



VIDRIOS ARQUITECTÓNICOS

DE BAJA EMISIVIDAD (LOW-E) Y CONTROL SOLAR:

Beneficios Energéticos, Económicos y Ambientales



1. Introducción

Según los acuerdos establecidos en el Tratado de París (2016), México se ha comprometido, en conjunto con otras naciones, a elaborar planes y tomar acciones correspondientes para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero con la finalidad de evitar el aumento de la temperatura media mundial por debajo de 2°C y evitar las consecuencias catastróficas que el cambio climático trae consigo.

Ante estos compromisos, el sector de la construcción presenta una oportunidad clave para lograr reducciones significativas de las emisiones de gases de efecto invernadero al aportar aproximadamente el 40% de éstas a nivel mundial. Asimismo, es urgente tomar medidas efectivas en el tema que aminoren la impresionante velocidad con la que la mancha urbana se está expandiendo: se proyecta que para el año 2060, el área ocupada de los edificios se duplicará, aumentando más de 230 mil millones de m² de construcciones nuevas en el mundo. El área de estos inmuebles proyectados equivalen a construir un espacio del tamaño de Japón cada año a partir del 2017 hasta el 2060¹.

Aunado a esto, contemplando que alrededor de dos tercios del área existente de construcción se conservará en el 2050, estas señaladas acciones deben considerar promover la recuperación de espacios existentes y elevar la tasa de renovación del inventario actual de inmuebles, misma que se encuentra actualmente entre 0.5%-1% anual².

De acuerdo a la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), el sector de los edificios tiene un consumo de aproximadamente 126 TWh, convirtiéndolo en el mayor consumidor de energía eléctrica del país, excediendo incluso a la industria en 11%³ por lo que es imperativo que la industria de la construcción integre estrategias que minimicen el uso de energía en las edificaciones para lograr el cumplimiento de los compromisos internacionales.

En nuestro país, principalmente en las zonas norte y costera⁴, los sistemas de aire acondicionado representan el mayor consumidor de energía en los inmuebles, alcanzando hasta el 50% del consumo total⁵. En los edificios que utilizan un sistema de acristalamiento del tipo muro cortina, el principal agente causante de este aumento en

el uso de energía por el aire acondicionado es la ganancia de calor no deseada. Aunque minimizar las áreas de vidrio usualmente se traduce en ahorros de energía, en ocasiones no es una recomendación conveniente debido a los beneficios que la luz natural y el confort visual brindan a los efectos biológicos y psicológicos de los ocupantes⁶. Es por ello que al momento de seleccionar un sistema de acristalamiento es necesario lograr un balance adecuado entre los aspectos de eficiencia energética e iluminación natural de las edificaciones.

El presente documento demuestra cómo la integración de vidrios arquitectónicos de alto desempeño en los sistemas de acristalamiento de los proyectos inmobiliarios impacta de manera directa los costos de inversión inicial y de operación continua del proyecto, especialmente en los relacionados con los equipos de aire acondicionado.

Para su realización, se integraron las propiedades de diversos tipos de vidrio y se consideraron las condiciones de cada una de las zonas climáticas de México, comprobando que el impacto en los costos depende en gran medida de la ubicación de la edificación: en las regiones con clima cálido, **el potencial de ahorro podría llegar hasta el 40% en los costos de inversión inicial y hasta un 30% en los costos de operación**, por mencionar un ejemplo.

Asimismo, la selección de vidrios arquitectónicos de alto desempeño en las edificaciones también representa una acción que busca el cuidado ambiental, ante los beneficios de reducir las emisiones de CO₂ durante su vida útil.

Los vidrios arquitectónicos de alto desempeño reúnen características especiales que permiten la reducción de las ganancias de calor hacia el interior de las edificaciones y, con ello, la disminución de los costos asociados a la compra y operación de equipos de aire acondicionado y ventilación. Además, la combinación de un agradable confort térmico al mismo tiempo que permite de la entrada de luz natural brinda resultados positivos en la experiencia de los ocupantes, que se traducen en una mayor productividad y sentido de colaboración en los trabajadores, al igual que un incremento en su calidad de vida⁷.

2. Características de los vidrios (principios básicos de transferencia de calor)

Antes de entrar en detalle a los resultados del estudio es conveniente tener un repaso a las tres propiedades principales que caracterizan el desempeño energético de los vidrios.

Valor-U (Coeficiente global de transferencia de calor)

El coeficiente global de transferencia de calor (valor-U) engloba los tres modos de transferencia de calor impulsados por la diferencia de temperaturas entre las superficies exteriores e interiores del sistema de acristalamiento: conducción, convección y radiación.

Dado que el calor se transfiere de cuerpos cálidos a cuerpos fríos, en verano el sentido de la transferencia de calor será principalmente del ambiente exterior hacia el ambiente interior, y en invierno será de manera opuesta. La cantidad de calor transferido a través del sistema de acristalamiento por medio de estos procesos es caracterizada por el valor-U: entre menor sea éste, también lo será la ganancia o pérdida de calor. El valor-U de un sistema de acristalamiento doble de alto desempeño puede ser de 0.3 Btu/(hr)(ft²)(°F) o más bajo, es decir, un 30% de mejora respecto a un vidrio convencional.

SHGC (Coeficiente de ganancia de calor solar)

El coeficiente de ganancia de calor solar (SHGC, por sus siglas en inglés) cuantifica la capacidad del sistema de acristalamiento para bloquear la radiación solar que se transmite respecto a la incidente. El SHGC es un número adimensional con valor de 0 a 1, conforme el valor sea menor, igual será la ganancia solar. Existe una amplia variedad de sistemas de acristalamiento de alto desempeño que van desde valores SHGC de 0.5 hasta 0.12. En contraste, el SHGC de un vidrio convencional es de 0.86, es decir, **un vidrio de alto desempeño es capaz de bloquear de 2 a 7 veces la ganancia solar incidente.**

VLT (Transmisión de luz visible)

La transmisión de luz visible (VLT por sus siglas en inglés) es la cantidad de luz que se transmite a través del sistema de acristalamiento en la porción del espectro electromagnético que el ojo humano es capaz de percibir. El VLT también es un número adimensional con valor de 0 a 1; cuanto más bajo sea el valor VLT, menor será la cantidad de luz visible que se transmitirá a través del sistema de acristalamiento.

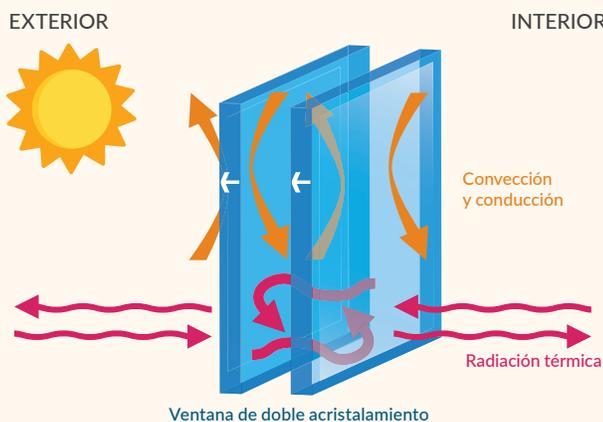


Figura 2.1 Mecanismos de transferencia de calor en productos con sistemas de cristalización

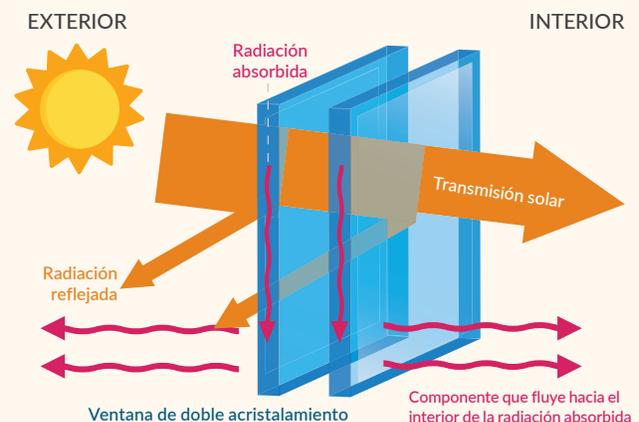


Figura 2.2 Las propiedades de reflexión, transmisión y absorción de un sistema de acristalamiento determinan qué sucede con la ganancia solar.

3. Impacto energético y económico de los vidrios arquitectónicos de alto desempeño

En julio de 2018, Vitro Vidrio Arquitectónico encomendó a Group14 Engineering, firma con sede en Denver dedicada a la consultoría en eficiencia energética y sustentabilidad, estudiar el impacto energético y económico de emplear diferentes tipos vidrios arquitectónicos de alto desempeño en edificios de oficinas en nueve ciudades de la República Mexicana con diferentes tipos de clima.

El estudio se desarrolló mediante la herramienta de modelación energética OpenStudio/EnergyPlus y detalla todos los flujos energéticos del edificio, al igual que un cálculo separado para cada hora del año (8,760 horas).

El inmueble analizado cuenta con 15 niveles, un área de 47,011 m² y un acristalamiento en el 70% de la fachada.

Asimismo, además de estos datos, el modelo energético toma en cuenta las tarifas eléctricas de México e integra los detalles arquitectónicos, los sistemas constructivos mecánicos y de iluminación, al igual que cargas internas como personas y receptáculos. Para el desarrollo de este ejercicio se consideraron criterios de sistemas energéticos característicos para edificios de oficinas basados en el estándar ASHRAE 90.1-2016 (*ver Anexo 2: "ASHRAE 90.1-2016"*).

Los resultados que arroja el modelo energético incluyen datos por hora, mensuales y anuales de cada uso final de energía, su costo y detalles del desempeño energético de los sistemas de aire acondicionado, calefacción y ventilación.

Es importante reconocer que el consumo energético de los equipos de aire acondicionado y ventilación depende de las características climatológicas de cada localidad. México cuenta con diversas zonas climáticas, pasando desde la zona 0 hasta la 4. Por ejemplo, en una ciudad cálida como Monterrey, el consumo de energía de dichos equipos será mayor que en una localidad templada como la Ciudad de México donde la temperatura promedio es menor.

Las ciudades seleccionadas para el estudio representan las principales zonas climáticas de México (*ver Anexo 3: "Zonas climáticas en México"*). Aunque algunas de las ciudades cuentan con la misma clasificación de zona climática, variables como la radiación solar, temperatura o humedad de cada localidad originan un desempeño energético diferente.

Tabla 3.1. Características climáticas y de diseño por ciudad

Ciudad	Zona climática	Elevación (m)	Grados día		Temperaturas de diseño [°C]		Humedad relativa de diseño	Humedad relativa anual promedio
			Refrigeración (10 °C base)	Calefacción (10 °C base)	Verano	Invierno		
Cancún	0A	6	5,933	3	34	13	73%	77%
Guadalajara	3A	1,551	3,596	257	33.5	5	66%	61%
León	2A	1,815	3,522	285	34.3	4.2	58%	50%
Mazatlán	1A	11	5,184	26	33.2	8.5	76%	68%
Mérida	0A	11	6,287	2	38.7	13.8	76%	73%
Ciudad de México	3A	2,229	2,641	599	29	3.6	58%	53%
Monterrey	2B	449	4,835	387	39.7	3.7	53%	62%
Tijuana	3B	149	2,859	697	32.6	5.6	59%	68%
Zacatecas	3C	2,176	2,120	1,136	30.7	2	51%	46%

Por otro lado, el estudio consideró sistemas de acristalamiento con medidas comerciales de 1.2 m por 3.0 m y engloba el análisis de ocho sistemas que incluyen un amplio rango de productos: vidrio claro monolítico, vidrio entintado, sistemas de vidrio doble claros y con diferentes revestimientos low-e.

Es importante señalar que las características de los sistemas de acristalamiento son afectadas por la cancelería e incluso pueden elevar el valor-U entre 23% y 135% respecto al valor-U en el centro del sistema de acristalamiento. Asimismo, en los sistemas analizados la cancelería tiene el efecto de elevar el SHGC y disminuir el VLT.

Capacidad de equipos HVAC

Los sistemas de aire acondicionado, calefacción y ventilación de los edificios son seleccionados para que sean capaces de remover o añadir energía a los espacios para

proveer de condiciones confortables a los ocupantes durante cualquier época del año. La capacidad de los equipos tiene un impacto directo en los costos de inversión inicial y la eficiencia de operación de los equipos, así como, en el confort de los ocupantes y la calidad del aire interior del edificio.

Los vidrios arquitectónicos de alta eficiencia reducen las ganancias de calor hacia el interior de los edificios reduciendo la demanda y capacidad de los equipos de aire acondicionado y ventilación.

En las **figuras 3.1 y 3.2** se muestra la tendencia de reducción en la demanda de los equipos de aire acondicionado y ventilación, respectivamente implementando los sistemas de acristalamiento en estudio.

Tabla 3.2. Propiedades de los sistemas de acristalamiento

Acristalamiento	Sistemas de vidrios	Valor-U (verano) [Btu/h*ft ² *°F]	SHGC	VLT	LSG
Monolítico Claro	6 mm Monolítico Claro	0.924 (*1.139)	0.818 (*0.807)	0.878 (*0.769)	1.073 (*0.953)
Monolítico Filtrasol®	6 mm Monolítico Filtrasol®	0.925 (*1.140)	0.584 (*0.594)	0.444 (*0.389)	0.760 (*0.655)
IGU Claro	6 mm Claro + 6 mm Claro	0.497 (*0.803)	0.704 (*0.705)	0.776 (*0.680)	1.102 (*0.964)
Filtrasol® IGU	6 mm Filtrasol® + 6 mm Claro	0.497 (*0.803)	0.458 (*0.487)	0.392 (*0.344)	0.856 (*0.706)
Solarban®60 IGU	6 mm Solarban® 60 Claro + 6 mm Claro	0.272 (*0.627)	0.390 (*0.431)	0.697 (*0.611)	1.790 (*1.420)
Solarban®70XL IGU	6 mm Solarban® 70XL Claro + 6 mm Claro	0.264 (*0.621)	0.274 (*0.331)	0.634 (*0.555)	2.314 (*1.677)
Solarban®90 IGU	6 mm Solarban® 90 Claro + 6 mm Claro	0.267 (*0.623)	0.234 (*0.294)	0.505 (*0.443)	2.160 (*1.506)
Solarban®R100 IGU	6 mm Solarban® R100 Claro + 6 mm Claro	0.273 (*0.628)	0.233 (*0.294)	0.411 (*0.360)	1.760 (*1.224)

IGU: Insulated Glass Unit

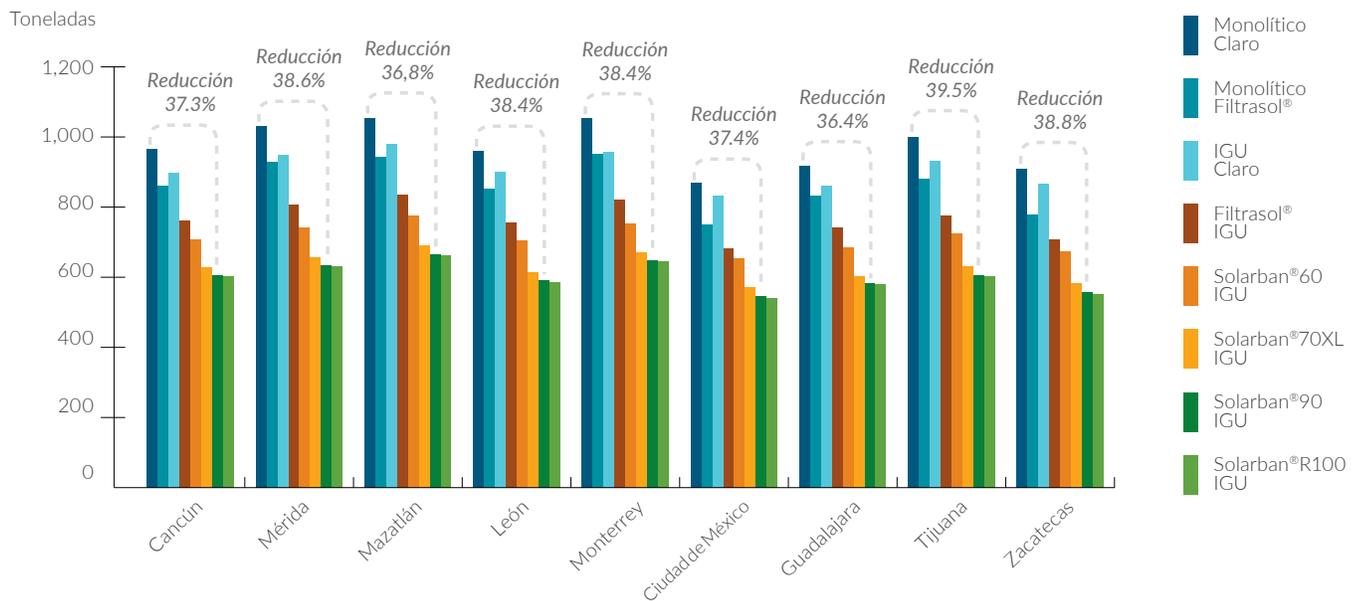
* Los valores en paréntesis representan las características del sistema de acristalamiento completo, es decir, los vidrios y la cancelería.

Para propósito de este estudio, en lo que se refiere a costos de energía se consideran las tarifas eléctricas de mercado abierto para cada hora del año y de cada ciudad, al igual que los costos y cargos asociados por transmisión (\$158.5 MXN/MWh), del Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) (\$6.1 MXN/MWh) y servicios de conexión (\$100 MXN/MWh).

Se estima que los costos asociados a la adquisición de los equipos de aire acondicionado son de \$4,755 MXN/kW (= \$16,708 MXN/ton) y los equipos de ventilación \$1,740 MXN/m³/min (= \$49 MXN/CFM). Se toma como referencia un tipo de cambio de 1.00 USD = 18.22 MXN.

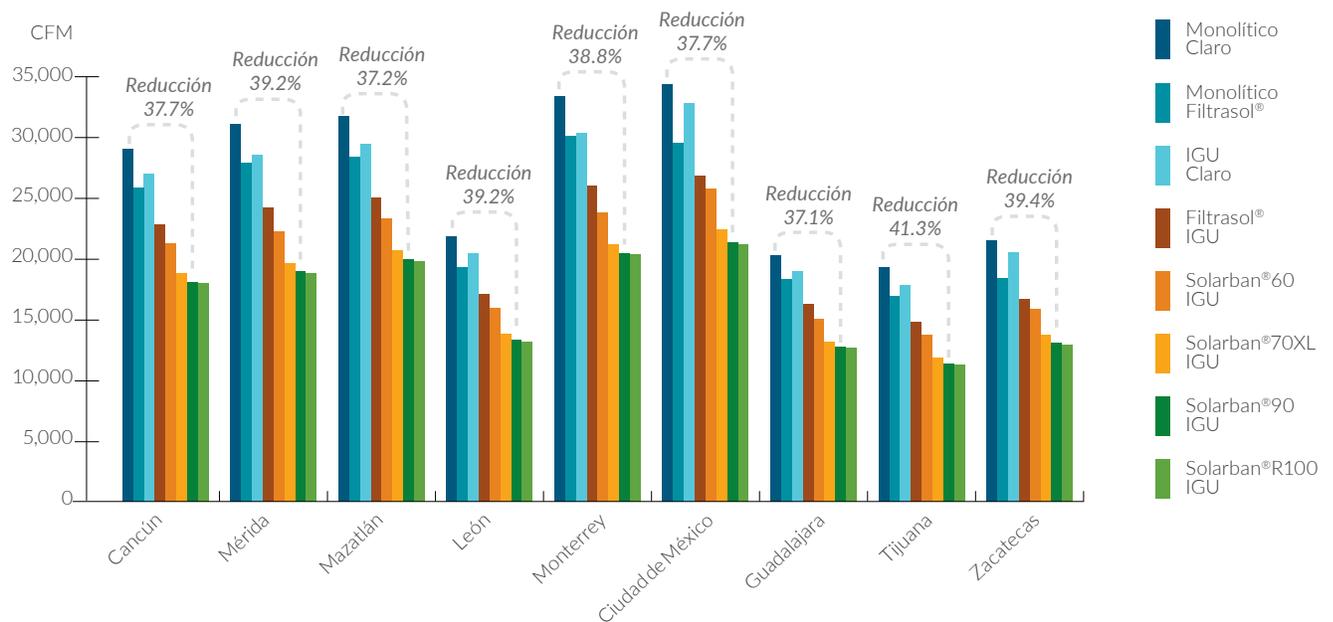
Siguiendo las prácticas de la industria, los factores U incluidos en la cancelería de los sistemas vidriados se basan en las condiciones del invierno en lugar del verano. Los factores U de la cancelería y sus dimensiones fueron proyectadas según el Manual de Fundamentos de ASHRAE 2017, Capítulo 15 para Aluminio, muro cortina. Los valores del centro del vidrio contemplaron los factores U en condiciones de verano, debido a las condiciones climáticas del país.

Figura 3.1. Capacidad de refrigeración



Comparando los resultados del vidrio **Monolítico Claro** y **Solarban®90**, en todas las ciudades se observa una reducción en la capacidad de los equipos entre 36 y casi un 40% en las toneladas de refrigeración y entre 37 y 41% en el flujo de aire de ventilación.

Figura 3.2. Capacidad de ventilación



Ambas reducciones en la capacidad de los equipos se traducen en ahorros en los costos de inversión inicial, **mostrando un potencial de ahorro entre 19 y 30 millones de pesos**, dependiendo de la ciudad. Típicamente en las ciudades con una mayor cantidad de grados día de refrigeración, es decir, las ciudades con clima cálido se obtienen mayores ahorros en la inversión inicial.

Figura 3.3. Consumo energético de operación anual del edificio analizado, por ciudad

Consumo energético de operación anual

El consumo de energía anual para la operación del edificio con el vidrio Monolítico Claro es de alrededor de 15,094 MWh (Cancún) a 6,379 MWh (Tijuana). En la **figura 3.3** se observa la distribución de los usos finales de energía para cada ciudad, evidenciando que el consumo energético es mayor en las ciudades con clima más cálido que en las ciudades templadas debido a la energía destinada para el enfriamiento. Es precisamente en el enfriamiento y usos finales de energía asociados (ventilación, rechazo de calor y bombas) donde emplear vidrios arquitectónicos de alto desempeño tienen el mayor potencial de aprovechamiento.

En la **figura 3.4** se muestra la tendencia del consumo anual total de energía con cada sistema de acristalamiento para cada ciudad.

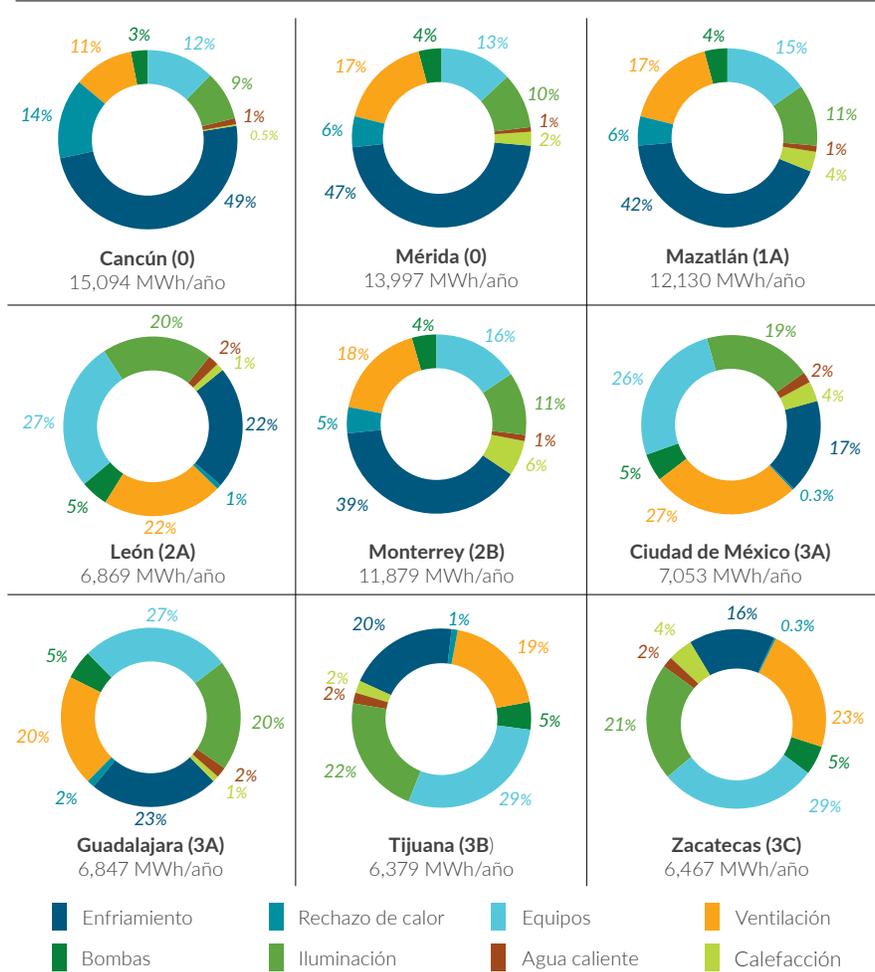
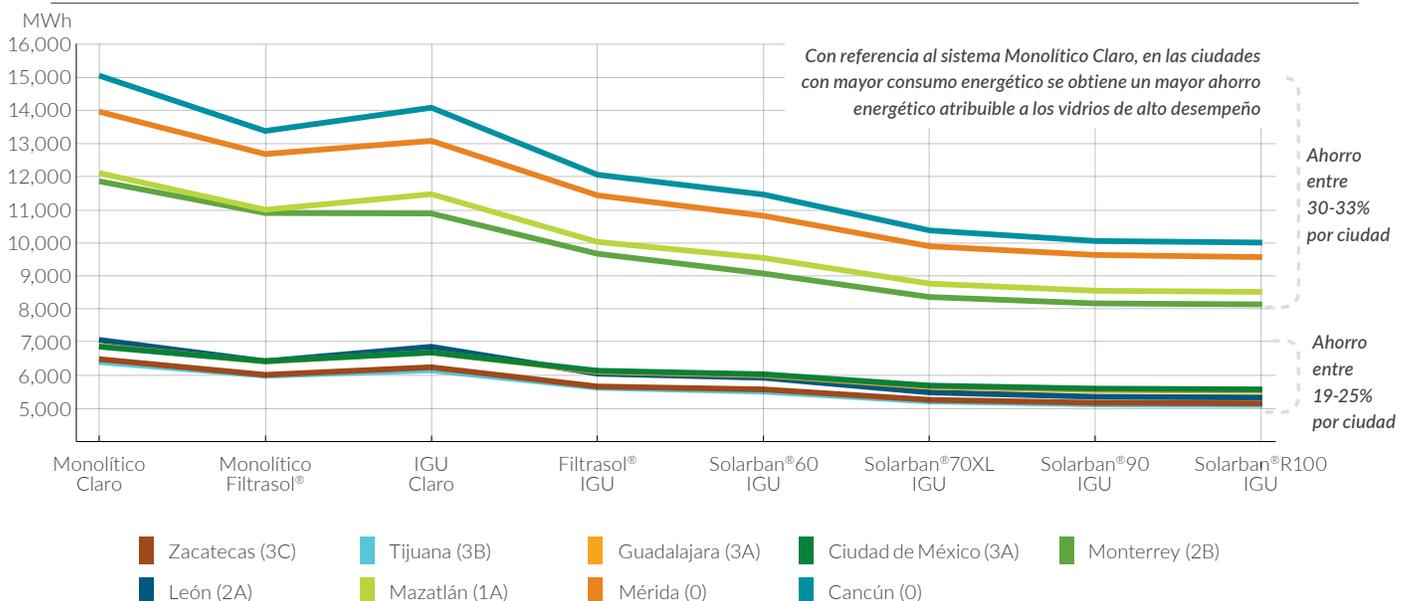


Figura 3.4. Consumo energético anual del edificio analizado, por ciudad



Costos de inversión y operación

Las **figuras 3.5** y **3.6** se muestran los costos de inversión inicial de los equipos de aire acondicionado y ventilación, así como, el costo operacional, y se comparan con el sistema de acristalamiento Monolítico Claro. Los mayores ahorros en los costos de operación ocurren en las zonas climáticas 0, 1A y 2B, los mayores ahorros de inversión

en equipos ocurren en las mismas zonas climáticas con la adición de la zona 3A. **Las zonas climáticas con los mayores costos de operación, específicamente debido al consumo de energía por enfriamiento, muestran los mayores ahorros de energía atribuible a los vidrios arquitectónicos de alto desempeño.**

Figura 3.5. Ahorro en costos de inversión inicial del edificio analizado, por ciudad

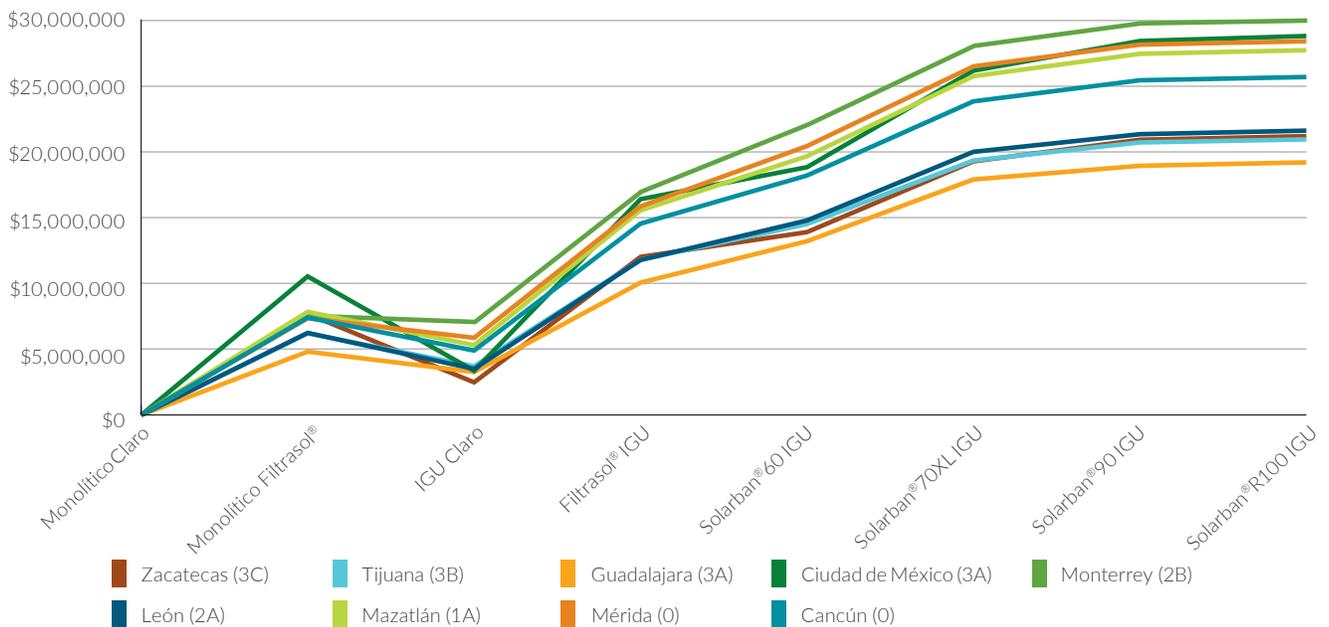
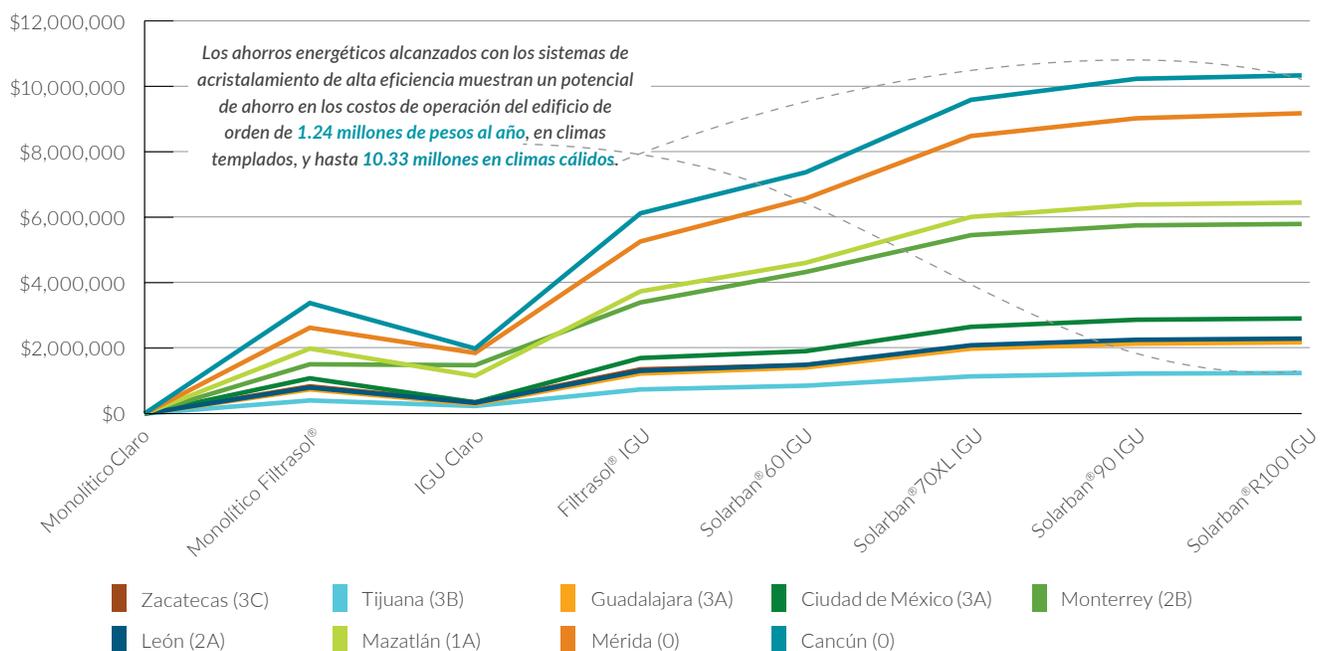


Figura 3.6. Ahorro en costos de operación anual del edificio analizado, por ciudad



Los resultados demuestran que los sistemas con acristalamiento con valor SHGC menor reflejan el mayor ahorro en el costo de operación e inversión. Por ejemplo, añadiendo un entintado al sistema de acristalamiento claro (Filtrazol®) disminuye significativamente los costos debido a un valor SHGC bajo. La selección de sistemas de acristalamiento con revestimiento low-e y SHGC bajo resulta en un potencial de ahorro que podría llegar hasta el 40% en los costos de inversión inicial y hasta un 30% en los costos de operación.

También se demuestra que entre menor sea el valor-U de los sistemas, los costos operacionales y de inversión son menores. Sin embargo, el valor-U de los sistemas de acristalamiento tiene un impacto significativamente menor comparado con el SHGC dado que la calefacción representa menos del 5% del costo operacional en todas las ciudades analizadas. El ahorro en los costos con los sistemas de doble acristalamiento comparados con el sistema Monolítico Claro se atribuye principalmente a valores SHGC bajos y solamente una pequeña porción de los ahorros a la mejora del valor-U.

4. Beneficios ambientales

Más allá de los beneficios energéticos y económicos, los vidrios de alto desempeño tienen el potencial de mitigar las emisiones de CO₂ asociadas a la operación de las edificaciones. Esto, debido al menor consumo de energía demandado por los sistemas de aire acondicionado y ven-

tilación para adecuar los espacios interiores gracias a las propiedades de los sistemas de acristalamiento de alto desempeño. Esta reducción energética de los edificios aminora la cantidad de gases de efecto invernadero provenientes de los combustibles fósiles.

Tabla 4.1. Potencial de mitigación de toneladas de CO₂ por sistema de acristalamiento, proyectando una operación de 40 años
El número dentro del paréntesis representa el porcentaje de mitigación de CO₂ respecto al sistema Monolítico Claro

	Cancún (0)	Mérida (0)	Mazatlán (1A)	León (2A)	Monterrey (2B)	Ciudad de México (3A)	Guadalajara (3A)	Tijuana (3B)	Zacatecas (3C)
Monolítico Claro	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Monolítico Filtrasol®	39,216 (11.16%)	30,022 (9.21%)	26,049 (9.22%)	11,027 (6.89%)	22,478 (8.13%)	15,177 (9.24%)	10,268 (6.44%)	9,693 (6.53%)	11,111 (7.38%)
IGU Claro	22,724 (6.47%)	20,657 (6.34%)	14,984 (5.31%)	4,610 (2.88%)	22,819 (8.25%)	4,893 (2.98%)	4,117 (2.58%)	5,869 (3.95%)	5,748 (3.82%)
Filtrazol® IGU	70,233 (19.99%)	59,322 (18.20%)	48,806 (17.28%)	18,250 (11.41%)	51,362 (18.57%)	23,922 (14.57%)	17,057 (10.70%)	18,189 (12.25%)	19,375 (12.87%)
Solarban®60 IGU	84,265 (23.98%)	73,796 (22.65%)	60,171 (21.31%)	20,740 (12.97%)	65,394 (23.65%)	26,837 (16.34%)	19,574 (12.28%)	20,988 (14.13%)	21,424 (14.23%)
Solarban®70X IGU	109,705 (31.22%)	95,365 (29.27%)	78,392 (27.76%)	28,994 (18.13%)	82,018 (29.66%)	37,227 (22.67%)	27,597 (17.31%)	27,953 (18.82%)	28,831 (19.15%)
Solarban®90 IGU	117,157 (33.34%)	101,530 (31.16%)	83,406 (29.53%)	31,321 (19.58%)	86,535 (31.29%)	40,309 (24.55%)	29,747 (18.66%)	30,012 (20.21%)	30,942 (20.55%)
Solarban®R100 IGU	118,285 (33.6%)	103,045 (31.62%)	84,203 (29.82%)	31,813 (19.89%)	87,206 (31.53%)	40,835 (24.87%)	30,280 (19.00%)	30,441 (20.50%)	31,323 (20.80%)

Se estima que el potencial de mitigación de emisiones de CO₂ es de 118,285 toneladas en Cancún y hasta 30,280 toneladas en Guadalajara respecto a emplear un sistema Monolítico Claro.

La Comisión Reguladora de Energía (CRE) estableció en 2017 el factor de emisión de dióxido de carbono del Sistema Eléctrico Nacional de 0.582 toneladas de CO₂ por cada MWh.

5. Conclusiones

De acuerdo con el International WELL Building Institute⁸, **pasamos el 90% del tiempo en espacios interiores**, por lo que el diseño de nuevas construcciones y la selección de materiales deben realizarse con una intención y una perspectiva más amplia que la de la elaboración de un espacio para el resguardo de los elementos exteriores, tomando siempre en cuenta el bienestar y calidad de vida de sus ocupantes.

Por otro lado, según el Consejo Mundial de Edificación Sustentable (WorldGBC)⁹, un inmueble que ha sido edificado con estrategias materiales amigables con el usuario y el medio ambiente brinda diversos beneficios además de los energéticos y económicos:

- Se mantiene la productividad de los ocupantes si la temperatura es óptima. En caso de que los espacios interiores se perciban muy calientes o fríos, la productividad puede descender desde un 4% hasta un 6%.
- Los colaboradores que cuentan con espacios de trabajo cercanos a las ventanas reportan hasta 46 minutos de mejor calidad de sueño por las noches.
- Desde 7% hasta 12% de mejora en los tiempos de procesamiento al contar con vistas de naturaleza desde los espacios de trabajo.

Teniendo en consideración que la cantidad de inmuebles para 2060 será del doble de lo que hubo en 2018 y que la vida útil de un edificio consta alrededor de 50 años o más, las decisiones tomadas desde el inicio del proyecto tendrán una repercusión a corto, mediano y largo plazo para los ocupantes y el medio ambiente, convirtiendo a cada proyecto inmobiliario en una oportunidad para aportar hacia un futuro de emisiones nulas por parte del sector inmobiliario.

La selección de vidrios de alto desempeño, acompañados de otras ecotecnologías innovadoras del sector, crearán inmuebles que maximicen las capacidades de los ocupantes y servirán de acciones activas y continuas contra el cambio climático.

Actualmente, el catálogo de vidrios de alto desempeño térmico se encuentra disponible en el mercado y se ajusta a las diversas condiciones de las zonas térmicas de México, como una opción de materiales de construcción sustentable de impacto mundial que transforma positivamente el sector inmobiliario.

6. Referencias

¹ UN Environment and International Energy Agency (2017): Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector. Global Status Report 2017.

² Existing Buildings: Operational Emissions – Architecture 2030. Recuperado de <https://architecture2030.org/existing-buildings-operation/>

³ CONUEE, Chatellier Lorentzen, D. y McNeil, M. (2019). *Consumo de electricidad de edificios no residenciales en México: la importancia del sector de servicios*. [pdf] p.10. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/455552/cuaderno3nvciclo_2.pdf.

⁴ Norma Oficial Mexicana NOM-008-ENER-2001, Eficiencia Energética en Edificaciones, Envolverte de Edificios No Residenciales.

⁵ International Energy Agency (2017) *Energy Policies Beyond IEA Countries*.

⁶ Peter Boyce, Claudia hunter & Owen Howlett (2003) *The Benefits of Daylight through Windows*. Lighting Research Center Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York.

^{7,9} World Green Building Council (2016). BUILDING THE BUSINESS CASE: Health, Wellbeing and Productivity in Green Offices. Recuperado de <https://www.worldgbc.org/news-media/building-business-case-health-wellbeing-and-productivity-green-offices>.

⁸ Delos Living LLC, International WELL Building Institute (2016). *The WELL Building Standard*.

¹⁰ Pacific Northwest National Laboratory & United States Department of Energy (1998). *Spectrally Selective Glazings*.

Anexo 1:

Vidrios arquitectónicos de alto desempeño

Los vidrios arquitectónicos de alto desempeño integran tecnologías que potencian el desempeño del sistema de acristalamiento en los proyectos.

Múltiples capas de vidrio

Este sistema de acristalamiento consta de dos o más capas de vidrio con una cavidad de aire entre ellas. Este espacio es sellado herméticamente y actúa como aislamiento térmico, reduciendo el valor-U y los coeficientes SHGC y VLT del sistema.

Vidrios de color

Los sistemas de acristalamiento de color modifican la apariencia del vidrio y reducen los coeficientes SHGC y VLT, aménorando la ganancia de radiación solar, al igual que la transmisión de luz visible hacia el interior de los edificios.

Insulados

En algunos sistemas de acristalamiento de múltiples capas, las cavidades pueden ser rellenas con algún gas inerte con baja conductividad térmica, típicamente argón, kriptón o una mezcla de uno de éstos con aire. Esta estrategia permite reducir el valor-U del sistema.

Revestimientos de baja emisividad (low-e)

En los sistemas de acristalamiento, la energía que absorbe el vidrio incrementa su temperatura, por lo que es importante considerar la emisividad del vidrio como un factor preponderante en la etapa de selección de los materiales. La emisividad de un vidrio estándar tiene un valor de 0.84 en la longitud de onda larga del espectro electromagnético, en otras palabras, emite 84% a cierta temperatura y sólo el 16% de la radiación es reflejada. En contraste, los revestimientos de baja emisividad (low-e) cuentan con emisividades hasta de 0.04, es decir, únicamente emitirán el 4% de la energía y reflejarán 96% de la radiación incidente. Los revestimientos low-e reducen principalmente el valor-U de los sistemas de acristalamiento y también modifica el valor SHGC.



Revestimientos de selectividad espectral

Este tipo de sistemas de acristalamiento permite que solamente ciertas longitudes de onda solares entren en el edificio, bloqueando otras. Así, los revestimientos de selectividad espectral conservan un valor VLT alto respecto al valor SHGC, expresando su efectividad con el factor Light-to-Solar Gain (LSG) como resultado de la división VLT/SHGC.

Generalmente los sistemas de acristalamiento con un valor LSG mayor a 1.25 son considerados como cristales con selectividad espectral.

Anexo 2:

ASHRAE 90.1-2016

El estándar ASHRAE 90.1-2016, creado por la Sociedad Americana de Aire Acondicionado, Refrigeración y Calefacción (ASHRAE, por sus siglas en inglés) es un estándar internacional que establece los requerimientos mínimos de eficiencia energética para el diseño de edificios comerciales y edificios residenciales mayores a tres niveles. La primera versión del estándar se remonta al año de 1975 y desde entonces ha contado con múltiples actualizaciones para incluir tecnologías emergentes más eficientes.

Además, la versión 2016 es el estándar empleado por la certificación LEED® (Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental, por sus siglas en inglés) en su versión 4.1 para medir el desempeño energético de edificios.

Los sistemas comprendidos por ASHRAE 90.1-2016 incluyen: sistemas constructivos, aislamiento térmico, calefacción, aire acondicionado, ventilación, potencia e iluminación. Así como, controles y sensores para la operación de algunos de los sistemas.

En las siguientes tablas se muestran las consideraciones y parámetros tomadas del estándar 90.1-2016 para el desarrollo del modelo energético del presente documento.

Tabla Anexo 2.1. Aislamiento térmico en envoltorio por zona térmica

Sistemas constructivos	Zona climática - Aislamiento térmico ft ² °Fh/BTU			
	0	1	2A/2B	3A/3B/3C
Pisos - Vigueta de acero	SR	SR	R-30	R-30
Cimientos - Losa sobre terreno	SR	SR	SR	SR
Cubierta - Aislamiento continuo	R-25 a.c.	R-20 a.c.	R-25 a.c.	R-25 a.c.
Muros exteriores - Muro ligero de panel de yeso	R-13 (0.124 Btu/hrft ² °F)	R-13 (0.124 Btu/hrft ² °F)	R-13+R-3.8 a.c. (0.084 Btu/hrft ² °F)	R-13+R-5 a.c. (0.077 Btu/hrft ² °F)
Ventanas	Como se estableció en la tabla 3.2. Propiedades de los sistemas de acristalamiento			

SR = Sin requerimiento a.c. = Aislamiento continuo

Tabla Anexo 2.2. Características de los sistemas energéticos

Parámetro	Descripción
Relación ventana/muro	70 % de piso a piso
Area de ventanas	8,455 m ²
Iluminación	Método espacio por espacio con densidad de potencia para espacios de oficinas de 9.4 W/m ²
HVAC	Ventiladores de aire de volumen variable (VAV, por sus siglas en inglés) con cajas accionadas por ventilador paralelo <ul style="list-style-type: none"> • 2 Chillers centrífugos enfriados por agua (autodimensionados) • Eficiencia de los chillers de 0.576 FL, 0.549 IPLV.IP • Calefacción con resistencia eléctrica
Economizador	Requerido sólo en las zonas climáticas 2B, 3B y 3C
Agua Caliente Sanitaria	Calentadores de agua eléctricos
Temperaturas de consigna de HVAC	Enfriamiento: 24 °C Calefacción: 21 °C 65 % de humedad relativa en control de deshumidificación
Carga eléctrica de equipos	8 W/m ²
Horarios de operación	8 a.m. - 7 p.m. (los ventiladores operan una hora antes y después)
Ocupación	18.6 m ² /persona
Requerimientos de aire exterior	De acuerdo a estándar ASHRAE 62.1-2016 espacios de oficinas

FL = Full-load performance IPLV.IP = part-load performance

Anexo 3: Zonas climáticas en México

El estándar ASHRAE 90.1-2016 reconoce al menos cinco zonas climáticas en México: desde la zona climática 0 hasta la 4. En términos generales, se considera que entre menor es el número de la zona térmica habrá mayor consumo de energía derivado del aire acondicionado y ventilación.

Las zonas térmicas se definen en función de los grados día y de la precipitación pluvial. Los grados día son una medida de cuánto (expresado en grados) y por cuánto tiempo (expresado en días) la temperatura del aire exterior estará por encima (grados día de refrigeración) o por debajo (grados día de calefacción) de una temperatura específica de referencia. En otras palabras, los grados día expresan la necesidad de climatizar el ambiente en una localidad ya sea por enfriamiento o por calefacción. En las localidades con alto número de grados día de refrigeración, los equipos de enfriamiento tendrán un mayor consumo de energía.

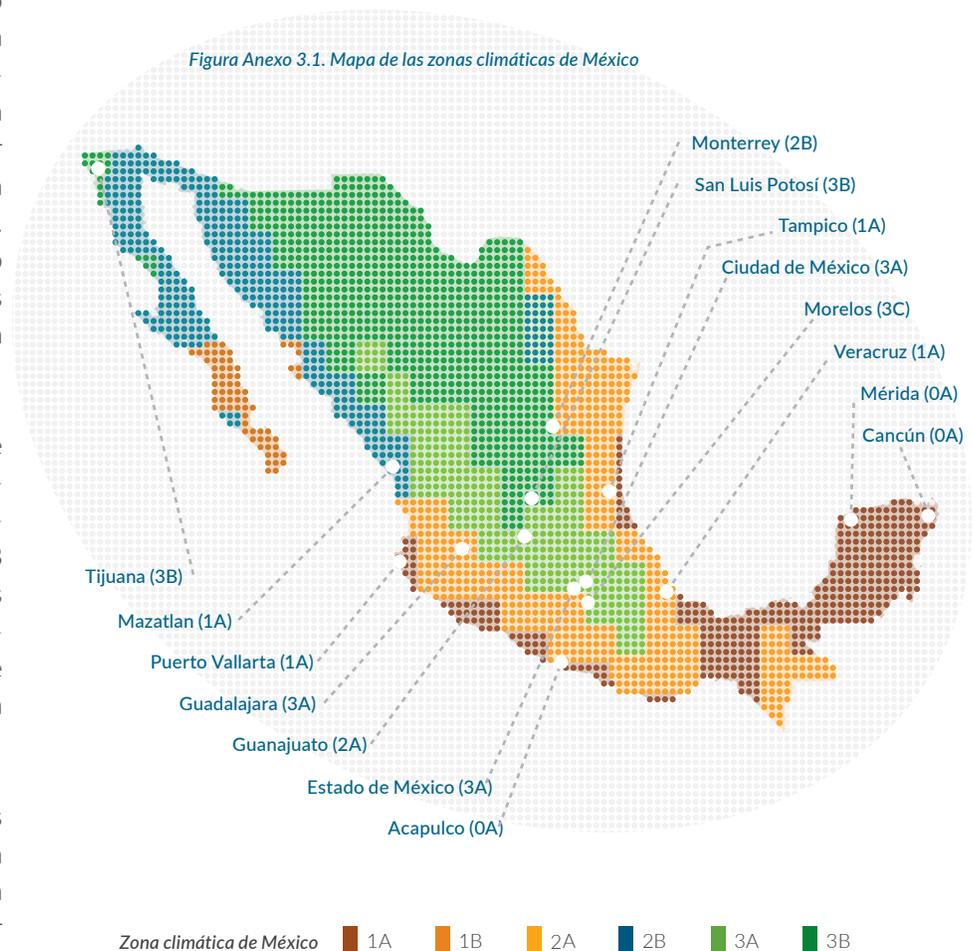
Además, la clasificación climática de ASHRAE también incluye una subcategoría del nivel de humedad denotado por las letras **A (húmedo)**, **B (seco)** y **C (marino)**. Típicamente las localidades con mayor humedad relativa tendrán un mayor consumo de enfriamiento debido a la carga térmica latente asociada a la alta humedad.

ASHRAE 90.1-2016 señala ciertas medidas energéticas de acuerdo a la zona térmica de cada localidad. En la tabla Anexo 3.1 se pueden apreciar

los requerimientos de las propiedades de los sistemas de acristalamiento por zona térmica: conforme ésta sea más templada, el requerimiento de valor-U baja y el valor SHGC crece. La relación de transmisión visible y ganancia global solar permanece igual en todas las zonas térmicas.

Tabla Anexo 3.1. Requerimientos de las propiedades de los sistemas de acristalamiento por zona térmica

Zona térmica	Valor-U (Btu/hft ² °F)	SHGC	VLT/SHGC
0 (A,B)	0.50	0.22	
1 (A,B)	0.57		
2 (A,B)	0.54	0.25	1.10
3 (A,B,C)	0.45		
4 (A,B,C)	0.38	0.36	

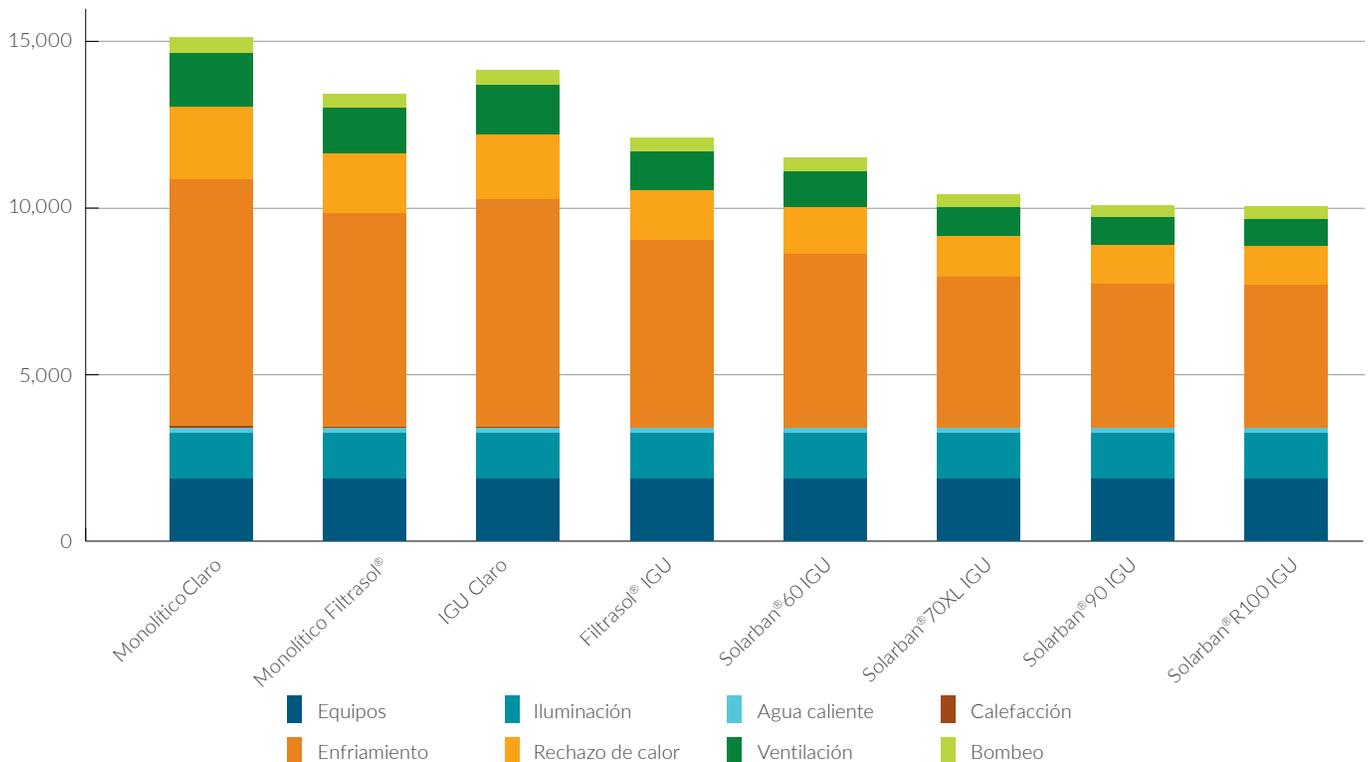


Anexo 4: Resultados detallados por ciudad.

Cancún (0)

Sistema de cristalamiento	Consumo eléctrico (MWh)	Capacidad de enfriamiento (kW)	Capacidad de calefacción (kW)	Capacidad de ventilación (m³/min)	Costo operativo total (MX \$)	Costo de inversión para enfriamiento (MX \$)	Costo de inversión para ventilación (MX \$)	Costo total de inversión (MX \$)	Ahorro en costos de inversión inicial total	Ahorro en costos de operación anual
Monolítico Claro	15,094	3,395	611,445	29,529	\$31,401,384	\$16,141,846	\$51,380,115	\$67,521,961	0.00%	0.00%
Monolítico Filtrasol®	13,410	3,026	611,549	26,287	\$28,021,510	\$14,387,666	\$45,740,203	\$60,127,869	10.95%	10.76%
IGU Claro	14,118	3,151	509,875	27,384	\$29,412,184	\$14,981,072	\$47,648,711	\$62,629,783	7.25%	6.33%
Filtrasol® IGU	12,078	2,671	509,917	23,164	\$25,281,323	\$12,698,472	\$40,304,762	\$53,003,234	21.50%	19.49%
Solarban®60 IGU	11,475	2,489	440,916	21,562	\$24,027,399	\$11,832,853	\$37,518,459	\$49,351,312	26.91%	23.48%
Solarban®70XL IGU	10,382	2,208	437,957	19,096	\$21,812,956	\$10,499,726	\$33,226,478	\$43,726,203	35.24%	30.54%
Solarban®90 IGU	10,062	2,128	438,974	18,394	\$21,170,242	\$10,120,630	\$32,005,916	\$42,126,546	37.61%	32.58%
Solarban®R100 IGU	10,014	2,116	441,154	18,286	\$21,066,795	\$10,061,974	\$31,817,102	\$41,879,076	37.98%	32.91%

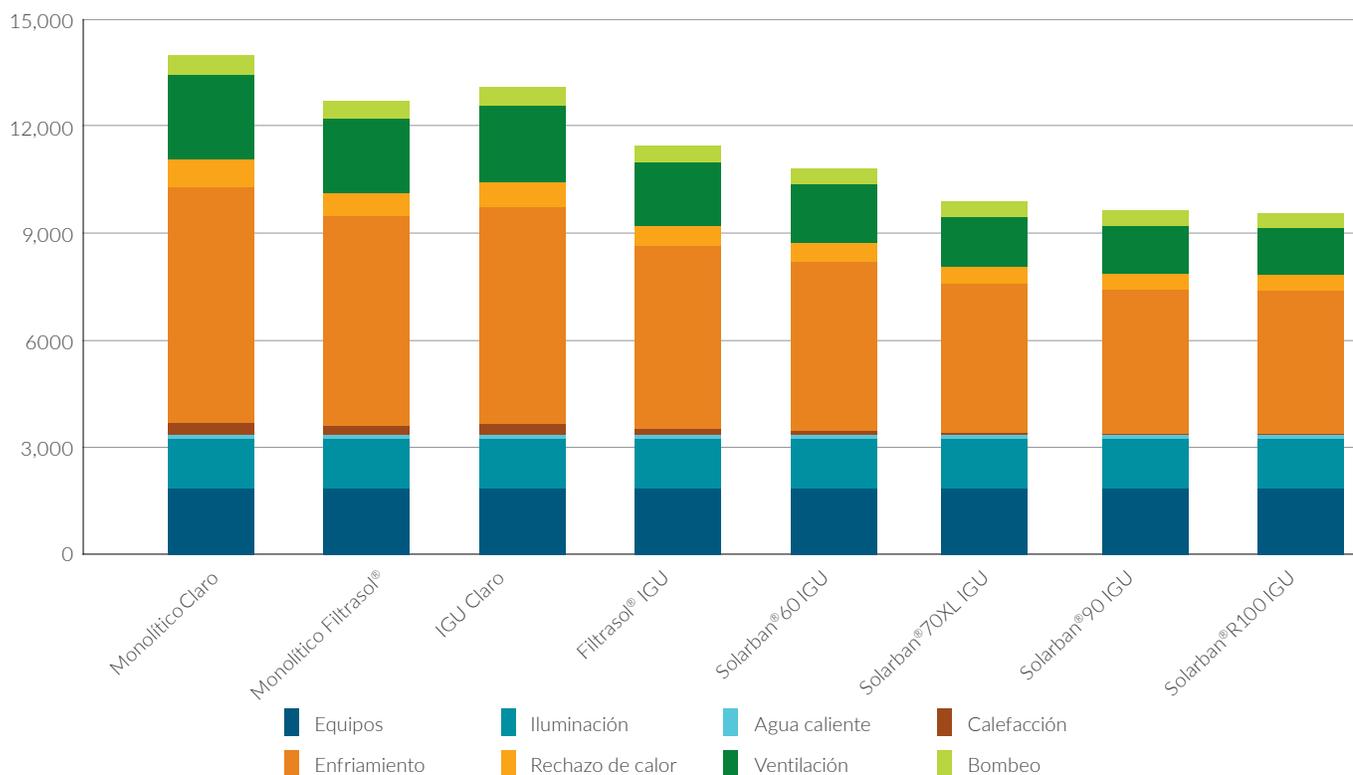
Consumo anual de energía por uso final (MWh)



Mérida (0)

Sistema de acristalamiento	Consumo eléctrico (MWh)	Capacidad de enfriamiento (kW)	Capacidad de calefacción (kW)	Capacidad de ventilación (m³/min)	Costo operativo total (MX \$)	Costo de inversión para enfriamiento (MX \$)	Costo de inversión para ventilación (MX \$)	Costo total de inversión (MX \$)	Ahorro en costos de inversión inicial total	Ahorro en costos de operación anual
Monolítico Claro	13,997	3,626	594,502	31,565	\$29,211,782	\$17,241,060	\$54,923,776	\$72,164,836	0.00%	0.00%
Monolítico Filtrasol®	12,708	3,260	594,600	28,346	\$26,587,191	\$15,499,116	\$49,322,217	\$64,821,333	10.18%	8.98%
IGU Claro	13,110	3,334	497,853	28,997	\$27,358,198	\$15,851,709	\$50,454,863	\$66,306,572	8.12%	6.35%
Filtrasol® IGU	11,449	2,836	497,893	24,627	\$23,951,521	\$13,487,494	\$42,851,474	\$56,338,968	21.93%	18.01%
Solarban®60 IGU	10,827	2,608	431,301	22,620	\$22,639,034	\$12,402,325	\$39,358,361	\$51,760,686	28.27%	22.50%
Solarban®70XL IGU	9,901	2,307	428,431	19,969	\$20,728,621	\$10,968,841	\$34,745,473	\$45,714,314	36.65%	29.04%
Solarban®90 IGU	9,636	2,225	429,419	19,245	\$20,187,706	\$10,577,526	\$33,486,566	\$44,064,092	38.94%	30.89%
Solarban®R100 IGU	9,571	2,212	431,532	19,133	\$20,034,283	\$10,516,767	\$33,291,051	\$43,807,818	39.29%	31.42%

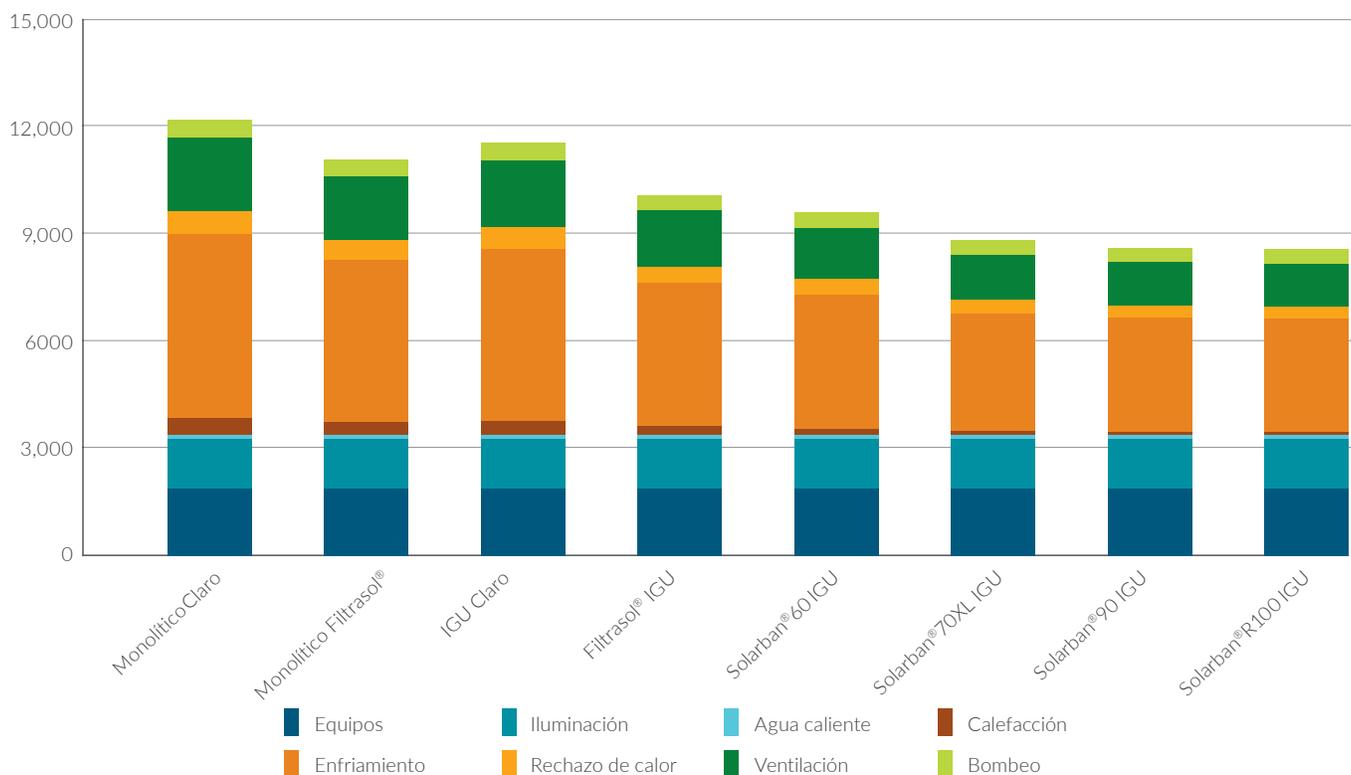
Consumo anual de energía por uso final (MWh)



Mazatlán (1A)

Sistema de acristalamiento	Consumo eléctrico (MWh)	Capacidad de enfriamiento (kW)	Capacidad de calefacción (kW)	Capacidad de ventilación (m³/min)	Costo operativo total (MX \$)	Costo de inversión para enfriamiento (MX \$)	Costo de inversión para ventilación (MX \$)	Costo total de inversión (MX \$)	Ahorro en costos de inversión inicial total	Ahorro en costos de operación anual
Monolítico Claro	12,130	3,706	906,125	32,254	21,747,704	17,619,747	56,122,509	73,742,257	0.00%	0.00%
Monolítico Filtrasol®	11,011	3,315	906,297	28,823	19,760,761	15,763,487	50,152,568	65,916,055	10.61%	9.14%
IGU Claro	11,487	3,441	740,838	29,930	20,593,210	16,362,370	52,078,506	68,440,876	7.19%	5.31%
Filtrasol® IGU	10,034	2,931	740,902	25,446	18,012,888	13,938,671	44,275,623	58,214,294	21.06%	17.17%
Solarban®60 IGU	9,546	2,727	638,272	23,646	17,139,896	12,966,510	41,144,638	54,111,147	26.62%	21.19%
Solarban®70XL IGU	8,763	2,424	634,055	20,983	15,737,599	11,528,035	36,510,014	48,038,049	34.86%	27.64%
Solarban®90 IGU	8,548	2,340	635,490	20,238	15,362,157	11,125,468	35,213,411	46,338,879	37.16%	29.36%
Solarban®R100 IGU	8,513	2,326	638,614	20,117	15,300,097	11,060,120	35,002,951	46,063,071	37.54%	29.65%

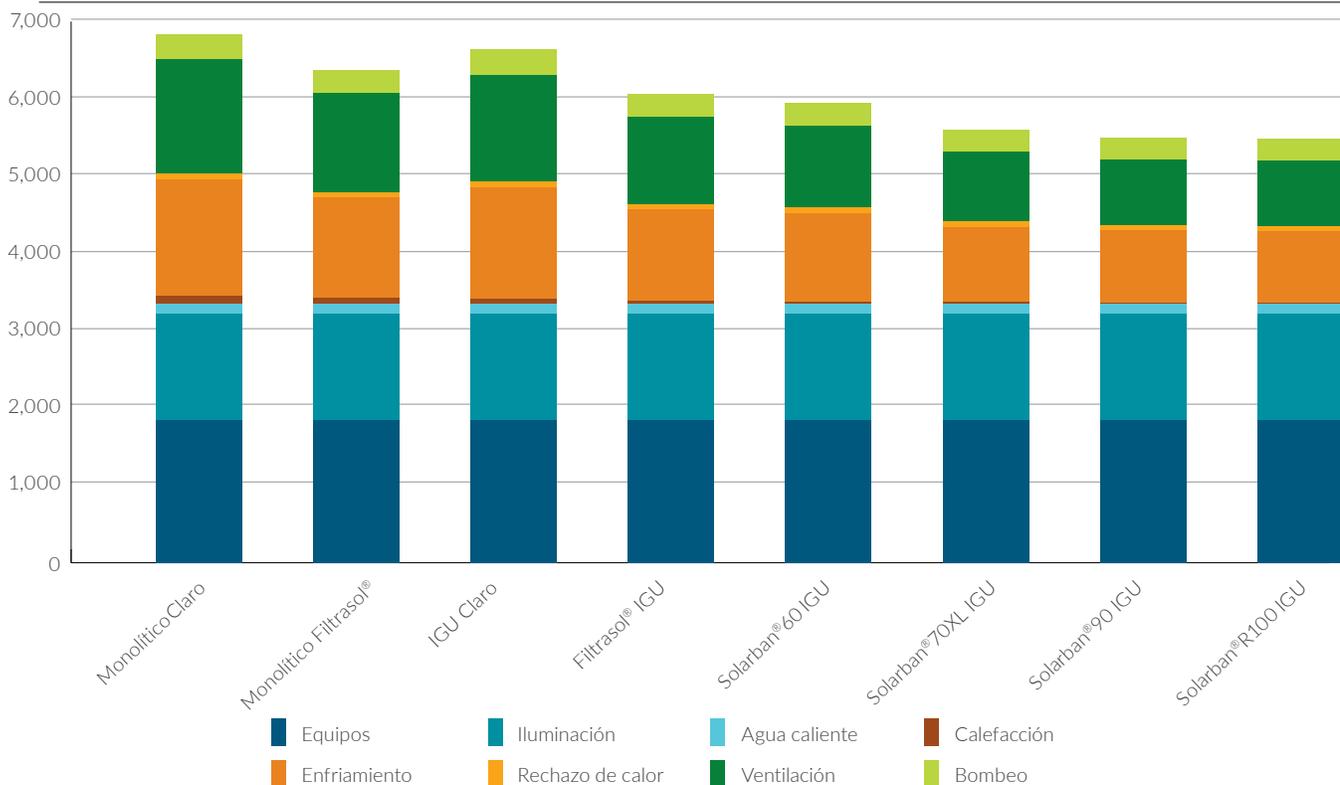
Consumo anual de energía por uso final (MWh)



León (2A)

Sistema de acristalamiento	Consumo eléctrico (MWh)	Capacidad de enfriamiento (kW)	Capacidad de calefacción (kW)	Capacidad de ventilación (m³/min)	Costo operativo total (MX \$)	Costo de inversión para enfriamiento (MX \$)	Costo de inversión para ventilación (MX \$)	Costo total de inversión (MX \$)	Ahorro en costos de inversión inicial total	Ahorro en costos de operación anual
Monolítico Claro	6,869	3,374	1,098,419	22,186	\$11,896,349	\$16,043,526	\$38,604,208	\$54,647,734	0.00%	0.00%
Monolítico Filtrasol®	6,396	2,996	1,098,636	19,638	\$11,102,053	\$14,246,830	\$34,170,196	\$48,417,026	11.40%	6.68%
IGU Claro	6,671	3,168	883,836	20,737	\$11,565,075	\$15,062,688	\$36,082,293	\$51,144,982	6.41%	2.78%
Filtrasol® IGU	6,085	2,660	883,917	17,377	\$10,588,606	\$12,650,608	\$30,236,438	\$42,887,047	21.52%	10.99%
Solarban®60 IGU	5,978	2,478	751,645	16,150	\$10,406,213	\$11,783,887	\$28,101,819	\$39,885,706	27.01%	12.53%
Solarban®70XL IGU	5,624	2,158	746,258	14,033	\$9,807,932	\$10,262,492	\$24,417,839	\$34,680,331	36.54%	17.56%
Solarban®90 IGU	5,524	2,076	748,091	13,489	\$9,639,950	\$9,872,259	\$23,471,488	\$33,343,747	38.98%	18.97%
Solarban® R100 IGU	5,503	2,059	752,082	13,380	\$9,603,639	\$9,792,878	\$23,280,417	\$33,073,295	39.48%	19.27%

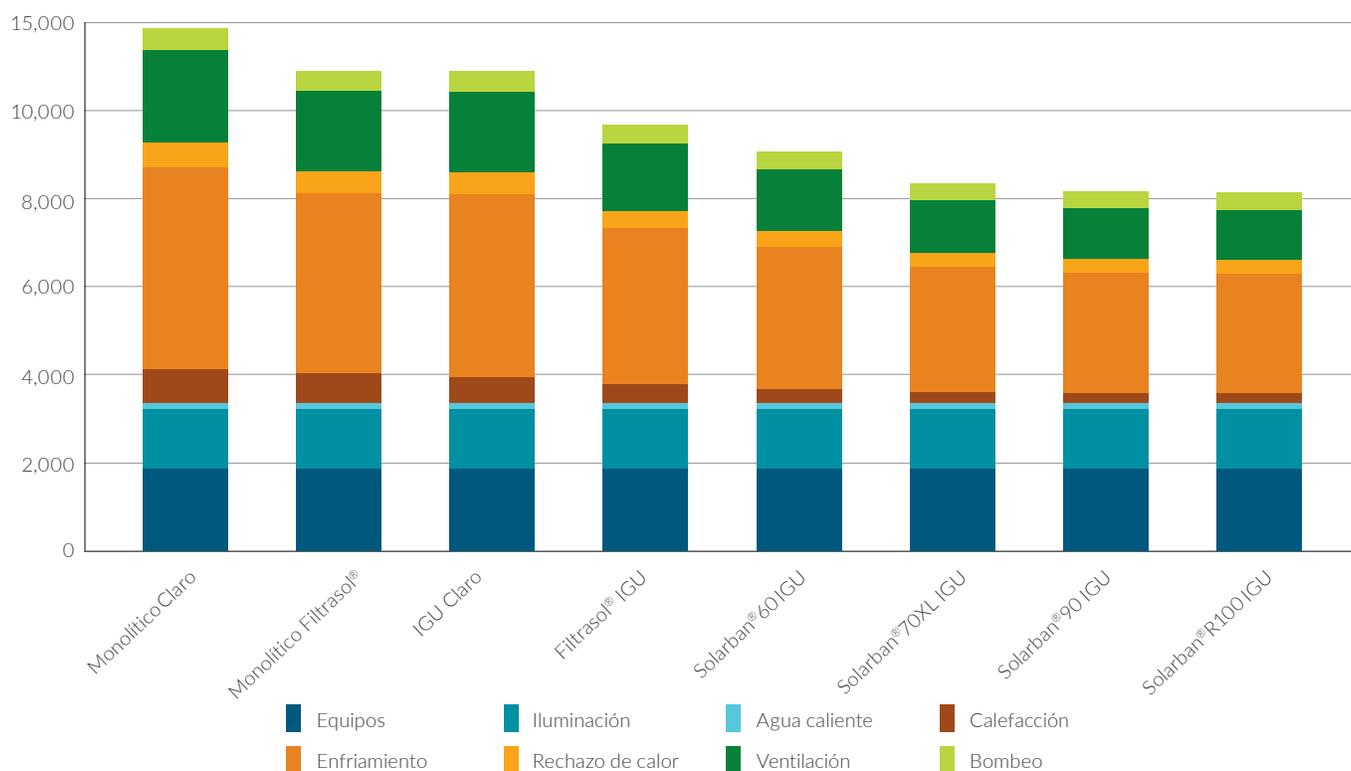
Consumo anual de energía por uso final (MWh)



Monterrey (2B)

Sistema de acristalamiento	Consumo eléctrico (MWh)	Capacidad de enfriamiento (kW)	Capacidad de calefacción (kW)	Capacidad de ventilación (m³/min)	Costo operativo total (MX \$)	Costo de inversión para enfriamiento (MX \$)	Costo de inversión para ventilación (MX \$)	Costo total de inversión (MX \$)	Ahorro en costos de inversión inicial total	Ahorro en costos de operación anual
Monolítico claro	11,879	3,699	1,186,681	33,933	\$18,716,792	\$17,588,598	\$59,043,365	\$76,631,963	0.00%	0.00%
Monolítico Filtrasol®	10,914	3,339	1,186,936	30,597	\$17,209,607	\$15,875,896	\$53,239,641	\$69,115,537	9.81%	8.05%
IGU Claro	10,899	3,361	941,442	30,806	\$17,236,082	\$15,983,166	\$53,603,216	\$69,586,382	9.19%	7.91%
Filtrasol® IGU	9,673	2,888	941,532	26,419	\$15,319,858	\$13,730,735	\$45,969,649	\$59,700,384	22.09%	18.15%
Solarban®60 IGU	9,070	2,644	797,713	24,166	\$14,389,744	\$12,573,941	\$42,048,949	\$54,622,890	28.72%	23.12%
Solarban®70XL IGU	8,356	2,358	791,981	21,511	\$13,263,090	\$11,210,457	\$37,429,914	\$48,640,371	36.53%	29.14%
Solarban®90 IGU	8,162	2,276	793,919	20,754	\$12,965,077	\$10,821,311	\$36,111,156	\$46,932,467	38.76%	30.73%
Solarban® R100 IGU	8,133	2,266	798,180	20,660	\$12,921,357	\$10,773,325	\$35,948,383	\$46,721,708	39.03%	30.96%

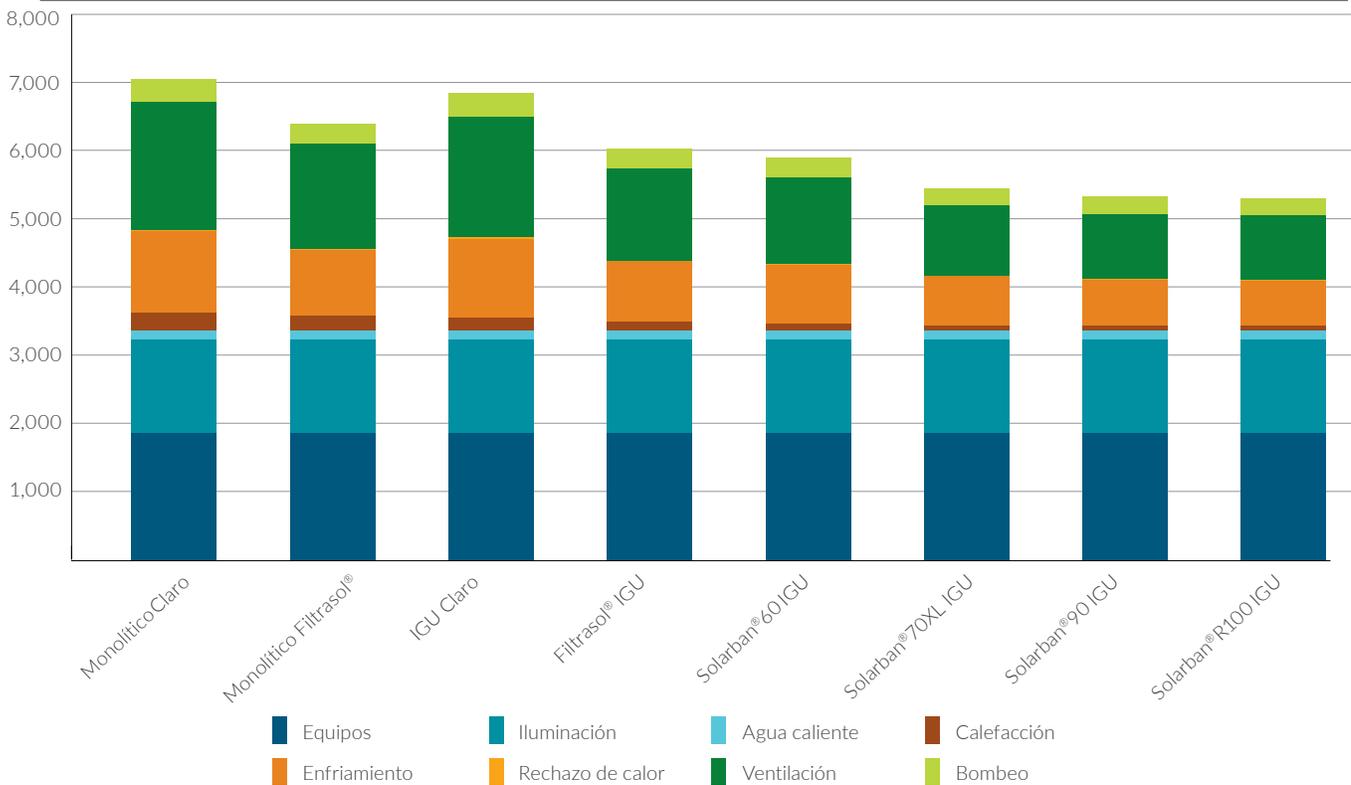
Consumo anual de energía por uso final (MWh)



Ciudad de México (3A)

Sistema de acristalamiento	Consumo eléctrico (MWh)	Capacidad de enfriamiento (kW)	Capacidad de calefacción (kW)	Capacidad de ventilación (m³/min)	Costo operativo total (MX \$)	Costo de inversión para enfriamiento (MX \$)	Costo de inversión para ventilación (MX \$)	Costo total de inversión (MX \$)	Ahorro en costos de inversión inicial total	Ahorro en costos de operación anual
Monolítico Claro	7,053	3,058	1,143,203	34,882	\$11,931,846	\$14,539,585	\$60,694,144	\$75,233,729	0.00%	0.00%
Monolítico Filtrasol®	6,401	2,634	1,143,440	29,995	\$10,852,484	\$12,523,102	\$52,192,010	\$64,715,112	13.98%	9.05%
IGU Claro	6,843	2,922	909,785	33,322	\$11,586,286	\$13,896,363	\$57,981,148	\$71,877,510	4.46%	2.90%
Filtrasol® IGU	6,026	2,398	909,872	27,275	\$10,233,697	\$11,400,875	\$47,458,744	\$58,859,619	21.76%	14.23%
Solarban®60 IGU	5,901	2,300	768,677	26,147	\$10,023,333	\$10,935,649	\$45,496,141	\$56,431,790	24.99%	16.00%
Solarban®70XL IGU	5,454	2,004	762,981	22,748	\$9,279,711	\$9,527,708	\$39,580,919	\$49,108,626	34.73%	22.23%
Solarban®90 IGU	5,322	1,913	764,913	21,702	\$9,062,702	\$9,096,257	\$37,761,846	\$46,858,104	37.72%	24.05%
Solarban®R100 IGU	5,299	1,898	769,140	21,527	\$9,025,309	\$9,023,970	\$37,457,074	\$46,481,044	38.22%	24.36%

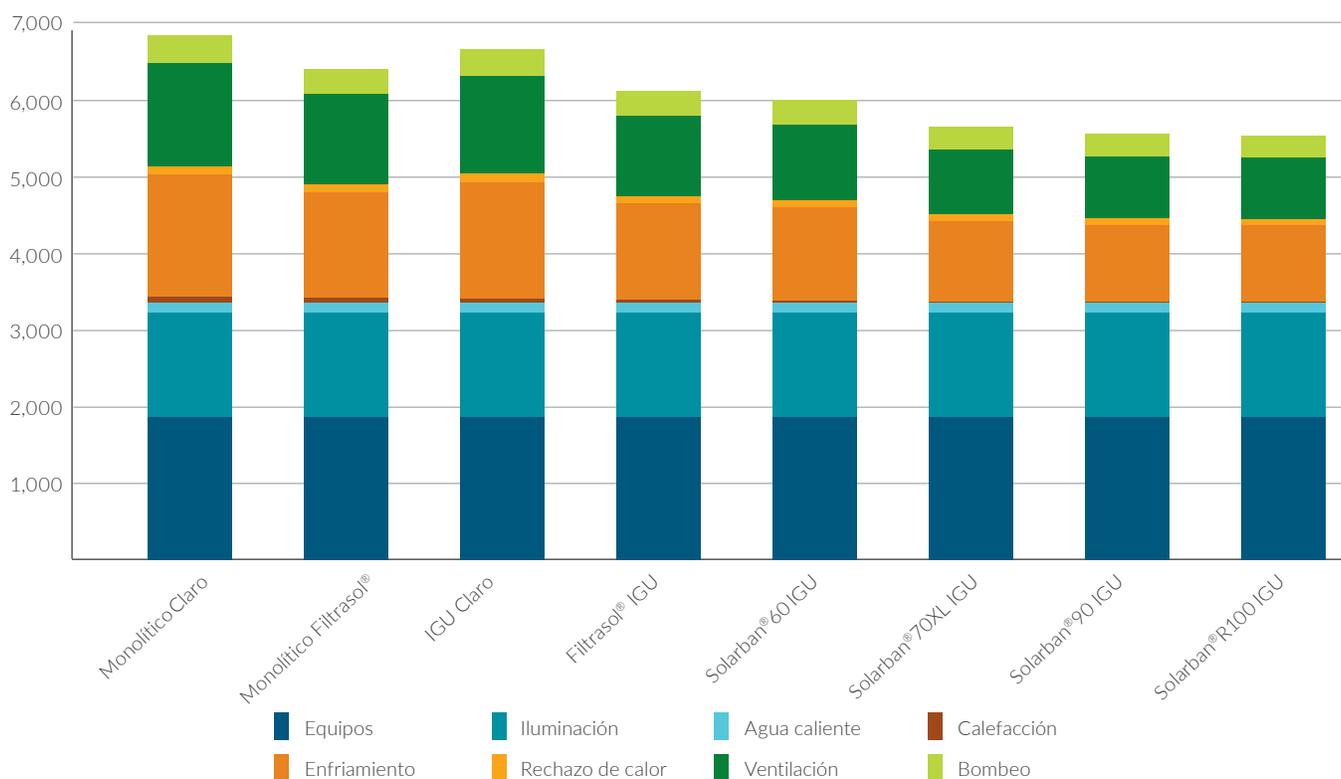
Consumo anual de energía por uso final (MWh)



Guadalajara (3A)

Sistema de acristalamiento	Consumo eléctrico (MWh)	Capacidad de enfriamiento (kW)	Capacidad de calefacción (kW)	Capacidad de ventilación (m³/min)	Costo operativo total (MX \$)	Costo de inversión para enfriamiento (MX \$)	Costo de inversión para ventilación (MX \$)	Costo total de inversión (MX \$)	Ahorro en costos de inversión inicial total	Ahorro en costos de operación anual
Monolítico Claro	6,847	3,225	1,055,358	20,587	\$11,826,534	\$15,336,968	\$35,822,239	\$51,159,207	0.00%	0.00%
Monolítico Filtrasol®	6,406	2,926	1,055,540	18,643	\$11,087,685	\$13,913,466	\$32,439,068	\$46,352,535	9.40%	6.25%
IGU Claro	6,670	3,025	872,373	19,259	\$11,532,222	\$14,384,117	\$33,510,004	\$47,894,121	6.38%	2.49%
Filtrasol® IGU	6,114	2,602	872,445	16,519	\$10,602,723	\$12,373,184	\$28,742,753	\$41,115,937	19.63%	10.35%
Solarban®60 IGU	6,006	2,408	754,962	15,244	\$10,418,275	\$11,449,556	\$26,524,003	\$37,973,560	25.77%	11.91%
Solarban®70XL IGU	5,662	2,116	750,079	13,349	\$9,842,605	\$10,060,580	\$23,227,510	\$33,288,090	34.93%	16.78%
Solarban®90 IGU	5,569	2,051	751,759	12,931	\$9,688,025	\$9,752,286	\$22,499,074	\$32,251,360	36.96%	18.08%
Solarban® R100 IGU	5,546	2,035	755,356	12,825	\$9,649,404	\$9,674,976	\$22,315,804	\$31,990,780	37.47%	18.41%

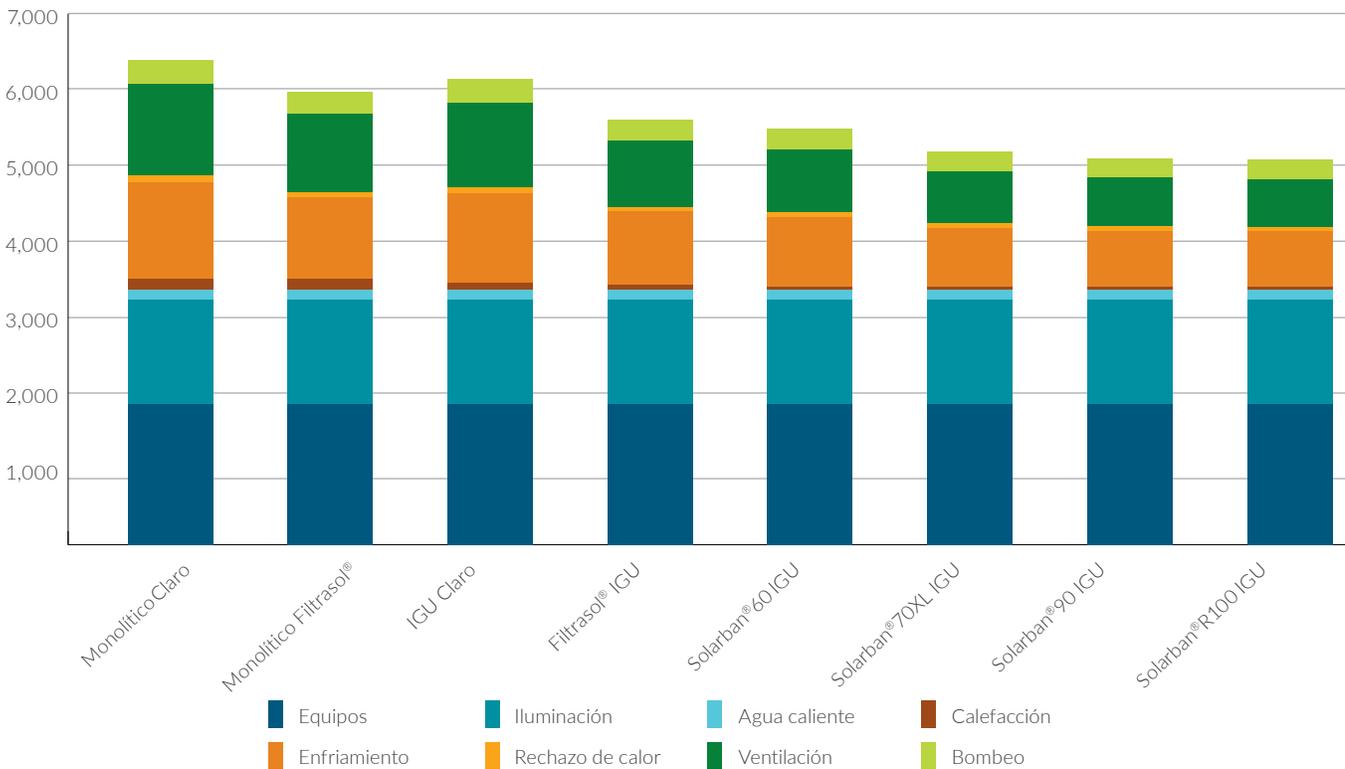
Consumo anual de energía por uso final (MWh)



Tijuana (3B)

Sistema de acristalamiento	Consumo eléctrico (MWh)	Capacidad de enfriamiento (kW)	Capacidad de calefacción (kW)	Capacidad de ventilación (m³/min)	Costo operativo total (MX \$)	Costo de inversión para enfriamiento (MX \$)	Costo de inversión para ventilación (MX \$)	Costo total de inversión (MX \$)	Ahorro en costos de inversión inicial total	Ahorro en costos de operación anual
Monolítico Claro	6,379	3,511	1,045,817	19,616	\$6,036,813	\$16,695,031	\$34,131,144	\$50,826,175	0.00%	0.00%
Monolítico Filtrasol®	5,963	3,094	1,046,009	17,192	\$5,633,917	\$14,711,372	\$29,914,571	\$44,625,943	12.20%	6.67%
IGU Claro	6,127	3,275	856,284	18,133	\$5,803,581	\$15,573,219	\$31,551,638	\$47,124,857	7.28%	3.86%
Filtrasol® IGU	5,598	2,727	856,357	14,991	\$5,297,561	\$12,968,569	\$26,083,676	\$39,052,245	23.17%	12.25%
Solarban®60 IGU	5,478	2,547	737,390	13,925	\$5,183,794	\$12,110,230	\$24,229,510	\$36,339,740	28.50%	14.13%
Solarban®70XL IGU	5,179	2,221	732,492	12,044	\$4,899,218	\$10,560,260	\$20,955,767	\$31,516,027	37.99%	18.84%
Solarban®90 IGU	5,090	2,128	734,167	11,510	\$4,813,914	\$10,118,992	\$20,026,813	\$30,145,805	40.69%	20.26%
Solarban® R100 IGU	5,072	2,113	737,786	11,420	\$4,796,470	\$10,045,450	\$19,870,881	\$29,916,331	41.14%	20.55%

Consumo anual de energía por uso final (MWh)



Zacatecas (3C)

Sistema de acristalamiento	Consumo eléctrico (MWh)	Capacidad de enfriamiento (kW)	Capacidad de calefacción (kW)	Capacidad de ventilación (m³/min)	Costo operativo total (MX \$)	Costo de inversión para enfriamiento (MX \$)	Costo de inversión para ventilación (MX \$)	Costo total de inversión (MX \$)	Ahorro en costos de inversión inicial total	Ahorro en costos de operación anual
Monolítico Claro	6,467	3,193	1,492,098	21,855	\$11,306,829	\$15,183,115	\$38,027,005	\$53,210,120	0.00%	0.00%
Monolítico Filtrasol®	5,990	2,738	1,492,408	18,691	\$10,474,070	\$13,018,735	\$32,522,717	\$45,541,452	14.41%	7.37%
IGU Claro	6,220	3,048	1,182,248	20,824	\$10,962,344	\$14,495,002	\$36,233,894	\$50,728,897	4.66%	3.05%
Filtrasol® IGU	5,635	2,482	1,182,358	16,903	\$9,954,063	\$11,802,868	\$29,411,344	\$41,214,212	22.54%	11.96%
Solarban®60 IGU	5,547	2,371	1,003,168	16,128	\$9,826,997	\$11,272,825	\$28,062,263	\$39,335,088	26.08%	13.09%
Solarban®70XL IGU	5,229	2,051	996,111	13,917	\$9,279,055	\$9,751,242	\$24,215,657	\$33,966,899	36.16%	17.93%
Solarban®90 IGU	5,138	1,953	998,500	13,241	\$9,122,595	\$9,287,926	\$23,039,300	\$32,327,226	39.25%	19.32%
Solarban®R100 IGU	5,122	1,937	1,003,742	13,129	\$9,093,904	\$9,210,718	\$22,844,916	\$32,055,634	39.76%	19.57%

Consumo anual de energía por uso final (MWh)

