

Evaluation of the effect of meteorological variables on the thermal performance of a residential building based on monitored data

Evaluación del efecto de las Variables Meteorológicas en el desempeño Térmico de una Edificación residencial a Partir de Datos Monitoreados

 F.D. Vásquez¹

 C.A. Naranjo²

 A.P. Lobato³

¹Instituto de Investigación Geológico y Energético, Quito, Ecuador
E-mail: francisvasquezaza@gmail.com

²Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito, Ecuador
E-mail: carlos.naranjo@epn.edu.ec

³Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Engenharia Mecânica, São Paulo, Brazil.
Email: a265322@dac.unicamp.br

Abstract

Strategies to promote the efficient use of energy and thermal comfort have been actions applied worldwide. Being the variation of temperature a worrying factor for governments due to the influence to achieve the energy goals proposed by the SDGs. In this sense, the thermal behavior inside a building could relate to external conditions and could estimate through energy simulation tools. However, the results present different levels of uncertainty due to the quality of the meteorological data, the properties of materials, the occupation patterns, as well as the complexity of generating thermal evaluation processes. Against this, experimental measurements to evaluate the real state of a building and thus predict its behavior with respect to the meteorology can have a great contribution. In this context, this study develops a methodology to evaluate the incidence of climate in the thermal behavior of a building. The evaluation is carry out in an experimental prototype house located in an equatorial region monitored for approximately one year. With the available data, validated linear regression models have developed to estimate the behavior of the interior temperature as a function of one or more environmental variables. The internal air temperature prediction model shows an R^2 of 0.41, in the worst case when only ambient temperature is available for the prediction, and an experimental error of 10%. Therefore, the methodology can be replicated in buildings of different uses, climate and adjusted to the availability of data.

Index terms— housing, meteorological variables, linear regression, monitored data.

Resumen

Las estrategias para promover el uso eficiente de energía y el confort térmico han sido acciones aplicadas mundialmente. Siendo la variación de temperatura un factor preocupante para los gobiernos debido a la influencia por alcanzar las metas energéticas propuestas por los ODS. En este sentido, el comportamiento térmico al interior de una edificación podría estar relacionado a las condiciones externas y se pueden estimar a través de herramientas de simulación energética. Sin embargo, los resultados presentan diferentes niveles de incertidumbre debido a la calidad de datos meteorológicos, las propiedades de los materiales, los patrones de ocupación, así como la complejidad de generar procesos de evaluación térmica. Frente a esto, mediciones experimentales para evaluar el estado real de una edificación y así predecir su comportamiento respecto a la meteorología pueden tener un gran aporte. En este contexto, este estudio desarrolla una metodología para evaluar la incidencia del clima en el comportamiento térmico de una edificación. La evaluación se realiza en una vivienda prototipo experimental localizada en una región ecuatorial monitoreada por aproximadamente un año. Con los datos disponibles, se desarrollaron modelos de regresión lineal validados para estimar el comportamiento de la temperatura interior en función de una o varias variables ambientales. Los resultados del modelo de predicción de la temperatura interna del aire presenta un R^2 de 0.41, en el peor de los casos cuando se disponga solo de la temperatura ambiente para la predicción, y un error experimental del 10%. Por lo tanto, esta metodología puede ser replicada en edificaciones de diferentes usos, clima y ajustada a la disponibilidad de datos.

Palabras clave— vivienda, variables meteorológicas, regresión lineal, datos monitoreados.

Recibido:30-12-2021, Aprobado tras revisión: 08-07-2022

Forma sugerida de citación: Vásquez, F.; Naranjo, C.; Lobato, A; (2022). "Evaluación del efecto de las Variables Meteorológicas en el desempeño Térmico de una Edificación residencial a Partir de Datos Monitoreados". Revista Técnica "energía". No. 19, Issue I, Pp. 53-60

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

Doi: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v19.n1.2022.502>

© 2022 Operador Nacional de Electricidad, CENACE



1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo a la Agencia Internacional de la Energía (IEA por su siglas en inglés), el consumo energético primario a nivel mundial ha ido incrementando exponencialmente con el pasar del tiempo, especialmente en países en desarrollo de América Latina, Asia y África [1]. En el caso de países desarrollados la aplicación de medidas y políticas de ahorro energético han estabilizado este consumo de acuerdo al Word Energy Outlook de la IEA [2]. En los últimos años las edificaciones han sido responsables de un porcentaje muy elevado en el consumo de energía primaria, alcanzando hasta un 40% en países desarrollados, representando más de un tercio de la energía primaria total mundial.

El consumo de energía en viviendas representa un problema tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo y promueve acciones en busca del uso eficiente. En países desarrollados se debe principalmente al uso de equipos de acondicionamiento de aire (calefacción y refrigeración) para garantizar condiciones adecuadas de habitabilidad a los ocupantes. Mientras que en países en desarrollo está relacionado con la calidad del aire al interior de las viviendas. Sin embargo, en estos casos se busca generar espacios interiores con condiciones de aire adecuadas, que contribuyan con la salud de sus habitantes [3]. Además, el consumo energético varía, por un lado, en el tipo de edificación (construcción, funcionalidad, actividad de los ocupantes) y por otro lado en la incidencia de las condiciones meteorológicas a las cuales la edificación está expuesta [4].

Con la finalidad de evaluar el comportamiento térmico de una edificación, herramientas informáticas de simulación y energética son usadas. Los resultados obtenidos son estimaciones que pueden presentar diferentes niveles de incertidumbre debido a diversos factores en los datos de entrada y de procesamiento. Por ejemplo, en los datos de entrada: la calidad de la serie de datos meteorológicos, las propiedades térmicas de los materiales de construcción, los patrones de ocupación de la edificación adoptados entre otros. Estudios sobre la evaluación del rendimiento energético de una edificación, planificados como de consumo energético casi nulo y basados únicamente en la energía eléctrica consumida por los equipos y luminarias de una vivienda, tendrá resultados alejados de la realidad [5]. En este sentido la variable climática juega un papel principal en el consumo energético e incrementa su influencia en la temperatura al interior de una edificación debido al cambio climático postulado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés).

A pesar que la estimación del consumo energético en una vivienda a través de simulaciones de comportamiento ha tenido gran alcance y mejora en cuanto a los resultados, existen discrepancias entre el diseño y el desempeño medido en una edificación [6]. La aplicación de

mediciones experimentales en condiciones reales permite obtener información para evaluar procesos directos, indirectos y contribuir en la proyección de información basados en datos recopilados en condiciones reales. El uso de estrategias en busca del uso eficiente de energía, han sido impulsadas a nivel mundial, en alineación con la Meta 3 “De aquí a 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética” del ODS 7 Energía Asequible y no contaminante.

Con la finalidad de determinar los parámetros más influyentes en el consumo energético de edificaciones, se han realizado, en los últimos años, diversos estudios sobre la influencia de las variables meteorológicas en el consumo energético y comportamiento térmico de edificaciones, en donde se ha evidenciado que la temperatura ambiente (T_{amb}), la velocidad del viento (VV), la humedad relativa (HR), y la radiación solar (RS) se consideran como variables directamente influyentes en la demanda energética en edificaciones [7]. En este contexto es importante mencionar que cada región del mundo presenta una climatología diferente de acuerdo a la ubicación geográfica, presión atmosférica, altura sobre el nivel del mar, entre otros factores. Es por ello que los resultados obtenidos para cierta región no son replicables en otras, por lo que es evidente que se deben realizar estudios específicos para cada región climática.

Los últimos años el gobierno central ha aportado al desarrollo de varios proyectos de investigación. Entre estos, el ex INER (Instituto Nacional de Eficiencia energética y Energía renovable) actual Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE) diseñó una edificación residencial prototipo conocida como “Casa Prototipo” y concebida como un laboratorio de pruebas experimentales que contribuyan con las investigaciones multidisciplinarias. Entre ellas monitorización de variables internas y externas para validar posteriormente datos de simulación y entender el comportamiento térmico de la edificación bajo diferentes condiciones de estudio.

Debido a los escasos estudios sobre eficiencia energética en edificaciones en climatologías ecuatorianas es importante iniciar con el desarrollo de una metodología adecuada que permita rápidamente identificar las variables más importantes para el diseño eficiente de edificaciones, entendiéndose por eficiente, a bajo consumo energético y adecuado confort térmico de los ocupantes. Para ello, los datos experimentales juegan un importante papel para la obtención de modelos que puedan ser usados en el diseño preliminar y así estimar el comportamiento térmico que una edificación tendrá. Estos datos deberían ser tomados y validados para diversas climatologías y ampliar el estudio para varios casos.

En este contexto, se propone esta investigación que tiene como objetivo, desarrollar una metodología para la evaluación la incidencia de las variables meteorológicas (temperatura ambiente, radiación solar global, velocidad



de viento y humedad relativa) en el comportamiento térmico de una edificación (temperatura interior del aire). La evaluación se la realizará para una vivienda localizada en la región ecuatorial (0 ° 31'N 78 ° 12'O) que ha sido monitoreada por aproximadamente un año. Los resultados permitirán determinar cuáles son las variables meteorológicas de mayor impacto en el comportamiento térmico de la edificación permitirán determinar los parámetros de mayor influencia en el consumo energético de edificaciones. A su vez contribuirá con análisis de evaluación del estado actual de una edificación para proyectar su comportamiento respecto a la meteorología que la afecta.

2. METODOLOGÍA

2.1. Modelo físico y equipos

Este estudio contempla un modelo de edificación prototipo basada en una vivienda de interés social, la cual ha sido implementada por medio del IIGE. Esta edificación presenta varios instrumentos de monitorización para medir variables térmicas internas, así como, una estación meteorológica portátil. La edificación es de una sola planta con una superficie de construcción de 45.2 m² y una altura total de 4.36 m, contiene sala, comedor, cocina, dos dormitorios y un baño, además el techo es inclinado. Tres termopares han sido ubicados en distintas habitaciones para medir la temperatura interna del aire a una altura de 2.00m y la estación meteorológica se ha ubicado en el techo de la edificación.

2.2. Ubicación y climatología

La investigación se ha desarrollado en la ciudad de Urcuquí la cual es una región montañosa del Ecuador, ubicada a 2384 msnm (0°31'N 78°12'O). Urcuquí tiene un clima cálido templado, no supera los 30°C durante el día. Sin embargo, es muy húmedo en las noches y bastante seco en horas del mediodía. El clima es muy seco durante los meses de verano entre junio, julio y agosto y relativamente húmedo en el invierno. La temperatura ambiente presenta un mismo patrón de variación durante el ciclo diario para un 95% del año. En la noche es posible encontrar temperaturas entre 10°Cy 15°C y durante el día la temperatura está entre 20°C y 25°C.

2.3. Datos

Los datos monitoreados fueron medidos desde diciembre 2014 con intervalos de 5 minutos, por aproximadamente un año. Con estos datos se ha calculado los promedios horarios considerando que la percepción de cambio de temperatura en el ambiente interno es apreciable en un intervalo de una hora. Los principales datos ambientales medidos son la humedad relativa (HR), velocidad del viento (VV), temperatura de bulbo seco (Tamb), radiación solar global (RS) y la temperatura del aire

interno de la casa (Taire_int1, Taire_int2, Taire_int3). Se disponen de un total de 90139 datos por cada variable. Cada una de las variables debe ser revisada mediante estadística descriptiva para eliminar valores repetidos completar con valores no asignados aquellas fechas que el sistema no registró valores. La Tabla 1 muestra la media, desviación estándar, valor mínimo, valor máximo y datos no asignados en la base.

Tabla 1: Resumen de datos

	media	DE	Min	max	NA
Tamb (°C)	17.7	3.6	8.9	27.7	0
HR (%)	71.5	21.4	20.9	100	0
VV(m/s)	1.6	1.4	0	8.1	0
RS (W/m ²)	220.4	295.2	16.3	1332	727
Taire_int1 (°C)	25.0	2.6	18.0	34.3	0
Taire_int2 (°C)	24.5	2.1	17.7	31.9	0
Taire_int3 (°C)	24.6	2.4	17.6	33.5	0

2.4. Análisis de datos atípicos

Luego de un análisis descriptivo se debe realizar un tratamiento de valores atípicos, para este estudio se ha tomado como referencia el análisis del diagrama de caja [8]. Los valores atípicos muy extremos causan muchas dificultades y afectan directamente a las predicciones de los modelos de regresión. Sin embargo, los valores atípicos extremos deben extraerse, cuando se tenga certeza de un mal funcionamiento de los equipos, errores en las mediciones, errores del personal técnico, entre otros. La eliminación de dichos valores extrínsecos comprobados llevarán a conseguir resultados más precisos al momento de encontrar modelos de predicción [9].

Las variables meteorológicas que presentan valores atípicos son la radiación solar y la velocidad del viento, estos valores elevados se deben a que la radiación en la noche es nula y al medio día presenta valores muy elevados. La velocidad del viento muestra valores elevados en ciertas horas del día y su alta variación no permite analizar los valores atípicos en cortos intervalos de tiempo. Siempre la velocidad del viento se debe analizar su variación cada hora y serán declarados valores atípicos si cumplen las Ecuaciones (1) (2) y (3) propuestas por [10]

$$v_t > 35.5 \text{ m/s} \quad (1)$$

$$|v_t - v_{(t-1)}| < 7.7 \text{ m/s} \quad (2)$$

$$|v_t - v_{(t+1)}| < 7.7 \text{ m/s} \quad (3)$$

Los valores de radiación considerados como atípicos son los que sobrepasan los valores máximos incidentes sobre la capa más externa de la tierra de 1366 W/m² [11]. Las temperaturas internas del aire presentan ciertos valores atípicos solitarios, estos datos deben ser estudiados



cuidadosamente y cambiados por valores no asignados para los posteriores análisis se tomen tan solo las observaciones completas.

2.5. Orden de influencia

El orden de influencia de las variables meteorológicas y las temperaturas internas de la edificación serán analizadas mediante un análisis de Pareto [12]. Para construir el diagrama de Pareto se calcula la variación porcentual de los datos de una hora a otra. Luego, se obtiene la suma o el promedio de los valores calculados para cada variable. Este dato representa el porcentaje promedio de variación en una hora para cada parámetro medido.

Por ejemplo, para una variación de la temperatura del aire interior (Taire_int1) del 2.3% de su valor en una hora, la temperatura ambiente deberá presentar un cambio del 5%, la humedad relativa 6.5%, la velocidad del viento 32% y la radiación solar 38%. Es decir que mientras mayor sea el cambio en las variables meteorológicas, menor será el cambio en la temperatura interna, esto determina la relación inversa de estas relaciones. Por este motivo se debe calcular la diferencia porcentual de los valores encontrados para graficar las variables climáticas de mayor a menor influencia.

La Fig. 1 muestra el diagrama de Pareto para la temperatura (Tair_int1). La variable meteorológica que más influye en los cambios de temperatura interna es la temperatura ambiente y la humedad relativa, esto determina que los modelos de regresión están determinados en su mayoría por estas dos variables.

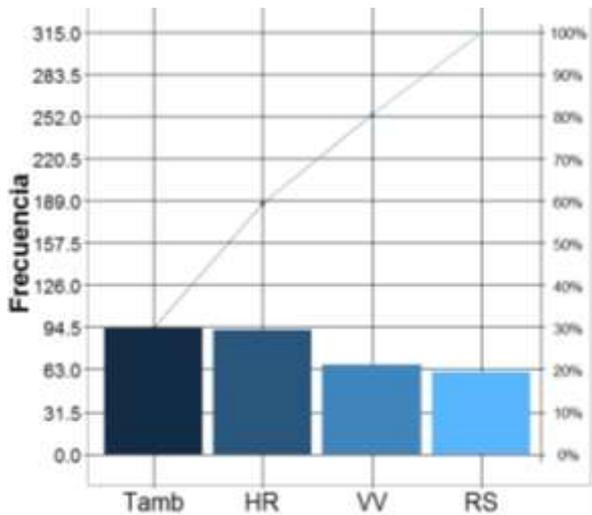


Figura 1: Diagrama de Pareto (Taire_int1)

2.6. Regresión lineal múltiple

Una vez que la base de datos ha sido correctamente validada mediante análisis estadístico, esta debe ser dividida en dos partes, el 80% para el entrenamiento del modelo de regresión lineal múltiple y el 20% para validación [13]. El modelo de regresión múltiple se lo

desarrollará por el método de los mínimos cuadrados [14]. Este método consiste en relacionar a una variable dependiente y con k variables independientes de acuerdo a (4).

$$y = B_0 + B_1x_1 + B_2x_2 + \dots + B_kx_k + e \quad (4)$$

Donde los coeficientes B se denominan parámetros de regresión y “e” el error generado del modelo. Para el error de regresión se considera una esperanza igual a cero, desviación estándar igual a y los errores individuales de las observaciones no presentan correlación alguna.

Cada variable meteorológica debe ser estudiada tomando en cuenta el comportamiento mediante un diagrama de dispersión para evaluar su afinidad lineal o no lineal. De acuerdo al comportamiento de las gráficas se realiza transformaciones cuadráticas, cúbicas o logarítmicas tanto a las variables dependientes como independientes para estabilizar la varianza e incrementar el valor del Coeficiente de Determinación (R²)[9]. Finalmente, una validación con datos que no fueron incluidos en el modelo se llevará a cabo, para encontrar el error de predicción.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Correlación lineal

El análisis de correlación entre variables es el primer paso para determinar el grado de relación existente entre variables, en este estudio el coeficiente de correlación lineal de Pearson será usado. La Tabla 2 muestra los coeficientes de correlación lineal de Pearson para todas las temperaturas y las variables meteorológicas. Los valores del coeficiente varían entre -1 a 1, valores cercanos a cero determinan que las variables no se correlacionan linealmente.

Tabla 2: Correlación lineal de Pearson

	T _{amb}	H _R	V _V	R _S
Taire_int1	0.57	-0.35	0.61	0.32
Taire_int2	0.68	-0.44	0.60	0.45
Taire_int3	0.62	-0.39	0.61	0.38

La correlación lineal entre las temperaturas internas y la temperatura ambiente presenta los valores más altos (0.68), la velocidad del viento presenta valores similares (0.6), la humedad relativa presenta un comportamiento inverso por su signo negativo y sus valores se encuentran alrededor de 0.4 y la radiación solar es el parámetro menos influyente y sus fluctúan entre 0.3-0.45.

3.2. Modelos de regresión lineal múltiple

La estimación de los parámetros de regresión lineal múltiple, es igual que una regresión lineal simple. Es decir, se aplica el método de los mínimos cuadrados, pero de forma matricial. La Tabla 3 muestra los modelos de regresión lineal múltiple calculados de las temperaturas internas en función de las variables meteorológicas.



El mayor R^2 ajustado encontrado corresponde a la temperatura (Taire_int2) con un R^2 ajustado de 0.73 cuando el modelo toma en cuenta todas las variables meteorológicas. El valor de R^2 reduce gradualmente conforme reducen el número de variables independientes. En el peor de los casos cuando solo se toma en cuenta la temperatura ambiente el coeficiente de determinación será de 0.5.

La Fig. 2 muestra la relación entre la temperatura real versus la predicha indicando la escala de error porcentual, como es apreciable la temperatura ambiente juega un papel muy importante al momento de encontrar el modelo de predicción, casi el 50% de los datos se ajustan con un error menor al 5% y tan solo para un 9% de datos aproximadamente el error es mayor al 10%.

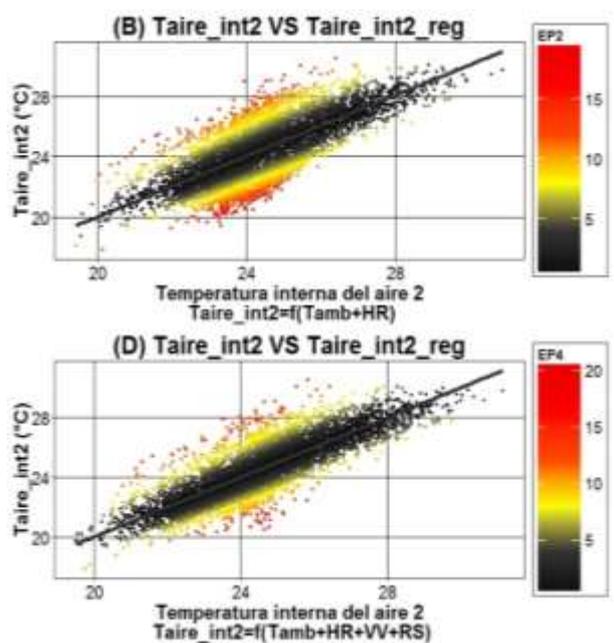


Figura 2: Temperatura real vs temperatura predicha

3.3. Validación experimental

La validación de los modelos conlleva a un análisis estadístico de los errores encontrados entre el valor predicho y el valor real. La Tabla 4 muestra un resumen de los parámetros y rangos más importantes del modelo de la Taire_int2 con todas las variables meteorológicas. El 75% de datos de validación presenta un error inferior al 5% para un R^2 de 0.727.

Como se observa, el uso de todas las variables en el modelo, compacta mejor los errores generados. Para este modelo el error promedio es de 3.61% y el error máximo esperado de 10.97% si se toma en cuenta los errores atípicos. El modelo es muy bueno, es decir, se espera un error inferior al 5% para temperatura ambiente entre 14-16°C y 23-25°C.

El modelo presenta errores superiores al 5% cuando la temperatura ambiente se encuentra entre 14-17°C y 18-19°C, humedad relativa entre 58-74% y 98-100%, velocidades del viento inferiores a 2m/s y radiación solar cero. Y, por último, el modelo genera errores superiores a 5% para temperatura ambiente entre 15-16°C, 58-60% y 96-100% de humedad relativa, velocidades del viento inferiores a 2m/s y radiación solar cero.

Tabla 3: Errores de predicción

Modelo	Taire_int2			
	R ²	0.7268	Error promedio	3.61 %
Rango error Atípico	10.97-15.29%	Error máximo	15.29 %	
Error	T _{amb} (°C)	H _R (%)	V _v (m/s)	R _s (W/m ²)
< 5%	14-16 23-25	-	-	-
>5%	14-17 18-19	58-74 98-100	0-2	0
>5%	15-16	58-60 96-100	0-2	0

Si bien, el análisis de los errores en los modelos es importante al momento de generar buenos resultados en las predicciones, se debe analizar dichos errores en el tiempo. De esta manera se puede tener una mejor interpretación de los resultados del modelo sin tener que recurrir a la utilización de términos estadísticos.

Una semana típica fue seleccionada, es decir que presente una temperatura ambiente, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar promedio en relación a los datos anuales medidos. A dicha semana se le ha evaluado los datos que genera el modelo de predicción en comparación con los datos experimentales medidos in situ. La semana seleccionada va desde el 6 de octubre hasta el 12 de octubre del 2015, la cual muestra un promedio de 17.66°C de temperatura ambiente, 70.68% de humedad relativa, 1.64 m/s de velocidad del viento y 220.64 W/m².

La Fig. 3 muestra la temperatura ambiente, temperatura interior experimental de la edificación y la temperatura interior del modelo de regresión en función de la hora del día, para el modelo de la temperatura interior del aire (Taire_int2). Los datos se aproximan muy bien a la curva real de datos experimentales, en el peor de los casos el error es de 3°C al mediodía donde influye mucho la radiación solar. Por otro lado, algunos errores superiores a 2°C se generan en horas de la noche.

Los errores son mínimos cuando las predicciones se realizan desde des 6 de la mañana hasta las 12 de día. De esta forma se puede tomar datos de una semana en un lugar específico de construcción, realizar las predicciones de las temperaturas internas y validar los datos para usarlos en el diseño preliminar, sin la necesidad de medir variables meteorológicas en intervalos de tiempo muy extenso.



Tabla 4: Modelos de regresión lineal múltiple

Modelos de regresión	R ²
$\ln(Taire_int1) = 1.026 + 0.3366T_{amb} - 0.01759T_{amb}^2 + 0.0003145T_{amb}^3$	0.34
$\ln(Taire_int1) = 1.92 + 0.1718T_{amb} - 0.007221T_{amb}^2 + 0.0001229T_{amb}^3 - 0.005035HR + 0.00004671HR^2$	0.41
$\ln(Taire_int1) = 0.4019 + 0.4362T_{amb} - 0.02332T_{amb}^2 + 0.0003808T_{amb}^3 - 0.00442HR + 0.00004279HR^2 + 0.0311VV + 0.01221VV^2 - 0.002259VV^3$	0.52
$\ln(Taire_int1) = 1.686 + 0.3956 \ln(T_{amb}) + 0.003294HR + 0.04097VV - 0.0004012RS + 0.0004985T_{amb}^2 + 0.000002637RS^2 - 0.006455 \ln(RS)$	0.68
$\ln(Taire_int2) = 1.22 + 0.3129199T_{amb} - 0.0169977T_{amb}^2 + 0.0003167T_{amb}^3$	0.49
$\ln(Taire_int2) = 1.931 + 0.172T_{amb} - 0.0082T_{amb}^2 + 0.0001482T_{amb}^3 - 0.002956HR + 0.00003237HR^2$	0.56
$\ln(Taire_int2) = 1.326 + 0.2774T_{amb} - 0.01421T_{amb}^2 + 0.0002547T_{amb}^3 - 0.00268HR + 0.00003053HR^2 + 0.01054VV + 0.005594VV^2 - 0.0009497VV^3$	0.59
$\ln(Taire_int2) = 2.317 + 0.1442 \ln(T_{amb}) + 0.002846HR + 0.01812VV - 0.0002267RS + 0.0008663T_{amb}^2 + 0.0000001502RS^2 - 0.007663 \ln(RS)$	0.73
$\ln(Taire_int3) = 1.183 + 0.313T_{amb} - 0.01664T_{amb}^2 + 0.0003044T_{amb}^3$	0.40
$\ln(Taire_int3) = 1.962 + 0.1604T_{amb} - 0.007092T_{amb}^2 + 0.0001209T_{amb}^3 - 0.003515HR + 0.00003682HR^2$	0.46
$\ln(Taire_int3) = 0.8917 + 0.3468T_{amb} - 0.01772T_{amb}^2 + 0.0003089T_{amb}^3 - 0.002991HR + 0.00003327HR^2 + 0.0164VV + 0.01087VV^2 - 0.001772VV^3$	0.52
$\ln(Taire_int3) = 2.017 + 0.2519 \ln(T_{amb}) + 0.003172HR + 0.03105VV - 0.0003251RS + 0.0007479T_{amb}^2 + 0.0000002039RS^2 - 0.006755 \ln(RS)$	0.67

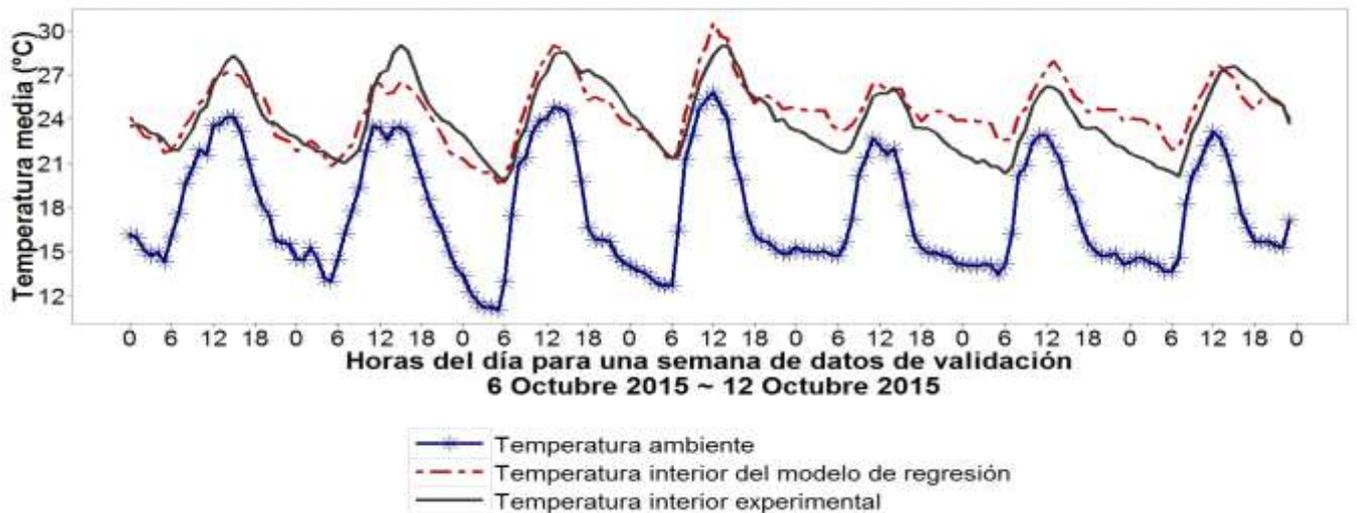


Figura 3: Validación del modelo de regresión para una semana de datos

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La temperatura al interior de una edificación está relacionada con las condiciones meteorológicas del lugar donde está emplazada. Por lo que alcanzar el confort térmico de los ocupantes dependerá de las condiciones de temperatura ambiente interior y del conocimiento de las características climáticas de la zona. Actualmente, no se puede garantizar confort térmico en los ocupantes en las edificaciones promedio principalmente por el escaso uso

de técnicas de eficiencia energética aplicadas en las construcciones. Dichas medidas deben ser evaluadas acorde al clima al ser uno de los factores de mayor influencia en la aplicación de las técnicas de eficiencia energética en viviendas, edificios residenciales o edificios de oficinas. Siendo evidente el aporte de esta investigación para el desarrollo de una metodología de estudio que puede ser replicable en diferentes tipos y usos de edificaciones y climatologías.



Mediante el análisis de datos se determinó que la temperatura ambiente es la variable de mayor incidencia en el comportamiento térmico de la edificación. En promedio la correlación con la temperatura exterior es ($R^2 = 0.41$), obtenida a través de un modelo de regresión de una sola variable. Este valor indica que el 40.7% de los datos se ajustan a dicho modelo y para este tipo de estudios se puede considerar como un modelo bastante aceptable. Los resultados muestran que se puede incrementar la correlación al emplear una regresión con múltiples variables. El coeficiente de determinación puede incrementarse al generar un modelo considerando la HR ($R^2=0.48$), la HR y RS ($R^2=0.55$) y la HR, RS y VV ($R^2=0.69$).

El mejor modelo para la predicción de la temperatura interna del aire de acuerdo a la validación de datos es aquel que depende de la ($T_{amb} + HR + VV + RS$), además, se han encontrado los rangos de radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa donde tienen menor influencia y se ubican cuando la temperatura ambiente varía entre 14-16 °C y 23-25 °C, de esta manera el modelo con todas las variables se ajusta muy bien cuando la temperatura ambiente se ubica entre este rango. Sin embargo, el modelo genera mayores errores cuando la humedad relativa oscila entre 58-74% y 96-100%, la velocidad del viento está entre 0 y 2 m/s y cuando la radiación solar es igual a cero.

Para encontrar modelos más precisos se recomienda usar funciones estabilizadoras de la varianza en la variable dependiente como el logaritmo natural en el caso de la temperatura. Además, aplicar cambios de variables adecuados de acuerdo a las gráficas de dispersión de las variables o a la forma de dispersión de residuales en los modelos, esto hará que el R^2 aumente y el modelo genere menor error. Además, aumentar el número de variables meteorológicas como la nubosidad, condensación, etc., esto se sugiere como estudio de trabajo futuro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] International Energy Agency, "Key World Energy Statistics 2015," p. 81, 2015.
- [2] International Energy Agency, "World Energy Outlook," IEA, p. 14, 2018.
- [3] N. Watts et al., "The Lancet Countdown on health and climate change: from 25 years of inaction to a global transformation for public health," *Lancet*, vol. 391, no. 10120, pp. 581–630, Feb. 2018.
- [4] T. Hong, W.-K. Chang, and H.-W. Lin, "A fresh look at weather impact on peak electricity demand and energy use of buildings using 30-year actual weather data," *Appl. Energy*, vol. 111, pp. 333–350, 2013.
- [5] C. Carpino, D. Mora, N. Arcuri, and M. De Simone, "Behavioral variables and occupancy patterns in the design and modeling of Nearly Zero Energy Buildings," *Build. Simul.*, vol. 10, no. 6, pp. 875–888, 2017.
- [6] Z. Afroz, H. Burak Gunay, and W. O'Brien, "A review of data collection and analysis requirements for certified green buildings," *Energy Build.*, vol. 226, p. 110367, 2020.
- [7] F. Apadula, A. Bassini, A. Elli, and S. Scapin, "Relationships between meteorological variables and monthly electricity demand," *Appl. Energy*, vol. 98, pp. 346–356, 2012.
- [8] E. Galindo, *Estadística, métodos y aplicaciones para administración e ingeniería*. Quito, 2008.
- [9] H. A. Quevedo Urías, *Estadística para ingeniería y ciencias*, Primera. México, 2014.
- [10] D. Jijón, J. Constante, M. Moya, and G. Guerrón, "Métodos para homogenizar y rellenar datos de viento de la torre meteorológica del Parque Eólico Villonaco en Loja-Ecuador," *Av. en Ciencias e Ing.*, vol. 7, no. 2, 2015.
- [11] F. J. Entrena González, *Determinación del potencial solar (UF0212)*, IC Editori. 2013.
- [12] S. Walter Stachú, "Identificación de la problemática mediante Pareto e Ishikawa," 2000.
- [13] S. Asadi, S. S. Amiri, and M. Mottahedi, "On the development of multi-linear regression analysis to assess energy consumption in the early stages of building design," *Energy Build.*, vol. 85, pp. 246–255, 2014.
- [14] P. Vining Montgomery, *Introducción al Análisis de Regresión Lineal*, Continenta. 2006.



Francis Vásquez Aza.- Nació en Ibarra, Ecuador en 1991. Recibió su título de Ingeniero Mecánico de la Escuela Politécnica Nacional en 2016 y su título de Master en Sistemas y Tecnologías de Conversión de Energía de la Universidad Rovira i Virgili, Tarragona-España en 2020. Sus campos de investigación están relacionados con la Eficiencia Energética en Edificaciones y las Energías Alternativas.



Carlos Naranjo Mendoza. - Nació en Quito en 1986. Recibió su título de Ingeniero Mecánico de la Escuela Politécnica Nacional en 2010; Master en Renewable Energy and Energy Efficiency en la École de technologie supérieure (ÉTS) en 2013 y su doctorado en la



Universidad De Montfort en 2020, y su campo de investigación se encuentra relacionado con la eficiencia energética, energías renovables y almacenamiento de energía.



Andrea Lobato Cordero. -

Arquitecta por la Universidad Católica de Cuenca, Ecuador; Master en Eco diseño y Eficiencia Energética en Edificaciones por la Universidad de Zaragoza, España; doctoranda del programa "Energy Systems Planning" en la Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) Campinas, Brasil. Sus áreas de actuación están relacionadas con la Sostenibilidad, Habitabilidad y Condiciones de Salud en Espacios Interiores, Estrategias Bioclimáticas, Eficiencia Energética en Residencias, Comportamiento Térmico de Materiales de Construcción.