





Recibido 26/02/2021
Aceptado 10/06/2021

MEJORAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN CALEFACCIÓN. POTENCIAL DE INTERVENCIÓN EN EDIFICIO ESCOLAR EXISTENTE DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN JUAN, ARGENTINA

ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENTS IN HEATING. POTENTIAL FOR INTERVENTION IN AN EXISTING SCHOOL BUILDING IN THE METROPOLITAN AREA OF SAN JUAN, ARGENTINA.

MARÍA GUILLERMINA RÉ

Magister en en Arquitectura en Zonas Áridas y Sísmicas
Becaria Doctoral CONICET, Docente, Investigadora en Instituto
Provincial de Planeamiento y Hábitat, Facultad de Arquitectura,
Urbanismo y Diseño Universidad Nacional de San Juan
San Juan, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-3109-7138>
guillerminare@gmail.com

MARÍA PÍA MAZZOCCO

Arquitecta
Profesional independiente
Córdoba, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-3403-1353>
piamazzocco@gmail.com

CELINA FILIPPÍN

Doctora en Ciencias
Investigadora Principal
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas
y Técnicas (CONICET)
La Pampa, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-0521-6180>
cfilippin@cpenet.com.ar

RESUMEN

El cambio climático, el constante crecimiento del consumo energético y los altos niveles de emisiones que registra el sector energético, requieren de la implementación de soluciones concretas. La rehabilitación de edificios ofrece una oportunidad significativa para contribuir en este aspecto. El objetivo del presente trabajo es analizar el potencial de intervención en un edificio escolar perteneciente al Programa Nacional 700 Escuelas. Las mejoras en eficiencia energética se evalúan a través de simulación dinámica y se calculan indicadores respecto al consumo anual de energía para calefacción. Los valores para el edificio de referencia son de 74,5 kWh/m² año y de 158 kWh/alumno. Con las propuestas de rehabilitación se podrían alcanzar ahorros energéticos de entre 39,7% y 60%. La alternativa R-Media se presenta como la más conveniente al lograr beneficios energéticos del 47%, con menores costos de inversión. Los indicadores de eficiencia energética para dicho conjunto de mejoras son de 39,2 kWh/m² año y de 83,1 kWh/alumno. Los resultados alcanzados pueden servir de referencia para la rehabilitación de 71 edificios escolares erigidos en la provincia de San Juan entre los años 2004 y 2015, los cuales responden a una tipología constructiva con similitudes de materialización de la envolvente y configuración funcional.

Palabras clave

escuelas, rehabilitación energética, eficiencia energía, simulación.

ABSTRACT

Climate change, the constant growth of energy consumption, and the high levels of emissions recorded by the energy sector, require the implementation of concrete solutions. Building rehabilitation offers a significant opportunity to contribute in this regard. The purpose of this work is to analyze the potential for intervention in a school building from the "Programa Nacional 700 Escuela" (National 700 Schools Program). The improvements in energy efficiency are evaluated through a dynamic simulation and indicators are calculated regarding the annual energy consumption for heating. The values for the reference building are 74.5 kWh/m² year and 158 kWh/student. With the rehabilitation proposals, energy savings could be achieved of between 39.7% and 60%. The R-Mean alternative appears as the most convenient one as it achieves energy benefits of 47%, with lower investment costs. The energy efficiency indicators for said set of improvements are 39.2 kWh/m² year and 83.1 kWh/student. The results achieved can serve as reference for the rehabilitation of 71 school buildings built in the province of San Juan between 2004 and 2015, which belong to a construction typology with a similarity of materials of their envelope and functional configuration.

Keywords

schools, energy rehabilitation, energy efficiency, simulation

INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción y la operación de edificios registran la mayor participación en el uso de energía y emisiones de dióxido de carbono asociadas. Durante 2017, representaron el 36% del consumo de energía final, con una producción de CO₂ del 39% (IEA, 2018). Actualmente, existe un interés creciente de los países en sus políticas de Estado, por mejorar el desempeño del sector edilicio. En Argentina, la Norma IRAM 11900 (2017) constituye un avance en materia de regulaciones, aunque se encuentra limitada al uso residencial.

La rehabilitación energética de edificios se puede lograr a través de la aplicación de estrategias bioclimáticas de diseño, mejoras de las propiedades térmicas de la envolvente, reemplazo de equipos por unos eficientes, y uso de sistemas pasivos o híbridos de acondicionamiento que involucren energías renovables (Esteves, 2017). Asimismo, las mejoras de cerramientos verticales y horizontales, con la incorporación de materiales aislantes, representan una inversión en la calidad de la infraestructura (Andersen, Discoli, Viegas y Martini, 2017; Mercader Moyano y Czajkowski, 2017; A. Esteves, M. Esteves, Mercado, Barea y Gelardi, 2018, Kuchen y Kozak, 2020).

El potencial de intervención sobre la envolvente de edificios escolares genera un doble beneficio: mejorar la eficiencia energética y optimizar los niveles de confort térmico. Las escuelas deben garantizar estándares de calidad ambiental interior para que alumnos y docentes puedan desarrollar correctamente los procesos de enseñanza-aprendizaje (San Juan, 2014, Barbosa, De Freitas y Almeida, 2020).

La eficiencia energética en los edificios se mide mediante unidades de consumo por área (kWh/m² año). Este indicador permite establecer comparaciones a nivel nacional e internacional. Sin embargo, para edificios escolares tiene debilidades, como la exclusión del uso. Las escuelas están conformadas, como se sabe, por espacios de diversas características. El consumo de energía debe ser definido también con la consideración de la ocupación de los espacios (kWh/alumno). Al adoptar una combinación de ambos indicadores de eficiencia energética se obtiene una imagen más integral (Sekki, Andelin, Airaksinen y Saari, 2016). En particular, un estudio en Brasil (Geraldí y Ghisi, 2020) determinó que el indicador de la intensidad del uso de energía en función del número de estudiantes es más confiable y adecuado para representar el *stock* de edificios escolares.

La evaluación del comportamiento energético de edificios existentes y propuestas de rehabilitación se puede abordar con distintos enfoques complementarios entre sí (Wang, Yan, y Xiao, 2012). En ese sentido, la simulación dinámica es una herramienta favorable para el análisis del funcionamiento de edificios en su etapa post

construcción ya que brinda la posibilidad de identificar los distintos parámetros que afectan el consumo de energía y cuantificar su incidencia en los valores totales (Veloso y Souza, 2019).

Dado este contexto, el objetivo principal del presente trabajo es evaluar energéticamente a través de simulación dinámica el potencial de intervención en un edificio escolar de construcción tradicional, localizado en el Área Metropolitana de San Juan (AMSJ). Los objetivos específicos buscan: primero, generar el modelo termofísico del edificio a partir de la calibración con valores de consumo de energía medidos; segundo, estudiar distintas propuestas tecnológicas y de área colectora de energía solar para disminuir el consumo de energía manteniendo la situación de confort; y, tercero, calcular Indicadores de Eficiencia Energética (IEE).

METODOLOGÍA

Se trabaja sobre la base de una investigación aplicada, avanzando a través del estudio de caso. Gran parte de la infraestructura escolar existente, se presenta como una oportunidad de revertir el problema ambiental del uso de la energía, si se la considera como redes en lugar de entidades independientes (Boutet, Hernández, Jacobo, 2020). Para el presente estudio se selecciona un edificio escolar representativo por su configuración funcional y tecnología constructiva (Ré, 2017): el Colegio Provincial de Rivadavia (CPR), que pertenece al Programa Nacional 700 Escuelas (PN700E), vigente entre 2004 y 2008, y extendido a través de los programas Más Escuelas, hasta el año 2015. En la provincia de San Juan existen 71 escuelas públicas erigidas en el marco de dichos programas, las cuales podrían ser rehabilitadas energéticamente.

El análisis se aplica a la estación fría, por ser el período crítico de climatización de un edificio escolar, dada su mayor frecuencia de uso. En función del diagnóstico, se elaboran distintas propuestas de mejoras de la eficiencia energética. La evaluación de cada una de ellas se realiza mediante simulación dinámica utilizando el software Ecotect (Autodesk, 2011).

Al edificio existente en sus condiciones originales de envolvente, equipamiento y comportamiento se lo llama "edificio de referencia". Esta expresión es empleada a nivel internacional en investigaciones de *stock* y evaluaciones de propuestas de rehabilitación energética (Attia, Shadmanfar y Ricci, 2020; Geraldí y Ghisi, 2020).

CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA Y LOCALIZACIÓN

La ciudad de San Juan se ubica a 640 msnm y sus coordenadas geográficas son: 31°32'13" latitud sur y 68°31'30" longitud oeste. Pertenece a la zona

Datos climáticos		Unidad	Invierno	Verano
Temperatura	Media	°C	10,61	25,56
	Máxima media		18,5	33,1
	Mínima media		2,7	18
	Máxima de diseño		-	41,4
	Mínima de diseño		5,6	-
Humedad relativa		%	58	46,7
Precipitación	Media	mm	13	60,2

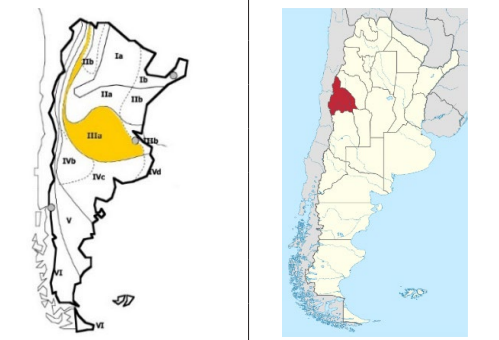


Tabla 1. Datos climáticos de la ciudad de San Juan. Mapas de localización geográfica y de Zona Bioambiental III-a. Fuente: Elaboración de las autoras en base a datos de la Norma IRAM 11603 (2012). Mapa: Wikipedia (2020).

Variable	Un.	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic
T° media	°C	26,49	26,46	21,59	19,53	15,37	13,16	9,82	12,75	13,88	21,28	23,92	28,09
T° máxima	°C	31,34	31,71	26,25	24,62	20,57	18,31	14,75	18,88	19,35	26,64	29,65	33,23
T° mínima	°C	21,36	21,16	16,89	14,33	10,41	7,83	5,09	6,76	8,51	15,60	17,91	22,47
Humedad relativa	%	45	37	46	46	47	38	44	32	37	34	32	36
Radiación solar	W/m2	311	320	248	206	153	125	126	166	200	281	324	355
Presión atmosférica	kPa	93,73	93,60	93,90	93,94	93,98	94,12	94,27	94,26	94,22	93,81	93,64	93,47
Velocidad del viento	m/s	2,85	2,96	2,99	2,00	2,10	1,94	2,14	2,39	2,99	3,06	3,26	3,32
Punto de rocío	°C	12,60	10,18	8,54	6,93	3,40	-1,67	-2,69	-4,78	-1,42	3,14	4,48	10,55
T° Bulbo húmedo	°C	26,37	25,79	20,66	18,56	14,21	11,02	7,82	10,66	12,07	19,69	22,31	27,36

Tabla 2. Variables climáticas; promedios mensuales año 2013. Fuente: Elaboración de las autoras en base a datos de Pontoriero (2017).

bioambiental III-a, templada calidad, según la clasificación de la Norma IRAM 11603 (2012) para la República Argentina (Tabla 1). La subzona “a” presenta amplitudes térmicas, diarias y estacionarias, iguales o mayores a los 14°C.

Para simular el comportamiento energético del edificio escolar, se elaboró un archivo climático propio del año en estudio, el cual permite un mayor acercamiento a la realidad. La información fue procesada y transcripta al programa Elements (Rocky Mountain Institute [RMI], 2020). Los datos climáticos de la ciudad de San Juan fueron obtenidos con una estación meteorológica ubicada en el Instituto de Energía Eléctrica (Pontoriero, 2017). En la Tabla 2 se puede observar la información introducida al programa.

CASO DE ESTUDIO

El Colegio Provincial de Rivadavia es una institución de gestión estatal de nivel secundario. La escuela se desarrolla en planta baja, posee una superficie cubierta de 1169,4 m² y una superficie calefaccionada de 604,38 m². Las circulaciones son semi-cubiertas, a través de galerías. La tecnología constructiva es de muros de mampostería de ladrillo macizo cocido, con traba de 30cm o 22cm, y terminación exterior de revoque. El cerramiento horizontal superior es de losa de hormigón armado, plana o inclinada

con terminación de baldosa cerámica (sector aulas). La carpintería es corrediza, de marco de chapa de acero y vidrio simple. Las ventanas presentan parasoles en las orientaciones norte y oeste (Figura 1).

En la etapa de diagnóstico se analiza el rango de sombras de 9:00 a 17:00 h, cada 30 minutos, para el día 21 de junio, con el fin de estudiar el potencial de ganancia solar que presenta edificio (Figura 2). Las aulas (todas con orientación norte-sur), poseen ventilación cruzada e iluminación natural. Sin embargo, los parasoles al norte restringen el ingreso solar en invierno al permanecer relativamente cerrados la mayoría del tiempo.

La evaluación térmico-energética de edificios escolares difiere significativamente de otros usos y amerita otros aspectos a considerar, como:

- Ocupación: 285 alumnos distribuidos turno mañana y tarde.
- Densidad de ocupación bruta máxima por aula y por turno: 2.29 m²/alumno; valor que corresponde a 24 estudiantes por aula de 55 m².
- Tasa de ventilación por aula, según ANSI/ASHRAE Standard 62.1 (2019): 551 m³/h.aula o 23 m³/h.alumno.
- Tiempo de uso del edificio: 8 h de lunes a viernes; 6 h los sábados.

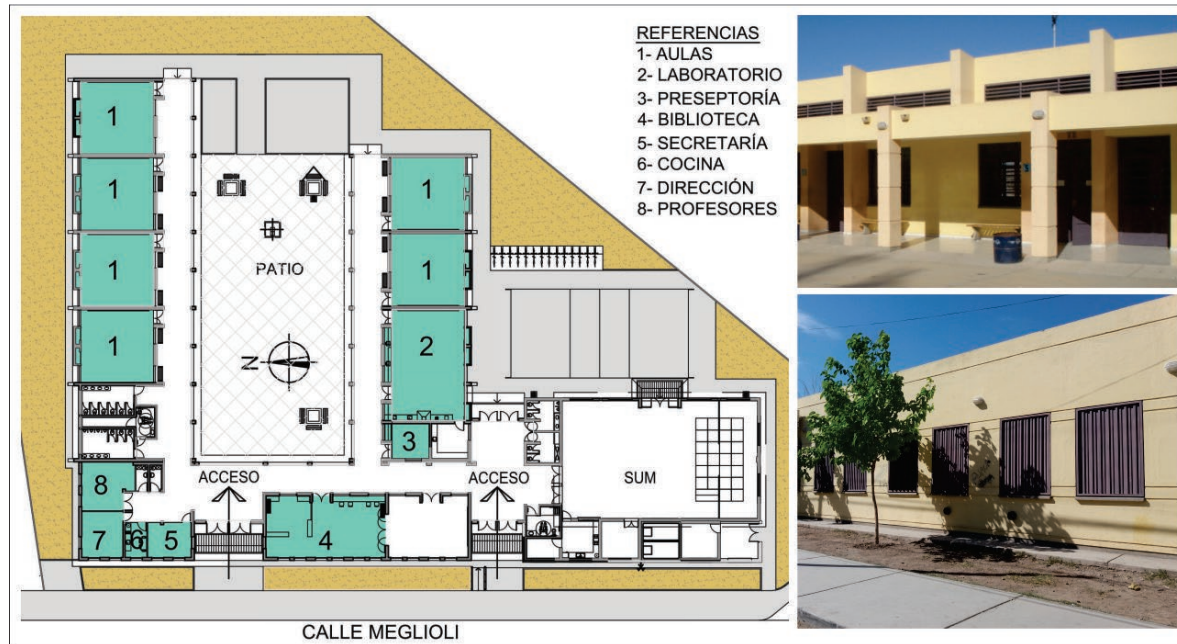


Figura 1. Planta del CPR, con identificación de espacios con calefacción mecánica (en color verde). Fotografías de galería y del frente del edificio con vista de los parasoles. Fuente: Elaboración de las autoras.

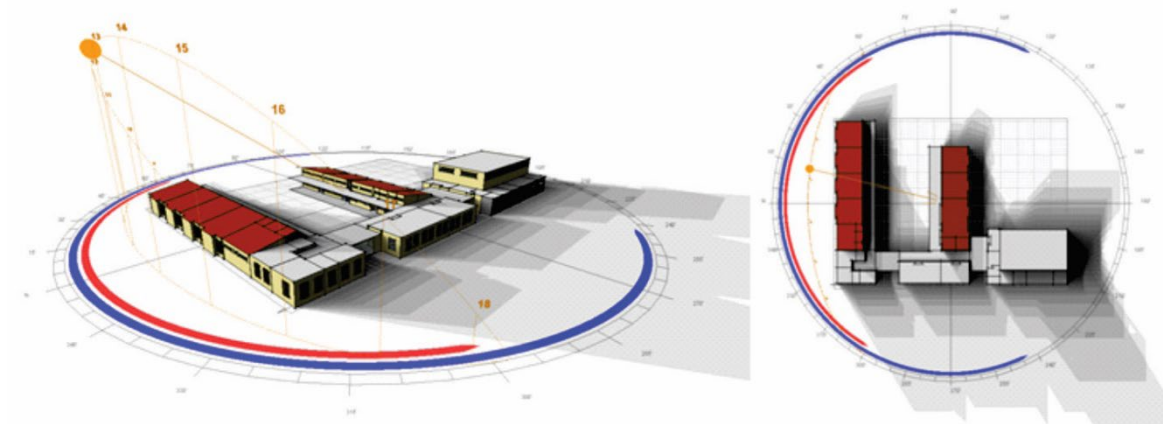


Figura 2. Volumetría y planta del edificio. Análisis de sombras para el 21 de junio. Fuente: Elaboración de las autoras con Ecotect.

EVALUACIÓN DINÁMICA

Se evalúa el edificio de referencia y las distintas propuestas de rehabilitación a través de simulación dinámica con Ecotect¹. El software posibilita el análisis integral y en simultáneo de situaciones de asoleamiento, ganancias internas, configuración geométrica y tecnológica de los elementos constructivos. Ecotect permite estudiar el potencial de intervención de soluciones constructivas mediante modificaciones de la condición existente e individualizar diferentes zonas del edificio para conocer su

desempeño energético. Distintos autores que emplean el programa en la actualidad concluyen que son razonables los resultados obtenidos respecto a los datos medidos y simulados (Trisnawan, 2018; Khan, Asif y Mohammed, 2017; Harish y Kumar, 2016).

Para darle confiabilidad y validez a los resultados de la simulación, se lleva a cabo la calibración del modelo computacional a partir de datos empíricos (Godoy-Muñoz, 2015). Se utilizan los registros de consumo energético de

¹ ECOTECT utiliza un cálculo simplificado basado en el Método de Admitancias del Chartered Institute of Building Services Engineers (CIBSE Admittance Method). Aplica la admitancia de los elementos constructivos y los factores de retraso y atenuación térmica de materiales para definir la respuesta en régimen transitorio.

Consumo de energía para calefacción							
Bimestre	1	2	3	4	5	6	Anual
Consumo de gas natural							kWh
Cocina/Horno	292	667	697	712	622	508	3498
Calefacción (estufas TB)	11	3630	19491	13714	7719	–	44565
Total gas	303	4297	20188	14426	8341	508	48063
Consumo electricidad							
Estufa a cuarzo	–	68	141	95	–	–	304
Caloventilador	–	185	378	251	–	–	814
Calefacción eléctrica	–	253	519	346	–	–	1118
Otros usos	7412	10026	7007	7597	6280	6266	44588
Total electricidad	7412	10279	7526	7943	6280	6266	45706
Total calefacción	11	3883	20010	14060	7719	–	45683

Tabla 3. Consumo de gas natural y electricidad del edificio. Discriminación del consumo para calefacción por fuente de energía. Fuente: Elaboración de las autoras.

electricidad y gas natural del establecimiento escolar correspondientes a la auditoría energética del año 2013 (Ré, Blasco Lucas y Filippin, 2016).

El sistema de acondicionamiento adoptado para la simulación es “heating only” (sólo calefacción) en los ambientes con estufas y “full air conditioning” (aire acondicionado completo) para el espacio que cuenta con equipo de Aire Acondicionado (AA) split.

CONSUMOS ENERGÉTICOS

El análisis energético se centra en la fase de funcionamiento del edificio (energía operativa). Los datos de consumo se obtienen de las facturas de servicio y de la auditoría energética. Los registros de gas natural, en m³, se convierten a kilovatios hora (kWh). Se utiliza un factor de conversión de 9,767 kWh/m³, que surge de considerar el Poder Calorífico Inferior del gas natural (8400 kcal/m³) y una equivalencia de 1 kW a 859,8 kcal/h (Selectra, 2020).

El equipamiento eléctrico para climatización que posee la escuela es: 2 caloventiladores (1500 W), 1 estufa a cuarzo (1200 W) y 1 AA (2150 W) en el sector de administración. En las aulas hay ventiladores de pared (90 W). Los artefactos a gas natural para calefacción son 10 estufas a gas de tiro balanceado de 5700 kcal/h y 4 de 3800 kcal/h.

El consumo de gas para calefacción corresponde a 44.565 kWh/año. La electricidad utilizada para calefaccionar ambientes se calcula en 1.118 kWh, de acuerdo a las potencias y horas de uso de los artefactos (ENRE, 2020). La Tabla 3 muestra cada uno de los consumos por bimestre, según información de las boletas de servicio.

PROPUESTAS DE REHABILITACIÓN

A partir de lo observado, se elaboran propuestas de rehabilitación energética del edificio escolar como medidas de optimización del comportamiento térmico-energético. Éstas involucran: aumento del área de ganancia solar directa (GSD) en las aulas de la crujía norte; aumento de la resistencia térmica de la envolvente; y mejoras de eficiencia en el sistema de acondicionamiento mecánico.

El aumento de área colectora se aplica a las aulas de la crujía norte debido a su potencial de intervención. Los valores alcanzados representan un 13% del área efectiva de vidrio respecto al área útil del aula. Las ventanas pasan de 5,15 m² (edificio de referencia) a 7,04 m² (caso rehabilitado). Además, se decide eliminar los parasoles en esta orientación, para que no reduzcan las ganancias solares en invierno.

Las propiedades térmicas de los cerramientos verticales y horizontales se calculan siguiendo los procedimientos de las Normas IRAM 11601 (2002). Los elementos mejorados verifican los valores de transmitancia térmica sugeridos en la Norma IRAM 11605 (2002) en los niveles de confort *A-recomendado* y *B-medio*. Para la rehabilitación de muros se emplea un Sistema de Aislamiento Térmico Exterior (SATE). La carpintería existente se reemplaza por puertas y ventanas que permitan aumentar el área efectiva de vidrio, mejorar las propiedades térmicas y disminuir las infiltraciones de aire. La sustitución está prevista en todos los espacios calefaccionados del edificio. En el nivel A se usan marcos de aluminio con ruptor de puente térmico (RPT) y doble vidrio hermético (DVH 6-12-6 mm). En el nivel B, se opta por marco simple con DVH.

Las mejoras constructivas se agrupan en diferentes propuestas de intervención, las cuales reciben los

Componente tecnológico	Propiedades	Edificio referencia	R-Simple B	R-Simple A	R-Media	R-Óptima
Carpintería		Chapa	Aluminio	Aluminio + RPT	Aluminio	Aluminio + RPT
	Material	V. Simple (6 mm)	DVH (6-12-6 mm)	DVH (6-12-6 mm)	DVH (6-12-6 mm)	DVH (6-12-6 mm)
	U [W/m2.K]	5,66	3,89	2,82	3,89	2,82
Muro 1	Material	Ladrillón + revoque	Ladrillón + revoque	Ladrillón + revoque	EPS 50 mm + revoque	EPS 100 mm + revoque
	Espesor [cm]	30	30	30	35	40
	U [W/m2.K]	2,04	2,04	2,04	0,49	0,28
Muro 2	Material	Ladrillón + revoque	Ladrillón + revoque	Ladrillón + revoque	EPS 50 mm + revoque	EPS 100 mm + revoque
	Espesor [cm]	22	22	22	27	32
	U [W/m2.K]	2,47	2,47	2,47	0,51	0,28
Losa inclinada	Material	Losa H° A°+ mezcla + baldosas	EPS 100 mm + chapa galvanizada	EPS 150 mm + chapa galvanizada	EPS 100 mm + chapa galvanizada	EPS 150 mm + chapa galvanizada
	Espesor [cm]	30 cm	40,2 cm	45,2 cm	40,2 cm	45,2 cm
	U [W/m2.K]	1,35	0,26	0,18	0,26	0,18
Losa plana	Material	Losa H° A°+ mezcla + membrana	EPS 100 mm + mezcla + membrana	EPS 150 mm + mezcla + membrana	EPS 100 mm + mezcla + membrana	EPS 150 mm + mezcla + membrana
	Espesor [cm]	26 cm	39 cm	44 cm	39 cm	44 cm
	U [W/m2.K]	1,43	0,26	0,18	0,26	0,18
U Global [W/m2.K]		2,26	1,54	1,35	0,98	0,71

Tabla 4: Componentes tecnológicos. Materiales, propiedades térmicas. Edificio de referencia y propuestas de rehabilitación. Fuente: Elaboración de las autoras.

siguientes nombres: Rehabilitación Simple (R-Simple) A y B, Rehabilitación Media (R-Media), y Rehabilitación Óptima (R-Óptima). En la Tabla 4 se detalla la conformación de cada conjunto, con sus respectivas transmitancias térmicas (U). Para las renovaciones de aire, se considera una tasa de 2,6; valor establecido para garantizar condiciones de higiene y salubridad (ANSI/ASHRAE, 2019).

Así también, se analizan los costos de inversión y del Período de Amortización (PA), aspectos que contribuyen en la toma de decisiones. Dicha estimación podría presentar variaciones significativas a futuro debido a los altos niveles de inflación que ha evidenciado el país en la última década e, igualmente, ante posibles cambios en la política de gobierno respecto al subsidio de la energía, situación que se da en la actualidad.

La tercera estrategia es la mejora de la eficiencia del sistema de calefacción. Se propone el reemplazo de los

equipos individuales (estufas tiro balanceado) que poseen una eficiencia del 59%, según Norma IRAM 11900 (2017), por un sistema central de calefacción cuya eficiencia estimada alcanza el 65%.

El potencial de ahorro se analiza según dos Indicadores de Eficiencia Energética: kWh/m² año y kWh/alumno, para el total del edificio calefaccionado (604,38 m²), como para las 4 aulas que integran la crujía norte (220 m²). El número de alumnos es de 285 y 192, respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 3 expone la calibración del modelo computacional del caso de referencia a partir de los registros energéticos. Se compara el consumo real de energía destinada a la calefacción con los valores calculados en la simulación. El gráfico de dispersión arroja

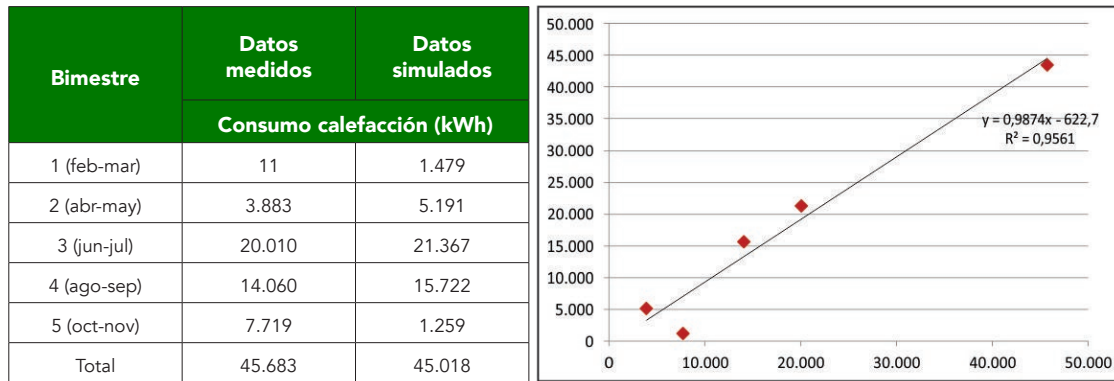


Figura 3: Consumo de energía destinada a calefacción. Datos medidos 2013 vs. simulados. Fuente: Elaboración de las autoras.

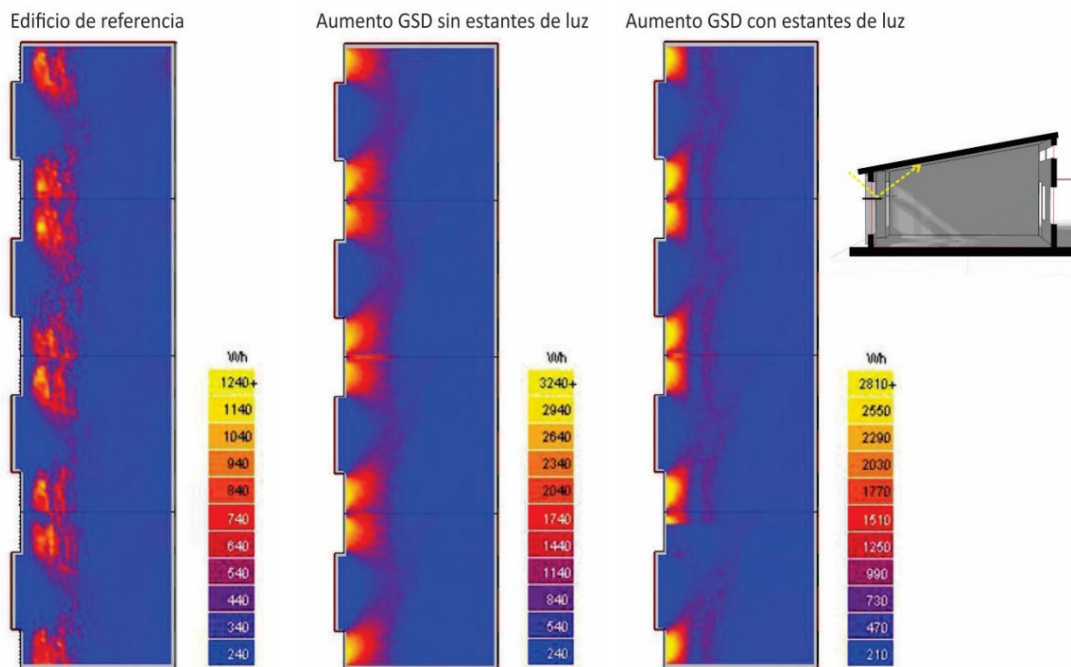


Figura 4. Incidencia de la radiación diaria promedio en aulas de crujía norte. Edificio de referencia y R-Óptima. Fuente: Elaboración de las autoras con Ecotect.

una relación $R^2 = 0.956$, estadísticamente significativa ($P \leq 0.05$). Se considera que el modelo obtenido puede ser usado para estudiar el comportamiento de las distintas propuestas tecnológicas.

MEJORAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

En las aulas orientadas al norte, se analiza la radiación diaria promedio en invierno sobre un plano de trabajo ubicado a 80 cm del suelo (Figura 4). En la imagen de la izquierda, se aprecian las ventanas del edificio de referencia con los parasoles abiertos. Al centro, la Rehabilitación Óptima con aumento de superficie de ganancia solar directa y eliminación de parasoles. A fin de mitigar el deslumbramiento, se colocan estantes de luz fijos, que generen una distribución uniforme en el

espacio áulico (Figura 4, derecha); y para evitar las ganancias de calor indeseadas se genera un alero con la cubierta inclinada, que proporcione sombra en los meses cálidos.

A través de la simulación, se evalúa el posible sobrecalentamiento en verano. Se realiza, entonces, el cálculo del consumo de energía para refrigeración de las 4 aulas a intervenir, con una eficiencia del sistema de 3.6 según Norma IRAM (2017). Los resultados muestran un consumo de 3.871 kWh/año para el edificio de referencia durante la época estival (de octubre a marzo). Los casos rehabilitados consumirían 3.338 kWh/año R-Óptima y 3.360 kWh/año R-Óptima + GSD, confirmando que no se eleva el requerimiento de acondicionamiento mecánico.

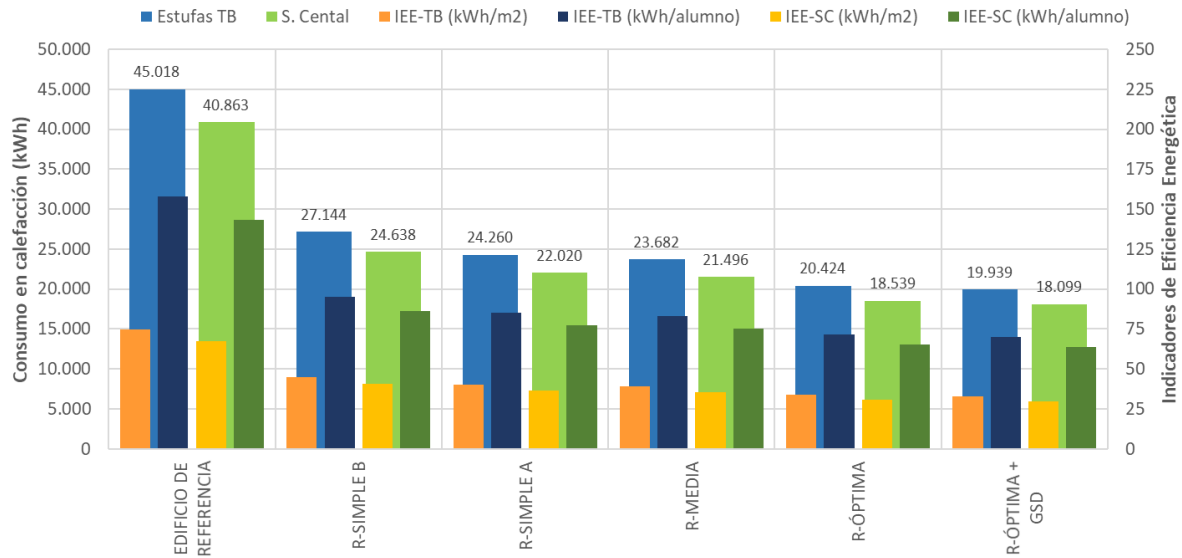


Figura 5. Consumo de energía destinada a calefacción para el edificio de referencia y propuestas de rehabilitación. Fuente: Elaboración de las autoras.

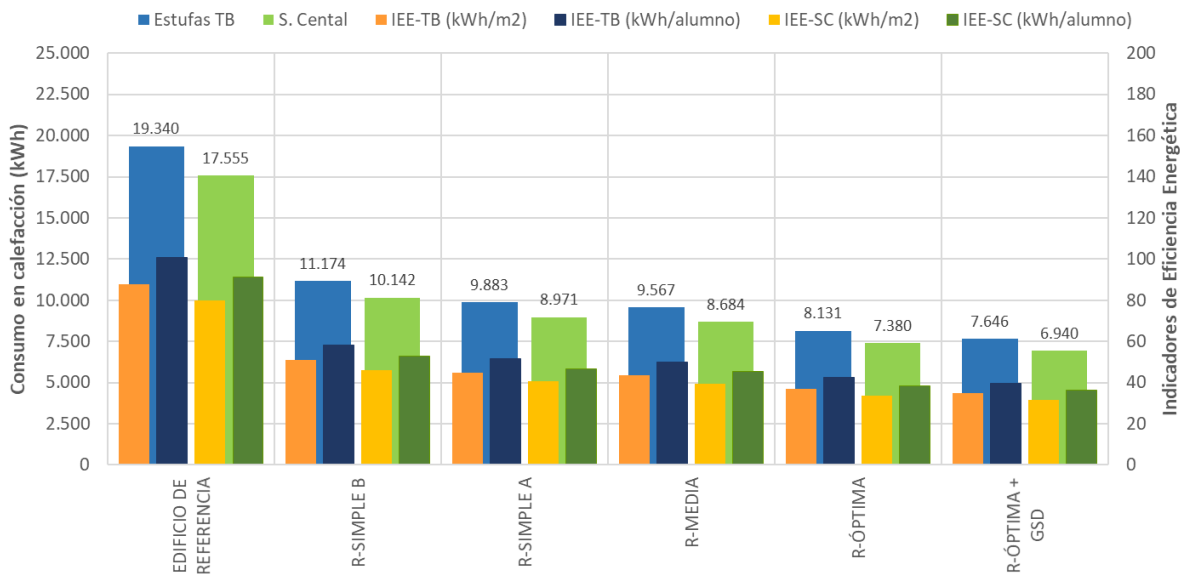


Figura 6. Consumo de energía destinada a calefacción del sector de aulas crujía norte. Fuente: Elaboración de las autoras.

El consumo de energía destinada a calefacción para el edificio de referencia y para las distintas rehabilitaciones se puede observar en la Figura 5. Los IEE para cada caso se ubican en la misma gráfica. En azul se representan los consumos simulados con las estufas existentes de Tiro Balanceado (TB) y en verde con Sistema Central (SC) de calefacción. El edificio de referencia disminuye sus consumos de 45.018 kWh/año a 40.863 kWh/año con el cambio de equipos, representando un ahorro del 9%.

Con el aumento de la resistencia térmica de la envolvente, los consumos energéticos descienden desde 27144 kWh/año (R-Simple B-TB) hasta 18.539 kWh/año (R-Óptima-

SC). Los IEE-TB para estos casos son de 44,9 kWh/m² y 95,2 kWh/alumno, y IEE-SC de 30,7 kWh/m² y 65,0 kWh/alumno. El modelo R-Óptima con aumento de Ganancia Solar Directa (GSD), y sistema de calefacción central muestra un comportamiento energético de 18.099 kWh/año con una disminución del consumo del 60%. En esta propuesta, los IEE descienden de 74,5 kWh/m² y 158 kWh/alumno (edificio de referencia) a 29,9 kWh/m² y 63,5 kWh/alumno.

El potencial de intervención de las cuatro aulas al norte se puede observar en la Figura 6. Esta zona podría reducir sus consumos de 19.340 kWh/año a 6.940 kWh/

Variante analizada	IEE-TB	IEE-TB	Consumo	Costo por año	Valor/sup.	Total Rehab.	Total Rehab.	Amortización
Caso	kWh/m ²	kWh/alumno	kWh/año	\$	U\$/m ²	U\$	\$	Años
Edificio ref.	74,5	158,0	45.018	52429				
R-Simple B	44,9	95,2	27.144	31613	108	65.296	6.298.848	55
R-Simple A	40,1	85,1	24.260	28254	153	92.301	8.923.369	67
R-Media	39,2	83,1	23.682	27581	127	76.953	7.406.979	54
R-Óptima	33,8	71,7	20.424	23787	182	109.787	10.614.726	67
R-Óptima+GSD	33,0	70,0	19.939	23222	191	115.364	11.132.611	69

Tabla 5. Comparación de IEE, costos energéticos y valor de la inversión para las propuestas de rehabilitación de la envolvente. Referencias del valor dólar 1U\$ = \$96,5, al 26/05/2021, Banco Nación Argentina. Fuente: Elaboración de las autoras.

Programa Nacional 700 Escuelas en el AMSJ	IEE- superficie	IEE- densidad
Unidades de análisis	kWh/m ²	kWh/alumno
Escuela Técnica Obrero Argentino	32,2	81,6
Escuela Provincial Educación Técnica N°5	33,6	101,0
Colegio Provincial de Rivadavia	75,6	160,3
Colegio Secundario Jorge Luis Borges	24,9	61,6
Colegio Superior N°1 Rawson	28,2	35,5

Tabla 6. IEE de Escuelas pertenecientes al PN700E del Área Metropolitana de San Juan. Fuente: Elaboración de las autoras.

año si se aplicaran las tres estrategias propuestas. Los IEE van desde 87,9 kWh/m² y 100,7 kWh/alumno (IEE-TB Edificio de Referencia) a 31,5 kWh/m² y 36,1 kWh/alumno (IEE-SC R-Óptima + GSD). Los Indicadores de Eficiencia Energética por alumno para el sector aulas poseen valores significativamente menores que aquellos resultantes para la totalidad del edificio. Ellos representan la intensidad de uso diferenciada que caracterizan a los edificios de tipología escolar.

A continuación, las propuestas de mejoras se analizan desde el aspecto económico. La consideración de los costos de la inversión por unidad de superficie (U\$/m²) y el Período de Amortización ayudan a la toma de decisiones. La comparación de los IEE con el PA permite identificar que las mejoras R-Simple B y R-Media son las más convenientes al permitir disminuir el consumo energético con una inversión moderada (Tabla 5). La R-Óptima + GSD alcanza el mayor ahorro energético, pero presenta valores elevados de construcción (191 U\$/m²), condicionados por el costo de los componentes tecnológicos. Las ventanas de aluminio con RPT, duplican el valor de aquellas que no lo poseen. La alternativa R-Media disminuye la demanda de energía en un 47%, con costos de inversión de 127 U\$/m². Los indicadores de consumo energético en calefacción para dicho conjunto de mejoras son de 39,2 kWh/m² año y de 83,1 kWh/alumno.

Se advierte que el PA es elevado en el número de años debido a los bajos costos de la energía a nivel nacional. Tanto el gas natural como la energía eléctrica se encuentran subsidiados. Además, su valor no acompañó el significativo incremento de la inflación anual registrado en los últimos años. Sin embargo, las mejoras de eficiencia energética propuestas en este trabajo se justifican desde una visión ambiental y social, enmarcadas en las políticas de reducción de las emisiones de CO₂, y mejoras del confort térmico interior durante la vida útil del edificio. Se considera que, en tipologías escolares, donde se desarrolla la formación y educación de las futuras generaciones, las adecuadas condiciones del espacio áulico y la disminución de la demanda energética superan la visión de negocio respecto al recupero de la inversión.

PÉRDIDAS Y GANANCIAS DE CALOR

Con el software de simulación también se analizan las pérdidas de energía a través de los cerramientos opacos y de las aberturas, para un día típico del mes de julio. Se comparan, así, los datos de pérdidas de calor por convección y por infiltración de aire entre el Edificio Referencia y la R-Óptima. El estudio revela que las mejoras propuestas logran una disminución del 29,2% y 37,6%, respectivamente.

En cuanto a las ganancias térmicas, se identifica que el aumento del área colectora en el sector de aulas al norte representa una contribución del 6%. Las cargas internas (personas, iluminación, equipamiento) muestran un aporte de calor entre 56% y 61% en las propuestas de rehabilitación.

INDICADORES DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

Los IEE del caso CPR se comparan con el comportamiento energético que evidencian otros edificios escolares del PN700E localizados en el Área Metropolitana de San Juan. Los datos de la Tabla 6 expresan los indicadores de consumo energético por unidad de superficie y por alumno, calculados en base a registros reales obtenidos de las boletas de servicios. Se puede observar que la escuela analizada exhibe los mayores valores, lo cual justifica su necesidad de rehabilitación.

Los resultados alcanzados con el presente estudio podrían ser trasladados para mejorar el comportamiento energético y las condiciones de confort térmico interior de otras infraestructuras escolares pertenecientes a los programas nacionales implementados en la provincia desde 2004 a 2015.

CONCLUSIÓN

El desarrollo del trabajo expuesto permitió analizar el potencial de intervención de distintas propuestas de rehabilitación. Concretamente, la R-Óptima + GSD incorpora mejoras en la transmitancia térmica de la envolvente (U Global de $0,71 \text{ W/m}^2\text{K}$), ganancia solar directa en las aulas orientadas al norte y eficiencia del sistema de calefacción. Este conjunto verifica el Nivel A definido por la Norma IRAM 11.605 (2002) y disminuye los consumos energéticos en un 60% respecto al edificio de referencia. La R-Media, con valores U Global de $0,98 \text{ W/m}^2\text{K}$, alcanza el Nivel B de la Norma y evidencia ahorros energéticos potenciales del 47% con estufas TB. Dicha propuesta se posiciona como la alternativa más conveniente tras comparar los consumos energéticos potenciales, los costos de la inversión y el período de amortización.

Los indicadores de eficiencia energética calculados para el edificio rehabilitado, otorgan un rango de consumo energético anual para calefacción desde $44,9 \text{ kWh/m}^2\text{año}$ a $33 \text{ kWh/m}^2\text{ año}$ y de $95,2 \text{ kWh/alumno}$ a 70 kWh/alumno . Los valores para el edificio de referencia son de $74,5 \text{ kWh/m}^2\text{ año}$ y de 158 kWh/alumno , en el modelo de simulación.

Los datos permiten reconocer la importancia de considerar las ganancias por radiación y las internas en espacios densamente ocupados como son las aulas de los edificios escolares, para una mejor aproximación al

valor de la carga auxiliar de calefacción anual, en cálculos analíticos y de régimen estacionario.

Frente a la nueva realidad instalada por la pandemia COVID-19 y ante posibles epidemias que involucren a la climatización respecto a la transmisión de enfermedades, ASHRAE (2020) recomienda, en el caso de las escuelas, aumentar la ventilación de las aulas con un adecuado suministro de aire exterior que facilite diluir los contaminantes. Esta situación insta al sector científico a tener que perfeccionar las consideraciones sobre el consumo de energía.

A su vez, en vista de las nuevas exigencias de salubridad en edificios escolares, se manifiesta la necesidad de revisar y actualizar los Criterios y Normativa Básica de Arquitectura Escolar (Ministerio de Educación, 1998). Entre los diferentes aspectos que ameritan ser examinados, se insiste en los valores recomendados para las renovaciones de aire y ventilación de ambientes, ya que éstos afectan directamente la salud de las personas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Nacional de San Juan y al IRPHa-CONICET, por la contribución en el financiamiento de la investigación en el marco del proyecto CICITCA 2020 (Código A0948). El desarrollo del trabajo forma parte de la Tesis Doctoral de la autora María Guillermina Ré, del Doctorado en Arquitectura de la Universidad de Mendoza.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andersen, M., Discoli, C.A., Viegas, G.M. y Martini, I. (2017). Monitoreo energético y estrategias de retrofit para viviendas sociales en clima frío. *Hábitat Sustentable*, 7(2), 50-63. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2017.07.02.05>
- ANSI/ASHRAE (2019). *Standard 62.1-2019. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*. ASHRAE and the American National Standards Institute.
- ASHRAE (2020). *Reopening of schools and universities*. Recuperado de <https://www.ashrae.org/technical-resources/reopening-of-schools-and-universities>
- Attia, S., Shadmanfar N. y Ricci, F. (2020). Developing two benchmark models for nearly zero energy schools. *Applied Energy* 263, art. 114614. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114614
- Autodesk (2011). *Ecotect Analysis. Sustainable Building Design Software*. Recuperado de www.autodesk.com/ecotect-analysis.
- Barbosa, F.C., De Freitas, V.P. y Almeida, M. (2020). School building experimental characterization in Mediterranean climate regarding comfort, indoor air quality and energy consumption. *Energy & Buildings*, 212. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.109782

Boutet, M.L., Hernández, A. y Jacobo, G. (2020). Methodology of quantitative analysis and diagnosis of higr-thermal and lighting monitoring for school buildings in a hot-humid mid-latitude climate. *Renewable Energy*, 145, 2463-2476. DOI: 10.1016/j.renene.2019.08.009

ENRE (2020). Ente Nacional Regulador de la Electricidad. Ministerio de Desarrollo Productivo. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/enre/uso-eficiente-y-seguro/consumo-basico-electrodomesticos>.

Esteves, A. (2017). *Arquitectura bioclimática y sustentable: Teoría y práctica de la conservación de la energía. Sistemas solares pasivos y enfriamiento natural de edificios*. Mendoza: FAUD, UM; INHAE, CCT-CONICET.

Esteves, A., Esteves, M.J., Mercado, M.V., Barea, G. y Gelardi, G. (2018). Building Shape that Promotes Sustainable Architecture. Evaluation of the Indicative Factors and Its Relation with the Construction Costs. *Architecture Research*, 8(4), 111-122. DOI:10.5923/j.arch.20180804.01

Geraldi, M. S. y Ghisi, E. (2020). Mapping the energy usage in Brazilian public schools. *Energy & Buildings*, 224, 1-17. DOI=10.1016/J.ENBUILD.2020.110209

Godoy-Muñoz, A. (2015). *Validación y calibración de la simulación energética de edificios La importancia del análisis de sensibilidad e incertidumbre*. Tesis de Doctorado en Sostenibilidad, Universidad Politécnica de Catalunya.

Harish, V. S. K. V. y Kumar, A. (2016). A Review on Modeling and Simulation of Building Energy Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1272–1292. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.040

IEA (2018). *Informe Global. Hacia un sector de edificios y de la construcción eficiente, resiliente y con cero emisiones. Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC)*. Coordinado por el Programa del Medio Ambiente de las Naciones Unidas. Recuperado de www.iea.org.

IRAM (2002). 11605. *Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en Edificios*. Revisión 2002. Instituto Argentino de Normalización.

IRAM (2002). 11601. *Aislamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo*. Instituto Argentino de Normalización.

IRAM (2012). 11603. *Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina*. Instituto Argentino de Normalización.

IRAM (2017). 11900. *Prestaciones energéticas en viviendas. Método de cálculo*. 2° Edición. Instituto Argentino de Normalización.

Khan, H.S., Asif, M. y Mohammed, M.A. (2017). Case Study of a Nearly Zero Energy Building in Italian Climatic Conditions. *Infrastructures*, 2(4), 19. DOI: 10.3390/infrastructures2040019

Kuchen, E. y Kozak, D. (2020) Transición energética argentina. El nuevo estándar de eficiencia energética en la evaluación de la vivienda social. Caso de estudio: Vivienda de Barrio Papa Francisco. *Hábitat Sustentable*, 10(1), 44 -55. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2020.10.01.04> HS

Mercader Moyano, M. P. y Czajkowski, J. D. (2017). Multi-objective optimisation model: A housing block retrofit in Seville Patricia Edith Camporeale. *Energy & Buildings*, 153, 476–484.

Ministerio de Educación (1998). *Criterios y Normativa Básica de Arquitectura Escolar. Dirección de Infraestructura*. Gobierno de la Nación. Argentina.

Pontoriero, D. (2017). *Banco de datos meteorológicos, 2006 a 2015*. Instituto de Energía Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan.

Ré, M.G. (2017). Arquitectura escolar. Análisis del Programa Nacional 700 Escuelas en la Provincia de San Juan. *Actas del XXI Congreso ARQUISUR*. Eje 1. Trabajo N°30. En: https://www.researchgate.net/publication/320300087_ARQUITECTURA_ESCOLAR_ANALISIS_DEL_PROGRAMA_NACIONAL_700_ESCUELAS_EN_LA_PROVINCIA_DE_SAN_JUAN

Ré, M.G., Blasco Lucas, I. y Filippín, C. (2016). Evaluación higrotérmica y energética de un edificio escolar perteneciente al Programa Nacional 700 Escuelas, en el Área Metropolitana de San Juan, Argentina. *Hábitat Sustentable*, 6(2), 40-51.

Rocky Mountain Institute [RMI] (2020). Recuperado de <https://rmi.org/>

San Juan, G. (2014). *Aprendizaje en las escuelas del siglo XXI. Nota 5. Auditoría ambiental y condiciones de confort en establecimientos escolares*. Banco Interamericano de Desarrollo.

Sekki, T., Andelin, M., Airaksinen, M. y Saari, A. (2016). Consideration of energy consumption, energy costs, and space occupancy in Finnish daycare centres and school buildings. *Energy & Buildings* 129, 199–206. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.08.015

Selectra (2020). Factor de conversión del gas natural, de m³ a kWh. Recuperado de <https://preciogas.com/faq/factor-conversion-gas-natural-kwh>.

Trisnawan, D. (2018). Ecotect design simulation on existing building to enhance its energy efficiency. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 105. DOI:10.1088/1755-1315/105/1/012117

Veloso, A.C.O. y Souza, R.V.G. (2019). *Peso do sistema de ar condicionado no consumo de energia elétrica em edificacao de escritorios: estudo de caso em Belo Horizonte – Brasil*. International Building Performance Simulation Association. IBPSA.

Wang, S., Yan, C. y Xiao, F. (2012). Quantitative energy performance assessment methods for existing buildings. *Energy & Buildings*, 55, 873–888.

Wikipedia (2020). Mapa de Argentina con localización de la provincia de San Juan. Recuperado de [https://es.wikipedia.org/wiki/Provincia_de_San_Juan_\(Argentina\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Provincia_de_San_Juan_(Argentina)).