

Optimización multi-objetivo en el diseño paramétrico

Reducción del consumo de energía en calefacción y refrigeración en tipologías de vivienda agrupada.

Autor 01 Patricia Edith Camporeale

Filiación: Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad Nacional de La Plata

Dirección: Calle 47 núm 162, (1900) La Plata, Buenos Aires, Argentina Correo: pcamporeale@fau.unlp.edu.ar

Autor 02 Pilar Mercader Moyano

Filiación: Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad de Sevilla

Dirección: Av. de la Reina Mercedes 2, (41012) Sevilla, España

Correo: pmm@us.es

Código del manuscrito: 06_001

Fecha de aceptación: 04/10/2019

Resumen

El trabajo aborda la problemática de la forma arquitectónica en sus etapas iniciales de diseño donde, debido a su falta de definición formal y material, resulta difícil realizar una simulación para conocer su nivel de eficiencia energética. Se aplica un método de cálculo cuasi-estacionario utilizado en la norma argentina IRAM 11900 de Etiquetado Energético de Edificios para el índice de consumo de energía primaria en calefacción y refrigeración junto con un indicador bioclimático que evalúa el potencial de generación de energía solar fotovoltaica en cubiertas y fachadas Norte. Luego de una investigación bibliográfica, se comprueba el escaso número de trabajos que se enfocan en el estudio de las formas arquitectónicas generativas desde una perspectiva del consumo energético. En consecuencia, se propone un flujo de trabajo parametrizando los datos de entrada: climáticos, materiales, normativos y formales, de las tipologías más frecuentes del tejido urbano de las ciudades argentinas: torre, edificio en altura y bloque lineal destinados a vivienda. El edificio se sitúa en un terreno urbano del Área Metropolitana de Buenos Aires. La optimización multi-objetivo permite que las morfologías iteren desde una torre exenta a un edificio compuesto por dos bloques y un edificio en altura que las articula. Los resultados muestran las opciones formales que mejor responden a la reducción del consumo de energía primaria. Esta metodología constituye una herramienta idónea para su uso en la etapa de diseño conceptual sea para una obra nueva como para una rehabilitación energética, donde suelen emplearse modelos de caja negra, como el diseño arquitectónico.

Palabras claves: optimización multi-objetivo, diseño paramétrico, metodo holístico, eficiencia energética en calefacción y refrigeración

Abstract

This paper explores the architectural shape at the conceptual design stage from the perspective of its energy efficiency, when the lack of formal and material definition makes difficult to conduct an energy simulation. Thus, a quasi-steady state method, applied in the Argentine IRAM Standard 1900: Building Energy Labeling, provides the primary energy consumption index in heating and cooling. A bioclimatic indicator provides the potential to supply solar power on roofs and North façades. After a literature review, the research on this field shows that the 3D tools that architects use are far from energy performance digital tools. Therefore, the paper proposes a workflow to parameterize the building morphology and materials, the climatic characteristics, and the building standards requirements as inputs. The most frequent housing typologies in Argentinian cities are the slab and high rise buildings and the free-standing tower. The case study situates in an urban plot in the Buenos Aires Metropolitan Area. The shape iterates from a tower to a combined shape of two slab buildings linked by a high-rise one at the corner. The multi-objective optimization shows the alternatives that perform best according to primary energy consumption reduction. This methodology results



Internacional Building Performance Simulation Association / Argentina - Brasil - Chile



appropriate for the conceptual stage of new or refurbished buildings, when black box models are commonly used, as it is the case of architectural design.

Keywords: multi-objective optimization, energy efficiency in heating and cooling, parametric design, holistic methodology

Introducción

El sector edilicio representa casi el 40% del consumo energético mundial y muestra una tendencia creciente a medida que la población urbana se incrementa. Se estima que las ciudades albergarán aproximadamente el 68% de la población mundial para 2050 (“World Urbanization Prospects - Population Division - United Nations” n.d.), lo cual acarreará un incremento del consumo energético que, a su vez, provocará un aumento de las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI), agravando el Calentamiento Global. Los edificios destinados a vivienda se incrementarán en número tanto los nuevos como las ampliaciones del parque existente.

El gobierno argentino se ha propuesto implementar medidas de eficiencia en los edificios públicos y privados junto con la promoción del uso de energías renovables de generación distribuida (“El Gobierno publicó nueva reglamentación sobre generación distribuida | Cámara Argentina de Energías Renovables” n.d.). Si bien se están tratando leyes de etiquetado energético en edificios basadas en la norma IRAM 11900 (IRAM 2018) a nivel provincial, aún no se ha sancionado ninguna. En el caso de Santa Fe, que ya cuenta con una ley en tratamiento (Gobierno de Santa Fe 2019), se ha desarrollado un aplicativo propio de la norma de referencia para el Etiquetado energético en viviendas (“Certificación Energética de Viviendas” n.d.). La metodología de la norma de referencia provee un índice de consumo de energía primaria por unidad de superficie útil del inmueble llamado índice de prestaciones energéticas (IPE) que según una escala, le asigna una letra correspondiente al nivel de eficiencia de la vivienda analizada.

En climas templados cálidos húmedos como es el caso de Buenos Aires, se recomienda emplear estrategias de diseño para acondicionamiento térmico tanto en invierno como en verano. La reducción de superficies expuestas al exterior y la aislación de los elementos vidriados como el doble vidriado hermético, reducen las pérdidas de calor en invierno. Asimismo, la orientación Oeste debe evitarse por el sobrecalentamiento que produce en el interior de la vivienda en verano y favorecer la ventilación natural cruzada en horas nocturnas (IRAM 2011). Un índice sumamente utilizado suele ser el coeficiente de forma (CF) que es el cociente entre la envolvente y el volumen de aire efectivo de una vivienda. Sin embargo, en climas como el de Buenos Aires, la compactidad no es siempre un indicador de eficiencia energética como sí ocurre en climas más fríos y secos. Esta dicotomía entre compactidad y no compactidad requiere una respuesta al complejo equilibrio para alcanzar el confort higrotérmico interior, sumándose a las otras variables a las cuales el diseño arquitectónico debe responder, tales como las estéticas, espaciales, materiales y estructurales.

Las ciudades de matriz hispanoamericana, como Buenos Aires, responden a un esquema de cuadrícula compuesta por manzanas con un borde compacto exterior y un espacio libre interior, comúnmente conocido como patio de manzana que puede estar unificado o no, y que varía en sus dimensiones según las normativas vigentes locales. En Buenos Aires, la relación entre el área libre y la superficie del lote es del 40% en la mayoría de los casos, correspondiendo al área construida, el 60% restante. Esta normativa resulta en una variedad de tipologías de vivienda donde se destacan el bloque lineal, la torre y el edificio en altura, configurando un skyline irregular, salvo excepciones (Fig. 1).



Figura 1. Tejido urbano del Área Metropolitana de Buenos Alres. Fuente: Google maps., 2019

Estado del arte del problema

Los algoritmos genéticos (AG), que forman parte de los algoritmos meta-heurísticos, se inspiran en el proceso de evolución y selección natural para la optimización de problemas donde los modelos determinísticos no son adecuados por la naturaleza de aquéllos como ocurre en los modelos de caja negra, frecuentemente utilizados en el diseño arquitectónico. El diseño generativo consiste en una serie de reglas alimentadas por parámetros o genes que producen soluciones geométricas o fenotipos. Estas soluciones restringidas por principios codificados permiten alcanzar diversidad y un comportamiento adaptativo más que soluciones estáticas (Bianconi, Filippucci, and Buffi 2019).

Al tratar de resolver el desempeño energético edilicio es necesario implementar metodologías que atiendan además las variables de diseño y ambientales, las restricciones normativas del modelo edilicio, y los tiempos de ejecución y costos. Se han relevado estudios que se focalizan en la optimización de la composición de la envolvente y el equipamiento para mejorar el desempeño energético. Sin embargo, solamente algunos tienen como objetivo la forma edilicia, siendo ésta determinante de la performance energética del proyecto arquitectónico (A. Zhang et al. 2017). L. Zhang et al analizan un AG multiobjetivo aplicado al CF, que maximiza el espacio útil y la radiación recibida, en escuelas situadas en climas fríos de China (L. Zhang, Zhang, and Wang 2016). Shin et al realizan un exhaustivo relevamiento de diferentes métodos de optimización y detectan su falta de conexión con los métodos de modelado 3D utilizado por los arquitectos, resaltando que estos métodos son utilizados mayormente en rehabilitaciones y no en edificios nuevos (Shi and Yang 2013). Ascione et al revisan los métodos de optimización multiobjetivos con AGs y proponen un esquema para optimizar la envolvente, el consumo energético, y la inversión (Ascione et al. 2019). Otros autores evalúan las tipologías de bloque lineal y torre con modelos edilicios no paramétricos para no ralentizar el proceso de evaluación, reduciendo el número de soluciones obtenibles (Lin et al. 2014). No obstante, la simulación dinámica requiere generosos recursos computacionales y tiempo así como también habilidades técnicas con las que

los arquitectos no se encuentran familiarizados (Attia et al. 2012). Aún más, en los estadios tempranos del proceso proyectual, no se dispone de datos detallados acerca de la composición de la envolvente y el equipamiento, lo cual hace necesario la búsqueda de herramientas simplificadas para estimar consumos energéticos (Znouda, Ghrab-Morcos, and Hadj-Alouane 2007).

Como se mencionara en la Introducción, el CF constituye un índice útil para evaluar la eficiencia energética pero no es linealmente dependiente en climas templados cálidos húmedos (Ratti, Baker, and Steemers 2005). Algunos investigadores proponen el volumen pasivo, constituido por el área perimetral de la fachada por 6m de profundidad o dos veces la altura de los locales, como indicador de eficiencia, al conseguir la reducción de la iluminación artificial y la ventilación mecánica propiciando la iluminación y ventilación naturales (Baker and Steemers 1996). Otros investigadores se inclinan por la maximización de las superficies mejor orientadas: techos y fachadas, para colocar dispositivos solares tales como calentadores de agua o paneles fotovoltaicos (Díez-Mediavilla et al. 2019). Por último, otros autores remarcan como las fachadas orientadas al Norte pueden constituir un aporte importante para la generación fotovoltaica (Brito et al. 2017; Catita et al. 2014; Redweik, Catita, and Brito 2013).

Sin embargo, las cuestiones a las cuales debe responder el proyecto arquitectónico no pueden limitarse a una o más funciones objetivo. Los diseñadores necesitan conocer el impacto cuantitativo de sus decisiones y, a la vez, mantener la libertad para explorar las facetas cuantitativas tales como las cuestiones estéticas y espaciales. Esta investigación busca otorgar a los diseñadores una metodología que, utilizando un método holístico, les permita obtener formas paramétricas optimizadas de tipologías de torre, edificio en altura y bloque lineal eficientes en el consumo energético de calefacción y refrigeración, dentro de un proceso transparente y en tiempo real.

Metodología

1. Esquema del flujo de trabajo

La metodología propuesta consiste en la introducción de datos variables y constantes con las cuales se calcula el IPE según la norma IRAM 11900, que a su vez tiene como antecedentes el Manual de ASHRAE y las normas europeas de eficiencia energética en edificios (ASHRAE 2013; AENOR 2011; Comité Europeo de Normalización y Certificación 2012).

Los datos paramétricos— o sea, que varían dentro de un rango establecido por el usuario— son las dimensiones de los volúmenes que componen el edificio: dos bloques lineales y un edificio de planta cuadrada que los articula en la esquina. Se determinan los rangos dimensionales para el ancho (15 -20m), el largo (30-35m), y la altura (3-12 pisos) de los edificios en bloque. El edificio de la esquina posee planta cuadrada por lo que se parametriza el lado (15-20m) y la altura (4-31 pisos). Cuando alcanza la máxima altura desaparecen los bloques y se genera una torre exenta de 31 pisos. La superficie total construída para todas las alternativas, es de alrededor de 12000 m², difiriendo en menos de un 10% para cada alternativa. Los bloques lineales pueden variar sus dimensiones independientemente uno de otro mientras que el edificio de esquina siempre se mantiene un piso por encima del bloque lineal más alto.

Los datos constantes son las temperaturas medias de los meses correspondientes a las temporadas de calefacción que comprende desde el 15/4 hasta el 5/11, y refrigeración que comprende desde el 5/11 hasta el 28/2), la radiación solar global, la temperatura y conductividad del terreno, la composición de la envolvente que, en este caso, supera los requisitos de la norma IRAM 11605 (IRAM 1996) (Tabla 1), y las dimensiones y orientación del terreno (50x50 m, esquina NO). También es constante la relación vidriado/opaco (RVO) que, siguiendo las recomendaciones de la norma IRAM 11603, se establece en los sig. porcentajes: Norte, 40%, Sur, 10%, Este, 30% y Oeste, 20%. Esto se debe a que el AG, si iterara libremente dentro de un rango, fijaría su límite en el extremo inferior para obtener el IPE más bajo, porque los cerramientos opacos tiene una transmitancia térmica inferior que las ventanas y la reducción del área vidriada en favor del área opaca disminuye el consumo energético (IPE).

Tabla 1. Valores de transmitancia térmica mínimos según IRAM 11605 y los del modelo. Fuente: Elaboración propia, 2019

ciudad	K W/m ² K						Infiltración m ³ /h.m
	invierno			verano			
	muros	cubiertas	ventanas	muros	cubiertas	ventanas	
Buenos Aires	1	0,83	< 4	1,10	0.45	< 4	>4.01
edificio modelo	0,54	0,19	2,61	0,54	0,19	2,61	>2

En la Fig. 2, se observan las diferentes etapas metodológicas donde se muestran los datos de entradas paramétricos y no paramétricos, la optimización multi-objetivo y los resultados.

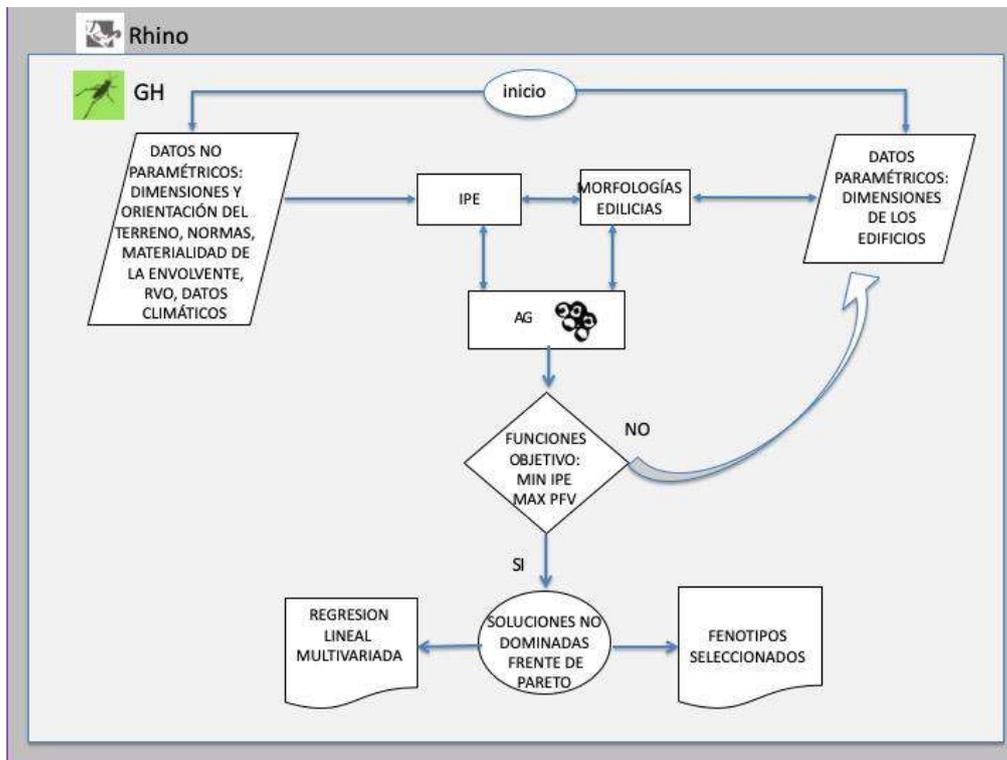


Figura 2. Flujo de trabajo de la optimización multi-objetivo. Fuente: Elaboración propia, 2019

2. Cálculo de IPE

Para el cálculo del IPE, se consideran los datos de entrada según la ecuación 1 de acuerdo a la norma IRAM 11900 (Ec.1).

$$IPE = \frac{EP_{cal} + EP_{ref}}{A} \quad \text{Ec. 1}$$

siendo:

IPE= índice de prestaciones energéticas en kWh/m². año

EP_{cal}= consumo de energía primaria en calefacción en kWh/año

EP_{ref} = consumo de energía primaria en refrigeración en kWh/año

A= área útil del edificio en m^2 .

Para el cálculo de EP_{cal} se considera el método utilizado en la Norma IRAM 11900 (Ec. 2)

$$EP_{cal} = \sum_{j=1}^M \left[\sum_{i=1}^N \frac{Q_{cal;i,j}}{\eta_{cal;i,j}} \cdot f_{p;i} \right] \quad \text{Ec. 2}$$

$Q_{cal;i,j}$ = energía térmica mensual de calefacción para cada zona térmica (kWh)

$\eta_{heat;i,j}$ = promedio ponderado de la eficiencia del sistema de calefacción: 0,7 (calefactores a gas natural)

$f_{p;i}$ = factor de conversión de energía secundaria a primaria para cada zona térmica: 1.25

M= número de meses de calefacción

N= número de zona térmica

Las cargas térmicas de calefacción por zona térmica se calculan según la Ec. 3.

$$Q_{cal} = Q_{env;rad;vent} - \eta_g \cdot (Q_{intg} + Q_{sol}) \quad \text{Ec. 3}$$

Q_{cal} = requerimiento mensual de energía térmica para calefacción (kWh)

$Q_{env;rad;vent}$ = energía térmica intercambiada por transmisión a través de la envolvente, radiación a la bóveda celeste y ventilación. (kWh)

η_g = factor de utilización de los aportes térmicos gratuitos.

Q_{intg} = ganancias internas (equipment, lighting, occupancy) (kWh)

Q_{sol} = ganancias solares (kWh)

Para el cálculo de EP_{ref} se considera el método utilizado en la Norma IRAM 11900 (Ec. 4)

$$EP_{ref} = \sum_{j=1}^M \left[\sum_{i=1}^N \frac{Q_{ref;i,j}}{\eta_{ref;i,j}} \cdot f_{p;i} \right] \quad \text{Ec. 4}$$

$Q_{ref;i,j}$ = energía térmica mensual de refrigeración para cada zona térmica (kWh)

$\eta_{ref;i,j}$ = promedio ponderado de la eficiencia del sistema de refrigeración: 3,2 (Split tipo A)

$f_{p;i}$ = factor de conversión de energía secundaria a primaria para cada zona térmica: 3,3

M= número de meses de refrigeración

N= número de zona térmica

Las cargas térmicas de refrigeración por zona térmica se calculan según la Ec. 5.

$$Q_{ref} = Q_{intg} + Q_{sol} - \eta_{disp} \cdot Q_{env;rad;vent} \quad \text{Eq. 5}$$

Q_{ref} = requerimiento mensual de energía térmica para refrigeración (kWh)

Q_{intg} = ganancias internas (equipamiento, iluminación, ocupación) (kWh)

Q_{sol} = ganancias solares (kWh)

$Q_{env;rad;vent}$ = energía térmica intercambiada por transmisión a través de la envolvente, radiación a la bóveda celeste y ventilación e infiltración (kWh)

η_{disp} = factor de utilización de las dispersiones térmicas

Se calculan tres zonas térmicas: una por cada volumen edificio y luego, el promedio ponderado de consumo de EP (IPE_{pp}). El área total de los tres sólidos es de 12000 m², siendo variables las superficies de cada uno de los volúmenes según cada alternativa. No se toman en cuenta los obstáculos en el horizonte ni el propio edificio para el cálculo de sombras así como tampoco el consumo eléctrico de iluminación. La temperatura de termostato para invierno es de 20° C y para verano, 25 ° C. El período de calefacción se extiende desde el 15 de abril al 5 de noviembre y el de refrigeración, desde el 8 de diciembre al 28 de febrero. No se incluyen en el cálculo los muros divisorios interiores pero sí las losas de entrepiso. Los muros medianeros se consideran adiabáticos.

Asimismo, se calcula un índice de potencial fotovoltaico (P_{FV}) que permita estimar la posibilidad de captación de energía solar para generación fotovoltaica en cubiertas y muros al Norte. El P_{FV} es el cociente entre la energía primaria equivalente y la energía fotovoltaica teórica considerando la colocación de paneles FV en el 50% de la superficie cubiertas y muros de al Norte, llevada a energía primaria. Los paneles de las cubiertas se encuentran inclinados 32° al Norte. Suponiendo que se aprovecha el 10% de la radiación anual recibida sobre los paneles, se tiene que los de las cubiertas colectan 173,27 kWh/m².año y la fachada Norte, 105,44 kWh/m².año (Ec. 6)

$$P_{FV} = \frac{0,5 \times 0,1 \times (\text{sup. cubierta} \times \text{rad. anual cub.} + \text{sup. muro Norte} \times \text{rad. anual muro N}) \times f_{FVP}}{\text{sup. edificio}} \times \frac{1}{IPE_{pp}} \times 100 \quad \text{Ec. 6}$$

P_{FV} =potencial fotovoltaico (%)

sup. FV cubierta en m²

rad. anual cub. = 1732,72 kWh/m².año con una inclinación de 32 °al N

sup. FV muro Norte en m²

radiación anual muro N= 1054,37 kWh/m².año con una inclinación de 90 °al N

f_{FVP} = factor de conversión de energía FV a primaria (3,3)

sup. edificio= superficie útil del edificio (m²)

IPE_{pp} = promedio ponderado del índice de consumo anual de energía primaria en calefacción y refrigeración

3. Optimización multiobjetivo

El flujo de trabajo se desarrolla íntegramente en Rhinoceros (P. Cook 2013), la parametrización y el cálculo se realizan mediante el plug-in Grasshopper (GH) (A. Payne and R. Issa 2009). La optimización multi-objetivo emplea el AG Octopus basado en el AG SPEA-2 y el algoritmo HypE (ETH- SOP- PISA n.d.).

Los genes son las dimensiones de los edificios: ancho, largo y altura dentro del rango fijado (Tabla 2).

Tabla 2. Rangos dimensionales paramétricos de los edificios Fuente: Elaboración propia, 2019.

Tipo	Poosición	Parameters ranges		
		ancho	largo	altura
Edificio en altura/torre	esquina	m	m	pisos
		15-20	15-20	3-31
		Bloque lineal	Norte	13-15
	Oeste	13-15	30-35	3-12

Las funciones objetivo son las siguientes:

- Minimización del IPE
- Maximización del porcentaje de potencial de generación fotovoltaica (P_{FV}) en las cubiertas y los muros orientados al Norte

• Resultados

Una vez corrido el programa durante 400 generaciones para una población de 196 individuos, 6 genes correspondientes a las dimensiones y la posición de los edificios en el terreno y mediante dos funciones objetiv competitivas, se obtienen las 100 soluciones no dominadas de mejor desempeño, ordenadas en un Frente de Pareto. De ellas se seleccionan las 30 más representativas, ya que algunas son muy similares entre sí (Tabla 3)

Tabla 3. Alternativas optimizadas más representativas del Frente de Pareto. Fuente: Elaboración propia, 2019.

alt.	genes geométricos			funciones objetivo		area m2	CF 1/m	RVO
	bloque N	edificio esquina	bloque O	IPE _{pp} kWh/m2.año	P _{FV} %			N-S-E-O %
1	11	12	10	61,04	68,30%	12255	0,2355	40-10-30-20
2	11	12	8	59,18	74,37%	12290	0,225	40-10-30-20
3	4	13	12	56,29	74,60%	11185	0,2319	40-10-30-20
4	12	13	5	61,81	75,83%	12172	0,2242	40-10-30-20
5	12	19	3	68,03	72,62%	12150	0,24	40-10-30-20
6	12	14	7	62,77	71,67%	12285	0,2351	40-10-30-20
7	7	30	3	80,74	62,00%	11300	0,286	40-10-30-20
8	6	13	12	57,29	71,78%	11955	0,2303	40-10-30-20
9	7	12	11	55,73	74,88%	12150	0,2221	40-10-30-20
10	8	13	12	59,38	67,53%	12305	0,2347	40-10-30-20
11	5	13	12	52,47	78,90%	11850	0,2267	40-10-30-20
12	5	14	12	59,32	69,50%	11305	0,2403	40-10-30-20
13	10	11	12	57,7	77,38%	11996	0,2201	40-10-30-20
14	9	10	9	56,12	78,80%	11740	0,2187	40-10-30-20

15	10	11	10	57,54	72,84%	12275	0,2252	40-10-30-20
16	11	12	7	59,22	76,09%	12252	0,2214	40-10-30-20
17	11	24	3	72,7	67,48%	12365	0,2573	40-10-30-20
18	12	14	8	63,96	68,00%	12250	0,2402	40-10-30-20
19	12	22	4	72,64	64,91%	12230	0,259	40-10-30-20
20	12	16	4	63,86	74,90%	12256	0,2323	40-10-30-20
21	12	19	5	68,3	68,73%	12360	0,2483	40-10-30-20
22	12	16	6	65,26	70,75%	12210	0,2411	40-10-30-20
23	5	13	12	58,02	72,06%	11255	0,2364	40-10-30-20
24	3	22	12	66,86	60,71%	11775	0,2622	40-10-30-20
25	3	26	11	70,12	58,46%	12220	0,2684	40-10-30-20
26	3	28	9	73,64	58,99%	11760	0,2769	40-10-30-20
27	12	18	6	68,29	66,36%	12240	0,2496	40-10-30-20
28	12	21	4	70,8	67,97%	12285	0,2543	40-10-30-20
29	12	14	7	60,92	73,85%	12285	0,2351	40-10-30-20
30	8	14	11	60	68,65%	12355	0,2338	40-10-30-20
torre	-	31	-	78,92	33,67%	12558	0,2379	40-10-30-20

Para validar el método cuasi-estacionario de la Norma IRAM 11900, se realizó una simulación térmica con EnergyPlus, utilizando el plug-in Honeybee dentro de Grasshopper/Rhinoceros para la tipología torre (fig. 3).

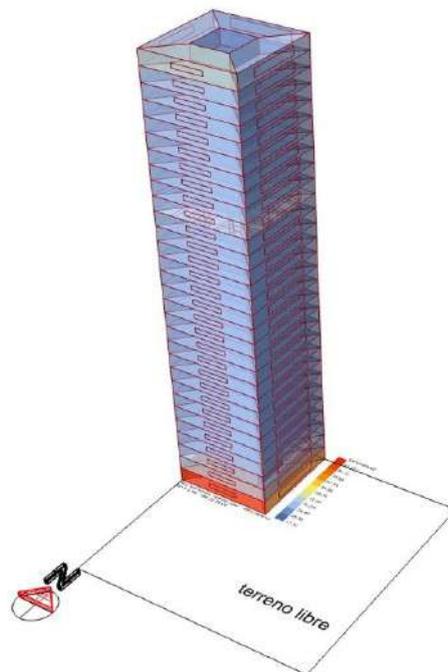


Figura 3. Zonificación de la torre según Energy+. Fuente: Elaboración propia, 2019

Se compararon los resultados de la demanda de calefacción y refrigeración mes a mes y se observó una mayor dispersión de los mismos hacia los extremos de cada temporada tal como lo menciona la norma española UNE EN ISO 13790 (AENOR 2011), que comparte la metodología de cálculo con la IRAM 11900. Los intensidad energética anual de la suma de las demandas de calefacción y refrigeración totalizan 50,16527 kWh/m².año para el método de IRAM 11900 y 46,68698 kWh/m².año según Energy+. En la fig. 4 se muestran las demandas mes a mes mientras que en la fig.

5, se muestra la regresión lineal de estos valores. Se observa un elevado coeficiente de determinación (R^2) para la demanda de calefacción y sensiblemente bajo para la de refrigeración, pudiéndose atribuir dicho comportamiento a que la temporada de calefacción es seca, y la temporada de refrigeración, húmeda, siendo este último factor no considerado por el método cuasi-estacionario.

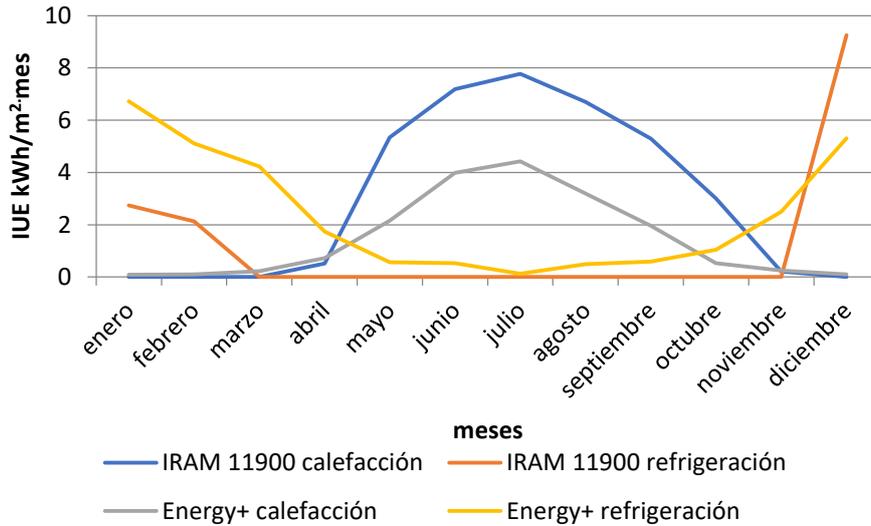


Figura 4. Demanda de calefacción y refrigeración según método cuasi-estacionario y Energy+. Fuente: Elaboración propia, 2019

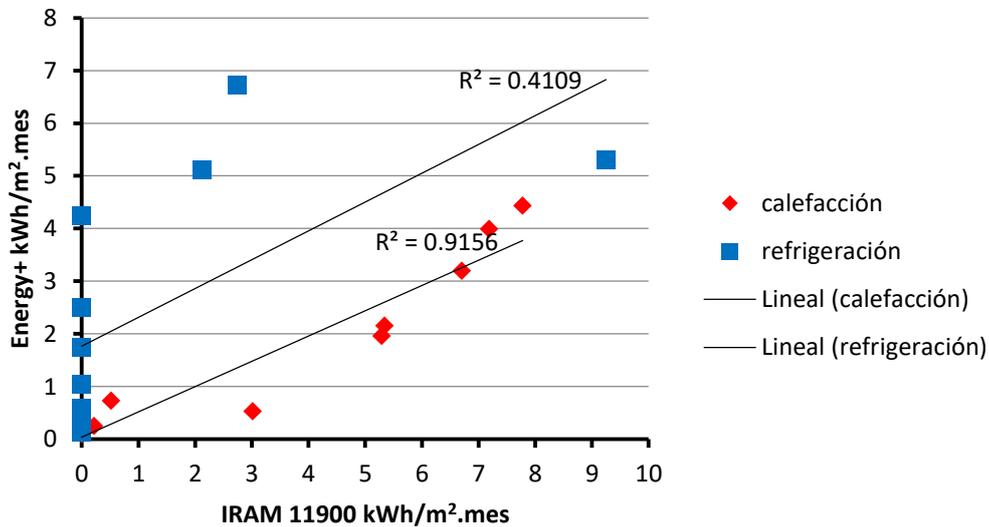
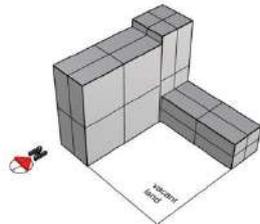
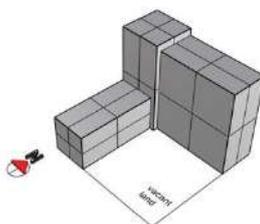
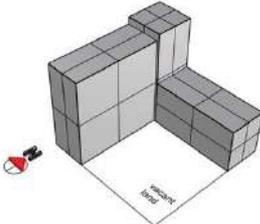
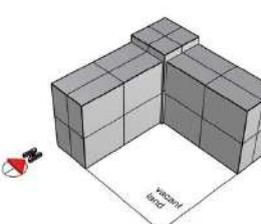
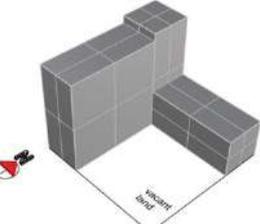
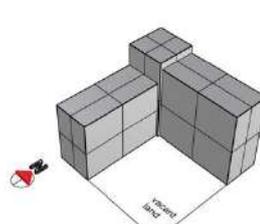
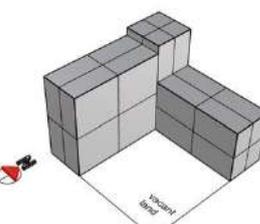
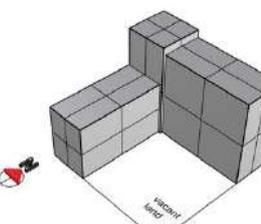


Figura 5. Regresión lineal entre las demandas obtenidas por cada método. Fuente: Elaboración propia, 2019

Luego, se eligen las mejores 5 tipologías para cada indicador: IP_{pp} , P_{FV} y CF, lo que da un total de 7 ya que algunas se repiten y se ordenan en la Tabla 4 a los efectos de compararlas entre sí. Observando las tipologías de mejor desempeño, se podría inferir que si se pretendiese disminuir el IPE, sería más conveniente maximizar el bloque Oeste, como es el caso de la alternativa 11, seguido por la alternativa 9 de mayor compacidad, pero no puede obviarse que el

método cuasi-estacionario, al no funcionar tan bien para el verano, maximiza las fachadas al Oeste, dejando de lado el recalentamiento que dicha orientación provoca. Se observa también que la alternativa 11 no presenta un CF tan bajo, lo que indica su falta de correlación con el IPE. Si es prioritaria la generación fotovoltaica, se aconseja maximizar el bloque Norte, tal el caso de las alternativas 4, 13 y 16 que a su vez presentan CFs bajos. Cabe aclarar que la dependencia lineal entre las variables sólo sirve para la RVO fijada para este caso: otras RVOs darían otras soluciones óptimas.

Tabla 4. Ranking de las 8 mejores alternativas para IPE_{pp}, P_{FV}, y CF. Fuente: Elaboración propia, 2019

											
Alt.3			Alt. 4			Alt. 8			Alt. 9		
IPEPP	PFV	CF	IPEPP	PFV	CF	IPEPP	PFV	CF	IPEPP	PFV	CF
56,29	0,76089159	0,2221	61,81	0,75829154	0,2242	57,29	0,75829154	0,2242	55,73	0,78795438	0,2201
											
Alt.11			Alt. 13			Alt. 14			Alt. 16		
IPEPP	PFV	CF	IPEPP	PFV	CF	IPEPP	PFV	CF	IPEPP	PFV	CF
52,47	0,7890223	0,2187	57,7	0,77383016	0,2201	56,12	0,77383016	0,2187	59,22	0,76089159	0,2214

A continuación, los resultados son analizados a partir de regresiones lineales multivariadas que vinculan IPE_{pp}, P_{FV} y CF entre sí (Figs. 6-8). Se consideran las series excluyendo e incluyendo la tipología TORRE, debido a la distorsión en los coeficientes de determinación que esta provoca. Puede observarse como el IPE_{pp} resulta inversamente proporcional al P_{FV}, mostrando un coeficiente de determinación más alto cuando no se considera la torre. La relación entre el IPE_{pp} y el CF es inversamente proporcional pero el coeficiente de determinación no es tan alto como si sucedería en climas más fríos y secos que el de Buenos Aires, siendo particularmente alto en el caso donde no se incluye la tipología TORRE. A modo de síntesis, se observa que la tipología TORRE provoca una disminución del coeficiente de determinación en todos los casos.

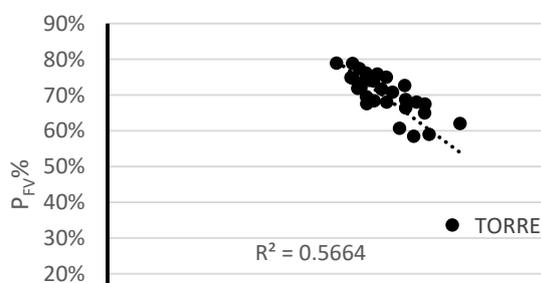
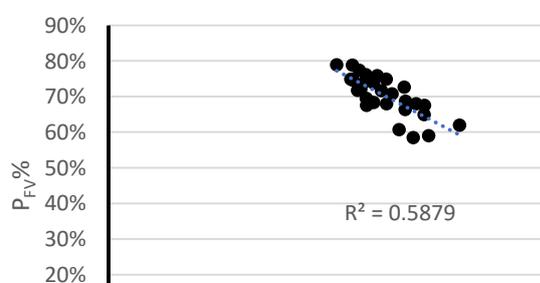


Figura 6. Regresiones lineales entre IPE_{pp} y P_{FV} % excluyendo e incluyendo la tipología TORRE. Fuente: Elaboración propia, 2019

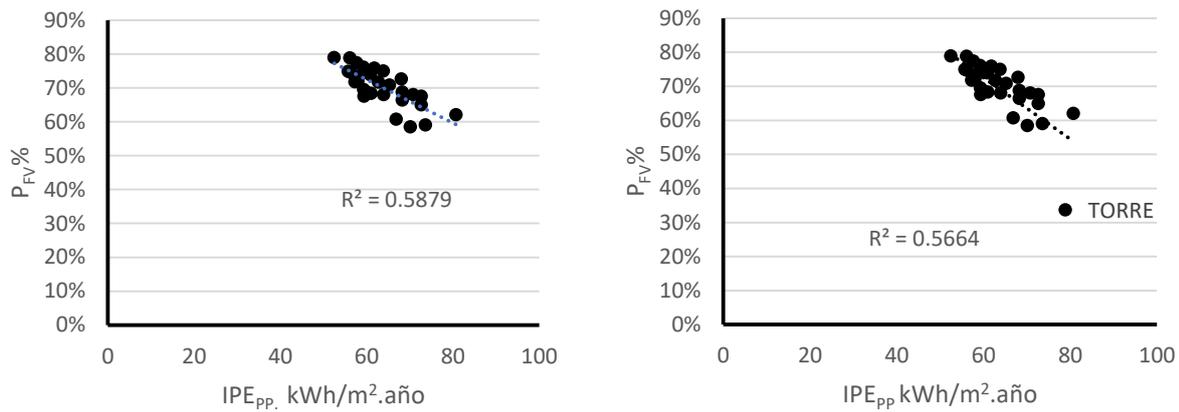


Figura 7. Regresiones lineales entre IPE_{pp} y CF excluyendo e incluyendo la tipología TORRE. Fuente: Elaboración propia, 2019

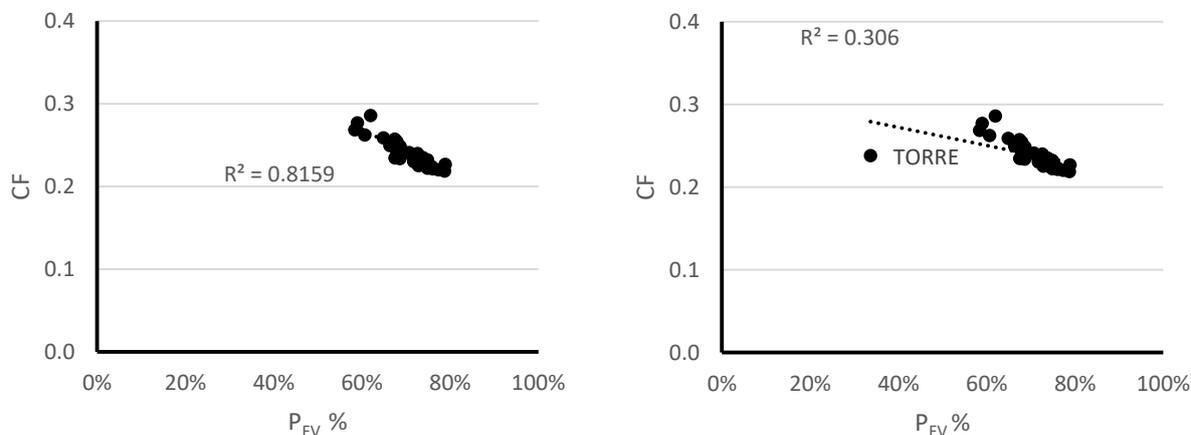


Figura 8. Regresiones lineales entre IPE_{pp} y CF excluyendo e incluyendo la tipología TORRE. Fuente: Elaboración propia, 2019

Discusión y Conclusiones

El uso de objetivos competitivos, como los implementados mediante las funciones objetivo, permiten que las soluciones formales edilicias den respuesta a requerimientos de naturaleza diversa en entornos no determinísticos, como las variables que intervienen el diseño arquitectónico.

Los resultados obtenidos revelan la fortaleza de la optimización multiobjetivo en un flujo de trabajo desarrollado en una única interfaz Rhino/GH/Octopus porque permite la iteración de los parámetros de manera transparente y traceable en tiempo real.

Las futuras líneas de investigación pueden incorporar variables de impacto ambiental como la energía incorporada a los materiales además de la operativa así como también la reducción de la emisiones de Gases Efecto Invernadero. Estas variables permitirían acercar el diseño arquitectónico al objetivo de Edificio de energía casi nula, contribuyendo a la Mitigación del Cambio Climático desde el sector de la construcción. Otra variable pasible de ser incorporada es la reducción de los desechos de construcción y demolición, que también influyen en el potencial de calentamiento global, propiciando la economía circular.

En síntesis, esta metodología si bien reconoce limitaciones ya que no pretende reemplazar las simulaciones energéticas dinámicas que corresponden a una etapa más avanzada del diseño arquitectónico, permite encauzar las morfologías edilicias en su etapa embrionaria, hacia un diseño más sustentable.

Agradecimientos

Las autoras agradecen a Eric Denovitzer la prueba de lectura.

Referencias

- A. Payne, and R. Issa. 2009. *The Grasshopper Primer. 2nd edition.* USA: Lift Architects. https://static1.squarespace.com/static/51c6f9f3e4b0e47ad1bbc71c/t/521cf940e4b021571fc7d3a5/1377630528615/Grasshopper+Primer_Second+Edition_090323.pdf.
- AENOR. 2011. "UNE-EN ISO 13790: 2011 Eficiencia Energética de Los Edificios. Cálculo Del Consumo de Energía Para Calefacción y Refrigeración de Espacios. (ISO 13790: 2008)." Asociación Española de Normalización y Certificación.

- Ascione, Fabrizio, Nicola Bianco, Gerardo Maria Mauro, and Giuseppe Peter Vanoli. 2019. "A New Comprehensive Framework for the Multi-Objective Optimization of Building Energy Design: Harlequin." *Applied Energy* 241 (May): 331–61. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.028>.
- ASHRAE. 2013. *2013 ASHRAE Handbook: Fundamentals*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning EngineersE.
- Attia, Shady, Jan L. M. Hensen, Liliana Beltrán, and André De Herde. 2012. "Selection Criteria for Building Performance Simulation Tools: Contrasting Architects' and Engineers' Needs." *Journal of Building Performance Simulation* 5 (3): 155–69. <https://doi.org/10.1080/19401493.2010.549573>.
- Baker, Nick, and Koen Steemers. 1996. "LT Method 3.0 — a Strategic Energy-Design Tool for Southern Europe." *Energy and Buildings, PLEA '94 International Conference*, 23 (3): 251–56. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(95\)00950-7](https://doi.org/10.1016/0378-7788(95)00950-7).
- Bianconi, Fabio, Marco Filippucci, and Alessandro Buffi. 2019. "Automated Design and Modeling for Mass-Customized Housing. A Web-Based Design Space Catalog for Timber Structures." *Automation in Construction* 103 (July): 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.002>.
- Brito, M.C., S. Freitas, S. Guimarães, C. Catita, and P. Redweik. 2017. "The Importance of Facades for the Solar PV Potential of a Mediterranean City Using LiDAR Data." *Renewable Energy* 111 (October): 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.085>.
- Catita, C., P. Redweik, J. Pereira, and M.C. Brito. 2014. "Extending Solar Potential Analysis in Buildings to Vertical Facades." *Computers & Geosciences* 66 (May): 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.01.002>.
- "Certificación Energética de Viviendas." n.d. Accessed July 2, 2019. <https://www.santafe.gov.ar/certiviviendas/>.
- Comité Europeo de Normalización y Certificación. 2012. "UNE-EN 15978:2012 Sostenibilidad En La Construcción. Evaluación Del Comportamiento Ambiental de Los Edificios. Métodos de Cálculo." AENOR.
- Díez-Mediavilla, M., M.C. Rodríguez-Amigo, M.I. Dieste-Velasco, T. García-Calderón, and C. Alonso-Tristán. 2019. "The PV Potential of Vertical Façades: A Classic Approach Using Experimental Data from Burgos, Spain." *Solar Energy* 177 (January): 192–99. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.11.021>.
- "El Gobierno publicó nueva reglamentación sobre generación distribuida | Cámara Argentina de Energías Renovables." n.d. Accessed May 21, 2019. <http://www.cader.org.ar/el-gobierno-publico-nueva-reglamentacion-sobre-generacion-distribuida/>.
- ETH- SOP- PISA. n.d. "SPEA2." Accessed April 21, 2019. <https://sop.tik.ee.ethz.ch/pisa/selectors/spea2/?page=spea2.php>.
- Gobierno de Santa Fe. 2019. "PROYECTO DE LEY DE ETIQUETADO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DE INMUEBLES DESTINADOS A VIVIENDA." Gobierno de Santa Fe. <https://www.santafe.gob.ar/ms/eficienciaenergetica/wp-content/uploads/sites/25/2018/12/Proyecto-de-Ley.pdf>.
- IRAM. 1996. IRAM 11605. Acondicionamiento Térmico de Edificios. Condiciones de Habitabilidad En Edificios Valores Máximos de Trasmitancla Térmica En Cerramientos Opacos. Buenos Aires: Argentine Normalisation and Certification Institute.
- IRAM. 2011. IRAM STANDARD 11603 Acondicionamiento Térmico de Edificios- Clasificación Bioambiental de La República Argentina. Buenos Alres: Argentine Normalisation and Certification Institute.
- IRAM. 2018. "IRAM 11900 Energy Performance in Residential Units. Calculation Method." Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- Lin, Meishun, Yiqun Pan, Weiding Long, and Weizhen Chen. 2014. "Influence of Building Shape Coefficient on Energy Consumption of Office Buildings in Hot-Summer-and-Cold-Winter Area of China." In . Nagoya, Japan. http://ibpsa.org/proceedings/asim2014/160_AsimC5-29-293.pdf.
- P. Cook. 2013. *Rhinoceros v5.0, Level 1, Training Manual*. Seattle: Robert McNeel & Associates.
- Ratti, Carlo, Nick Baker, and Koen Steemers. 2005. "Energy Consumption and Urban Texture." *Energy and Buildings* 37 (7): 762–76. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.10.010>.
- Redweik, P., C. Catita, and M. Brito. 2013. "Solar Energy Potential on Roofs and Facades in an Urban Landscape." *Solar Energy* 97 (November): 332–41. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.08.036>.

- Shi, Xing, and Wenjie Yang. 2013. "Performance-Driven Architectural Design and Optimization Technique from a Perspective of Architects." *Automation in Construction* 32 (July): 125–35. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.01.015>.
- "World Urbanization Prospects - Population Division - United Nations." n.d. Accessed March 25, 2019. <https://population.un.org/wup/>.
- Zhang, Anxiao, Regina Bokel, Andy van den Dobbelsteen, Yan Chen Sun, Qiong Huang, and Qi Zhang. 2017. "Optimization of Thermal and Daylight Performance of School Buildings Based on a Multi-Objective Genetic Algorithm in the Cold Climate of China." *Energy and Buildings* 139 (March): 371–84. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.048>.
- Zhang, Longwei, Lingling Zhang, and Yuetao Wang. 2016. "Shape Optimization of Free-Form Buildings Based on Solar Radiation Gain and Space Efficiency Using a Multi-Objective Genetic Algorithm in the Severe Cold Zones of China." *Solar Energy* 132 (July): 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.02.053>.
- Znouda, Essia, Nadia Ghrab-Morcos, and Atidel Hadj-Alouane. 2007. "Optimization of Mediterranean Building Design Using Genetic Algorithms." *Energy and Buildings* 39 (2): 148–53. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.11.015>.