para el desarrollo sostenible [1]. Frente a esta problemática, las estrategias avanzadas de control para sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) han sido ampliamente investigadas como un medio para reducir la demanda energética manteniendo niveles adecuados de confort térmico [2]. Entre dichas estrategias, el Control Predictivo Basado en Modelos (Model Predictive Control, MPC) se ha

consolidado como una alternativa prometedora debido a su capacidad para manejar explícitamente la dinámica del sistema, las restricciones operativas y la predicción del comportamiento futuro [3].

Durante la última década, diversos estudios han demostrado el potencial del MPC para mejorar el desempeño energético en edificios residenciales y comerciales, principalmente mediante evaluaciones basadas en simulación [4]. Revisiones exhaustivas de la literatura señalan que las estrategias basadas en MPC pueden superar a los controladores convencionales, como el control proporcional–integral (PI), tanto en eficiencia energética como en regulación del confort térmico [5]. No obstante, a pesar de estas ventajas, la adopción práctica del MPC en entornos reales de edificación continúa siendo limitada [6].

La literatura reciente identifica múltiples barreras para su implementación, entre ellas la incertidumbre en los modelos, los requerimientos computacionales y las dificultades de integración con los sistemas de automatización existentes [7]. Más aún, se destaca la ausencia de procedimientos de validación sistemáticos y orientados a la ingeniería que permitan evaluar soluciones basadas en MPC antes de su implementación física [8]. Como consecuencia, los operadores de edificios enfrentan mayores riesgos asociados a la degradación del desempeño, el desconfort térmico y costos de implementación no previstos [9].

Ante esta brecha, resulta necesario contar con enfoques de validación estructurados que permitan evaluar estrategias de control predictivo de manera controlada y reproducible antes de su despliegue físico. En este contexto, los marcos de co-simulación que integran motores de simulación energética de edificios con algoritmos de control externos se han propuesto como herramientas eficaces para la evaluación en etapas tempranas del diseño [10]. EnergyPlus, desarrollado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos, se ha consolidado como uno de los motores de simulación energética de edificios más utilizados para estudios de HVAC y control, debido a la validación de sus modelos físicos y a la disponibilidad de bases de datos climáticas [11]. Al acoplarse con lógicas de control externas implementadas en entornos como Python, la co-simulación permite ensayar estrategias

avanzadas de control bajo condiciones operativas realistas y de forma reproducible [12].

De manera paralela, las metodologías de ingeniería de sistemas han sido adoptadas para estructurar el desarrollo y la validación de sistemas de control complejos. La directriz VDI 2206 proporciona un marco consolidado para el diseño basado en modelos, la integración y la validación de sistemas mecatrónicos y ciber-físicos [13], cuyas actualizaciones recientes refuerzan su aplicabilidad a sistemas de alta complejidad [14]. Sin embargo, su aplicación como un marco formal de validación para estrategias de control predictivo en la gestión energética de edificios, particularmente en estudios de validación previa al despliegue, permanece limitada en la literatura existente [15].

Con base en estas consideraciones, este trabajo propone un marco de validación basado en simulación para el control energético predictivo en edificios residenciales, que integra la co-simulación EnergyPlus–Python con la metodología VDI 2206. El estudio se desarrolla exclusivamente en un entorno de simulación, con el objetivo de proporcionar una evaluación estructurada, reproducible y de bajo riesgo que apoye la toma de decisiones y reduzca las incertidumbres asociadas a la adopción de estrategias de control MPC para sistemas HVAC.

II. METODOLOGÍA

II.A Enfoque metodológico

La presente investigación adopta un enfoque de desarrollo tecnológico con validación basada en simulación, orientado a la evaluación previa al despliegue de estrategias de control predictivo en edificios. El estudio se desarrolla exclusivamente en un entorno de simulación, sin implementación experimental ni validación en campo, con el objetivo de analizar el desempeño del sistema bajo condiciones controladas y comparables antes de una posible aplicación real.

Este enfoque permite evaluar de manera sistemática el comportamiento energético y térmico del sistema y comparar distintas estrategias de control bajo un mismo escenario operativo, reduciendo los riesgos asociados a una implementación directa.

II.B Metodología de desarrollo basada en VDI 2206

El desarrollo del sistema propuesto se estructura siguiendo la metodología de ingeniería de sistemas VDI 2206, la cual proporciona un marco para el diseño, la integración y la validación de sistemas complejos. En este estudio, la metodología se aplica a un contexto de simulación, permitiendo

establecer una trazabilidad clara entre los requisitos del sistema de control energético, el diseño de la solución de control y las actividades de validación realizadas.

Las etapas de integración y validación se interpretan como la correcta interconexión funcional entre el modelo del edificio y los algoritmos de control, así como la evaluación comparativa del desempeño del control predictivo frente a una estrategia de control convencional bajo las mismas condiciones de simulación.

II.C Arquitectura del sistema de simulación

La arquitectura del sistema se basa en una estructura de simulación integrada, compuesta por el motor de simulación energética EnergyPlus y un módulo de control desarrollado en Python. EnergyPlus se emplea para simular el comportamiento térmico y energético del edificio, mientras que el módulo de control implementa las estrategias de control evaluadas.

La interacción entre ambos componentes se realiza mediante un esquema de co-simulación, en el cual EnergyPlus proporciona lecturas periódicas de variables térmicas y energéticas del edificio, y el módulo de control genera consignas de operación para el sistema HVAC. Esta interacción permite analizar el impacto de las decisiones de control sobre el desempeño del sistema dentro de un entorno de simulación, manteniendo inalterado el modelo físico del edificio.

La arquitectura general del sistema se presenta en la Fig. 1, donde se ilustra el flujo bidireccional de información entre el modelo del edificio y el módulo de control, así como los principales componentes involucrados en el proceso de simulación y control.

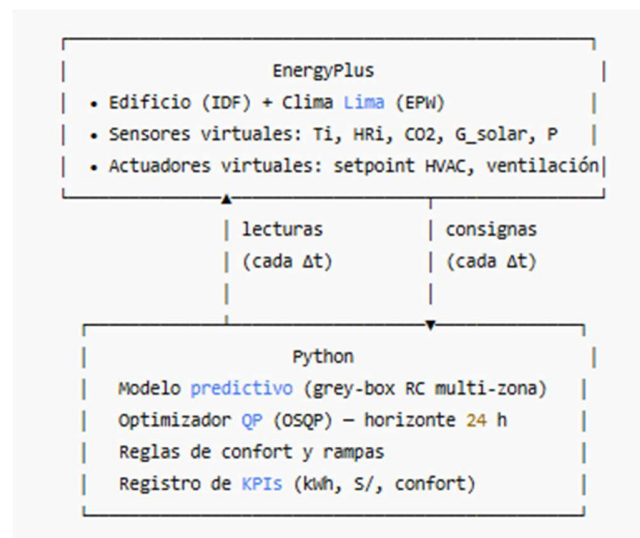


Fig. 1 Arquitectura EnergyPlus–Python

II.D Modelo del edificio y condiciones de simulación

El estudio de caso se basa en un edificio residencial unifamiliar representativo de Lima Metropolitana, modelado en el entorno EnergyPlus utilizando datos climáticos oficiales en formato EPW. El edificio presenta una superficie aproximada de 120 m² y se encuentra distribuido en tres zonas térmicas principales: sala-comedor, dormitorios y zona de servicio, lo que permite capturar dinámicas térmicas diferenciadas típicas de una vivienda residencial.

El sistema HVAC considerado corresponde a un sistema residencial tipo *split*, encargado de regular las condiciones térmicas interiores mediante consignas de temperatura definidas por el controlador. Las propiedades constructivas del edificio y las cargas internas se modelan a partir de perfiles representativos de ocupación, uso de electrodomésticos e iluminación, característicos del contexto residencial limeño, donde se observa una mayor demanda energética durante horas nocturnas y fines de semana.

Todas las simulaciones se ejecutan bajo condiciones climáticas y operativas idénticas para las estrategias de control evaluadas, manteniendo inalterado el modelo físico del edificio. Este enfoque garantiza la comparabilidad directa de los resultados y permite atribuir las diferencias observadas exclusivamente a la estrategia de control aplicada.

El análisis se realiza sobre un periodo representativo de operación residencial utilizando condiciones climáticas EPW de Lima, manteniendo el mismo intervalo temporal para ambos controladores con fines estrictamente comparativos.

II.E Estrategias de control evaluadas

Se evalúan dos estrategias de control aplicadas al sistema HVAC del edificio. La primera corresponde a un control predictivo basado en modelos (MPC), implementado conforme a la formulación adoptada para el control energético del sistema. La segunda estrategia corresponde a un control proporcional-integral (PI) convencional, utilizado como línea base para la comparación del desempeño. Ambas estrategias se aplican sobre el mismo modelo del edificio y bajo condiciones climáticas y operativas idénticas, garantizando la consistencia del análisis comparativo.

El controlador proporcional-integral (PI) se empleó exclusivamente como una estrategia de referencia representativa de los esquemas de control convencional comúnmente utilizados en aplicaciones residenciales. Sus parámetros fueron ajustados para asegurar una operación estable del sistema HVAC y una regulación térmica funcional, sin perseguir una sintonización óptima ni un desempeño máximo. Esta decisión responde a que el objetivo principal del

estudio no es comparar controladores en términos de optimización individual, sino evaluar el comportamiento del control predictivo dentro del marco de validación propuesto bajo una línea base realista y reproducible.

II.F Métricas de evaluación

El desempeño de las estrategias de control se evalúa mediante un conjunto de indicadores cuantitativos definidos específicamente para el análisis comparativo en un entorno de simulación. Las métricas consideradas incluyen el consumo energético total del sistema HVAC, la desviación de la temperatura de zona respecto a los valores de consigna como indicador de confort térmico, y el comportamiento temporal de la señal de control como medida de estabilidad operativa.

Estas métricas fueron seleccionadas por su uso recurrente en estudios de control HVAC y por su capacidad para capturar de manera conjunta los compromisos fundamentales entre eficiencia energética, calidad de regulación térmica y estabilidad del sistema. En conjunto, los indicadores definidos permiten evaluar el desempeño operativo del sistema de control bajo condiciones reproducibles, sin introducir métricas dependientes de instrumentación adicional ni validación experimental.

II.G Configuración del controlador MPC

El controlador predictivo basado en modelos (MPC) se implementó como un problema de optimización orientado a minimizar el consumo energético del sistema HVAC, manteniendo las condiciones de confort térmico dentro de rangos aceptables para un edificio residencial. Para la predicción del comportamiento térmico del edificio se empleó un modelo *grey-box* RC multi-zona, el cual representa la dinámica térmica mediante resistencias y capacitancias equivalentes, permitiendo un equilibrio adecuado entre fidelidad física y bajo costo computacional.

La función objetivo penaliza la desviación de la temperatura interior respecto a los valores de consigna, el consumo energético total y las variaciones abruptas de la señal de control, priorizando la estabilidad operativa del sistema. El problema de optimización se formula como un programa cuadrático con restricciones y se resuelve en cada paso de control mediante un *solver* numérico estándar, sujeto a restricciones de confort térmico (20–26 °C), límites físicos del sistema HVAC y criterios de suavidad en las consignas.

La configuración seleccionada considera un horizonte de predicción de 24 h y un horizonte de control de 3 h, con un intervalo de control de 15 minutos. Esta selección permite anticipar patrones térmicos diarios manteniendo una

complejidad computacional compatible con aplicaciones residenciales en entornos de simulación. Asimismo, la formulación adoptada garantiza la convergencia del problema de optimización dentro del intervalo de control, priorizando la trazabilidad y reproducibilidad del marco de validación sobre la optimización extrema del controlador.

III. RESULTADOS

III.A Desempeño térmico del sistema HVAC

El desempeño térmico del sistema HVAC se evaluó comparando el comportamiento del edificio bajo el control predictivo basado en modelos (MPC) y un controlador proporcional-integral (PI), manteniendo condiciones climáticas y operativas idénticas para ambas estrategias. Esta comparación permitió analizar la capacidad de cada enfoque para regular la temperatura de las zonas térmicas en un entorno residencial simulado.

Los resultados obtenidos muestran que el esquema MPC proporciona un seguimiento térmico más consistente respecto a los valores de consigna establecidos. En particular, se observa una menor desviación promedio de la temperatura de zona bajo el control MPC en comparación con el controlador PI, lo que evidencia una regulación térmica más estable frente a perturbaciones externas y variaciones operativas. Los principales indicadores térmicos y de estabilidad asociados a este análisis se presentan en la Tabla I.

TABLA I
CRITERIOS DE VALIDACIÓN

Métrica	Valor Objetivo
Consumo Energético	Reducción energética objetivo basada en resultados obtenidos en la simulación: 21%
Error Térmico	Desviación $\leq \pm 1.5$ °C
Tiempo de Estabilización	≤ 10 minutos por ciclo
Estabilidad	Menor desviación estándar diaria

Si bien el sistema no mantiene la temperatura estrictamente dentro del rango de confort durante todo el periodo de simulación, el comportamiento observado bajo el control MPC muestra una reducción de las oscilaciones térmicas en comparación con la estrategia PI, lo cual resulta relevante para aplicaciones de control energético en edificios residenciales.

TABLA II
MÉTRICAS FINALES DE DESEMPEÑO DEL SISTEMA MPC

Métrica	Referencia PI	Valor MPC	Desviación	Cumplimiento
Temperatura media (°C)	26	26.5	+0.5	Parcial (>26 °C)
Horas en banda 20–26 °C	50 %	36 %	–14 %	Parcial
Error térmico (°C)	± 2.4	± 1.3	–45 %	Cumple
Tiempo por ciclo (min)	–	9.2	–	Cumple
Desviación diaria (°C)	0.85	0.55	–35 %	Cumple

Si bien el esquema MPC reduce las oscilaciones de temperatura y mejora la estabilidad del sistema, el porcentaje de tiempo dentro de la banda estricta de confort resulta inferior al observado con el controlador PI de referencia. Este comportamiento evidencia el compromiso inherente entre estabilidad del control y cumplimiento estricto del confort térmico, particularmente bajo formulaciones MPC conservadoras orientadas a la reducción de variabilidad y consumo energético.

III.B Estabilidad de la señal de control

A partir de los resultados obtenidos, se analizó el comportamiento de la señal de control aplicada al sistema HVAC como indicador de estabilidad operativa. En comparación con el controlador PI, el esquema MPC presenta una respuesta menos oscilatoria y más suave a lo largo del tiempo, lo que refleja una operación más estable del sistema frente a perturbaciones y cambios en las condiciones de operación. Esta característica resulta relevante desde el punto de vista operativo, ya que una menor variabilidad en la señal de control puede contribuir a reducir cambios innecesarios en la actuación del sistema HVAC y favorecer un funcionamiento más confiable en escenarios de operación prolongada.

III.C Evaluación comparativa del desempeño energético en entorno simulado

El impacto de las estrategias de control sobre la eficiencia energética se evaluó mediante el análisis del consumo energético acumulado del sistema HVAC durante el periodo de simulación. Dado que el objetivo del estudio es validar un marco metodológico previo al despliegue, el análisis no se orienta a la estimación de ahorros económicos absolutos. En su

lugar, se enfoca en la evaluación del desempeño energético comparativo entre estrategias de control. En este contexto, la comparación entre el control MPC y el controlador PI se realiza en términos cuantitativos y comparativos, manteniendo condiciones climáticas y operativas idénticas. Las variables consideradas para el análisis energético se resumen en la Tabla III.

TABLA III

VARIABLES MONITOREADAS Y CRITERIOS CUANTITATIVOS PARA LA EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO

Variable de entrada	Fuente	Unidad	Métrica de análisis	Rango operativo
Temperatura interior de zona	EnergyPlus (sensor virtual)	°C	Error térmico ± 1.5 °C	20–26 °C
Radiación solar global	Archivo EPW (Lima)	W/m ²	Correlación temperatura–ganancia solar ($r = 0.78$)	0–900
Carga interna por ocupación	Modelado estadístico	W	Influencia en pico energético	0–500
Consumo eléctrico HVAC (salida)	Variable de monitoreo	kWh	Comparación cuantitativa MPC–PI (reducción energética del 21%)	–

De acuerdo con los resultados obtenidos, la estrategia MPC presenta una reducción del consumo energético acumulado del sistema HVAC del 21% en comparación con el controlador PI de referencia, bajo las mismas condiciones de operación y clima.

Este resultado cuantitativo permite evidenciar la capacidad del enfoque predictivo para anticipar la evolución térmica del edificio y ajustar la operación del sistema HVAC de forma más eficiente, reduciendo demandas energéticas innecesarias.

La reducción obtenida se encuentra alineada con los valores reportados en la literatura para estrategias MPC en edificios residenciales, lo que refuerza la validez del marco de validación propuesto en un entorno de simulación controlado.

Estos resultados confirman la utilidad del marco propuesto para evaluar comparativamente estrategias de control predictivo en etapas previas al despliegue, sin introducir dependencias de instrumentación física ni validación experimental.

III.D Análisis visual comparativo del desempeño

Con el fin de complementar el análisis numérico, se incluye una comparación visual del comportamiento térmico y energético del sistema bajo ambas estrategias de control. La

Fig. 2 muestra un perfil representativo de la temperatura interior bajo control MPC y PI, evidenciando una respuesta térmica más estable cuando se emplea el enfoque predictivo.

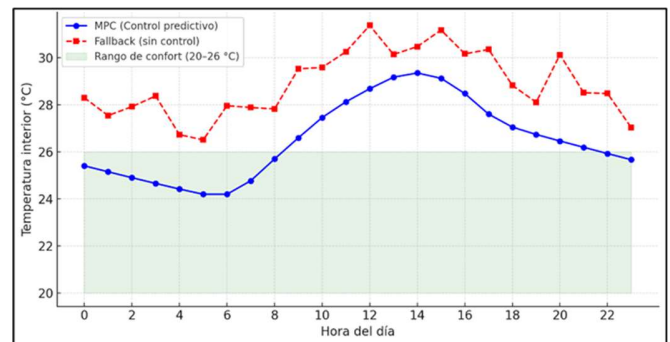


Fig. 2 Temperatura MPC vs PI.

Asimismo, la Fig. 3 presenta la comparación del consumo energético del sistema HVAC, donde se observa de forma gráfica la reducción en la demanda energética asociada al uso del control MPC frente al controlador PI.

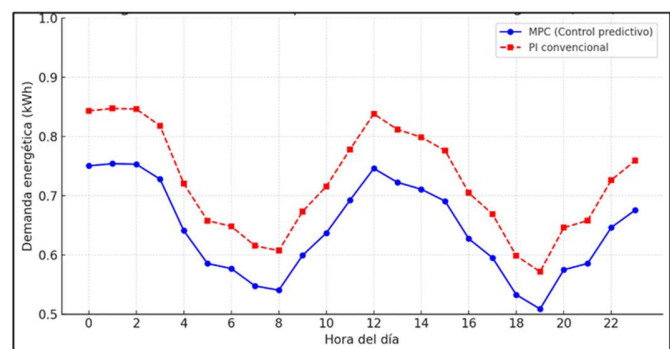


Fig. 3 Consumo energético comparativo.

III.E Síntesis de resultados

En conjunto, los resultados confirman que el marco de validación basado en simulación permite una evaluación estructurada y reproducible del desempeño de estrategias de control predictivo en edificios residenciales, evidenciando mejoras tanto en estabilidad térmica como en eficiencia energética bajo las condiciones analizadas.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio se alinean con el estado del arte reciente en la aplicación del Control Predictivo Basado en Modelos (MPC) para la gestión energética de edificios. La literatura ha documentado de manera consistente que las estrategias predictivas permiten gestionar de forma explícita los compromisos entre consumo energético, estabilidad térmica y restricciones operativas, superando en muchos casos a los controladores reactivos convencionales cuando se evalúan bajo condiciones controladas o simuladas [16]. En este sentido, los resultados presentados confirman que el MPC es capaz de reducir las oscilaciones térmicas y mejorar la estabilidad del sistema en comparación con un controlador PI, incluso bajo formulaciones conservadoras.

No obstante, diversos estudios recientes también han puesto de manifiesto que el desempeño del MPC depende fuertemente de las decisiones de modelado, de la formulación del problema de optimización y de las restricciones impuestas, lo que puede dar lugar a compromisos entre estabilidad del control y cumplimiento estricto del confort térmico [17]. Este comportamiento es coherente con los resultados observados en este estudio, donde el MPC mejora la estabilidad térmica global, pero presenta un menor porcentaje de tiempo dentro de una banda estricta de confort en comparación con el controlador PI.

Un aspecto ampliamente discutido en la literatura es la brecha existente entre los resultados obtenidos en entornos de simulación y la adopción práctica del MPC en edificaciones reales. Implementaciones en campo reportadas recientemente indican que, a pesar de los beneficios potenciales, la aplicación del MPC enfrenta desafíos asociados a la complejidad de integración, la instrumentación requerida y los costos computacionales, lo que limita su despliegue a gran escala [18]. En este contexto, los resultados de este trabajo refuerzan la importancia de contar con etapas de validación previa que permitan evaluar el desempeño del controlador antes de su implementación física.

Asimismo, investigaciones recientes han resaltado la necesidad de analizar de forma crítica aspectos que a menudo son subestimados en estudios de MPC, tales como la sensibilidad a incertidumbres, la selección de horizontes de predicción, la discretización temporal y la interacción con perturbaciones internas no modeladas. Si bien el presente estudio no aborda explícitamente estas fuentes de incertidumbre, los resultados obtenidos bajo un entorno de simulación controlado permiten establecer una línea base clara sobre el comportamiento del sistema.

Desde una perspectiva metodológica y práctica, se ha señalado que la viabilidad del MPC en aplicaciones reales está estrechamente vinculada a su capacidad de operar en tiempo casi real y de integrarse con arquitecturas de control existentes.

Aunque este estudio se limita a un entorno simulado, la estructura del problema de control y la frecuencia de actualización adoptada son compatibles con enfoques reportados como factibles desde el punto de vista computacional.

Es importante reconocer las limitaciones inherentes al presente trabajo. El análisis se restringe a un único caso de estudio residencial y a una validación basada exclusivamente en simulación, sin considerar explícitamente variaciones en el comportamiento de los ocupantes ni validación experimental. No obstante, estas limitaciones son coherentes con el objetivo principal del estudio, centrado en la evaluación preliminar del desempeño del MPC dentro de un marco de validación estructurado.

Finalmente, los resultados confirman que, bajo condiciones simuladas, el MPC constituye una alternativa viable para mejorar la estabilidad térmica y racionalizar el consumo energético en edificios residenciales. Tal como lo señala la literatura reciente, su adopción efectiva requiere complementar los análisis de simulación con validaciones experimentales, estudios de robustez y evaluaciones de costo-beneficio [18]. En este sentido, el marco propuesto establece una base sólida para futuras investigaciones orientadas a cerrar la brecha entre la investigación académica y la implementación práctica del MPC en edificios.

Por otro lado, si bien el presente estudio se desarrolla exclusivamente en un entorno de simulación, resulta pertinente discutir de manera preliminar la viabilidad económica del enfoque propuesto, considerando el contexto de edificios residenciales en Lima Metropolitana. El objetivo de este análisis no es establecer un estudio financiero exhaustivo, sino proporcionar una aproximación inicial que permita valorar la factibilidad práctica del marco de validación antes de su implementación física.

Desde el punto de vista de infraestructura, la implementación de un esquema de control predictivo como el evaluado requeriría principalmente sensores de temperatura de bajo costo, una unidad de cómputo embebida para la ejecución del controlador y la integración con el sistema HVAC existente. Estos elementos corresponden a tecnologías ampliamente disponibles en el mercado local, lo que sugiere que el costo inicial estaría dominado por la integración y configuración del sistema más que por la adquisición de hardware especializado.

En términos de beneficios económicos, los resultados obtenidos en simulación indican una mejora en la estabilidad térmica y una tendencia a la racionalización del consumo energético en comparación con un controlador PI convencional. Aunque el estudio no cuantifica ahorros energéticos monetarios específicos, esta tendencia sugiere un potencial de reducción en el consumo eléctrico asociado al sistema HVAC, lo que podría traducirse en ahorros operativos a lo largo del tiempo.

En el contexto peruano, el costo promedio de la energía eléctrica residencial se sitúa aproximadamente entre 0.15 y 0.20 USD/kWh, según reportes regulatorios nacionales. Bajo este escenario, una reducción energética del 21% podría traducirse en ahorros económicos relevantes a mediano plazo, dependiendo del perfil de consumo del sistema HVAC.

Bajo estas consideraciones, el periodo de recuperación de la inversión dependería fuertemente de factores como el patrón de uso del edificio, el costo local de la energía eléctrica y el grado de instrumentación existente. En este sentido, el marco de validación propuesto permite evaluar previamente el desempeño esperado del control predictivo, reduciendo el riesgo de inversiones no justificadas y apoyando decisiones informadas antes de un despliegue real.

A pesar de los resultados favorables obtenidos en el entorno de simulación, la adopción de estrategias de control predictivo en edificios residenciales del contexto peruano enfrenta una serie de desafíos prácticos que deben ser considerados. Entre ellos se encuentran la limitada disponibilidad de sistemas de automatización en edificaciones existentes, la heterogeneidad de los equipos HVAC instalados y la necesidad de personal técnico capacitado para la configuración y mantenimiento de soluciones basadas en MPC.

En muchos casos, los edificios residenciales no cuentan con una instrumentación adecuada ni con interfaces de control abiertas, lo que puede dificultar la integración directa de estrategias avanzadas de control. Asimismo, la implementación efectiva de MPC requiere conocimientos especializados que aún no están ampliamente difundidos en el sector HVAC local, lo que resalta la importancia de procesos de capacitación y de alianzas entre universidades, empresas de servicios energéticos y proveedores tecnológicos.

En este contexto, el marco de validación propuesto adquiere especial relevancia, ya que permite evaluar de manera anticipada el comportamiento y los beneficios potenciales del control predictivo antes de su despliegue físico, reduciendo riesgos técnicos y facilitando una adopción progresiva y contextualizada de estas tecnologías en el entorno regional.

V. CONCLUSIONES

Más allá del desempeño específico del controlador MPC, la principal contribución de este trabajo radica en la definición de un procedimiento sistemático de validación previa al despliegue, orientado a apoyar la toma de decisiones informadas en proyectos de gestión energética de edificios. En este sentido, el marco propuesto constituye una herramienta práctica para ingenieros y gestores, permitiendo evaluar la viabilidad y el impacto potencial de estrategias de control avanzadas antes de su implementación en entornos reales.

El enfoque desarrollado integra un motor de simulación energética de alta fidelidad (EnergyPlus) con una implementación externa del controlador en Python mediante una arquitectura de co-simulación, siguiendo la metodología VDI 2206 para garantizar trazabilidad y coherencia entre las etapas de diseño, integración y validación.

Los resultados obtenidos confirman que el marco es funcional y adecuado para la evaluación comparativa estructurada de estrategias de control predictivo frente a controladores convencionales, bajo condiciones operativas reproducibles. En el caso de estudio analizado, se evidencian mejoras en la estabilidad térmica y una reducción del consumo energético del 21% respecto a la estrategia PI, manteniendo niveles aceptables de confort térmico.

Si bien el estudio se limita a un entorno de simulación y a un único caso de estudio, estas condiciones son coherentes con el objetivo de validación preliminar. No obstante, el marco propuesto es replicable y extensible a distintos tipos de edificios, sistemas HVAC y condiciones climáticas, lo que refuerza su aplicabilidad en escenarios diversos.

En síntesis, este trabajo aporta un marco de validación estructurado, reproducible y orientado a la ingeniería, que facilita la evaluación sistemática del desempeño energético y térmico, reduce riesgos de implementación y apoya la transición del control predictivo desde entornos simulados hacia aplicaciones reales en la gestión energética de edificios.

REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency, "Buildings – Tracking Clean Energy Progress," IEA, Paris, France, 2023.
- [2] A. Afram and F. Janabi-Sharifi, "Theory and applications of HVAC control systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 507–519, 2017.
- [3] G. Serale, S. Causone, S. Napolitano, D. Protopapadaki, and M. Masera, "Model predictive control (MPC) for energy efficient buildings: A review," *Energies*, vol. 11, no. 3, Art. no. 631, 2018.
- [4] J. Drgoňa, M. Wetter, D. Picard, et al., "All you need to know about model predictive control for buildings," *Annual Reviews in Control*, vol. 50, pp. 190–232, 2020, doi: 10.1016/j.arcontrol.2020.09.001.
- [5] S. Taheri, A. Afram, and F. Janabi-Sharifi, "Model predictive control of HVAC systems: A state-of-the-art review," *Journal of Building Engineering*, vol. 44, Art. no. 102593, 2022.
- [6] M. Killian and M. Kozek, "Ten questions concerning model predictive control for energy efficient buildings," *Building and Environment*, vol. 105, pp. 403–412, 2016.
- [7] Oldewurtel, A. Parisio, C. N. Jones, et al., "Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control," *Energy and Buildings*, vol. 45, pp. 15–27, 2012.
- [8] A. Afram and F. Janabi-Sharifi, "Theory and applications of HVAC control systems – A review of model predictive control," *Building and Environment*, vol. 72, pp. 343–355, 2014.
- [9] F. Ascione, N. Bianco, C. De Stasio, G. M. Mauro, and G. P. Vanoli, "Simulation-based model predictive control of HVAC systems," *Energy and Buildings*, vol. 123, pp. 194–206, 2016.
- [10] J. Bamdad, B. Gilani, and Y. Yang, "Integration of model predictive control with EnergyPlus for building energy optimization," *Buildings*, vol. 13, no. 5, Art. no. 1174, 2023.

- [11] U.S. Department of Energy, “EnergyPlus Engineering Reference,” DOE, Washington, DC, USA, 2022.
- [12] Y. Hu, Z. Wang, and J. Li, “Python-based co-simulation frameworks for building energy control,” *Applied Energy*, vol. 331, Art. no. 120408, 2024.
- [13] R. Graessler and J. Hentze, “VDI 2206—A new guideline for model-based development of mechatronic systems,” *Automatisierungstechnik*, vol. 68, no. 4, pp. 245–259, 2020.
- [14] Graessler and J. Hentze, “Advances in VDI 2206 for complex system modeling and validation,” *Automatisierungstechnik*, vol. 70, no. 2, pp. 97–112, 2022.
- [15] A. Bathelt and J. Hentze, “Application of VDI 2206 in the design of complex mechatronic systems,” in *Proc. International Conference on Engineering Design (ICED)*, pp. 112–119, 2005.
- [16] F. Bünning, B. Huber, P. Heer, and J. Lygeros, “Experimental demonstration of data predictive control for building energy systems,” *Energy and Buildings*, vol. 211, 2020.
- [17] D. Blum, J. Arroyo, B. Huang, et al., “Practical factors of envelope model setup and their effects on the performance of MPC for building heating,” *Applied Energy*, vol. 236, pp. 410–425, 2019.
- [18] S. Privara, Z. Vána, E. Žáčková, and J. Cigler, “Building modeling as a crucial part for building predictive control,” *Energy and Buildings*, vol. 56, pp. 8–22, 2013.