

EFICIENCIA ENERGÉTICA

La primera aproximación al diseño eficiente conecta al interesado con la idea de que un recurso invertido (energía, en este caso) obtenga efectos benéficos y que no se desperdicie en absoluto, esto es, obtener máxima utilidad con el mínimo de gastos. Para volver aplicable ese principio en un proyecto de climatización es necesario contar con algún indicador que permita decidir entre alternativas que compiten o, a veces, simplemente determinar si la incorporación de un determinado cambio se justifica. Los textos subsiguientes pretenden resolver tal necesidad. Al considerar el “*Edificio Energía Cero*” como opción relevante para el tema, se incluyen su descripción y análisis al final del capítulo.

Concepto de eficiencia energética. Siendo la termodinámica la ciencia que estudia la energía en sus diversas formas y transformaciones, y las leyes y limitaciones de sus procesos, resulta natural apoyarse en sus principios para introducir el concepto de eficiencia energética en edificaciones. Según la termodinámica clásica existen dos formas de definir eficiencia energética: desde la primera ley y desde la segunda ley.

Eficiencia energética de primera ley. Siendo eficiencia en ingeniería, y en muchas otras disciplinas, la comparación de los resultados obtenidos contra las inversiones causadas, se podría aplicar este concepto al edificio como sistema térmico donde se busca confort mientras se consume energía en los procesos ejecutados para obtenerlo. Esta primera aproximación podría ser adecuada, después de acordar las unidades y la forma de comparación entre los distintos niveles de confort alcanzado. Si el confort se cuantifica en porcentaje de personas satisfechas, se tiene una base de comparación simple que permite calificar dos propuestas de climatización de un espacio. Se define eficiencia I:

$$\eta_{I-ed} = (100 - \text{PPD}) / (W_{EE} + Q) \text{ [\% satisfechos/kW]},$$

donde PPD es porcentaje de gente insatisfecha según índice de Fanger; W_{EE} es la potencia eléctrica consumida [kW] y Q el flujo de calor gastado [kW].

EFICIENCIA DE SEGUNDA LEY. Atendiendo al hecho de que dos sistemas pueden causar el mismo efecto y gastar los mismos recursos, pero uno de ellos en condiciones mucho más exigentes que el otro, se da paso en termodinámica al concepto de eficiencia energética de segunda ley. Para hacer diferencia entre los dos sistemas descritos se pasa a comparar cada uno de ellos con el sistema ideal. Se entiende como sistema ideal aquel que no contiene irreversibilidades y, por consiguiente, puede ejecutar las tareas sin incurrir en ningún tipo de desperdicio. Se define entonces como eficiencia II:

$$\eta_{II-ed} = \eta_{I-ed} / \eta_{I-ideal}$$

donde la eficiencia del sistema ideal debe ser implementado para el caso particular que atañe, teniendo en cuenta que los procesos energéticos involucrados no presenten irreversibilidades térmicas (fricción, transferencia a diferentes niveles de temperatura, expansiones).

Para el caso simple de enfriamiento, es decir para el caso básico de climatización en verano o en clima cálido mediante enfriadores, el problema se reduce a establecer el nivel de temperatura interior a mantener, el nivel de temperatura exterior, la carga calórica a remover y la potencia eléctrica a consumir para cada solución. Los datos anteriores permiten calcular η_{I-ed} para cada equipo, mientras que para la referencia ideal se utiliza la eficiencia de refrigerador ideal, la cual es;

$$\eta_{I-ideal} = (T_L + 273) / (T_H - T_L),$$

donde T_L es la temperatura media [°C] del ambiente exterior y T_H la temperatura [°C] interior.

Para el caso simple de calefacción, es decir para el caso básico de climatización en invierno o en clima frío mediante bombas de calor, el problema se reduce a establecer el nivel de temperatura interior a mantener, el nivel de temperatura exterior, la carga calórica a suministrar y la potencia eléctrica a consumir para cada solución. Los datos anteriores permiten calcular

η_{I-ed} para cada equipo, y para la referencia ideal se utiliza la eficiencia de la bomba de calor ideal, la cual es;

$$\eta_{I-ideal} = (T_H + 273) / (T_H - T_L),$$

donde T_L es la temperatura media [°C] del ambiente exterior y T_H la temperatura [°C] interior.

El problema de evaluar la eficiencia se vuelve algo más complejo cuando se trata de evaluar una determinada modificación al sistema básico. Se trata de que, frecuentemente, se pregunta si la introducción de un cambio se justifica desde el punto de vista energético. Por ejemplo, el agregar uno (o varios) elementos que alteran la carga (aislamientos, barreras contra la radiación), aberturas para facilitar corrientes de aire naturales, improvisar un ventilador, implementar un tragaluz para iluminación natural, etc., o combinaciones de tales alteraciones. En tales casos lo que corresponde es evaluar el efecto benéfico del cambio o la combinación de cambios a introducir, frente a los costos en que se podrá incurrir. Lo anterior, si se mira a la luz del concepto introducido inicialmente de eficiencia energética, no es otra cosa que la eficiencia energética del cambio particular. Sin embargo, de una rápida revisión de la ecuación propuesta salta a la vista que no aplica a una modificación particular, pues está diseñada para espacios o edificaciones. Procede entonces comparar dos alternativas: sistema original versus sistema modificado. Para hacer simple esta comparación, pues el tiempo es un recurso muy valioso, se parte que el PPD no se altera por razones obvias, que la potencia eléctrica W_{EE} y el calor de aporte Q se cambian según:

$$\Delta W_{EE} = \Delta \text{carga} / \text{EER o}$$

$$\Delta Q = \Delta \text{carga} / \text{COP},$$

donde EER=Potencia frigorífica / Potencia eléctrica consumida en refrigeración (parámetro propio del equipo de acondicionamiento de aire, viene especificado claramente en su placa), normalmente en [TR/kW], que puede ser expresado adimensionalmente, pues 1 TR = 3.517 kW; COP=Potencia calorífica / Potencia eléctrica consumida en calefacción (parámetro propio del equipo de acondicionamiento de aire, viene especificado claramente en su placa); Δcarga = disminución en la carga calórica introducida por los cambios implementados.

EFICIENCIA ENERGÉTICA DE APARATOS CON LA MISMA FUNCIÓN

Como en cualquier caso de dispositivos electromecánicos que ejecutan las mismas tareas, se presentan ofertas de distinta calidad y duración. En la actualidad será siempre del caso estar atentos a los valores reportados de EER (ya explicado) y SEER. El párrafo a continuación es la traducción de una publicación de una compañía de gran trayectoria en el mercado del aire acondicionado (Trane): "...SEER, por sus siglas en inglés (**Seasonal Energy Efficiency Rating**) representa la *Relación de Eficiencia de Energía de Estación*. Al igual que los kilómetros por litro en un automóvil, SEER mide la eficiencia general de un sistema completo de calefacción y enfriamiento con base en temporada estacional. A mayor SEER, mayor será la eficiencia energética, y menor será la huella ecológica que usted genere. La mejor eficiencia proviene de sistemas acoplados, es decir, sistemas en que todos los componentes están balanceados para trabajar conjuntamente y lograr la optimización de la eficiencia y del desempeño. Entre mayor SEER tenga un equipo más elevado será su precio, pero menor será su consumo energético. De inicio pensar en pagar un 30% más que un equipo convencional puede parecer mucho, sin embargo, el ahorro en consumo de energía se verá reflejado mes con mes en su recibo de luz, en algunos casos en 7 meses se recupera el excedente. A continuación se muestra un grafica para su mejor comprensión."

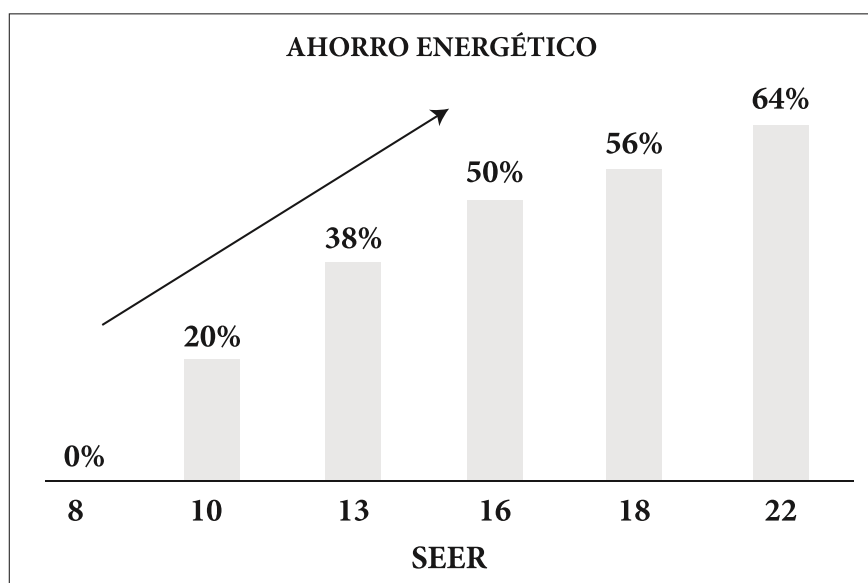


Figura 8.1. Ahorro energético.

CASO BASE

Para hacer ilustración del análisis de eficiencia energética en el caso base se seleccionan:

- Para los cambios pasivos aprobados en techos y muros, y
- Para las tres soluciones generales planteadas como sistemas de climatización.

Los parámetros de comportamiento disponibles son: $EER_{AA} = 0.87$ [TR/kW] (catálogo del equipo de aire acondicionado), $EER_{minisplits} = 0.80$ [TR/kW] (catálogo del equipo minisplits), $EER_{enfriam.evap.} = 5.2$ [TR/kW] (deducido del catálogo equipo), $PPD_{AA} = PPD_{minisplits} = PPD_{enfriador evap.} = 5\%$ (propio de AA y calculado para enfriamiento evaporativo), $W_{EE-AA} = 7.5$ kW (catálogo equipo AA), $W_{EE-Minisplits} = 2.5$ kW (catálogo equipo minisplits), $W_{EE-enfriador evap.} = 0.25$ kW (catálogo equipo)

- Modificaciones exteriores de techo y muros*

Carga original_{TECHOS-MUROS} = 5.305+4.781=10.086 kW = 2.87 TR (Tabla 7.2)

Carga Nueva_{TECHOS-MUROS} = 519+1.772= 2.291 kW = 0.65 TR (Tabla 7.2)

Entonces las potencias eléctricas consumidas en cada opción son:

$$W_{EE-AA} = \text{carga original} / EER_{AA} = 2.87 / 0.87 = 3.30 \text{ kW}$$

$$W_{EE-minisplits} = \text{carga nueva} / EER_{minisplits} = 0.65 / 0.8 = 0.81 \text{ kW}$$

$$W_{EE-enfriam.evap.} = \text{carga nueva} / EER_{enfriam.evap.} = 0.65 / 5.2 = 0.13 \text{ kW}$$

En consecuencia

$$\eta_{AA} = (100-5) / 3.3 = 29 \text{ [satisfechos/kW]}$$

$$\eta_{minisplits} = (100-5) / 0.81 = 117 \text{ [satisfechos/kW]}$$

$$\eta_{enfriam.evap.} = (100-5) / 0.13 = 731 \text{ [satisfechos/kW]},$$

que muestran, sin lugar a dudas, unas bondades, en términos de eficiencia energética, más que grandes.

- Soluciones generales de climatización*

$$\eta_{Ied-AA} = (100-5) / 7.5 = 9.4 \text{ [satisfechos/kW]}$$

$$\eta_{\text{led-minisplits}} = (110-5) / 2.5 = 38 \text{ [satisfechos/kW]}$$
$$\eta_{\text{led-enfriam.evap}} = (100-5) / 0.25 = 380 \text{ [satisfechos/kW]},$$

índices que también corroboran las bondades recién mencionadas.

Es muy visible que desde el punto de vista exclusivamente energético resultaron ampliamente justificadas las decisiones tomadas, pues los índices de eficiencia crecieron en gran modo. Llegados a este punto es necesario dejar en claro que una justificación desde el punto de vista simplemente energético no es definitiva, pues este recurso, aunque importante, está supeditado al recurso económico; dicho de otra manera: aunque importante, no basta por sí misma la mejora en la eficiencia energética.

El software comercial que hace análisis energético (mas no análisis de eficiencia energética) se reconoce como herramienta útil en el desarrollo de proyectos de climatización. A continuación se citan los más conocidos.

Ecotect: Software de Diseño de Construcción Sustentable

Autodesk® Ecotect® Analysis, software de análisis de diseño sustentable, es una de las posibilidades a elegir dentro de las herramientas de diseño para una construcción sustentable. Ofrece una amplia gama de simulaciones y análisis de funcionamiento energético que permite mejorar el rendimiento de los edificios existentes o en el diseño de otros nuevos, siendo una útil herramienta al momento de diseñar, ya que va desde modelos generales del edificio hasta el detalle. Permite integrar los análisis de energía, agua y emisiones de carbono con herramientas que permiten visualizar y simular el comportamiento del edificio en el contexto de su medio ambiente.

Herramientas y funciones del software:

- **Análisis energético del edificio:** Calcula el total de energía utilizada y las emisiones de carbono en el modelo del edificio. El cálculo puede hacerse anual, mensual, diario y horario, a partir de una base de datos global de información meteorológica.
- **Comportamiento térmico:** Calcula las cargas y requerimientos de enfriamiento y calentamiento y analiza los efectos de los ocupantes, las ganancias internas, infiltraciones y equipos.
- **Uso del agua y evaluación de costos:** Calcula una estimación del uso de agua dentro y fuera del edificio.
- **Radiación Solar:** Permite visualizar la incidencia solar y la radiación en ventanas y otras superficies, en cualquier período de tiempo.
- **Luz día:** Calcula los factores de luz día y niveles de luminosidad en cualquier punto del modelo.

- Sombras y reflejos: Muestra la posición solar y el recorrido relativo con respecto al modelo, en cualquier fecha, hora y ubicación.

Con todas estas herramientas podemos realizar variados análisis durante la fase de diseño del proyecto. Utilizando Ecotect, decisiones sobre forma, orientación, elección de materiales, tamaño y ubicación de ventanas, que tienen el mayor impacto sobre la eficiencia energética del proyecto, son evaluables y, por consiguiente, optimizables. Por último, Ecotect permite a los arquitectos y diseñadores trabajar fácilmente en 3D aplicando todas las herramientas necesarias.

ESP-r es un código abierto de modelado de rendimiento energético del edificio creado por la *University of Strathclyde* [113]. ESP-r calcula el desempeño del edificio con base en un análisis de elemento finito en donde se resuelve un conjunto de ecuaciones de conservación. Desarrollado en 1974 y convertido en 2002 en licencia pública, GNU-ESP-r [114] está diseñado para trabajar en sistema operativo Unix y se puede ejecutar en plataforma Windows utilizando un modulador de Unix, o funcionar con la versión de Windows directamente. El actual administrador de ESP-r es Ian Beausoleil Morrison.

DOE2.com Home Page. *doe2.com/eQUEST** [115] es un software de libre acceso, sofisticado pero fácil de usar, para análisis de uso de energía en el edificio. Esta herramienta provee resultados a nivel profesional con un nivel de esfuerzo muy razonable. Dentro de sus herramientas se cuentan:

- DOE-2. Herramienta para uso de energía y análisis de costos en edificaciones.
- eQUEST: the QUick Energy Simulation Tool.
- DOE-2. SUPPLEMENT. Version 2.1E. P.C. Winkelmann, B.E
- PowerDOE: Comparación de DOE-2.1E, DOE-2.2.
- Weather files: Archivos descargables de condiciones ambientales.
- +L: Lokmanhekim: Desarrollo conceptual.

TRNSYS (A TRaNsient SYstems Simulation Program)

Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Wisconsin (http://www.wisc.edu/) . TRNSYS [116] es un programa de simulación transitoria con estructura modular. La biblioteca TRNSYS incluye muchos de los componentes comúnmente hallados en sistemas de energía eléctrica y térmica, así como rutinas para manejar ingreso de datos climáticos o funciones de variables dependientes del tiempo, y salida de resultados de la simulación. TRNSYS está muy bien adaptado para análisis detallados de cualquier sistema cuyo desempeño depende del paso del tiempo.

Por lo anterior se ha vuelto un software de referencia para ingenieros e investigadores de todo el mundo. Dentro de sus principales aplicaciones se cuentan sistemas solares (térmicos y fotovoltaicos), edificios de bajo consumo energético, sistemas HVAC, sistemas de energías renovables, co-generación y celdas de combustible.

EDIFICIOS ENERGÍA CERO, O ENERGÍA CERCANA A CERO, O ENERGÍA PLUS

Dada la naturaleza propia de un edificio, su funcionamiento implica necesariamente el consumo de distintas formas de energía. *Edificio Energía Cero* es aquel que cuenta con medios propios para generar toda la energía que consume; *Edificio Energía Cercana a Cero*, aquel cuya generación propia es un algo menor que sus consumos, y *Edificio Energía Plus* es el que produce más energía que la que gasta, es decir que cuenta con excedentes.

Aunque en la práctica estos tipos de edificaciones se conocen desde siempre, el término “*Zero Energy House*” se popularizó a partir del trabajo de Esbensen & Korsgaard [117], publicado en *Solar Energy* (1977) y desarrollado en la Universidad Técnica de Dinamarca. Aquí se construyó una casa de dos alas (60 m^2 c/u) separadas por un atrio cubierto (70 m^2), especialmente diseñada para clima frío, considerando la climatología propia del país. El primer cuidado fue proveer un aislamiento térmico impresionante, que disminuyó la carga típica de calefacción de 20000 kWh/año a 2300 kWh/año , esto es rebajar un 88.5%. El siguiente paso fue implementar un gran sistema calefactor con colector solar ($42 \text{ m}^2 = 12\text{m} \times 3.5\text{m}$) y su respectivo tanque de almacenamiento ($30 \text{ m}^3 = 2.5\text{m D} \times 6.5\text{m L}$), con resistencias eléctricas de 5 kW que respaldaban el conjunto. El aire de renovación se proveyó mediante un sistema de ventilación ($200 \text{ m}^3/\text{h}$ en general y $100 \text{ m}^3/\text{h}$ al mediodía), con recuperador de calor 90% eficiente. El consumo de agua caliente se limitó a 350 l/día en períodos soleados y 175 l/día en períodos nublados (29% del tiempo), y se instaló un recuperador de calor 50% eficiente a las salidas de duchas/lavadora/lavaplatos. El suministro de energía eléctrica fue de tipo convencional, es decir de la red local, y se contabilizó un consumo en bombas, válvulas y ventiladores del orden de 330 kWh/año . En este ejemplo, energía cero solo se refería a la térmica.

En la actualidad la generación de energía eléctrica en *Edificios Energía Cero* se da mayoritariamente mediante paneles fotovoltaicos, y algunas veces por turbinas de viento. Para lidiar con las fluctuaciones de producción y demanda se puede optar por almacenar en rack de baterías y/o conectarse

a la red pública a través de un controlador de carga automático que inyecte los sobrantes y tome los faltantes. El análisis económico deberá considerar las diferencias entre las tarifas por venta a la red y las tarifas por compras más el cargo mínimo o, en el caso de independizarse de la red, el costo de reponer el rack de baterías cada tres años, aproximadamente.

La producción de energía térmica puede tomar varias formas, pero la más sencilla y eficaz es el aprovechamiento de la energía solar: colectores solares térmicos de agua caliente (o vapor a baja presión), chimeneas solares de aire caliente, acumulación en la masa térmica del edificio, muros Trombe-Michel, y muros de agua. También se pueden mencionar el aprovechamiento de combustibles residuales, biocombustibles y biomasa. Con estas técnicas puede brindarse calefacción, refrescamiento y hasta refrigeración a los ambientes de la casa o el edificio. Entre otros desarrollos se encuentran la calefacción geotérmica y el pozo canadiense (aire acondicionado natural), pero es importante recordar que esta última técnica solo es aplicable en regiones donde operan las cuatro estaciones, y no en nuestra zona tórrida.

