

# OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y EL CONFORT TÉRMICO EN EDIFICIOS DE OFICINA PÚBLICOS. PERIODO CRÍTICO DE VERANO EN LA CIUDAD DE SAN JUAN, ARGENTINA<sup>1</sup>

Recibido 28/02/2022  
Aceptado 17/06/2022

MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF ENERGY EFFICIENCY AND THERMAL COMFORT IN PUBLIC OFFICE BUILDINGS. CRITICAL SUMMER PERIOD IN THE CITY OF SAN JUAN -ARGENTINA

## **Bruno Damián Arballo**

Doctor en Arquitectura, Docente y Becario Postdoctoral CONICET, Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat, Facultad de Arquitectura Urbanismo y Diseño, Universidad Nacional de San Juan. San Juan, Argentina  
<https://orcid.org/0000-0002-6121-549X>  
arballobruno@gmail.com

## **Ernesto Kuchen**

Doctor en Arquitectura, Docente Investigador CONICET, Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat, Facultad de Arquitectura Urbanismo y Diseño, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina  
<https://orcid.org/0000-0001-6649-6932>  
ernestokuchen@faud.unsj.edu.ar

## **Daniel Chuk**

Doctor en Ingeniería, Docente Investigador, Instituto de Investigaciones Mineras, Universidad Nacional de San Juan San Juan, Argentina  
<https://orcid.org/0000-0003-3171-9571>  
dchuk@unsj.edu.ar

<sup>1</sup> Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). A la Universidad Nacional de San Juan.

## RESUMEN

El 40% de la demanda mundial de energía y de emisiones de CO<sub>2</sub> proviene de las edificaciones. En Argentina, los edificios son también responsables del 40% del consumo total anual de energía. El problema radica en el desequilibrio provocado entre la necesidad de proveer de una elevada calidad de vida y confort a los espacios de oficina y el costo de energía requerido para acudir a tal propósito. Tanto un alto nivel de confort como el ahorro energético representan dos objetivos a alcanzar. En ese sentido, este artículo propone una nueva metodología que combina la medición *in situ* con herramientas de simulación matemática. Se incorporan técnicas y modelos innovadores para la elaboración de la herramienta aplicando una optimización multiobjetivo termo-energética, que opera dinámicamente durante el horario laboral. Los resultados muestran un importante ahorro en el consumo energético para refrigeración de espacios de oficinas en verano (del 57,5% al 83,3%), junto con un aumento en la calidad del confort térmico de entre el 4,7% y el 29,4%.

### Palabras clave

optimización en edificios, ahorro energético, confort interior

## ABSTRACT

Buildings represent 40% of the world's energy demand and CO<sub>2</sub> emissions. In Argentina, buildings are responsible for 40% of the total annual energy consumption. The problem lies in an imbalance between the need to provide a high quality of life and comfort in office spaces, and the high energy cost required to meet that goal. Both a high comfort level and energy savings represent two objectives to be achieved. In this sense, this paper proposes a new methodology that combines onsite measurement with mathematical simulation tools. Innovative techniques and models are incorporated to make the tool, applying thermal-energy multi-objective optimization, which operates dynamically during working hours. The results show significant savings in energy consumption regarding cooling office spaces in the summer, from 57.5% to 83.3%, together with an increase in the thermal comfort quality, with improvements between 4.7% and 29.4%.

### Keywords

Building optimization, Energy savings, indoor comfort

## INTRODUCCIÓN

A nivel mundial las edificaciones representan alrededor del 40% del uso de energía, constituyéndose naturalmente en potenciales escenarios de ahorro de energía y emisiones (Li, L. Zhang, Zhang y Wu, 2021; Abdou, Mghouchi, Hamdaoui, Asri y Mouqallid, 2021). El ser humano moderno pasa la mayor parte de su tiempo en ambientes interiores, de un 80% a un 90% de dicho tiempo (van Hoof, Mazej y Hensen, 2010). Múltiples investigaciones han validado al confort térmico como una de las variables que mayormente afectan al confort en espacios interiores y, en particular, respecto a la eficiencia energética de los edificios (Nguyen, Reiter y Rigo, 2014). Diversos estudios internacionales legitiman la perspectiva de confort térmico adaptativo como estrategia de ahorro de energía fundamental en edificios (Li et al., 2021; Sánchez-García, Rubio-Bellido, Marrero-Meléndez, Guevara-García y Canivell, 2017; Chandel, Sharma y Marwah, 2016), la cual lleva a ahorros en el rango del 30 al 60%, sobre todo cuando se tiene en cuenta la evolución del clima exterior.

A nivel local, análisis desarrollados en el proyecto PICT2009-0014 Res.N°304/2010, "EEC, Eficiencia Energética y Confort en Espacios de Trabajo" y estudios doctorales (Arballo, 2020), en la ciudad de San Juan Argentina, fundamentan la disconformidad térmica de los habitantes frente a su ambiente laboral y el potencial de la optimización multiobjetivo para mejorar la eficiencia energética y lograr importantes ahorros.

Es de especial relevancia considerar la adaptabilidad de los habitantes y las variables climáticas del sitio en tiempo real, principalmente la temperatura exterior ( $t_e$ ), a fin de delimitar rangos de aceptación (ver Boerstra, van Hoof y van Weele, 2015). Esta base de datos habilita la definición de perfiles térmicos variables, necesarios para la construcción de modelos para el control de la temperatura interior de *setpoint* ( $Sp$ ) (Rupp, Kim, de Dear y Ghisi, 2018; Rupp, Vásquez y Lamberts, 2015).

En este contexto, es necesaria una optimización del funcionamiento del edificio (EnBop, 2008) y el desarrollo de una optimización multiobjetivo en tiempo real entre eficiencia energética y confort térmico de los habitantes. Estas variables se encuentran en conflicto, dado que un ahorro significativo de energía en el sistema energético de climatización puede resultar en condiciones interiores de disconformidad térmica para los habitantes. A su vez, el consumo energético de los edificios depende significativamente de las demandas del ambiente interior, el que afecta a la salud, al rendimiento y al confort (Bliuc, Rotberg y Dumitrescu, 2007). Los algoritmos genéticos "MOGA" (Multiobjective Genetic Algorithm) y algoritmos de optimización de partículas "PSO" (Particle Swarm Optimization) son los más utilizados para la optimización de la performance energética y del confort en edificios (Nguyen et al., 2014), debido a sus características favorables y su amplio grado de aplicabilidad (Chambers,

2000). La teoría matemática de los algoritmos genéticos o "MOGA" es presentada en Coello, van Veldhuizen y Lamont (2002) y sus aplicaciones a la optimización de sistemas HVAC, en Lu, Cai, Xie, Li y Soh (2005) y en Atthajariyakul y Leephakpreeda (2005), entre otros. Los algoritmos genéticos resultan ser muy útiles cuando se trata de buscar una solución óptima de preferencia dentro de un conjunto de posibles soluciones en situaciones estáticas (Stanislav, 2003); sin embargo, presentan dificultades para definir posibles soluciones para el control dinámico debido a la aleatoriedad que caracterizan sus operaciones. En la región del Litoral Argentino, el Centro de Investigación de Métodos Computacionales (CONICET-UNL), aplica algoritmos genéticos (NSGA-II) aplicando simulación (Building Energy Simulation) a la reducción del consumo de energía (Bre y Fachinotti, 2017), como también combinando algoritmos genéticos con metamodelos de redes neuronales (Artificial Neural Network Metamodels) (Bre, Roman y Fachinotti, 2020).

Otros algoritmos menos usados y poco probados, pero que demuestran muy buenos resultados en situaciones dinámicas (Y. Yuan, J. Yuan, Du y Li, 2012), son los algoritmos heurísticos de optimización de colonia de hormigas "MOACO" (Multiobjective Ant Colony Optimization). Uno de la clase es el algoritmo "MIDACO" (Mixed Integer Distributed Ant Colony Optimization), usado para calcular trayectorias de vuelos espaciales (Schlueter, Wahib y Munetomo, 2021). En el presente trabajo de investigación MIDACO es aplicado por primera vez al ámbito de la arquitectura.

## METODOLOGÍA

### MEDICIONES DE CONFORT *IN SITU* Y SIMULACIÓN MATEMÁTICA

La metodología de medición consiste en conducir un procedimiento sistemático de recolección de datos. Para la medición del confort térmico *in situ* se utiliza un sensor de temperatura y humedad HOB0 tipo U12-006 (temperatura interior) anclado a un dispositivo móvil de medición que se desplaza en el interior del edificio (Arballo, 2020). Al momento de la medición, en cada espacio de oficina, el sensor móvil se ubica a  $0,90 \pm 0,20$  m sobre el nivel del piso y a un radio no mayor a un metro del lugar de trabajo del habitante evaluado, lo que posibilita captar las condiciones ambientales percibidas por el mismo. Esta medición aporta los datos objetivos de confort térmico. Un sensor fijo exterior en azotea tipo UA-001-64 permite tomar registro de la temperatura exterior. La temperatura operativa se considera como un promedio de la temperatura del aire y la temperatura radiante media ( $t_{op} = \frac{t_a + t_{rm}}{2}$ ) (ISO 7730, 2005), tomando en cuenta que la velocidad del aire se mantiene menor a 0,2m/s y la diferencia entre temperatura del aire y la temperatura radiante media es menor que 4K (kelvin).

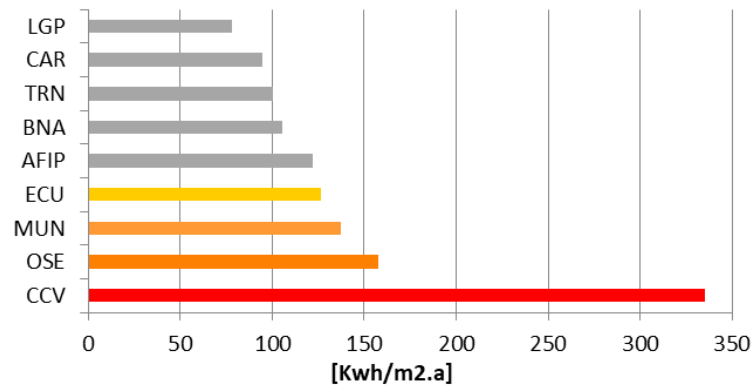


Figura 1. Consumos anuales de energía eléctrica en (KWh/m2.a) más destacados de edificios de oficina en el eje cívico intranillo de la ciudad de San Juan, Argentina. Fuente: EPRE (2017).

	I	II	III		IV
			A	B	
Nombre	CCV	OSE	MUN		ECU
Orientación	E-O	N-S	N-S	E-O	N-S
Superficie (m2)	80873	2455	4920		5320
Consumo Energético (Kwh/m2a)	335	158	137		126
Encuestas	885	84	86	49	121

Tabla 1. Información relevante casos de estudio. Fuente: Arballo (2020, p. 48).

En paralelo a la medición con sensores, se desarrolla una encuesta de confort, que brinda la información subjetiva del habitante en relación a su espacio de trabajo. De la encuesta se obtiene la información sobre el voto de confort (CV), a partir de una escala de 7 puntos (ASHRAE Standard 55, 2004). También se obtienen datos sobre el nivel de actividad (MET) y la vestimenta (CLO), basados en la norma ISO 7730. La medición se realiza de lunes a viernes de 8:00 a 13:30 h en las semanas que presentan condiciones climáticas.

## CASOS DE ESTUDIO

Los cuatro casos de estudio seleccionados (Figuras 1 y 2) representan el mayor porcentaje de consumo anual de energía eléctrica (Ente Provincial Regulador de Energía [EPRE], 2017). Se ubican en la ciudad de San Juan, Argentina (zona bioambiental IIIa, según la norma IRAM 11603, 2012), en una altitud de 630 metros, una de latitud 31,6° Sur y una longitud de 68,5° Oeste. Poseen clima templado cálido seco, con temperatura exterior media anual de 17,2°C, humedad relativa media de 53%, elevada radiación solar anual de 2239.64 kW/m<sup>2</sup>, 3300 horas de sol/año, amplitud térmica anual y diaria elevada >14K (Kelvin) y vientos del sector sud-este.

En función a los parámetros enunciados, la selección significativa de los casos de estudio se corresponde a los siguientes edificios (Tabla 1): I. Centro Cívico (CCV); II. Obras Sanitarias Sociedad del Estado (OSE); III. Edificio Central de la Universidad Nacional de San Juan (ECU) y IV. Municipalidad de la Capital (MUN).

Los edificios cuentan con equipo de climatización central, salvo el edificio MUN que se climatiza con equipos de aire acondicionado tipo "split" individuales. Todos cuentan con sistema de parasoles.

El edificio CCV concentra el mayor porcentaje de trabajadores de la administración pública de la provincia de San Juan, alrededor de unos 4000 trabajadores y un promedio de 2000 personas que visitan el edificio cada día laborable. Se trata de una arquitectura sistémica, organizada sobre la base de una célula modulada. La estructura del edificio está conformada por pórticos de hormigón armado. La escala del edificio sobrepasa la de la ciudad y sus características son las propias de las escuelas de arquitectura de la década del 60. Los edificios OSE y ECU incorporaron criterios de diseño bioclimático en la etapa de proyecto, tales como parasoles, reducido porcentaje de ventanas y mampuestos de 30 cm hacia el norte y oeste.

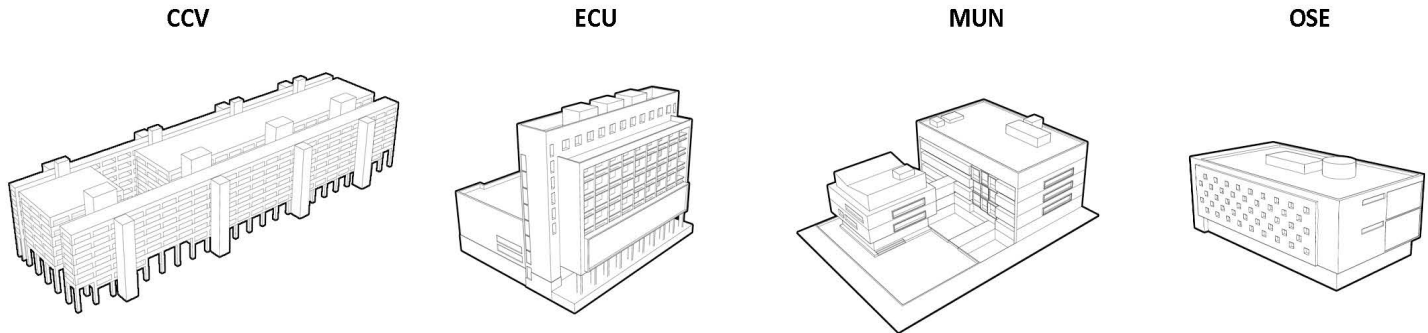


Figura 2. Esquema 3d de cada edificio. Fuente: Arballo (2020, p. 62).

## OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO

Resolver el presente problema de optimización multiobjetivo entre eficiencia energética y confort térmico implica seleccionar la mejor decisión entre un conjunto de elementos. En matemáticas, la optimización está relacionada con el proceso de obtener el máximo o mínimo de una o más funciones de evaluación de un sistema, en cuyos casos se habla de optimización de un solo objetivo, o mono-objetivo, y de optimización multiobjetivo. En este último caso existen una serie de funciones de evaluación que compiten entre sí, por lo que no puede hablarse de un valor óptimo único de solución sino de un conjunto de valores que satisfacen en mayor grado a uno u otro objetivo. Dicho conjunto de soluciones se puede encontrar empleando el Criterio de Optimalidad de Pareto (Coello et al., 2002).

A partir de los datos reales basados en las mediciones, se procede a diseñar las funciones objetivo. Las matrices de datos y los funcionales matemáticos de las distintas variables son cargados en el programa de simulación MATLAB. La implementación del algoritmo de optimización multiobjetivo MIDACO permite advertir el espectro de soluciones posibles (Conjunto Óptimo de Pareto) a las que se le aplica una selección de preferencia a fin de alcanzar el óptimo definitivo. Generalmente, se prefiere la solución por "norma 2" o vector ideal al punto de utopía.

La evaluación cuantitativa y cualitativa de los resultados obtenidos conduce a la definición de propuestas de eficiencia energética que implican un mejoramiento en la calidad de vida de los habitantes (salud y rendimiento). La determinación del grado de aplicabilidad de las propuestas de optimización logradas gracias a esta metodología, para cubrir demandas energéticas y térmicas, se realiza mediante un análisis cualitativo.

Esta optimización multiobjetivo se lleva a cabo en un espacio tipo/promedio de cada edificio en el periodo más relevante para la demanda de energía por climatización en el año: verano. A través de la aplicación de la herramienta

de optimización desarrollada se busca disminuir la demanda energética de cada edificio mejorando los niveles de confort encontrados. El valor de confort térmico se expresa como Disc (% de disconformes). La variable Disc se obtiene del modelo de confort térmico adoptado (Kuchen, 2008). La variable demanda energética En se marca en las figuras con líneas punteadas sobre el eje (x).

## DEFINICIÓN DEL PROBLEMA MULTI OBJETIVO Y FUNCIONES OBJETIVO

Llegado este punto, se procede a definir las variables fundamentales que afectan a la toma de decisiones sobre las funciones objetivo o de evaluación en el transcurso de operación dinámica del sistema de optimización multiobjetivo.

El esquema de optimización supone que hay dos tipos de ventilación, ambos excluyentes entre sí:

- Sin renovación de aire:** Un ventilador de techo o en cielorraso que es capaz de mover el aire de todo el ambiente a velocidad  $v_a$ , sin que entre aire del exterior. Si el AA está apagado, la única influencia es  $t_e$ .
- Con renovación de aire:** Una ventilación cruzada conformada por dos ventiladores ubicados dentro de pasantes en paredes exteriores: Uno en un extremo del ambiente que insufla aire del exterior y el segundo, en el extremo cruzado, lo extrae. El resultado es un movimiento de aire con velocidad  $v_a$ , que ingresa aire del exterior. El comportamiento dinámico es distinto al de "a."

Cada "n" intervalos de muestreo  $k$  se actualizan las variables de decisión. F es una variable de entrada que diferencia el/los modos de funcionamiento: F1, ventanas cerradas, AA apagado, ventiladores de techo o cielorraso mueven el aire a velocidad  $v_a$  tal como se describió en esquema de optimización "a."; F2, Funcionamiento de la ventilación cruzada con ingreso de aire exterior según esquema de optimización "b.", con movimiento del

aire a velocidad  $v_a$  y AA apagado; F3, AA encendido. Eventualmente, los ventiladores de techo o cielorraso descritos en "a." mueven el aire.

Luego, se determinan cinco funciones de evaluación y todas referidas al espacio de tiempo en que se desarrolla el horario de trabajo. Las variables de decisión son el *setpoint* de aire acondicionado SPAA, la velocidad del aire de ventilación  $v_a$  y el modo de operación F.: Estas variables no son estáticas, sino que se mueven a lo largo del período de operación, habitualmente 24 horas.

1.- Demanda energética:

$$f_1(\mathbf{x}) = E_n = \frac{\sum_{k=n_{w1}}^{n_{w2}} u_a(k)}{n_{w2} - n_{w1}} \quad (1)$$

Esta ecuación (1),  $u_a \in \{0,1\}$ , es una variable binaria de control del AA que depende de la secuencia diseñada por el optimizador para el *setpoint* de AA, SPAA, el cual es de tipo ON/OFF. Cuando el compresor del AA está trabajando y, por lo tanto, consume energía, se describe como  $u_a = 1$ ; en caso contrario,  $u_a = 0$ . Los valores  $n_{w1}$  y  $n_{w2}$  corresponden en intervalos de muestreo a los horarios de inicio y fin de trabajo, marcados con líneas de puntos verticales en todas las gráficas temporales que se exponen a continuación. De esta forma,  $0 < E_n < 1$  es una medida de consumo energético relativo y adimensional. El consumo  $E_n$  será el máximo posible –la unidad- cuando el compresor esté permanentemente trabajando,  $u_a = 1$  para todos los  $n_{w1} < k < n_{w2}$  y, entonces,  $= \frac{(n_{w2} - n_{w1})1}{n_{w2} - n_{w1}} = 1$ . Esta medida permite comparar fácilmente distintas estrategias de uso del AA para un mismo ambiente y un mismo AA.

2.- Diferencia cuadrática promedio del porcentaje de disconformes Disc:

$$f_2(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{k=n_{w1}}^{n_{w2}} (Disc(k) - DiscObj)^2}{n_{w2} - n_{w1}} \quad \forall Disc(k) > DiscObj \quad (2)$$

Esta es una función (2) que, por su naturaleza cuadrática, tiene su mínimo cuando para cada intervalo de muestreo  $k$  el porcentaje de disconformes Disc es igual a un cierto valor objetivo DiscObj, el cual se fija habitualmente entre un 7% -mínimo admisible de la función de disconformes de Kuchen (2008)- y un 12%.

3.- Control de variaciones de SP del AA (aire acondicionado):

$$f_3(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{k=n_{w1}}^{n_{w2}} (SP_{AA}(k) - SP_{AA}(k-1))^2}{n_{w2} - n_{w1}} \quad (3)$$

Esta función (3), al igual que las dos consecutivas, tiene el objetivo de estabilizar las oscilaciones del *setpoint* de aire acondicionado SPAA al reducir los cambios entre un intervalo de muestreo y el siguiente.

4.- Control de variaciones en  $v_a$  (velocidad del aire).Función (4):

$$f_4(\mathbf{x}) = \sum_{k=n_w(1)}^{n_w(2)} (v_a(k) - v_a(k-1))^2 \quad (4)$$

5.- Control de la cantidad de cambios en el modo de funcionamiento F. Función (5):

$$f_5(\mathbf{x}) = \sum_{k=h_w(1)}^{h_w(2)} (F(k) - F(k-1))^2 \quad (5)$$

6.- Función (6) de restricción:

$$Disc(k) < DiscMax \quad \forall \quad h_w(1) < k < h_w(2) \quad (6)$$

Esta es la única función de restricción implementada y tiene por propósito que el valor instantáneo de Disc nunca supere una cota de DiscMax que se ubica siempre por encima de DiscObj, por ejemplo 15%.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la evaluación del confort térmico se considera la norma ISSO 74: 2014 con objetivo de edificios de clase B, definida en Boerstra et al. (2015) (Figura 3).

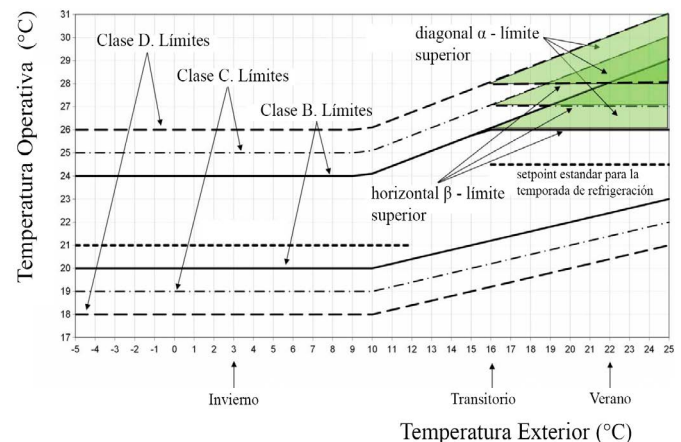


Figura 3. Requerimientos de ISSO 74: 2014 para temperatura operativa en relación a la temperatura exterior para las Clases B, C y D. Fuente: Boerstra et al. (2015, p. 28).

Según la norma ISSO 74: 2014, todos los espacios de trabajo del edificio CCV se determinan como tipo Beta ( $\beta$ ) (Boerstra et al., 2015). El nivel de expectativa de confort térmico interior se define como normal, categoría B. El 80% de los espacios de oficina analizados no tienen acceso a la apertura de la ventana (estrategia fundamental para restablecer el confort personal), el 100% de los espacios no presenta posibilidad para la modificación particular del termostato. Los valores promedio de la tasa metabólica (MET) son de 1.35 (se considera normal por ISSO 74). Los valores de

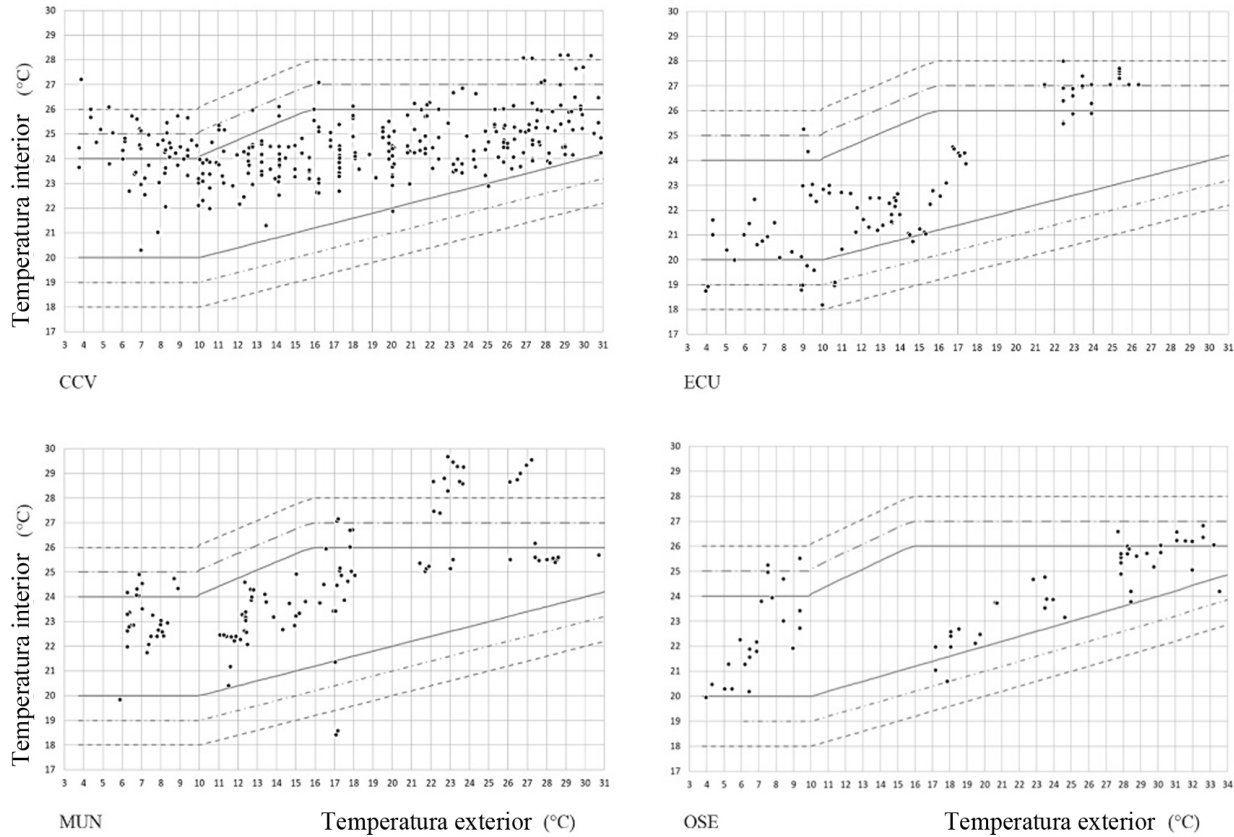


Figura 4. Evaluación confort térmico para el periodo anual y comparación de los edificios. Fuente: Arballo (2020, pp. 72-73).

CLO (aislamiento de la ropa) tienen un promedio de 1,44 (valores para las regulaciones de ropa de oficina normales).

En el compendio anual de datos (Figura 4) se puede observar que el 70% de los datos se incluye en el área de aceptabilidad del 90%, cumpliendo con un nivel medio de confort térmico en función de los límites propuestos por la norma ISSO 74: 2014 para espacios de oficina de tipo  $\beta$ , clase B.

Para el caso de edificio ECU, los espacios de oficina se determinan como tipo  $\beta$ . El nivel de expectativa de confort térmico interior se define como normal, categoría B. Los espacios de oficina tienen acceso a la apertura de la ventana (estrategia fundamental para restablecer el confort personal) y el 100% de los espacios no presenta posibilidad para la modificación particular del termostato. En todos los espacios es claramente percibido el sistema de climatización. Los valores promedio de la tasa metabólica (MET) son de 1.40 (se considera normal por ISSO 74). Los valores de CLO (aislamiento de la ropa) son de 0.76 para verano y de 1.44 para invierno (valores normales para espacios de oficina) (Toranzo, Kuchen y Alonso, 2012).

Para el período de verano, el 14% de los datos están dentro de la clase B (aceptabilidad del 90%) y un promedio

de porcentaje de aceptabilidad de 86%. Para el período transitorio, el 88% de los datos coinciden con el área de clase B. Para invierno, el 92% de los datos responde al área de clase B.

En el compendio anual de datos (Figura 4) se puede ver que el 82% de los datos se incluyen en el área de aceptabilidad del 90%, cumpliendo a nivel de confort térmico medio/alto en función de los límites propuestos por la norma ISSO 74: 2014 para espacios de oficina de tipo  $\beta$ , clase B. El periodo de verano es el periodo más crítico del año en relación a la aceptabilidad térmica de los habitantes de ECU.

En el compendio anual de datos para edificio MUN (Figura 4) se advierte que el 78% de los datos se incluyen en el área de aceptabilidad del 90%, cumpliendo a nivel de confort térmico medio, según los límites propuestos por la norma ISSO 74: 2014 para espacios de oficina de tipo  $\beta$ , clase B.

Para el caso del edificio OSE, el compendio anual de datos (Figura 4) muestra que el 85% de los datos se incluyen en el área de aceptabilidad del 90%, cumpliendo a nivel de confort térmico medio/alto, de acuerdo a los límites propuestos por la norma ISSO 74: 2014 para espacios de oficina de tipo  $\beta$ , clase B.

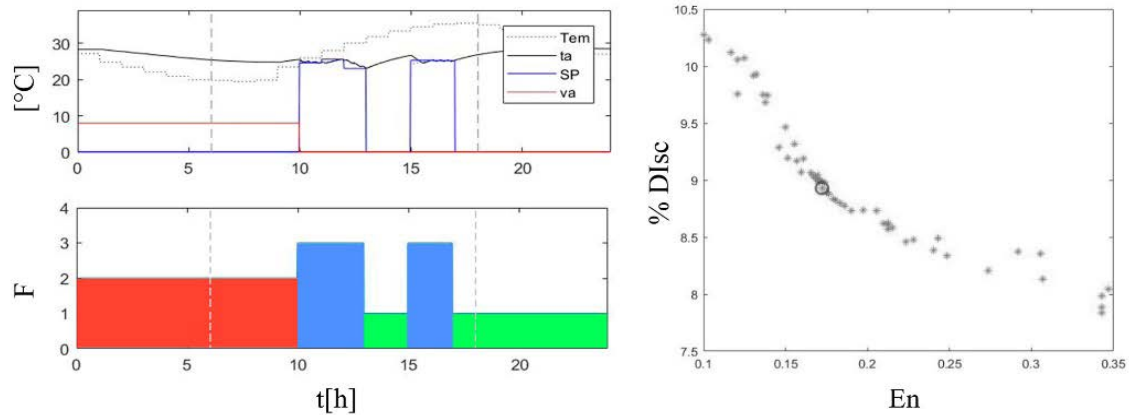


Figura 5. Izquierda: Evolución horaria de modos de funcionamiento *F*. Derecha: Perfil de Pareto de variables *Disc* y *En*. Optimización Multiobjetivo de un día típico de verano en el edificio CCV. Fuente: Arballo (2020, p. 96).

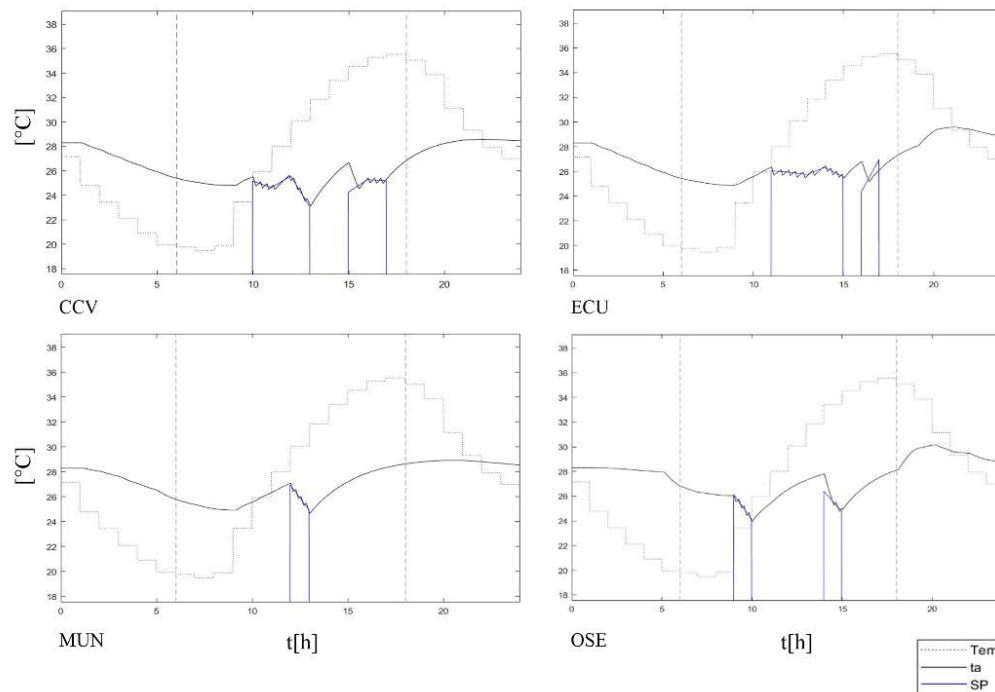


Figura 6. Evolución horaria de *Tem* (temperatura media exterior), *ta* (temperatura el aire interior) y *SP* (temperatura de setpoint). Optimización Multiobjetivo de un día típico de verano para los cuatro edificios. Fuente: Arballo (2020, pp. 97, 100, 104 y 107).

### OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO EN CCV

La Figura 5 ilustra los resultados de la optimización para el caso del edificio CCV. Según la evolución diaria, el sistema decide la estrategia *F2* (Ventana, rojo) durante la noche (más allá de que esto no sea posible actualmente), hasta las 10:00 AM del día siguiente, cuando, por razones del aumento de la temperatura exterior, el optimizador multiobjetivo cambia a estrategia *F3* (Aire Acondicionado, azul).

En un segmento intermedio del horario de trabajo se decide pasar a estrategia *F1* (Envolvente, verde). Este

corte en el uso del aire acondicionado (AA) permite un ahorro energético considerable. La Figura 6 muestra en detalle la evolución y relación entre la temperatura media exterior (*Tem*) y la temperatura del aire interior (*ta*). Como se observa, antes de las 10:00 de la mañana *ta* aumenta, lo que conlleva a un cambio de estrategia a *F3* (AA), siendo  $ta=26^{\circ}\text{C}$ . Con el uso del AA se disminuye a  $ta=23.5^{\circ}\text{C}$ . El sistema luego apaga el AA y lo vuelve a encender cuando  $ta=27^{\circ}\text{C}$  (15:00 h). Puede que durante este tiempo (estrategia *F1* de 13:00 a 15:00 h), a pesar de que el sistema define esta opción como la más óptima, este aumento en la temperatura conlleva a rangos estrechos de aceptación térmica para los habitantes. No obstante,



este rango intermedio en estrategia *F1* no implica costo energético, de modo que contribuye a lograr un ahorro de energía significativo.

Estos resultados se obtienen a partir de la selección de solución óptima por norma 2 (mínima distancia al vector ideal) encontrada en el perfil de Pareto (Figura 5). Para edificio CCV, a través de la optimización, se consigue un  $Disc=8.85$  y  $En=0.17$ .

### OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO EN ECU

El horario de trabajo se marca con líneas rayadas sobre el eje x. En este caso (Figura 7), el sistema decide la estrategia *F2* durante la mañana, hasta las 9:00; existen 2 horas de estrategia *F1* y luego se modifica a estrategia *F3*. De forma similar al caso de edificio CCV, se decide 1 hora -desde las 15:00 h- de estrategia *F1* (Figura 7).

Cerca de las 11:00  $t_a$  supera la barrera de los  $26^\circ C$  (Figura 6), sugiriendo un cambio de estrategia a *F3* (AA). Con el uso del AA se disminuye a  $t_a=26^\circ C$ . El

sistema, después, propone el apagado del AA y lo vuelve a encender cuando  $t_a$  se acerca a casi  $27.5^\circ C$ .

Para el edificio ECU, a través de la optimización, se consigue un  $Disc=7.95$  y  $En=0.12$ . (Figura 7).

### OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO EN MUN

En esta situación el sistema aconseja la estrategia *F2* durante la mañana hasta las 10:00, luego, 2 horas de estrategia *F1* y, por último, se modifica a estrategia *F3*, que se mantiene durante 1 hora (Figura 8). En este caso, el costo energético es mínimo, en comparación con CCV y ECU.

Con el uso del AA, se disminuye a  $t_a=25^\circ C$ . El sistema propone el apagado del AA 1 hora después, lográndose un importante ahorro energético. Hacia el final del horario de trabajo  $t_a$  llega a  $28^\circ C$  (Figura 6). La Figura 7 muestra el perfil de Pareto obtenido en base a la selección óptima preferida por norma 2. Para el caso del edificio MUN, a través de la optimización, se consigue un  $Disc=8.6$  y  $En=0.05$ .

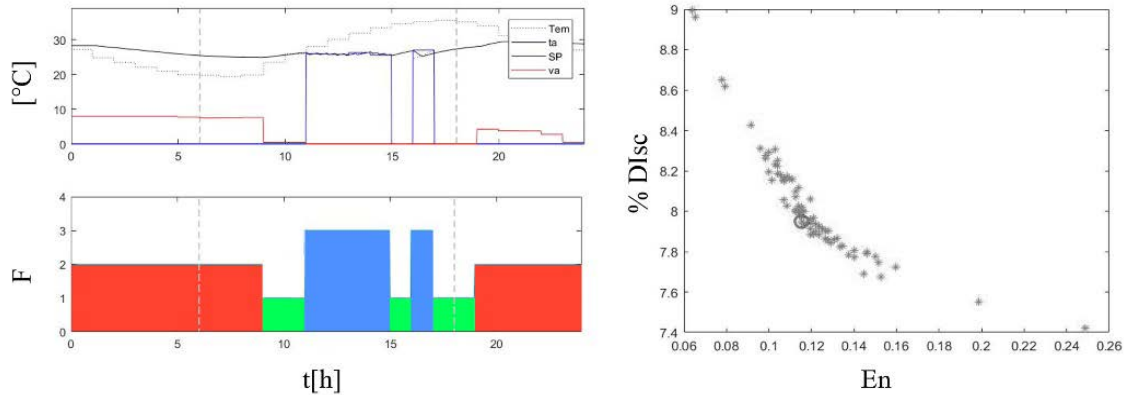


Figura 7. Izquierda: Evolución horaria de modos de funcionamiento *F*. Derecha: Perfil de Pareto de variables *Disc* y *En*. Optimización Multiobjetivo de un día típico de verano para el edificio ECU. Fuente: Arballo (2020, p. 99).

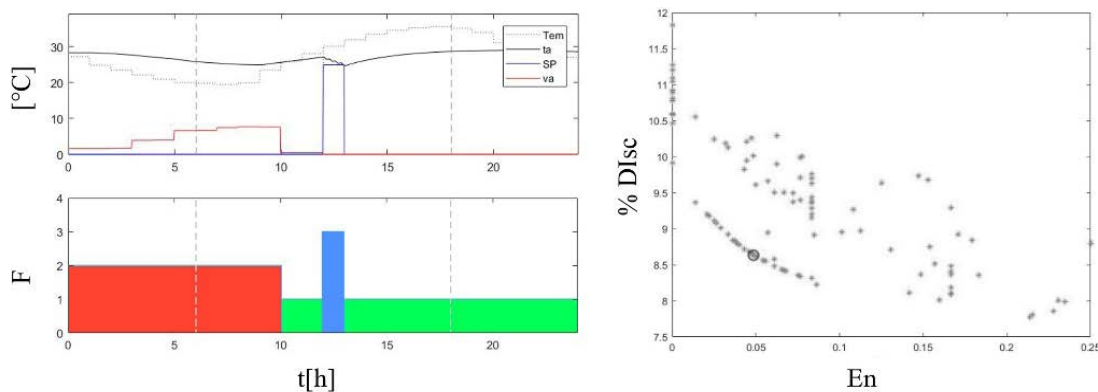


Figura 8. Izquierda: Evolución horaria de modos de funcionamiento *F*. Derecha: Perfil de Pareto de variables *Disc* y *En*. Optimización Multiobjetivo de un día típico de verano para el edificio MUN. Fuente: Arballo (2020, p. 103).

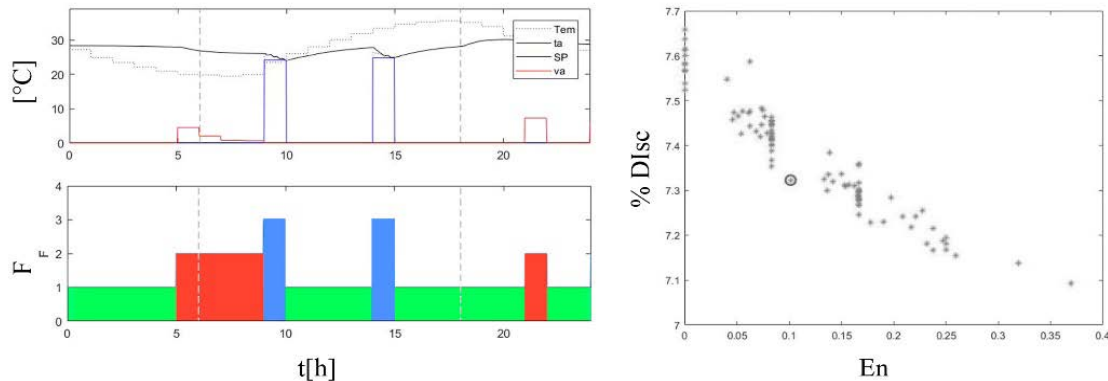


Figura 9. Izquierda: Evolución horaria de modos de funcionamiento F. Derecha: Perfil de Pareto de variables Disc y En. Optimización Multiobjetivo de un día típico de verano para el edificio OSE. Fuente: Arballo (2020, p. 106).

	DISC			EN		
	MED	OPT	%	MED	OPT	%
MUN	38	8.6	29.40	0.3	0.05	83.33
ECU	35	7.95	27.05	0.4	0.12	71.25
CCV	14	8.85	5.15	0.4	0.17	57.50
OSE	12	7.32	4.68	0.3	0.10	66.67

Tabla 2. Mejoras a través de la optimización de Disc y En (verano). Fuente: Arballo (2020, p. 108).

### OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO EN OSE

En la situación de estudio del edificio OSE, el sistema promueve la estrategia F2 durante la mañana hasta las 9:00 h. Hasta las 15:00 el sistema aconseja 2 horas de estrategia F3, con un periodo de 4 horas intermedio en F1 (Figura 9).

En seguida se modifica de nuevo a estrategia F1, que se mantiene hasta el final del horario laboral.

A las 9:00 h el sistema se adelanta al aumento de  $t_a$  en función a  $Tem$ , solicitando un cambio de estrategia a F3 (AA). Con el uso del AA, se disminuye a  $t_a=24^{\circ}C$  (Figura 6). El sistema apaga el AA 1 hora después, logrando un importante ahorro energético. Hacia el final del horario de trabajo  $t_a$  llega cerca de los  $28^{\circ}C$ . Para el caso del edificio OSE, a través de la optimización, se consigue un  $Disc=7.32$  y  $En=0.10$  (Figura 9).

### ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La presente investigación evidencia (Tabla 2) que, al aplicar la optimización multiobjetivo propuesta -para el periodo de verano-, se obtiene en todos los casos mejoras de la variable Disc (mayor confort térmico), con un porcentaje promedio de 20.53%. La variable de energía normalizada

En también mejora en todos los casos, con un porcentaje promedio de 69.6%. Los resultados demuestran que, a través de la implementación de la herramienta de optimización multiobjetivo termo-energética, puede reducirse ampliamente la demanda de energía para la climatización de espacios de oficina y, simultáneamente, mejorar significativamente la calidad en confort térmico.

A partir de clasificación del consumo de energía según ítems (para el periodo de verano), se determinan los consumos correspondientes al ítem "refrigeración" (Tabla 3), los cuales representan para cada edificio los siguientes porcentajes:  $CCV=45\%$ ;  $OSE=24\%$ ;  $MUN=12\%$ ;  $ECU=8\%$  (Kuchen et al., 2016).

Se constatan aportes de beneficio energético de la herramienta de optimización termo-energética, al conseguirse ahorros de hasta un 83.3% -en el caso de edificio MUN- de energía dedicada a refrigeración durante el periodo de verano (Tabla 3). De esta forma, se puede afirmar una proyección de ahorro energético para el caso del edificio CCV (edificio de mayor consumo en la provincia de San Juan), donde se reduce su consumo en el ítem de refrigeración en verano de 62 KWh/m2 (meses refrig.) a 26.4 KWh/m2 (meses refrig.).

Para los edificios analizados que más consumen, se reduce el porcentaje de ahorro (57,5% y 66.7%), pero para los edificios que menos consumen, el ahorro

	Consumo energético anual [kWh/m <sup>2</sup> .a]	Consumo energético verano [kWh/m <sup>2</sup> .(verano)]	Consumo refrigeración [kWh/m <sup>2</sup> .(verano)]	
			Sin ahorro	Con ahorro
CCV	335	137.5	62	26.4
OSE	158	71.1	17.1	5.7
MUN	137	50.7	6.1	1.0
ECU	126	56.9	4.6	1.3

Tabla 3. Consumos en verano según cada edificio y ahorros para el ítem "climatización" Fuente: Arballo (2020, p. 108).

potencial es mucho mayor, del rango de 71.3% y 83.3%. Los edificios ECU y MUN son lo que menos consumen, pero a costa de un porcentaje promedio Disc elevado (35% y 38%, respectivamente).

## CONCLUSIÓN

La presente investigación genera un aporte en la creación de técnicas y herramientas para arquitectos, ingenieros y especialistas del área, dedicados a la planificación de nuevos edificios y existentes, que tiendan a comprometer el uso de recursos naturales (escasos) para el funcionamiento, así como a la emisión de gases de efecto invernadero.

Conocer las ventajas del saneamiento de edificios existentes o, en su defecto, las posibilidades creativas de solución en el desarrollo de nuevos proyectos arquitectónicos, variando esquemas de orientación, ventilación, aislación y usos, es decir, haciendo efectiva y necesaria la incorporación de conceptos bioclimáticos, posiciona al sector edilicio sobre el cambio de paradigma ambiental en la reducción de emisiones a la atmósfera.

En este trabajo se destaca la incorporación de técnicas implementadas por primera vez en la disciplina arquitectónica de saneamiento energético de edificios, en la identificación de variables de diseño (ventilación natural/mecánica, potencia de climatización a instalar) y en el control de climatización interior a través de la optimización multiobjetivo mediante algoritmos del tipo MIDACO (por colonia de hormigas). Estos aportes amplían el alcance de las herramientas de optimización, en comparación con aplicaciones a edificios de oficina en la etapa proyectual (software de simulación térmico-energéticos, como por ejemplo Energy Plus, Trnsys y otros), que se relevan en el estado del arte, abordando la optimización dinámica diaria para el saneamiento de edificios existentes y futura aplicabilidad hacia el desarrollo de sistemas de control inteligentes y definición de pautas de diseño (ventilación), en edificios nuevos.

En concreto, se valida la nueva herramienta de diseño aplicando optimización multiobjetivo, donde se reduce la brecha entre consumo energético y confort térmico, lográndose ahorros significativos de energía en los cuatro casos de estudio. Las soluciones encontradas en los Conjuntos de Pareto permiten contrastar las hipótesis propuestas. Se destaca el alcance de significativos ahorros de energía eléctrica para climatización (ítem refrigeración) en el periodo de verano, entre un 57.5% y un 83.3% de ahorro, manteniendo porcentajes de aceptación térmica por encima del 90% en todos los casos.

La herramienta de diseño permite la obtención de valores objetivo, es decir, la definición de valores de "demandas energéticas de diseño" con alto nivel de detalle diario y por espacio de trabajo para el periodo de verano (en este caso), introduciendo las variables temperatura operativa, temperatura exterior y voto de confort en relación al consumo energético, posibles de obtener a través de el modelado en software de simulación energética (Energy Plus o similares). Lo anterior se ve validado en este trabajo enfocado en edificios de oficinas con climatización en el clima templado cálido seco.

Actualmente, esta investigación se encuentra asociada al desarrollo tecnológico de un sistema de control para optimizar en tiempo real y de forma dinámica las variables de confort y estrategias de climatización/ventilación en espacios interiores. Ha sido premiada con un subsidio del Estado para la compra de insumos de alta calidad y puesta en marcha.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, al Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat de la Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño (UNSJ) y al Instituto de Investigaciones Mineras (UNSJ). Asimismo, se extienden agradecimientos a las autoridades de gobierno de los ministerios concentrados en el Centro Cívico de la Ciudad de San Juan, a las autoridades correspondientes de la Municipalidad de la Capital de la ciudad de San Juan y de Obras Sanitarias Sociedad del Estado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdou, N., Mghouchi, Y. E., Hamdaoui, S., Asri, N. E. y Mouqallid, M. (2021). Multi-objective optimization of passive energy efficiency measures for net-zero energy building in Morocco. *Building and Environment*, 204. DOI: [doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108141](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108141)
- Arballo, B. D. (2020). *Eficiencia Energética y Confort Térmico adaptativo-variable en espacios de oficina mediante Optimización Multiobjetivo*. Tesis doctoral. Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño. Universidad Nacional de San Juan.
- ASHRAE Standard 55 (2004). *Thermal environmental conditions for human occupancy*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Attahariyakul, S. y Leephakpreeda, T. (2005). Neural computing thermal comfort index for HVAC systems. *Energy conversion and management*, 46(15-16), 2553-2565. DOI: [doi.org/10.1016/j.enconman.2004.12.007](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.12.007)
- Bliuc, I., Rotberg, R. y Dumitrescu, L. (2007). Assessing thermal comfort of dwellings in summer using EnergyPlus. En Proc. of the CLIMA 2007 World Congress "Well Being Indoors".
- Boerstra, A. C., van Hoof, J. y van Weele, A. M. (2015). A new hybrid thermal comfort guideline for the Netherlands: background and development. *Architectural Science Review*, 58(1), 24-34. DOI: [doi.org/10.1080/00038628.2014.971702](https://doi.org/10.1080/00038628.2014.971702)
- Bre, F. y Fachinotti, V. D. (2017). A computational multi-objective optimization method to improve energy efficiency and thermal comfort in dwellings. *Energy and Buildings*, 154, 283-294. DOI: [doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.002](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.002)
- Bre, F., Roman, N. y Fachinotti, V. D. (2020). An efficient metamodel-based method to carry out multi-objective building performance optimizations. *Energy and buildings*, 206. DOI: [doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109576](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109576)
- Chambers, L. D. (2000). *The practical handbook of genetic algorithms: applications*. New York: Chapman and Hall/CRC. DOI: [doi.org/10.1201/9781420035568](https://doi.org/10.1201/9781420035568)
- Chandel, S. S., Sharma, V. y Marwah, B. M. (2016). Review of energy efficient features in vernacular architecture for improving indoor thermal comfort conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 459-477. DOI: [doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.038](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.038)
- Coello, C. A. C., van Veldhuizen, D. A., y Lamont, G. B. (2002). *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems* (Vol. 242). New York: Kluwer Academic.
- EnBop (2008). *Energie Betriebsoptimierung*. Recuperado de <http://www.enob.info>.
- EPRE (2017). Datos de consumo de energía proporcionados por el Ente Provincial Regulador de Energía. San Juan, Argentina.
- ISO 7730 (2005). *Ergonomics of the thermal environment-Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. ISSO. Rotterdam, Holanda.
- ISSO 74 (2004). *Thermische Behaaglijkheid. Publication 74*, ISSO. Rotterdam, Holanda.
- Kuchen, E. (2008). *Spot-Monitoring zum thermischen Komfort in Bürogebäuden*. Tesis de Doctorado. Tönning, Deutschland: Der Andere Verlag.
- Kuchen, E., Alonso-Frank, A., Alamino-Naranjo, Y., Arballo, B., Galdeano, M. y Accolti, E. (2016). Eficiencia Energética en Edificios Públicos. En *VIII Congreso Regional de Tecnología de la Arquitectura-CRETA* (19 al 21 de octubre). San Juan, Argentina.
- Li, Q., Zhang, L., Zhang, L. y Wu, X. (2021). Optimizing energy efficiency and thermal comfort in building green retrofit. *Energy*, 237. DOI: [doi.org/10.1016/j.energy.2021.121509](https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121509)
- Lu, L., Cai, W., Xie, L., Li, S. y Soh, Y. C. (2005). HVAC system optimization—in-building section. *Energy and Buildings*, 37(1), 11-22. DOI: [doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.12.007](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.12.007)
- Nguyen, A. T., Reiter, S. y Rigo, P. (2014). A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied Energy*, (113), 1043-1058. DOI: [doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061)
- Norma IRAM 11603 (2012). *Clasificación bioambiental de la República Argentina*. Buenos Aires: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- Rupp, R. F., Kim, J., de Dear, R. y Ghisi, E. (2018). Associations of occupant demographics, thermal history and obesity variables with their thermal comfort in air-conditioned and mixed-mode ventilation office buildings. *Building and Environment*, 135, 1-9. DOI: [doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.049](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.049)
- Rupp, R. F., Vásquez, N. G. y Lamberts, R. (2015). A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy and Buildings*, 105, 178-205. DOI: [doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.047](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.047)
- Sánchez-García, D., Rubio-Bellido, C., Marrero-Meléndez, M., Guevara-García, F. y Canivell, J. (2017). El control adaptativo en instalaciones existentes y su potencial en el contexto del cambio climático. *Revista Hábitat Sustentable*, 7(2), 06-17. DOI: [doi.org/10.22320/07190700.2017.07.02.01](https://doi.org/10.22320/07190700.2017.07.02.01)
- Schlueter, M., Wahib, M. y Munetomo, M. (2021). New State-of-the-Art Results on ESA's Messenger Space Mission Benchmark. In *Advances in Parallel & Distributed Processing, and Applications* (pp. 669-681). Springer, Cham.
- Stanislav, H. Z. (2003). *Systems and Control*. Nueva York: Oxford University Press.
- Toranzo, E., Kuchen, E. y Alonso, A. (2012). Potenciales de eficiencia y confort para un mejor funcionamiento del edificio central de la universidad nacional de San Juan. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente-AVERMA*, 16, 157-164.
- Van Hoof, J., Mazej, M. y Hensen, J. L. M. (2010). Thermal Comfort: Research and Practice. *Frontiers in Bioscience*, 15(2), 765-788.
- Yuan, Y., Yuan, J., Du, H. y Li, L. (2012). An improved multi-objective ant colony algorithm for building life cycle energy consumption optimisation. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 43(1), 60-66.