ASOCIACIÓN DE EMPRESAS DE FRÍO Y SUS TECNOLOGÍAS

"GUÍA PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LAS INSTALACIONES FRIGORÍFICAS"

AEFYT

ASOCIACIÓN DE EMPRESAS DE FRÍO Y SUS TECNOLOGÍAS

MAYO 2014

PUBLICACIÓN PROPIEDAD DE AEFYT

TÍTULO DE LA PUBLICACIÓN

"Guía para la mejora de la Eficiencia Energética de las Instalaciones Frigoríficas"

AUTORES: En la redacción de esta Guía han participado:
D. Ricardo Giménez López – Ingeniero Consultor. Asesor de AEFYT
D. Federico García Ruíz – Ingeniero. Coordinador del Comité Técnico de AEFYT
D. Manuel Lamúa Soldevilla – Ingeniero. Investigador del ICTAN (CSIC)
D. Juan Carlos Rodriguez Dominguez – Ingeniero de Johnson Controls Refrig.
Además han participado en la revisión de la misma Técnicos expertos de BC Systems SL y de Frost-Trol SA

Cualquier reproducción, parcial o total de la presente publicación, debe contar con la aprobación por escrito de AEFYT.

Depósito Legal: M-17448-2014

Esta Guía recibe el apoyo institucional de

Y ha sido patrocinada por las siguientes Entidades:

Asociación de Empresas de Frío y sus Tecnologías

Arkema Química SA

Dicostock Industrial SL

Emerson Climate Technologies SA

Frost-Trol SA

Grupo de Fabricantes de Enfriamiento Evaporativo

BC Systems-Rivacold

INDICE Página

PRÓLOGO……… 014
INTRODUCCIÓN……… 015

CAPITULO 1
1. Consideraciones Generales. …… 018

CAPITULO 2
2. Conceptos Teóricos. …… 020
2.1 Consumo de energía. …… 020
2.2 El ciclo de Rankine. …… 021
2.3 Coeficiente de eficiencia (COP). ……. 021
2.3.1 Estimación del COP. …… 025
2.3.2. Influencia del recalentamiento y del subenfriamiento. …… 027
2.3.2.1 Recalentamiento. …….. 027
2.3.2.2 Subenfriamiento. …….. 029
2.3.2.3 Efecto del subenfriamiento interno con un intercambiador líquido-vapor. .. 030

CAPITULO 3
3. Estimación de la carga térmica. …… 032
3.1 Formas de reducir la carga y puntas térmicas. ……... 032
3.1.1 Añadiendo algún equipo de apoyo al circuito frigorífico. ……... 033
3.1.2 Aprovechando el calor residual del aire de extracción. …….. 034
3.1.3 Recuperando calor residual procedente de líquidos de proceso. …… 035
3.1.4 Desplazando parte de las cargas térmicas a horas de tarifa baja. …… 035
3.1.5 Reduciendo las puntas de carga térmica. …… 036
3.1.6 Disminuyendo el consumo de las bombas de los sistemas indirectos. .. 036
3.1.7 Utilizando el frío natural (“free cooling”). ……. 037
3.1.8 Adoptando determinadas medidas en los locales refrigerados. …… 038
3.2 Cálculos en almacenes frigoríficos. ……. 039
3.2.1 Datos del almacén. …… 039
3.2.2 Cargas térmicas y consumos. …… 040
3.2.3 Medidas sugeridas para reducir el consumo. …… 042
3.2.3.1 Transmisión. …….. 042
3.2.3.2 Infiltraciones. ……. 043
3.2.3.3 Iluminación. …….. 044
3.2.3.4 Desescarche. ……. 045
3.2.3.5 Distribución de los consumos de energía. …… 045

CAPITULO 4
4. Elección del tipo de refrigerante y del sistema frigorífico. ……. 047
4.1 Tipo de Refrigerante. ……. 047
4.2 Sistemas de expansión: seca e inundada. …….. 048

4.3 Sistemas: directos e indirectos. ……. 049
4.4 Etapas de compresión. ……. 053
4.4.1 Sistema de una etapa de compresión. …….. 054
4.4.2 Sistemas de dos etapas de compresión. …….. 055
4.4.3 Sistema con economizador para compresores de tornillo. ……. 055
4.4.4 Sistemas en cascada. …….. 056
4.4.5 Comparación entre los diversos sistemas de compresión. …….. 057
4.4.5.1 Instalaciones de NH_3. …….. 058
4.4.5.1.1 Instalaciones en cascada con NH_3 en alta. …… 060
4.4.5.2 Instalaciones de R-404A. ……. 061
4.5 Tipos de economizadores. …….. 063
4.6 Métodos de condensación. ……. 066
4.7 Alternativa al sistema de compresión mecánica. La absorción. …… 067
4.7.1 Ciclo de absorción. ……. 067
4.7.2 Planta de absorción de amoníaco agua. …….. 068
4.7.3 Planta de absorción de bromuro de litio-agua. …… 072

CAPITULO 5

5. Selección de componentes. …… 074
5.1 Compresores. …….. 074
5.1.1 Particularidades de los compresores. …… . 077
5.1.1.1 Economizadores. …….. 077
5.1.1.2 Relación interna de volúmenes en los compresores de tornillo (Vi). 079
5.1.1.3 Nivel sonoro de los compresores y sus motores de accionamiento. . 081
5.1.1.4 Condiciones de aspiración de los compresores. …… 081
5.1.1.5 Combinaciones de varios compresores. …… 081
5.2. Intercambiadores de calor. ……. 087
5.2.1 Condensadores. …… 087
5.2.1.1 Condensación por aire. …….. 090
5.2.1.2 Aerorefrigeradores. …… 092
5.2.1.3 Condensadores adiabáticos. ……... 093
5.2.1.4 Condensadores evaporativos y torres de enfriamiento. ……. 094
5.3 Evaporadores y enfriadores de aire y de líquidos. …… 096
5.3.1 Evaporadores y enfriadores más utilizados. …….. 096
5.3.2 Principales características constructivas. …….. 096
5.3.3 Transmisión de calor. …… 097
5.3.4 Desescache de evaporadores. …… 097
5.3.5 Valores de diferenciales de temperaturas usuales y tendencias. ……... 104
5.3.6 Aplicación de los evaporadores. …… 105
5.4 Dispositivos y sistemas de expansión. ……. 111
5.5 Motores eléctricos. …… 119
5.5.1 Motores asíncronos. …… 120
5.5.2 Motores asíncronos de imanes permanentes. ……. 121
5.6 Bombas y ventiladores. …… 123

5.6.1 Bombas para la circulación de fluidos. ……. 124
5.6.1.1 Bombas para refrigerantes. …….. 124
5.6.1.2 Bombas para agua y fluidos secundarios. …… 125
5.6.2 Ventiladores. …….. 127
5.7 Depósitos en las instalaciones de refrigeración. …… 129
5.8 Tuberías y accesorios. …… 130
5.8.1 Tuberías horizontales. ……. 132
5.8.2 Tuberías verticales y altura estática. …… 133
5.8.3 Válvulas. …….. 136
5.9 Muebles frigoríficos. ……... 138

CAPITULO 6
6. Estrategias de control para reducir los consumos de energía. …… 141
6.1 Evaporación flotante. …….. 141
6.2. Condensación flotante. …….. 141
6.3 Control de velocidad de los ventiladores. …….. 144
6.4 Subenfriamiento del líquido. ……. 147
6.5 Variadores de velocidad para accionamiento de compresores frigoríficos. 148
6.5.1 Análisis del uso de variadores de frecuencia en compresores. …… 149
6.6 Sistemas de control. …… 152

CAPITULO 7
7. Acumulación de frío. …… 154
7.1 En el propio producto almacenado. ……. 154
7.2 Mediante calor sensible en líquidos. …… 154
7.3 Por medio de la acumulación de hielo. …… 154
7.3.1 Descripción de la acumulación de hielo. …….. 155
7.3.2 Generación de hielo. ……. 156
7.3.3 Información imprescindible para el diseño. ……. 157
7.3.4 Aplicaciones más frecuentes de la acumulación de hielo. …… 157
7.3.4.1 Sistemas con formación de hielo en el exterior de tubos. …….. 157
7.3.4.2 Sistemas con formación de hielo fuera del tanque de almacenamiento.. 158
7.3.4.3 Sistemas con formación de hielo en esferas o bolas. …… 158

CAPITULO 8
8. Recuperación del calor de condensación. …….. 160
8.1 Sistemas de aprovechamiento “directo”. ……. 162
8.1.1 Recuperación del calor sensible. …….. 162
8.1.2 Recuperación del calor latente. ……. 163
8.1.3 Recuperación del calor de condensación total. ……. 163
8.1.4 Recuperación del calor de enfriamiento del aceite. …….. 165
8.1.5 Circuitos de la recuperación de calor “directo”. …… 165
8.2 Sistemas con aprovechamiento “indirecto”. Bombas de calor. …… 166
8.2.1 Tipos de bombas de calor. ……. 166

8.2.2 Refrigerantes para las bombas de calor. ……. 168
8.2.3 Sistemas básicos para bombas de calor. …… 169
8.2.3.1 Bombas de calor de simple etapa. …….. 169
8.2.3.2 Bombas de calor de doble etapa. …… 170
8.3 Recuperación de calor en sistemas transcríticos. ……. 173
8.4 Pérdida de presión en los circuitos de recuperación de calor. …….. 173
8.5 Temperaturas y presiones de diseño en los circuitos de recuperación de calor. 173

CAPITULO 9
9. Mantenimiento de las instalaciones frigoríficas. ……. 174
9.1 Mantenimiento del interior de los circuitos frigoríficos. …… 174
9.1.1 Contaminación interior y como combatirla. Incondensables y agua. …… 175
9.1.2 Incidencia del agua en los circuitos de NH_3. …… 175
9.1.2.1 Eliminación del agua de los circuitos. …….. 176
9.1.3 Incidencia de los incondensables en las instalaciones. …… 178
9.1.3.1 Eliminación de los incondensables del circuito. …… 179
9.1.4 El aceite en los circuitos de refrigeración. …… 180
9.2 Mantenimiento de los intercambiadores de calor. …… 181
9.2.1 Limpieza de los intercambiadores de calor. …….. 182
9.3 Control de la carga de refrigerante. …….. 182

CAPITULO 10
10. Coste del ciclo de vida. …… 184

CAPITULO 11
11. Inversiones y sus cálculos financieros. …….. 186
11.1 Métodos de cálculo. …… 187

BIBLIOGRAFÍA …….. 193

ANEXOS

ANEXO l
1. Ahorro de energía en instalaciones existentes. …… 194
1.1 Estimación de ahorros potenciales. ……... 194
1.2 Ahorros por inversiones en modificaciones. …….. 195
1.3 Ahorros potenciales por modificaciones concretas. …….. 196

ANEXO ll
2. Introducción. …… 197
2.1 Diferencias de temperatura en intercambiadores de calor para refrigeración. … 197
2.1.1 Definición de las diferencias de temperatura usadas en este anexo. …… 197
2.1.2 Valores medios usuales y aconsejables. …….. 198

ANEXO III

3. Consideraciones sobre el COP. …… 202
3.1 Introducción. …….. 202
3.2 Ciclos de Compresión Mecánica: Ideal, Teórico-Práctico y Real. …… 203
3.2.1 COP de la compresión. ……... 203
3.2.1.1 Máquina Ideal – Ciclo de CARNOT. …….. 203
3.2.1.2 Máquina Teórico-Práctica – Ciclo de Rankine Modificado. …… 205
3.2.1.3 Máquina Frigorífica Real. ……. 206
3.2.2 COP de la instalación. …….. 208
3.3 Ejemplo práctico. …… 208

ANEXO IV

4. Datos de interés. ……... 212

PRÓLOGO

La producción de frío y su aplicación es una técnica de absoluta necesidad para el pleno desarrollo de nuestras actividades y subsistencia cotidiana, como lo podemos observar en casi todas las ramas industriales, terciarias y doméstica que nos rodean. Por potencia y capacidad frigorífica destaca la actividad industrial sobre la terciaría y doméstica, donde el sector agroalimentario se sitúa por delante de la industria química, farmacéutica y mecánica.

Esta técnica es una de las actividades más sensibles de las cadenas de producción en los sectores mencionados por el grado de fiabilidad que deben ofrecer al funcionamiento y a las variaciones de cargas, y cuya prestación genera un elevado consumo de energía.

Sin embargo, la producción de frío está experimentando avances tecnológicos y legislativos que justifican analizar los potenciales de ahorro y de mejora energética que tienen las instalaciones existentes, y cuya reforma producirá elevados beneficios energéticos y económicos para sus titulares y el país.

La sustitución de equipos de compresión que han quedado obsoletos ante máquinas tecnológicamente más avanzadas, con altas capacidades en ahorro de energía por su capacidad de modulación a variaciones de la demanda del servicio (multietapa, variación de las temperaturas de condensación y/o evaporación); la implantación de nuevos sistemas de control, regulación y monitorización, e incluso los nuevos fluidos refrigerantes y sus exigencias específicas, son todas cuestiones de indudable interés desde un punto de vista técnico cuya exposición y desarrollo se contemplan en esta **Guía para la mejora de la eficiencia energética de las instalaciones frigoríficas**.

Este documento es un libro de fundamentos técnicos de la producción del frío muy completo y cuya redacción va abordando las distintas etapas donde la eficiencia energética, por una buena selección o diseño de los componentes, puede jugar un papel fundamental en el consumo posterior de la instalación, criterios todos ellos que ha de tener presente cualquier profesional vinculado a este tipo de instalaciones, bien en la fase de proyecto como en las posteriores de explotación y mantenimiento.

Desde IDAE hemos valorado muy positivamente el contenido de esta guía y el esfuerzo asumido por AEFYT en su redacción por ofrecer un documento de esta trascendencia y que servirá de ayuda en la formación de los técnicos en frío que quieran abordar un buen diseño y uso, bajo criterios de eficiencia energética, de las instalaciones de frío.

IDAE
INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA

INTRODUCCIÓN

Este manual pretende ser una guía sencilla y practica de medidas que se pueden adoptar a fin de reducir el consumo de energía en las instalaciones frigoríficas.

Se puede aplicar total o parcialmente para:

a) El diseño y ejecución de nuevas instalaciones.
b) Las modificaciones de instalaciones existentes.
c) El mantenimiento de las instalaciones.

La industria frigorífica es un considerable consumidor de energía. Datos de países que podrían asimilarse a España en este aspecto, y que disponen de estadísticas fiables (por ejemplo Alemania), indican que la generación de frío para este sector de aire acondicionado, refrigeración industrial y comercial consume entre el 14 y 15 % del total del consumo de la energía eléctrica. En España, considerando su situación geográfica y la mayor incidencia de la industria alimentaria, importante usuario de estas instalaciones, en el total de su tejido industrial este porcentaje es probablemente superior.

En muchas industrias del sector alimentario el consumo de energía es uno de los mayores costes de la producción y tienen una influencia decisiva en la competitividad de los productos que produce o comercializa.

Hasta fechas recientes el aspecto del consumo energético de las instalaciones no tenía la necesaria consideración ni en su diseño, ni en la ejecución y mucho menos en su uso y mantenimiento.

Sin embargo, los incrementos de los precios de la electricidad y los continuos ajustes en los precios de los productos que se llevan al mercado, están provocando en los últimos años un cambio radical en la manera de enfocar este aspecto por parte de los responsables de estas industrias.

Como consecuencia de la insuficiente trascendencia que se le daba al consumo, nos encontramos ahora con un fuerte potencial de mejora de la eficiencia tanto a nivel de diseño de nuevas ejecuciones como en modificaciones de plantas en servicio, así como de ahorro de energía en el mantenimiento de las existentes y de las nuevas.

Este elemental manual pretende aportar ideas para reducir los costes de la energía consumida en este tipo de instalaciones con los medios materiales disponibles y experimentados en el mercado, es decir sin recurrir a temas como nuevos desarrollos e investigaciones.

Por otra parte, al plantearse la reducción del consumo eléctrico mediante el incremento de la eficiencia energética de las instalaciones, se está afectando muy positivamente la protección del medio ambiente. Aunque este no sea el objetivo de partida de la esta GUIA.

El comienzo del análisis de este estudio parte del diseño de las instalaciones, en donde existe una considerable mejora en la posterior eficacia de la planta, pasa luego por la elección de los elementos y componentes más idóneos y termina recordando los métodos y trabajos de mantenimiento que mayores aportaciones ofrecen al ahorro de energía. Los tres aspectos tienen relevancia similar y los tres deben de considerarse como partes importantes de la presente guía.

Queda fuera de este análisis el establecimiento de los puntos de partida básicos del proyecto, los cuales son igualmente de la máxima importancia, pero que entendemos no corresponden

ni al ingeniero frigorista ni al instalador, aunque sería deseable que se les consultase antes de la toma de decisiones. Algunos de ellos son por ejemplo:

- Determinación de las temperaturas de trabajo en las cámaras frigoríficas.
- Temperaturas hasta las que se deben de enfriar los productos congelados antes de introducirlos en las cámaras.
- Tipo, forma y orientación de las edificaciones.
- Elección de los refrigerantes o grupos de refrigerantes.
- Ubicación de las salas de máquinas, evitando distancias largas entre la generación del frío y los puntos de consumo.
- Los métodos de condensación más idóneos.

Para hacer una valoración de la instalación frigorífica y las consecuencias que acarrea desde los puntos de vista de costes para el industrial y efectos para el medio ambiente, ya no es suficiente el considerar como principal parámetro el coste de la inversión. Es necesario ampliar el análisis al concepto denominado **"costes del ciclo de vida ".** En este último deben de intervenir los costes totales de la instalación durante los "años de vida" esperados o previstos:

a. costes de la inversión y amortización,
b. costes de la energía consumida durante ese periodo,
c. costes de mantenimiento
d. costes de desmantelamiento.

No debería sorprender el hecho de que, en el frío industrial y comercial para el sector alimentario, los costes que se producen por el consumo energético durante su ciclo de vida usual pueden llegar a ser varias veces superiores al coste de la inversión.

Según literatura especializada, de fácil constatación mediante los necesarios cálculos, el consumo de energía suele representar como media hasta el 70% de los costes totales del ciclo de vida.

Un ejemplo más, son los datos que facilita la VDKL, Asociación alemana de almacenes frigoríficos (*). Según los cuales la instalación de frío alcanza como media dos terceras partes del consumo total de energía de los almacenes frigoríficos (el resto proviene de las carretillas, calefacción, iluminación, etc.). Supone, por otra parte, el 25 % del total de los costes generales de estas empresas.

(*)www.vdkl.de. Apartado Strompol.2012

No es de extrañar, con los datos anteriores, la marcada tendencia de la industria frigorífica a buscar soluciones para conseguir instalaciones más eficientes desde el punto de vista del consumo de sus máquinas y elementos o componentes. En todos ellos se pueden conseguir mejoras: desde los compresores y motores eléctricos hasta los componentes más pequeños, pasando por los depósitos, evaporadores, válvulas, condensadores, tuberías y sistemas de regulación y control.

Por otra parte no debe de olvidarse el hecho de que todos los componentes de cualquier instalación productora de frío han necesitado de energía para su fabricación .Cuanto más ahorro se consiga en su cantidad y tamaño sin disminución del nivel de un funcionamiento

fiable y seguro, más económica saldrá la instalación y más se estará contribuyendo a la protección del medio ambiente.
En este sentido, no es práctica aceptable el sobredimensionar los equipos y componentes sin que aporten nada positivo a la funcionalidad pretendida.
La buena práctica industrial significa sacar el máximo provecho a los recursos disponibles.
Como observación de gran trascendencia cabe subrayar que las directivas relacionadas con el **ECODISEÑO** están generando grandes cambios en los "productos relacionados con la energía" (Directiva 2009/ 125/EC. Sobre requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos relacionados con la energía, incorporada al Ordenamiento Jurídico Español mediante el RD 187-201).
Estas no se limitan a los consumidores de energía "directos" (motores de compresores, ventiladores, etc.), sino que alcanza igualmente a otros conceptos que según su diseño y función, puedan afectar al consumo de energía (aislamiento, cerramientos, tuberías, etc.), es decir se extienden a todos los productos "relacionados" con la energía.
Con la entrada escalonada de todas esas directivas habrá que ir adaptando el diseño de las instalaciones para cumplirlas. Con ello está asegurado en el próximo futuro un consumo más eficiente de los recursos energéticos en todos los casos que aplican las citadas directivas.
Por último una mención a la expresión "Smart Grid" que viene empleándose recientemente. Un novedoso intento de incrementar la coordinación entre la producción y distribución de la energía eléctrica con su consumo.
Esto que quizás se podría traducir por "redes inteligentes" pretende que los consumidores de energía eléctrica en los sectores de frío/aire acondicionado/bombas de calor tomen la electricidad de la red en los momentos en que más les convenga a las empresas generadoras y de distribución, con lo que estas últimas pueden ofrecer precios más reducidos. Por ejemplo desplazando parcialmente la capacidad frigorífica de los consumidores a periodos del día en donde la demanda de la red sea más baja. En un frigorífico no sería inviable el emplear electricidad "económica" para bajar la temperatura de consigna nominal y luego parar las instalaciones frigoríficas en las horas de precios más altos aprovechando su inercia térmica.
En definitiva es un intento de consumir la energía eléctrica cuando las compañías detecten valles en el suministro y les interese ofrecer precios más económicas.
Naturalmente que no será tarea fácil, porque por una parte requiere que los consumidores puedan aceptar la necesaria reducción de potencia durante esas horas "punta" y por otro la existencia de protocolos de comunicación establecidos de forma que la coordinación entre el generador y el consumidor transcurra de manera automática e inteligente. Pero es indudable que el tema promete. En algunos países esta nueva metodología ya se está empezando a utilizar en equipos de aire acondicionado y bombas de calor, y es de esperar y desear que en los próximos tiempos se vaya extendiendo su uso.

CAPITULO 1

1. Consideraciones Generales .

La refrigeración es un gran consumidor de energía eléctrica. El consumo de esta forma de energía en España durante el 2010 (1) fue el 21,5 % de la energía total, lo que supuso 250.422.124 MWh (véase Fig.1.1); según datos extraídos de la Estadística de la energía eléctrica del 2010, publicada por el MIEyT (2) alrededor de un 19 % fue consumido por la industria (Fig. 1.2) y admitiendo que el 15 % aproximadamente se utilizara en las instalaciones frigoríficas, supondría que éstas precisaron cerca de 7,1 x 10^{6}MWh

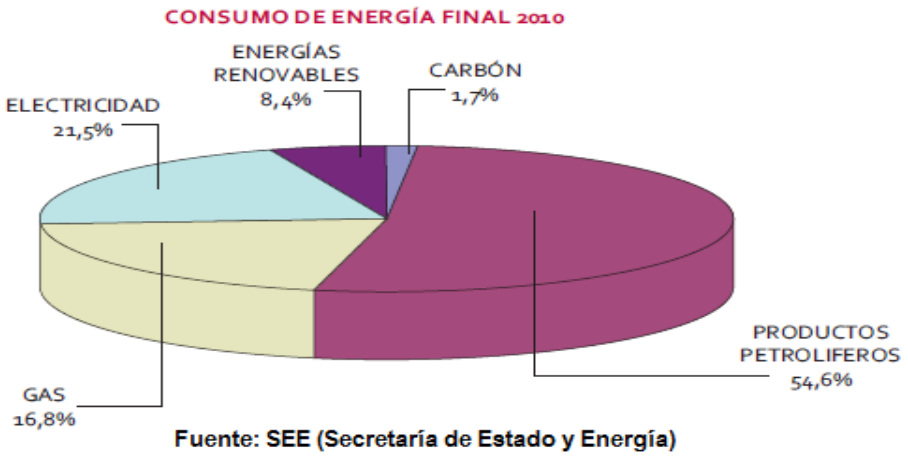

Fig. 1.1 Gráfico representativo de la estructura de consumo energético en España durante 2010. Fuente: Secretaría de Estado de Energía

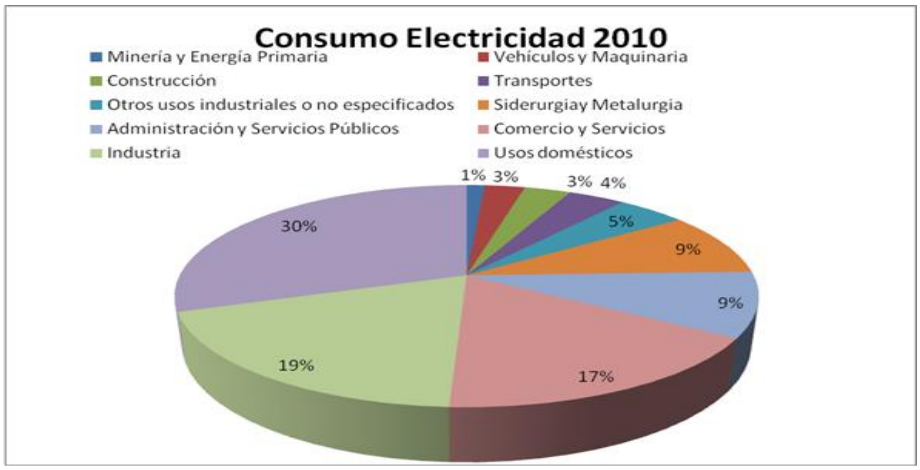

Fig.1.2 Gráfico de la estructura del consumo de electricidad en España durante 2010. Extraído a partir de la tabla V.1 Clasificación de la energía comercializada por sectores en el documento: Estadística de la energía eléctrica por el MIEyT.

Además, para poder resaltar la capacidad de ahorro por lo que respecta a la energía eléctrica típicamente consumida en sus diferentes usos por las instalaciones frigoríficas, sin incluir el sector del aire acondicionado, veamos el gráfico de la figura 1.3:

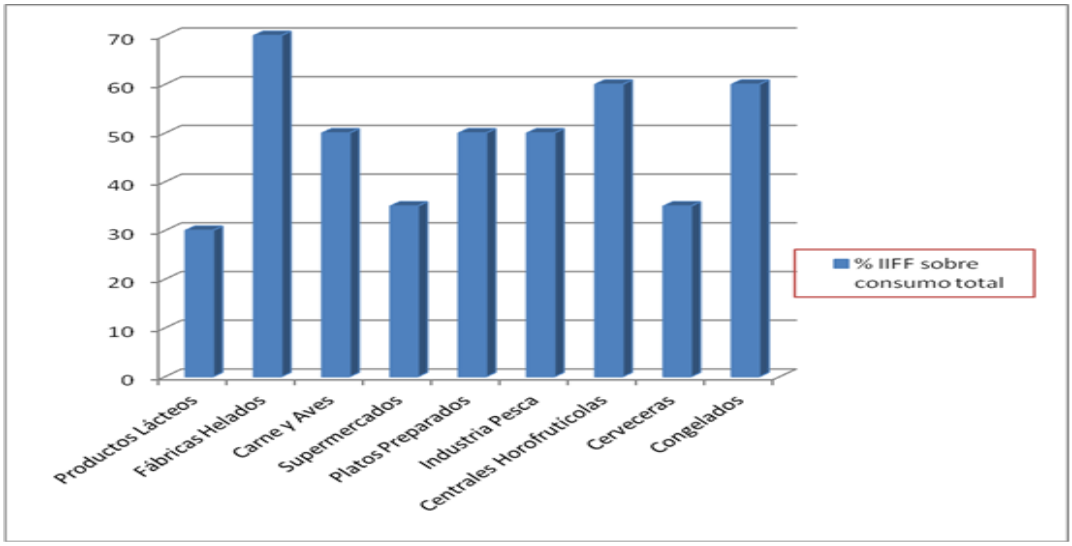

Fig. 1.3 Diagrama de barras representativo del consumo relativo de energía eléctrica de las instalaciones frigoríficas en diferentes sectores de la industria agroalimentaria respecto a su consumo total. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente.

Como ejemplo y según la "Guía de mejores técnicas disponibles en España del sector cárnico" (3), el consumo de energía eléctrica de un matadero en España está comprendido en el rango entre 55 y 193 kWh/Tm de canal. Si se estima que un 50% del mismo se debe a las instalaciones frigoríficas, las variaciones de consumo para dichas instalaciones entre los distintos mataderos serán también considerables.

Por otra parte las experiencias obtenidas en los últimos años ponen de manifiesto que el consumo de energía en las instalaciones frigoríficas puede reducirse considerablemente, y que es factible alcanzar valores cercanos al 20 %, adoptando medidas técnicas y de gestión con periodos de amortización a corto y muy corto plazo que van desde pocos meses hasta unos tres años.

Con las indicaciones y ejemplos que se plantean y proponen en esta guía, se pretende facilitar unas pautas de cómo mejorar la eficiencia energética en éste tipo de instalaciones. No es posible cubrir todas las posibles aplicaciones y sistemas, pero se trata de destacar los aspectos más relevantes con el fin de concienciar al instalador y muy especialmente al usuario de la necesidad de ahorrar energía y estimular el desarrollo de técnicas adecuadas para cumplir dicho objetivo.