



¿QUÉ CARACTERÍSTICAS SE REQUIEREN PARA QUE UN EDIFICIO SEA CERO ENERGÍA NETA CON UN COSTO MÍNIMO DE CICLO DE VIDA EN LA REGIÓN DE CENTROAMÉRICA Y EL CARIBE?

F. A. Hernández, I. A. Lemus, F. E. Solano, L. A. Martínez

¹Departamento de Ciencias Energéticas y Fluidicas, UCA, San Salvador, El Salvador
Teléfono (503)2210-6600 E-mail: lamartinez@uca.edu.sv

Resumen — Un edificio cero energía neta es una construcción que combina eficiencia energética en todas sus áreas con el uso de energías renovables, logrando un autoabastecimiento energético neto contabilizado anualmente. En Centroamérica y el Caribe se cuenta, en teoría, con condiciones climáticas que facilitarían la implementación de estas construcciones. Dichas condiciones incluyen una alta incidencia solar y climas tropicales moderados en ciertas regiones. El presente trabajo busca demostrar la factibilidad de construcción de este tipo de edificios dentro de la región, por medio de simulaciones energéticas y optimización del costo de ciclo de vida. Se tomó como base un prototipo experimental ya construido en la UCA con el fin de estudiar qué combinación de parámetros permitiría lograr el balance de cero energía neta anual en diez ubicaciones en la región de Centroamérica y El Caribe, así como el óptimo económico para cada ubicación. Se encontró que el prototipo existente está muy cercano al óptimo económico y que únicamente se requieren pequeñas modificaciones para ajustar dicho óptimo en las ubicaciones investigadas. Los resultados presentados pueden informar la formulación de políticas de construcción sostenible y la actualización de códigos de construcción en la región.

Palabras Clave – cero energía neta, costo de ciclo de vida, simulación

I. INTRODUCCIÓN

Hay un creciente interés, en muchos sectores a nivel mundial, de eliminar o reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero ocasionadas por el hombre [1]. Se afirma que las consecuencias de la inacción en esta área serían catastróficas [2]. La llamada descarbonización de la economía implica adoptar cambios en tecnologías de los sectores con mayor incidencia en emisiones contaminantes. El sector de edificios forma parte de los sectores de interés y la apuesta es transformar la operación de los mismos hacia cero energía neta. Un Edificio de Cero Energía Neta (NZEB, por sus siglas en inglés), es un edificio con un consumo energético operacional altamente reducido donde se han implementado medidas de eficiencia energética que permiten que el consumo pueda suplirse mediante el uso de fuentes renovables [3]. Aunque el interés en este concepto es creciente, su implementación es incipiente por diversas razones: insuficiente información, limitados proyectos piloto y la incertidumbre sobre los costos asociados.

La presente investigación se conceptualiza como la continuación del trabajo realizado por *Cerritos y Sánchez* [4], que a su vez se fundamenta en la propuesta presentada por *Martínez, L., Romero, C., Castellanos, F., Chávez, M., Flores, C., Rodríguez, L., Cisneros, C. Y Ariza, I* [5], la cual en conjunto con trabajos previos [6,7,8] buscan sentar las bases para la implementación de las edificaciones de cero energía en la región de Centroamérica y el Caribe, aprovechando las condiciones climáticas y de irradiancia solar con las que cuenta. La UCA desarrolló un proyecto prototipo de edificio cero energía neta experimental en su campus, el cual ha sido tomado como la base para el estudio. El objetivo es el de estudiar paramétricamente qué se requiere en diez ubicaciones en la región para lograr un edificio cero energía neta. Además, interesa determinar el óptimo desde la perspectiva del costo de ciclo de vida, a modo de iniciar una discusión sobre nuevos códigos de construcción que incentiven este tipo de edificaciones.

II. METODOLOGÍA

Para alcanzar el objetivo buscado, se optó por una metodología de simulación numérica, empleando programas comerciales, combinado con una parametrización y optimización utilizando herramientas disponibles de código abierto. Se consideró como función objetivo el costo de ciclo de vida (LCC, por sus siglas en inglés), definido como la suma en valor presente del costo de construcción y costo de operación durante la vida útil del edificio. Se seleccionó un grupo de ciudades de la región de Centroamérica y el Caribe para el estudio, analizando los resultados en busca de generalizaciones sobre el diseño óptimo.

Al tener los planos del laboratorio construido en la Universidad José Simeón Cañas se hizo un modelado en el programa de simulación energética Design Builder, tratando de recrearlo de la manera más exacta posible. El modelo creado genera un archivo IDF el cual describe todas las características que posee el edificio en líneas de código.

Al trabajar con Design Builder se tiene la ventaja que no hay transición entre programas, evitando que se pierdan detalles o se alteren algunas especificaciones del modelo.

El modelo base, que es el construido en la UCA, ya posee características que afectan el consumo energético del edificio, la idea no es simplemente ver como funcionarían el edificio con las mismas características en diferentes



ciudades sino que, poder generar un modelo optimizado que funcione de manera eficiente de acuerdo a cada ciudad, y encontrar las características similares entre estos modelos optimizados para generalizar las características necesarias o mínimas para un NZEB dentro de las zonas climáticas de Centroamérica y el Caribe.

A. Design Builder

Se modela el edificio NZEB UCA por medio de bloques para cada área del edificio, especificando los parámetros de cada segmento y especificando los principales factores que inciden en el desempeño energético del edificio. Se realizan cuatro simulaciones para cada ciudad con un giro de 90 grados como lo establece ASHRAE 90.1-2016 [9] obteniendo los siguientes resultados para el consumo energético anual.

Ubicación	Total (kWh)
Ciudad de Guatemala	10,759
Ciudad San José, Costa Rica	11,531
Ciudad La Habana, Cuba	12,767
Ciudad de Ilopango, El Salvador	13,259
Ciudad de San Juan, Puerto Rico	13,553
Ciudad de Managua, Nicaragua	13,774
Ciudad de Panama	13,836
Ciudad de Belice	13,952
Ciudad San Pedro Sula, Honduras	14,139
Ciudad de Acajutla	14,416

Se observa que la Ciudad de Guatemala tiene el menor consumo energético global, la Ciudad de Costa Rica el segundo con un consumo mayor del 7.2% con respecto al primero. La diferencia es causada por la zona climática de la Ciudad de Guatemala, con temperaturas más bajas con respecto a los demás países; esto beneficia a un ahorro energético en el sistema de aire acondicionado.

B. Estudio paramétrico

A diferencia de *Cerritos y Sánchez [4]*, las simulaciones se realizaron en jEPlus+EA, al igual que con jEPlus. Para el estudio paramétrico se utiliza jEPlus, este simula todas las combinaciones posibles de los parámetros introducidos sin seleccionar cuáles son los que cumplen con los requerimientos del estudio [10,11].

El software jEPlus+EA, trabaja por medio de un algoritmo genético [12, 13] el cual combina de forma aleatoria los parámetros a estudiar y somete a evaluación todas estas combinaciones, seleccionando como casos óptimos aquellas combinaciones que mejor cumplen con los criterios establecidos: mínimo consumo energético y costo de ciclo de vida para el presente estudio. De todos estos casos se selecciona solamente uno; el criterio de selección queda a discreción del investigador, y es el que se presenta como propuesta de optimización. Sin embargo, es

importante estudiar todos los casos a fin de encontrar, o diferenciar, las características comunes entre ellos e intentar generalizar qué es lo que los categoriza como óptimos.

Para crear el árbol paramétrico que rige el estudio, *Cerritos y Sánchez [4]* estudiaron cuáles características del edificio se pueden utilizar y la información necesaria para poder crear los intervalos de evaluación.

Para el presente caso se trabajó con seis parámetros, los cuales fueron: el espesor de espuma de poliuretano en paredes, espesor de espuma de poliuretano en techo, orientación del edificio con respecto al eje norte, control de iluminación, el tipo de acristalamiento y la eficiencia de los equipos de aire acondicionado. Para cada uno de estos parámetros se recolectó información de conductividad térmica, costo monetario, espesores, entre otros. En la Fig. 1 se muestran los parámetros con los que se trabajó el proceso de optimización en las ciudades estudiadas.

Además, se calculó el número mínimo de paneles solares que garantizan la condición de cero energía (net zero energy). Para este cálculo no se utilizó jEPlus+EA, ya que el software no permite trabajar con el número de paneles como parte del proceso de optimización.

La generación solar para cada ciudad fue obtenida a través del software libre PV WATTS.

Para calcular y optimizar el costo de ciclo de vida de cada caso, fue necesario caracterizar la variación en el costo de cada variable. Además, el modelo propuesto óptimo fue escogido tomando un valor intermedio de consumo energético y de su valor de costo de ciclo de vida. Para encontrar el costo de ciclo de vida de un edificio se debe de conocer la inversión inicial a realizar y el costo en energía eléctrica que consumirá el mismo. En nuestro caso la inversión inicial está conformada por dos valores, el primero consiste en un costo fijo de materiales y mano de obra donde no se encuentran implicados los parámetros del estudio paramétrico, y el segundo son los costos variables que lo conforman la suma de los parámetros elegidos en cada combinación realizada.

Para el costo de energía eléctrica se tomo como base el pliego tarifario para El Salvador de la distribuidora DELSUR, donde este costo se encuentra multiplicando el consumo eléctrico del edificio por el costo de consumo y el total es sumado con el costo de distribución. Para evitar introducir variables de diferencias en costo en cada localidad, se optó por utilizar el mismo costo de energía en todas las ubicaciones y enfocar el análisis en las características técnicas resultantes.

C. Ciudades de estudio

El edificio actualmente se encuentra operando en El Salvador por lo que se decidió trabajar primero con dos ciudades de este país que fueron Ilopango y Acajutla. Posteriormente se escogió la ciudad que contara con el archivo climático de su aeropuerto principal, estos son los archivos EPW y pueden adquirirse en sitios web [14]. Para cada una de estas ciudades se obtuvo por medio de Design



Builder su consumo energético con las características del NZEB UCA y su modelo optimizado en jEPlus+EA con su respectivo consumo energético y LCC.

La finalidad de tener ambos modelos es poder comparar tanto en costo como en consumo y ver el impacto que puede tener cada parámetro en el comportamiento del edificio y predecir qué tipo de parámetros se pueden trabajar en nuestra zona climática tropical.

Las ciudades seleccionadas con su respectiva zona climática según la norma ASHRAE 90.1-2016 se muestran en Tabla 1.

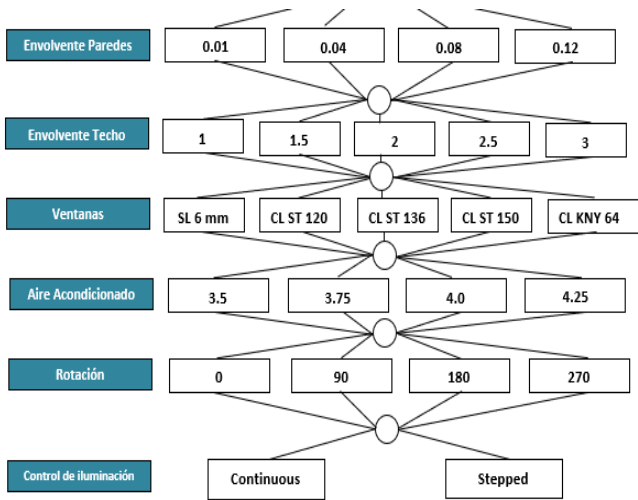


Fig. 1. Árbol paramétrico utilizado para la optimización

Tabla 1 Ciudades seleccionadas de C.A y el Caribe

Zona Climática	Ciudad
1A	Ilopango
2A	Acajutla
	Ciudad de Belice
	San Pedro Sula
	Managua
	San José
	Ciudad de Panamá
	San Juan
3A	La Habana
	Ciudad de Guatemala

III. RESULTADOS

Para cada ciudad estudiada se obtuvieron entre 10 a 28 modelos optimizados, de los cuales se seleccionó solo uno para poder ser evaluado y comparado con su respectivo modelo base. Al seleccionar los modelos propuestos optimizados se obtuvo que la mayoría de localidades necesitan entre 25 a 27 paneles solares para poder

catalogarse como cero energía neta, sólo Guatemala necesita 22 paneles debido a que su clima es un poco más frío a comparación de los demás. Por este mismo motivo se puede observar que dicha localidad presenta un menor consumo energético anual.

En la Fig. 2 y Fig. 3 podemos observar que Ciudad de Guatemala es el que posee un menor consumo energético seguido por San José. En cada caso se pudo obtener excedente de generación solar, por lo tanto, el balance energético anual sería positivo por lo que sí se obtendría un edificio NZEB.

También interesa conocer los porcentajes de mejora entre el modelo optimizado y el modelo base por lo que en Tabla 2 se muestra la comparación obtenida para el consumo energético y el costo de ciclo de vida. Cabe destacar que para el costo de ciclo de vida se consideró un periodo de 30 años y una tasa nominal de descuento del 5%, y que el costo de energía se tomó del pliego tarifario para El Salvador en todos los casos estudiados.

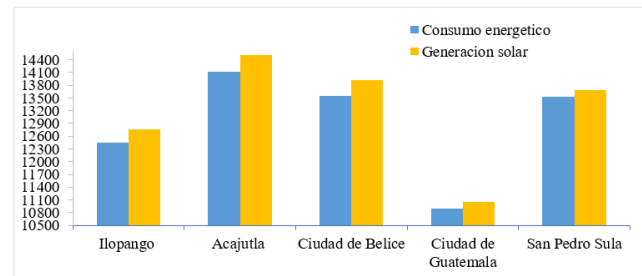


Fig. 2 Balance energético de modelos propuestos

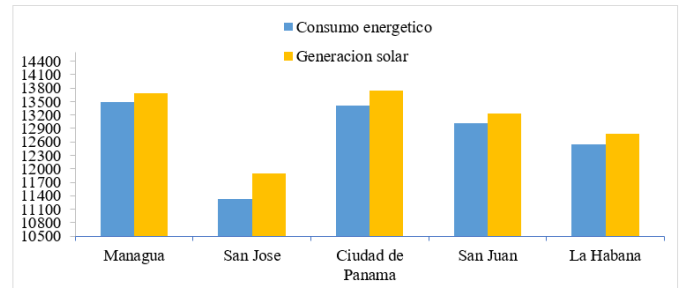


Fig. 3 Balance energético de modelos propuestos

Tabla 2. Ahorro consumo energético y LCC para cada ciudad de estudio, con respecto a su modelo base

Ciudad	Ahorro consumo energético	Ahorro LCC
Ilopango	6.21%	4.97%
Acajutla	2.07%	4.99%
Ciudad de Belice	3.00%	4.07%
Ciudad de Guatemala	-1.00%	5.00%
San Pedro Sula	4.20%	2.90%
Managua	2.50%	4.05%
San José	-2.00%	5.70%
Ciudad de Panamá	-3.00%	4.16%
San Juan	4.00%	5.27%
La Habana	9.81%	5.63%

Además de determinar el balance energético para cada caso óptimo, es de interés conocer si hay alguna similitud en las características, o parámetros, que determinan estos casos. La tabla 3 muestra cuáles fueron los parámetros de mayor recurrencia dentro de la totalidad de casos óptimos, y el número de veces que aparecen. Se obtuvieron varios casos óptimos de las simulaciones realizadas en el software donde nos permite encontrar cual es el patrón de repetición de un parámetro cada una de las ciudades evaluadas. En las figuras 4 y 5 se observa de forma porcentual la recurrencia de estos parámetros comunes.

Tabla 3. Parámetros con mayor recurrencia

Acrilamiento (Verde SL 6 mm)	158
Espesor aislante en paredes (0.04 m)	80
Espesor aislante en techo (0.0294 m)	108
Eficiencia COP (4.25)	138

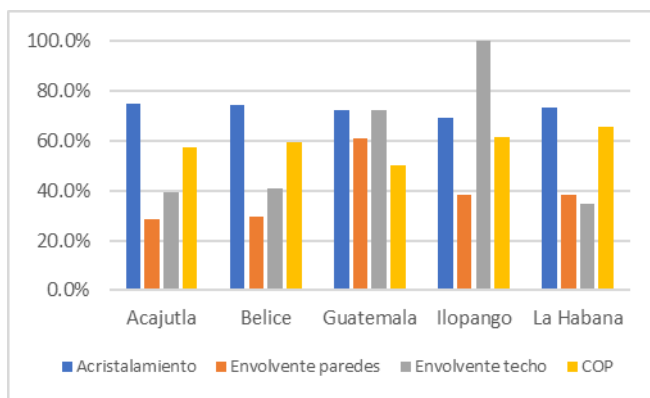


Fig. 4 Parámetros recurrentes por ciudad para casos óptimos

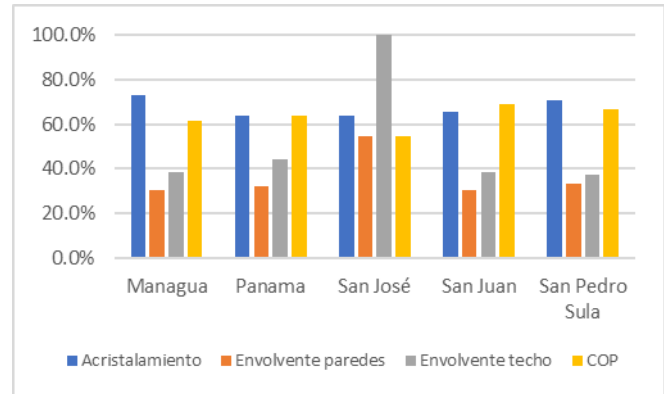


Fig. 5 Parámetros recurrentes por ciudad para casos óptimos

IV. DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se muestran los resultados del ahorro del consumo energético y LCC respectivos para cada ciudad, se puede observar que no en todas las ciudades se tiene un ahorro energético con respecto al modelo base. Dicha situación se presenta cuando el modelo optimizado es menos eficiente que el modelo base, pero tiene un costo menor en su ciclo de vida. En otras palabras, la inversión adicional en hacer más eficiente el modelo no logra recuperarse con el ahorro adicional. Además, en las simulaciones el consumo energético era calculado en base a su orientación en el eje norte, pero a la hora de hacer la comparación entre ambos modelos se utilizó el promedio de las cuatro ubicaciones que puede tener el edificio ocasionando un impacto en el aumento del consumo energético.

Las figuras 4 y 5 permiten observar que hay muy poca variación dentro de la combinación de parámetros que determinan un consumo óptimo de energía. El tipo de ventana Verde SL 6 mm y los equipos de aire acondicionado con COP de 4.25 componen más de la mitad de casos óptimos, el espesor de los aislamientos para pared y techo no alcanza porcentajes tan altos, pero igualmente los valores de 0.04 m para pared y 0.0294 m para el techo aparecen en una porción significativa de los casos. Esto nos dice que, al plantearse un nuevo caso de diseño, es altamente probable que estos parámetros permitan un consumo reducido a un costo accesible.

Podría decirse que estos parámetros determinan algunas de las características que conforman un posible NZEB tropical, un edificio diseñado y optimizado para garantizar la condición de cero energía dentro de la zona climática de Centroamérica y el Caribe. Las características que determinarían este edificio, basándose en las evaluadas para este trabajo, serían las contenidas en la tabla 4.



Tabla 4. Características del NZEB Tropical

Características de la envolvente	Valores
Tipo de aislante	Poliuretano
Espesor de aislamiento en paredes	Entre 4 y 8 cm
Conductividad del aislante	0.028 W/m K
Espesor de aislamiento en techo	Entre 1.5 y 2 pulgadas
Conductividad en techo	Entre 0.009-0.011 W/m K
Conductividad de ventanas	Entre 0.027-0.034 W/m K
SHGC de ventanas	0.25-0.31
LT de ventanas	0.24-0.35
Tipo de equipo	VRF
COP	Iguales o mayores a 4
Control de iluminación	Continuo
Tipo de energía renovable	SFV

V. CONCLUSIONES

En las comparaciones del modelo propuesto con el modelo NZEB para las distintas ciudades de estudio, se trabajó con la normativa ASHRAE 90.1-2016 que indica que deben de promediarse los consumos energéticos para cada orientación del edificio. Esto afecta el resultado original, generalmente aumentando el valor el obtenido con el software por lo que, en ciertos casos el modelo propuesto consume más que el modelo NZEB. Sin embargo, esto no significa que el modelo propuesto sea menos eficiente. Se optó trabajar con promedios para evitar que, al evaluar el edificio, los datos medidos difirieran en gran cantidad con respecto a los datos obtenidos en jEPlus+EA. También, se debe de tomar en cuenta que las simulaciones se vieron limitadas debido a la capacidad de los equipos con los que simuló.

Se concluye que la edificación construida en la UCA es un edificio cero energía neta cercano al óptimo económico y puede ser tomado como una referencia para este tipo de edificación en la región de Centroamérica y el Caribe.

Se observa que, para la mayoría de las ubicaciones estudiadas, los parámetros que determinan la propuesta del caso óptimo se repiten o varían muy poco. Esto indica que es posible hablar sobre un modelo base o específico para la región, un NZEB tropical podría decirse. Este sería un primer paso en la estandarización de la construcción de este tipo de edificaciones. Las características del mismo fueron presentadas en la Tabla 4. Debe entenderse que los resultados no son estáticos, pues se han usado valores actuales de precios de materiales y equipos y el costo de la energía, todos ellos sujetos a variaciones. Incluso considerando dichas variaciones, es de esperar que con el paso del tiempo dichos precios tiendan a la baja, haciendo más viable el concepto. Posibles incrementos en el costo de la energía también viabilizarían los NZEB.

Dado que las características óptimas son similares en las ubicaciones estudiadas, sería posible impulsar políticas regionales que incentiven que las nuevas construcciones sean cero energía neta.

AGRADECIMIENTOS

F. H., I. L., F.S., agradecemos al Dr. Luis Aaron Martínez, por su paciencia, tiempo y apoyo, además de agradecer a los Ingenieros Mario Chávez, Carlos Mario, Max Barillas, Herberth Cerritos, Edwin Sánchez, por encaminarnos durante este proceso.

REFERENCIAS

- [1] IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.
- [2] Rogelj, J., D. Shindell, K. Jiang, S. Fifita, P. Forster, V. Ginzburg, C. Handa, H. Khesghi, S. Kobayashi, E. Kriegler, L. Mundaca, R. Séférian, and M.V. Vilariño, 2018: Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.
- [3] Sartori, I., Napolitano, A., Marszal, A. J., Pless, S., Torcellini, P., & Voss, K. (2010, September). Criteria for definition of net zero energy buildings. In International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings (EuroSun 2010).
- [4] H. Cerritos y E. Sánchez. (2019). Determinar la viabilidad técnico-económica de los NZEB de la región centroamericana y el caribe. Evaluación preliminar del laboratorio prototipo NZEB en la UCA. Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", Antiguo Cuscatlán, La Libertad, El Salvador.
- [5] Martínez, L., Romero, C., Castellanos, F., Chávez, M., Flores, C., Rodríguez, L., Cisneros, C. Y Ariza, I. (2018). Energy Simulation of Proposed Net Zero Energy Laboratory Building in Central America. Congreso CONCAPAN
- [6] I. Ariza y A. Velásquez. (2017). Integración de metodologías y herramientas de simulación a procesos de diseño interdisciplinar para desarrollar edificaciones de cero energía neta. Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", Antiguo Cuscatlán, La Libertad, El Salvador.
- [7] F. Castellanos y C. Romero. (2018). Revisión, implementación práctica y optimización de metodologías de simulación con enfoque interdisciplinar para el diseño de edificios de cero energía neta. Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", Antiguo Cuscatlán, La Libertad, El Salvador.
- [8] F. Hernández, I. Lemus y F. Solano. (2019). Medición y optimización de un edificio cero energía neta en un contexto regional. Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", Antiguo Cuscatlán, La Libertad, El Salvador.
- [9] ASHRAE, ASHRAE Standard. "Standard 90.1-2013, Energy standard for buildings except low rise residential buildings." American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc (2013).



- [10] Y. Zhang (2012). Use jEPlus as an efficient building design optimization tool. CIBSE ASHRAE Technical Symposium, Imperial College, London UK.
- [11] <https://www.jeplus.org/>
- [12] Y. Zhang y I. Korolija (2010). Performing complex parametric simulations with jEPlus. *9th International Conference on Sustainable Energy Technologies*. Shanghai, China.
- [13] E. Naboni, A. Maccarini, I. Korolija y Y. Zhang (2013). Comparison of conventional, parametric and evolutionary optimization approaches for the architectural design of nearly zero energy BUILDINGS. *13th Conference of International Building Performance Simulation Association*. Chambéry, France
- [14] https://energyplus.net/weather-region/north_and_central_america_wmo_region_4/PRI%20%20