



# MÁSTER EN AUTOMOCIÓN

## ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

### TRABAJO FIN DE MÁSTER

Medidas de ahorro energético aplicadas al proceso de fabricación de piezas estampadas en el sector automoción, usando el modelo de la Energía Incorporada al Producto

Autor: D. Adrián José Castro Díaz

Tutor: D. Francisco V. Tinaut Fluixá

Tutor Colaborador: D. Álex Balbás (Gestamp Palencia)

Valladolid, junio de 2.012

**Escuela Ingenierías Industriales**

Depto. Ing<sup>a</sup> Energética y Fluidomecánica

Paseo del Cauce s/n

47011 Valladolid  
(España)



**Fundación Cidaut**

Parque Tecnológico de Boecillo, 209

47151 Boecillo (Valladolid)

España





**Escuela Ingenierías Industriales**

Depto. Ing<sup>a</sup> Energética y Fluidomecánica

Paseo del Cauce s/n

47011 Valladolid  
(España)



**Fundación Cidaut**

Parque Tecnológico de Boecillo, 209

47151 Boecillo (Valladolid)

España



## RESUMEN

En el presente trabajo se analiza el consumo de energía para fabricar una pieza estampada de la carrocería de un automóvil y se proponen medidas de ahorro de energía para bajar los costos de producción y mejorar las ganancias de la Empresa. Para analizar el consumo de energía durante la fabricación de la pieza, se utiliza el modelo de la Energía Incorporada al Producto (EIP). Para poder entender cómo se consume la energía en el proceso de estampación se explica en detalle cómo funciona la prensa mecánica, cómo se genera la fuerza para producir el trabajo, así como las entradas de diversas formas de energía que se requieren para el buen funcionamiento de la prensa, cómo energía eléctrica, hidráulica y neumática. También se describen los métodos más importantes de medición de consumo de energía, resaltando el uso de los Sistemas de Gestión de Energía (SGE), que simplifican el trabajo de medición. Es importante señalar que en el trabajo no se calcula el valor total de la energía consumida para fabricar una pieza estampada, lo que sí se logra es definir el método para hacerlo y se proponen medidas de ahorro de energía para disminuir el consumo por unidad de producto fabricada. Se hace especial énfasis en las medidas de ahorro de energía en calefacción, iluminación y aire comprimido. El presente trabajo es el resultado de las prácticas realizadas durante tres meses en una importante fábrica del sector de automoción que se dedica entre otras, a la fabricación de piezas estampadas.

## ABSTRACT

The following work analyze the energy consumption to manufacture a car body stamping part and propose energy saving measurements to reduce the production costs and improve the company's earnings. The Embodied Product Energy Model (EPE) was the model used to analyze the manufactured piece energy consumption. In order to be able to understand how energy is consumed in the stamping process, is explained in details how the mechanical press works, how the force is generated to produce the work, as well as the various form of energy inputs that arrive at the press, as electric, hydraulic and pneumatic energy. Also the more important energy measure methods are discussed, highlighting the use of the Energy Management Systems (EMS), which helps to simplify the work of energy measurement. Should be noted, the total value of the consumed energy isn't calculated to manufacturing a stamping piece, so the aim is to define the method to implement it and propose energy savings measures to reduce the consumption per unit product manufacturing. Particular emphasis is made in the energy saving measures in calefaction, illumination and compressed air. This work is the result of an internship performed during three months at an important automotive industry that is dedicated among other things, to manufacture stamping parts.

## **AGRADECIMIENTOS**

Un agradecimiento a todo el personal de la fábrica de Gestamp Palencia, por todo el apoyo y buen trato que me dieron durante mi estadía de prácticas, en especial al tutor industrial Alex Balbás, Javier Domínguez y Clara Zan. También un agradecimiento especial al tutor académico, Prof. Francisco Tinaut Fluixá, por el apoyo y seguimiento durante las prácticas y para la elaboración de este trabajo.

# ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	iii
ÍNDICE DE TABLAS .....	v
NOMENCLATURA.....	vii
CAPÍTULO 1. INFORMACIÓN PREVIA.....	1
1.1. Modelo de la Energía Incorporada al Producto (EIP).....	1
1.1.1. Energía indirecta y directa .....	2
1.1.2. Modelado de la energía incorporada al producto .....	3
1.1.3. Ejemplo de aplicación práctica del Modelo de la Energía Incorporada al Producto .....	4
1.2. Prensas mecánicas.....	6
1.2.1. Clasificación de las prensas.....	6
1.2.2. Elementos más importantes de las prensas mecánicas .....	8
1.2.3. Funcionamiento de una Prensa mecánica .....	9
1.2.4. Ciclo de trabajo de una Prensa mecánica.....	12
1.2.5. Generación de la fuerza en la prensa mecánica .....	14
1.2.6. Factores para la selección de una Prensa mecánica.....	16
1.3. Medición del consumo de energía .....	16
CAPÍTULO 2. BASES PARA APLICAR EL MODELO DE LA ENERGÍA INCORPORADA AL PRODUCTO EN LA FABRICACIÓN DE PIEZAS ESTAMPADAS.....	20
2.1. Línea de estampación.....	20
2.2. Proceso de fabricación de la pieza .....	21
2.3. Entradas de energía durante el proceso de estampación.....	22
2.3.1. Energía indirecta .....	22
2.3.2. Energía directa.....	25
2.4. Detalle de la medición del consumo de energía.....	26
CAPÍTULO 3. MEDIDAS GENERALES DE AHORRO DE ENERGÍA, RECOMENDADAS PARA EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE PIEZAS ESTAMPADAS.....	29
3.1. Medidas generales de ahorro de energía por etapa del proceso de estampación.....	29
3.1.1. Transporte de material .....	29
3.1.2. Proceso de fabricación. Estampado.....	29
3.1.3. Actividades para el mantenimiento de las condiciones del entorno de trabajo .....	31
CAPÍTULO 4. MEDIDAS DE AHORRO DE ENERGÍA EN CALEFACCIÓN .....	32
4.1. Estudio de la calefacción. ....	32
4.1.1. Experimento ilustrativo.....	32
4.1.1.1. Resultados del experimento.....	34
4.1.2. Medidas de ahorro en calefacción .....	36
CAPÍTULO 5. MEDIDAS DE AHORRO DE ENERGÍA EN ILUMINACIÓN.....	38
5.1. Motivación para cambiar la iluminación .....	38

5.2.	Información previa para el análisis de la mejor opción de iluminación.....	40
5.3.	Análisis de la mejor opción de iluminación, estudio económico .....	43
5.3.1.	Lámparas convencionales de vapor de sodio, vapor de mercurio y halogenuros metálicos	44
5.3.2.	Lámparas LED .....	50
5.3.3.	Comparación entre lámparas de tecnología convencional y LED .....	52
5.4.	Medidas recomendadas para ahorrar energía en iluminación .....	55
CAPÍTULO 6. MEDIDAS DE AHORRO DE ENERGÍA EN AIRE COMPRIMIDO .....		57
6.1.	Estudio del sistema de aire comprimido.....	57
6.1.1.	Ahorro de energía usando motores de alta eficiencia. ....	59
6.1.2.	Ahorro de energía variando la velocidad.....	60
6.1.3.	Ahorro de energía mediante la prevención de fugas.....	61
6.1.4.	Ahorro de energía usando aire exterior.....	63
6.1.5.	Ahorro de energía debido a la caída de presión .....	63
6.1.6.	Ahorro de energía mediante recuperadores de calor .....	64
6.1.7.	Ahorro de energía mediante boquillas eficientes .....	64
6.1.8.	Ahorro de energía por mantener limpias las superficies del compresor y el intercooling. ...	64
6.2.	Aplicación de algunas medidas en la empresa. ....	66
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		67
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		72
ANEXOS.....		74
Anexo 1. Mecanismos para la mejora del rendimiento al cambiar la iluminación [11].....		74
Anexo 2. Características técnicas de las lámparas.....		76
Anexo 3. Iluminación Industrial. Tipos de lámparas. [16] y [24] .....		79
Anexo 4. LEDs Información técnica .....		91

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del modelo de energía incorporada al producto (EIP). Ref. [2].	4
Figura 2. Tiempo de producción unitario en cada zona productiva para las piezas A, B y C. Ref. [2]	4
Figura 3. Pantalla del ejemplo de modelo de simulación con ARENA™, mostrando detalles de los valores de energía y los cuadros. Ref. [2]	5
Figura 4. Resultados del modelo, que muestra la energía incorporada durante la fase de manufactura para cada producto y para cada proceso. Ref. [2]	5
Figura 5. Prensa de cuello de cisne	6
Figura 6. Sección de una prensa genérica de doble montante [6]	8
Figura 6.5 Cadena cinemática Prensa mecánica [5]	11
Figura 7. Curvas de Prensa de doble efecto. Pisador = blank holder, punch holder = embutidor. [FAGOR].	13
Figura 7.5 Comparación de curvas Prensa doble efecto (Link-Drive) y Prensa simple efecto (bielamanivela). [FAGOR].	14
Figura 8 Potenciómetro digital con pinza	17
Figura 8.5 Red de cableado para Power Studio Scada [10]	18
Figura 9. Línea de estampación	20
Figura 10. Luminaria de vapor de sodio de alta presión	23
Figura 11. Equipo calefactor de tubos radiantes [25]	23
Figura 12. Nave calentada por calefacción convencional	24
Figura 13. Nave calentada por tubos radiantes	24
Figura 14. Máquina de limpieza industrial.	25
Figura 15. Servo-prensa para paneles de automóvil. (Honda-Aida) [10]	30
Figura 16. Disminución del tiempo de ciclo, así como la velocidad de impacto con servo-prensa. (Se logra un aumento en la producción de 150%) [10].	31
Figura 17. Nave industrial donde se realizó el estudio de los tubos radiantes [8]	33
Figura 17.5. Tubo radiante inclinado	34
Figura 18. Distribución de la temperatura radiante de forma transversal y axial de un tubo radiante a 5 metros de altura de: a) 6 kW, b) 9 kW, c) 18 kW. [8]	35
Figura 19. Distribución de la temperatura radiante en relación al ángulo de suspensión del tubo radiante. [8]	36
Figura 20. Efecto del cambio en la iluminación en el rendimiento productivo. Las líneas punteadas demuestran los resultados de los test individuales y la curva sólida demuestra el promedio de las pendientes. (29 casos). (Ruffer, 1925, 1927; Schneider, 1938; Goldstern y Putnoky, 1931; Bitterli, 1955; Stenzel, 1962a, b; Crouch, 1967; Lindner, 1975; Carlton, 1980). [11]	38
Figura 21. Efecto del cambio de la iluminación en el rechazo de productos. Las líneas punteadas demuestran los resultados de los test individuales y la curva sólida demuestra el promedio de las pendientes. (15 casos). (Goldstern y Putnoky, 1931; Schneider, 1938; Bitterli, 1955; Crouch, 1967; Lindner, 1975; Carlton, 1980; Buchanan et al., 1991) [11].	39
Figura 22. Luminaria LED Gentle Space de Philips [20]	54
Figura 23. Lámpara LED HB Series (Modulo de Osram) [23]	54

Figura 24. Costo de la energía según el tipo [17] .....	57
Figura 25. Costos durante el ciclo de vida de un compresor para producir aire comprimido [17]. .....	57
Figura 26. Potencial de ahorro de energía para diferentes opciones en la producción de aire comprimido [17]. .....	58
Figura 27. Relación entre la velocidad y la reducción de potencia consumida por el motor [17] .....	60
Figura 28. Dependencia de la pérdida de energía según el diámetro de la fuga a una presión de 600 KPa (6 bar). [17].....	62
Figura 29. Detector de fugas ultrasónico [17] .....	62



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de las prensas.....	7
Tabla 2. Elementos de la prensa mecánica y fuente de energía.....	12
Tabla 3. Nivel mínimo de iluminación en lux según la zona o parte del lugar de trabajo .....	41
Tabla 4. Niveles de iluminación recomendados para fábricas .....	41
Tabla 5. Comparación del factor de calidad de varias tecnologías de lámparas [16].....	42
Tabla 6.1 Características más importantes de las lámparas HID de 400 W. (Datos: ref. [19] y [20])...	44
Tabla 6.2 Características más importantes de las lámparas HID de 400 W, continuación. (Datos: ref. [19] y [20]).....	45
Tabla 6.3 Puntuación de lámparas de vapor de sodio de alta presión, vapor de mercurio de alta presión y halogenuros metálicos, según las características técnicas mencionadas.....	45
Tabla 6.4. Características más importantes de las lámparas HID de 400 W. Valores de euros/1.000 lúmenes, euros/1.000 [K] de temperatura del color, euros/1.000 horas de uso. (Datos: ref. [19] y [20]) .....	46
Tabla 6.5 Cantidad de lámparas HID de 400 W necesarias para un flujo luminoso de 400 lux y 500 lux, así como la inversión inicial en euros. (Datos: ref. [19] y [20]) .....	47
Tabla 6.6 Inversión inicial en campanas requeridas con lámparas HID de 400 W, para un flujo luminoso de 400 lux y 500 lux. Se consideran dos modelos de campanas el CABANA 2 y el HPK080, ambas de la marca Philips. (Datos: ref. [19] y [20]) .....	47
Tabla 6.7 Potencia instalada utilizando lámparas HID de 400 W para una iluminación de 400 lux y 500 lux. (Datos: ref. [19] y [20]).....	48
Tabla 7.1 Cantidad de lámparas HID de 250 W necesarias para un flujo luminoso de 400 lux y 500 lux, así como la inversión inicial en euros. (Datos: ref. [19] y [20]) .....	48
Tabla 7.2 Inversión inicial en campanas requeridas con lámparas HID de 250 W, para un flujo luminoso de 400 lux y 500 lux. Se consideran dos modelos de campanas el CABANA 2 y el HPK080, ambas de la marca Philips. (Datos: ref. [19] y [20]) .....	49
Tabla 7.3 Potencia instalada utilizando lámparas HID de 250 W para una iluminación de 400 lux y 500 lux. (Datos: ref. [19] y [20]).....	49
Tabla 8.1 Características de luminarias LED de varias capacidades y diferentes fabricantes para aplicaciones de gran altura. (Datos: ref. [20], [21], [22] y [23]).....	50
Tabla 8.2 Relación euros/1.000 lúmenes y euros/1.000 horas para luminarias LED para aplicaciones de gran altura. (Datos: ref. [20], [21], [22] y [23]). .....	51
Tabla 8.3 Características de luminarias LED de varias capacidades y diferentes fabricantes para aplicaciones de gran altura, continuación. (Datos: ref. [20], [21], [22] y [23]).....	52
Tabla 8.4 Cantidad de luminarias LED requeridas, inversión inicial y potencia instalada para una iluminación de 400 lux y 500 lux. (Datos: ref. [20], [21], [22] y [23]) .....	53
Tabla 9. Eficiencia de motores estándar y de alta eficiencia para varios estados de carga [17].....	59
Tabla 10. Ahorro de energía y retorno de la inversión para motores de alta eficiencia [17].....	59
Tabla 11. Ahorro de la factura (US\$) usando variador de velocidad [17].....	61
Tabla 12. Tiempo de retorno de la inversión para la reducción de la velocidad con variador de velocidad [17].....	61

Tabla 13. Pérdida de aire y energía para diferentes tamaños de fuga.....	63
Tabla 14. Consumo de potencia de un compresor alternativo de 150 hp a varias presiones de salida [17].....	63
Tabla 15. Efecto de la reducción de la presión de salida en la potencia consumida [17].....	64
Tabla 16. Ahorro mediante la instalación de boquillas ahorradoras de aire [17].....	64
Tabla 17. Ahorro de la energía consumida por aire comprimido y tiempo de retorno de la inversión para diferentes medidas de ahorro en diferentes tipos de industrias [17] .....	66

## NOMENCLATURA

CFL Compact Fluorescent Lamp (Lámpara Fluorescente Compacta)

CRI Color Rendering Index (Índice de Rendimiento del Color, IRC)

EA Energía Auxiliar, en inglés Auxiliar Energy (AE)

ED Energía Directa, en inglés, Direct Energy (DE)

EEFL External Electrode Fluorescent Lamp (Lámpara Fluorescente de Electrodo Externo)

EI Energía Indirecta, en inglés, Indirect Energy (IE)

EIP Energía Incorporada al Producto

ET Energía Teórica, en inglés Theoretical Energy (TE)

HID Descarga de alta intensidad (High Intensity Discharge)

IPCC Intergovernmental Panel of Climate Change

IR Infrared (Infrarrojo, relativo a los rayos)

LED Lighting Emitting Diode (Diodo Emisor de Luz)

P.M.I. Punto Muerto Inferior

P.M.S. Punto Muerto Superior

r.p.m. Revoluciones por minuto

Rs. Rupias (moneda de Pakistán)

SAC Sistema de aire comprimido

SGE Sistema de Gestión de Energía

THD Total Harmonic Distortion (Distorsión Total de Armónicos)

UV Ultraviolet (Ultravioleta, relativo a los rayos)

## CAPÍTULO 1. INFORMACIÓN PREVIA

En toda fábrica se requiere saber cuánta energía se consume para fabricar un producto, junto con los otros costos de materiales, mano de obra y depreciación de máquinas y herramientas. Con esta información se puede determinar el costo unitario para fabricar un producto. Esta información por lo general no se determina de forma exacta, más bien se hacen cálculos aproximados producto de la experiencia y de algunas mediciones de consumos de energía. En el presente trabajo se trata de analizar el consumo de energía para la fabricación de una pieza estampada para la carrocería de un automóvil y proponer medidas de ahorro de energía en algunas etapas del proceso. El análisis se hará usando el modelo de la Energía Incorporada al Producto (EIP).

Para determinar el consumo de energía de un proceso de fabricación, primero se tiene que conocer en detalle en qué consiste y cuáles son los elementos que consumen la energía, por esa razón en el Capítulo 1 se explica en detalle el funcionamiento de una prensa mecánica, sus partes, cómo se genera la fuerza de trabajo y cuáles son los elementos que consumen energía. También en este apartado se explica en detalle en qué consiste el modelo de la Energía Incorporada al Producto (EIP) y los métodos de medición del consumo de energía, haciendo énfasis en los Sistemas de Gestión de Energía (SGE).

En el Capítulo 2 se describen los elementos de la línea producción en estudio, se explica el proceso de fabricación de la pieza y cuáles son las entradas de energía y se propone un método para medir el consumo de energía en cada etapa del proceso.

En el Capítulo 3 se proponen medidas generales de ahorro de energía para cada etapa del proceso de fabricación. En este capítulo se destaca la nueva tecnología de las servoprensas, que según estudios ofrecen el menor tiempo de producción por pieza, con la menor energía consumida.

En el Capítulo 4 se estudia la optimización del uso y orientación de los tubos radiantes, para ahorrar energía en calefacción. En el Capítulo 5 se realiza un estudio de la mejor opción en iluminación para naves industriales de gran altura, destacando la comparación entre lámparas de Alta Intensidad de descarga (HID) y Lámparas LED y en el Capítulo 6, se hace un recuento de las medidas más comunes de ahorro energético para el sistema de aire comprimido, donde destaca la información del tiempo de recuperación de la inversión de las medidas propuestas.

Para finalizar se presentan las Conclusiones, Aportaciones al proyecto y Sugerencias para trabajos futuros.

### 1.1. Modelo de la Energía Incorporada al Producto (EIP).

El ahorro de energía es un tema al que estamos acostumbrados hoy en día, pero fue por la década de los 70's cuando debido al aumento del precio de los combustibles fósiles y al inminente agotamiento de estos, se comenzó a tomar conciencia acerca del buen uso de la energía. A todo esto se unen los daños al ambiente que se producen por las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros gases que de seguir aumentando amenazan con aumentar la temperatura de la tierra entre 1.4 y 5.8 °C durante el periodo comprendido entre 1.990 y 2.100 según el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático [en inglés, Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC)].

Como es bien conocido la energía es un recurso indispensable para el funcionamiento y crecimiento de la industria en general a nivel global. Según [1], el sector industrial consume alrededor de un 37% de la energía suministrada a nivel mundial y se proyecta que desde el año 2.006 hasta el año 2.030, ese consumo tenga un crecimiento promedio de 1,4% por año. El país donde se registra en la

actualidad el mayor crecimiento en el consumo de energía, es China, con un aumento del 5,5% por año.

Por lo comentado anteriormente, es muy importante saber cómo y en qué se gasta la energía en la industria. A continuación se presenta una breve reseña de las investigaciones más relevantes en esta área comentadas en la referencia [2].

Para determinar la energía consumida por un producto durante su ciclo de vida se han elaborado bases de datos de consumos de energía que por su carácter genérico y a veces poco preciso, sobre todo durante la fase de fabricación, permiten que se hagan estudios que no reflejan los consumos reales de energía. Esto ha motivado el desarrollo de varios programas de investigación con la finalidad de conocer el uso y desglose real de la energía en una instalación industrial.

Las investigaciones realizadas se pueden separar según el enfoque, uno a nivel de “planta” y otro a nivel de “proceso”. Las investigaciones realizadas en la perspectiva de “planta” se enfocan en la energía consumida por la infraestructura y otros servicios de alto nivel que son responsables de mantener las condiciones y el ambiente de producción. Ejemplos de las actividades que consumen este tipo de energía son la ventilación, iluminación, calefacción y aire acondicionado, entre otras. Los sistemas de gestión de energía (SGE) se usan comúnmente para monitorear estas actividades. Un ejemplo es el trabajo de Boyd et al. [2] que utiliza un enfoque de análisis estadístico para determinar los indicadores de desempeño energético basado en las variables a nivel de “planta”.

Por otro lado, las investigaciones enfocadas en el consumo de energía a nivel de “proceso” se concentran en el estudio de equipos individuales, maquinarias y estaciones de trabajo del sistema de producción. Entre algunos trabajos importantes se puede comentar el de Overcash et al. [2], que junto con un grupo de ingenieros están trabajando para producir una serie de reglas basadas en la ingeniería práctica para analizar los procesos unitarios usados en la industria y esta información es cotejada con un inventario de ciclo de vida de procesos unitarios que puede ayudar a evaluar un producto manufacturado según la calificación de varios parámetros incluyendo: uso de material, energía requerida, pérdida de material y las variables de la maquinaria. Otro trabajo importante es el realizado por Gutowski et al. [2], que se ha enfocado en evaluar la energía específica de los procesos. La importancia de este trabajo radica en que ha desarrollado un modelo de energía generalizado a nivel de equipo, usando un promedio de intensidades de energía de diferentes procesos para evaluar la eficiencia de las líneas de producción. Sin embargo el estudio del flujo de energía a nivel de “planta” o de “proceso” no proporciona una visión general de cuánta energía es necesaria para fabricar una unidad de producto.

Para poder determinar cuánta energía es necesaria para fabricar una unidad de producto se propone el **Modelo de Energía Incorporada al Producto (EIP)**, que se basa en un enfoque a nivel de “producto”, que no es solo capaz de determinar la energía total consumida, sino que ofrece un desglose de la energía usada en la fábrica.

El modelo propuesto de **Energía Incorporada al Producto** según la referencia [2], se basa en la investigación de la energía consumida tanto a nivel de “planta” como a nivel de “proceso”, con el objetivo de determinar cuánta energía es consumida para fabricar una unidad de producto.

### 1.1.1. Energía indirecta y directa

Para el modelo de EIP la energía consumida por las actividades en una aplicación industrial se divide en dos grupos: energía directa y energía indirecta. La energía directa (ED) se define como la energía requerida por varios procesos para la manufactura de un producto (por ejemplo, estampado, maquinado, pintura en spray, inspección, etc.). La energía indirecta (EI) es la energía consumida por

las actividades para mantener las condiciones del ambiente donde se realizan los procesos de fabricación (por ejemplo, ventilación, iluminación, calefacción, etc.).

Adicionalmente la energía directa (ED) se divide en: (i) energía teórica (ET), que se refiere a la energía mínima requerida para llevar a cabo un proceso (por ejemplo, la energía requerida para derretir una cantidad específica de metal durante la fundición o la energía requerida para remover una cantidad específica de material durante el proceso de maquinado) y (ii) energía auxiliar (EA), que se refiere a la energía requerida por las actividades y equipos auxiliares que apoyan en el proceso (por ejemplo, la generación de vacío para la fundición en arena o el bombeo de refrigerante para el proceso de maquinado). Es importante resaltar que la EA incluye la energía consumida en los modos no productivos como por ejemplo, la preparación para la puesta en marcha de la máquina, modo stand-by ó modo en espera y limpieza.

En el caso de la EI, la energía consumida por varias actividades como iluminación y calefacción son requeridas por varios procesos o se puede dar el caso que un proceso requiera unas condiciones particulares (por ejemplo, una habitación limpia para inspección). Por lo tanto, en este modelo se va a considerar a la fábrica como un grupo de “zonas”, donde una “zona” se define como un área de la fábrica donde los requerimientos de energía indirecta son similares.

El modelo de EIP utiliza los datos de la ED y EI tanto a nivel de “planta” y “proceso” para determinar la energía total consumida para manufacturar un producto. La energía total incorporada al producto es la suma de toda la energía requerida para manufacturar un producto y la energía consumida para mantener las condiciones de producción donde se llevan a cabo los procesos. La combinación de estudios teóricos y empíricos, son necesarios para determinar los valores de la ED y la EI.

### 1.1.2. Modelado de la energía incorporada al producto

Para calcular la ED y la EI requerida por varios procesos para la fabricación de un producto se sigue un enfoque sistemático. En la mayoría de los casos el valor de la ET de un proceso puede ser calculada basada en el conocimiento existente y/o un modelo matemático apropiado. La mayoría de los procesos tradicionales de producción dependen del material removido, de la fusión, evaporación o deformación, y la energía puede ser determinada usando los parámetros del proceso. Por ejemplo en un proceso de maquinado, la ET puede ser calculada con el valor de la energía específica de corte para un material determinado,  $U$ , y el volumen del material a ser removido,  $V$ , (por ejemplo,  $U \times V$ ). En la referencia [3] se presenta un estudio que analiza y estima la energía consumida por el maquinado usando control numérico. Este trabajo es muy interesante porque da una idea de cómo se puede estimar el consumo de energía de la máquina relacionando el programa de producción de control numérico y los parámetros de consumo de los componentes de la máquina. Igualmente la EA puede ser calculada usando las especificaciones del sistema (por ejemplo, datos provenientes de los fabricantes del equipo), y cuando los datos no están disponibles, se pueden realizar estudios empíricos para medir el consumo de los equipos auxiliares. En el caso de la EI, la energía atribuida a un producto se calcula basándose en la energía total consumida por una zona (por hora) dividida por el número de productos manufacturados en esa zona por hora. La suma de la ET y la EA (ED), junto con la EI para todos los procesos en el sistema productivo representan la energía total incorporada al producto. En la figura 1 se puede ver el esquema del modelo presentado.

El modelo de EIP no solo determina el consumo de energía de varios procesos, sino que también permite destacar los puntos de mayor consumo de energía en las instalaciones de la fábrica. De esta forma estos procesos de alto consumo de energía pueden ser estudiados para mejorar su eficiencia y cuando sea posible se pueden reemplazar por procesos menos intensivos. Adicionalmente, se puede hacer una evaluación más detallada de la eficiencia de los procesos, mediante la división de la ET entre la EA (donde si la ET es mucho mayor que la EA, el proceso es más eficiente) y de forma similar

el cociente de la ED entre la EI (donde un valor alto de ED y un valor bajo de EI representan un sistema productivo eficiente). El modelo de EIP también puede ser usado para medir el impacto de otros parámetros de producción como por ejemplo, el número de configuraciones, tamaño de lote, horarios de producción, etc. Todo esto permite determinar las configuraciones más adecuadas y los tamaños de lote óptimos, así como tener la oportunidad de explorar otros factores que pueden estar afectando el consumo de energía de los procesos.

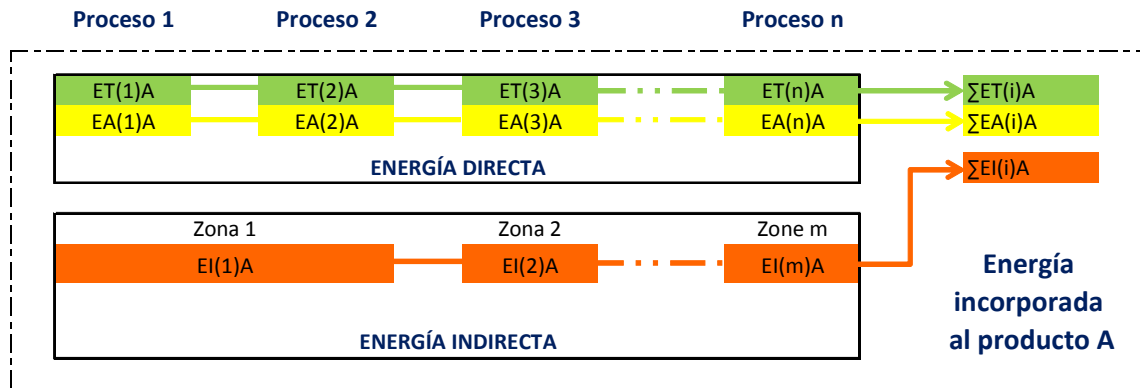


Figura 1. Esquema del modelo de energía incorporada al producto (EIP). Ref. [2].

### 1.1.3. Ejemplo de aplicación práctica del Modelo de la Energía Incorporada al Producto

La implementación del modelo de la Energía Incorporada al Producto de forma práctica, requiere el desarrollo de una herramienta para la toma de decisiones, capaz de representar la complejidad que tienen las mediciones, el modelado y el cálculo de la Energía Directa ( $ET+EA$ ) y la Energía Indirecta ( $EI$ ), para varios procesos en un sistema típico de producción. Un modelo de simulación de consumo de energía es necesario para establecer el consumo de energía durante la fase de manufactura del producto. Con la herramienta de simulación, el flujo del proceso de manufactura puede ser fácilmente alterado para diferentes productos y el modelo se puede ampliar para incluir variaciones en el producto y en el proceso. Variaciones como el tamaño de lote, tiempo de ciclo y tiempos de espera se pueden realizar.

En el ejemplo tomado de la referencia [2], se estudia la EIP para la fabricación de 3 piezas diferentes, A, B y C, que pasan por tres zonas productivas: “zona 1”: Acabado superficial y perforado, “zona 2”: Pintura en spray, “zona 3”: Inspección.

En la figura 2 se puede ver cuánto tiempo demora en promedio cada producto en la zona de producción y cuántos productos se fabrican por hora de las piezas A, B y C en cada zona.

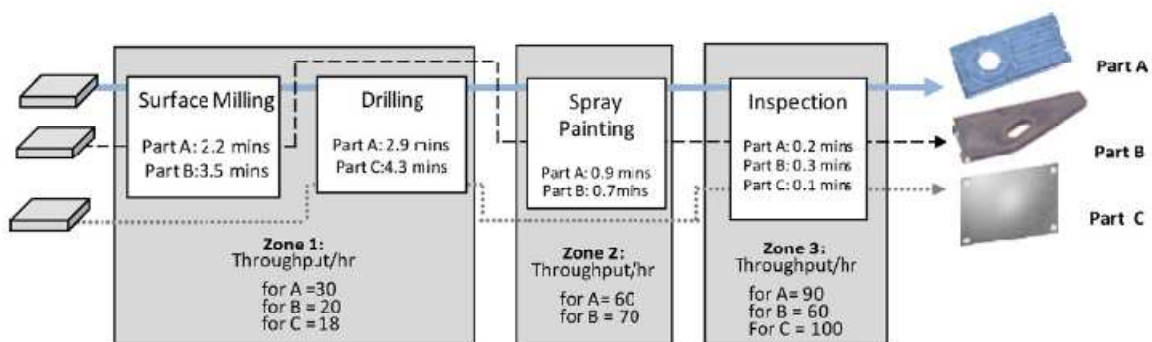


Figura 2. Tiempo de producción unitario en cada zona productiva para las piezas A, B y C. Ref. [2]

En la figura 3 se observa la simulación del flujo de energía en cada zona de producción para las tres piezas del ejemplo. Lo interesante del modelo es que se puede obtener el desglose de la energía directa e indirecta de cada producto, así como de cada proceso. Con esta información se puede ver en qué punto se consume más energía y se pueden tomar medidas para disminuir el consumo.

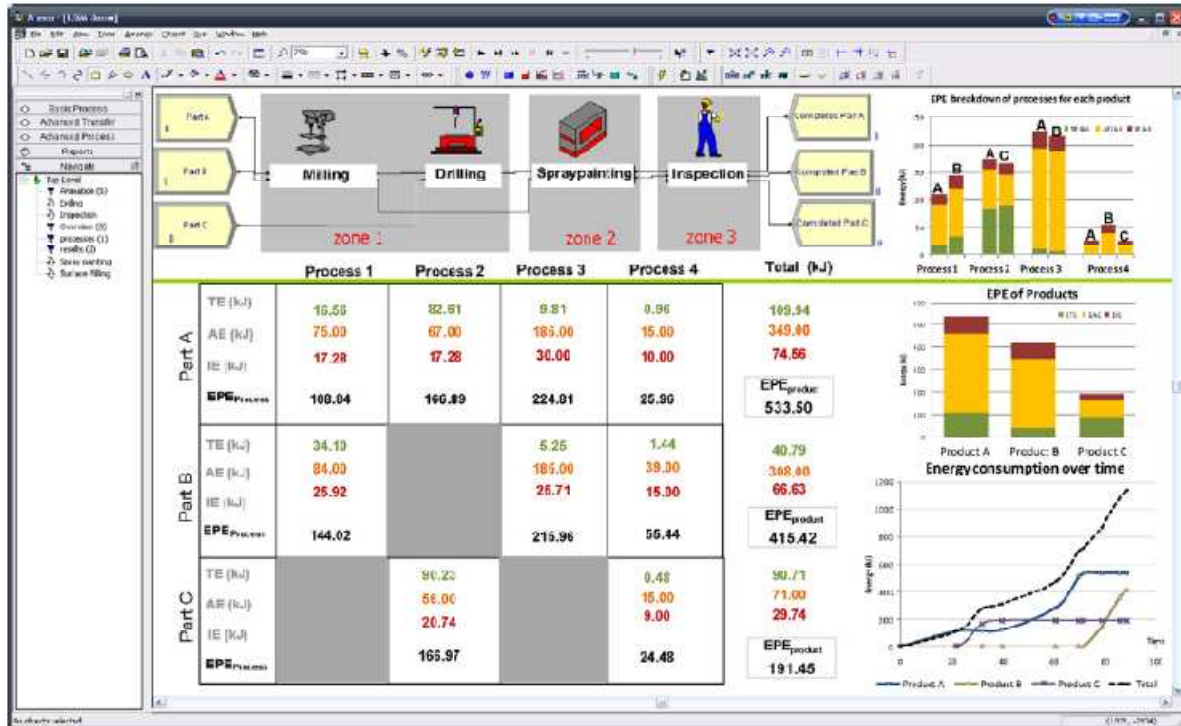


Figura 3. Pantalla del ejemplo de modelo de simulación con ARENA™, mostrando detalles de los valores de energía y los cuadros. Ref. [2]

En la figura 4 se muestra el desglose de la energía consumida para fabricar cada pieza y para cada proceso. Hay que resaltar que en la zona de producción 1 se realizan dos procesos, por esa razón hay cuatro procesos indicados en el gráfico.

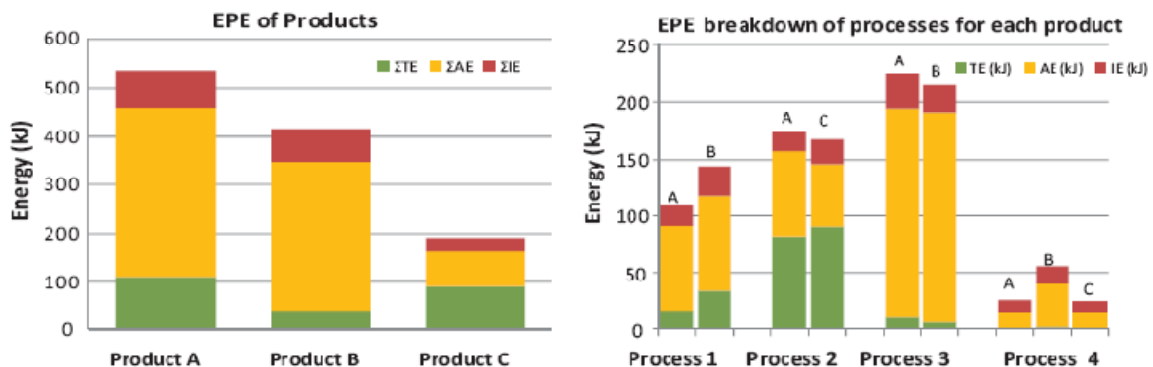


Figura 4. Resultados del modelo, que muestra la energía incorporada durante la fase de manufactura para cada producto y para cada proceso. Ref. [2]



## 1.2. Prensas mecánicas

El uso de las prensas mecánicas está muy extendido en la industria de la automoción. Con ellas se fabrican la mayoría de las piezas de la carrocería del automóvil, que luego son ensambladas por soldadura de arco eléctrico por puntos. En esta sección se hablará sobre los tipos de prensas mecánicas, cómo funcionan, cuál es su ciclo de trabajo, cómo se genera la fuerza de trabajo y cuáles son los factores que se consideran para la selección de la prensa. El tema de las prensas mecánicas es muy amplio y tiene muchos detalles, en este trabajo sólo se pretende dar una visión global del mundo de las prensas mecánicas.

### 1.2.1. Clasificación de las prensas

Las prensas se clasifican según la naturaleza del agente motor, según la forma del bastidor, según el número de partes móviles y por la velocidad del punzón. En la Tabla 1 se puede ver la clasificación de las prensas según estos parámetros.

A continuación se explicarán brevemente la prensa de cuello de cisne, la de doble montante simple efecto y doble montante doble efecto.

#### 1.2.1.1. Prensa de cuello de cisne

Cuando no se exige a la prensa esfuerzos superiores a las 200 Tm normalmente adoptan la forma llamada Cuello de Cisne en su bastidor (estructura de la prensa)



Figura 5. Prensa de cuello de cisne

**Tabla 1. Clasificación de las prensas**

<b>Tipo de clasificación</b>	
Según la naturaleza del agente motor	<b>Prensas mecánicas:</b> movimiento generado por motor eléctrico
	<b>Prensas hidráulicas:</b> movimiento transmitido por medio de un líquido
Según la forma del bastidor	<b>Prensas de cuello de cisne</b>
	<b>Prensas de arcada</b>
	<b>Prensas de montantes</b>
Según el número de partes móviles	<b>Prensas de simple efecto</b>
	<b>Prensas de doble efecto</b>
	<b>Prensas de triple efecto</b>
Según la velocidad del punzón	<b>Prensas articuladas</b>
	<b>Prensas no articuladas</b>

### 1.2.1.2. Prensas de doble montante, simple efecto

A partir de las 200 Tm aproximadamente, el bastidor en forma de cuello de cisne se flexiona mucho y la imprecisión en la deformación de la chapa es grande. Fue necesario buscar un nuevo armazón para las prensas, así nacieron las prensas de Arcada cuyo bastidor, en forma de pórtico, está fundido en una sola pieza (monobloque), y las prensas de Montantes, cuyo bastidor mantiene la forma de pórtico pero compuesto de varias partes ensambladas y desmontables con la consiguiente ventaja sobre las de Arcada en cuanto al transporte.

### 1.2.1.3. Prensas de doble montante, doble efecto

Hay piezas que requieren una embutición más profunda, por lo que necesitan una sujeción de la chapa de mayor fuerza que otras piezas menos profundas. La solución para esto son las prensas con dos partes móviles deslizando una en el interior de la otra: La exterior se llama Pisador, y desliza sobre las guías de los montantes; la interior se llama Punzón, y desliza sobre guías solidarias al pisador.

El objeto del Pisador es la sujeción de la chapa en embuticiones profundas para evitar que se expanda libremente formando arrugas. Pero la palabra sujeción no debe entenderse al pie de la letra, sino como un aumento de adherencia del borde de la chapa sobre la superficie de pisado de la matriz y el propio pisador del útil. Cuando el punzón incide, la chapa sufre un estiramiento en sentido radial y cada una de sus fibras no debe superar la zona plástica o de deformación permanente, porque rompería, y para evitar que ocurra, la chapa debe de poder deslizar ligeramente a partir de una determinada fuerza del punzón sobre ella.

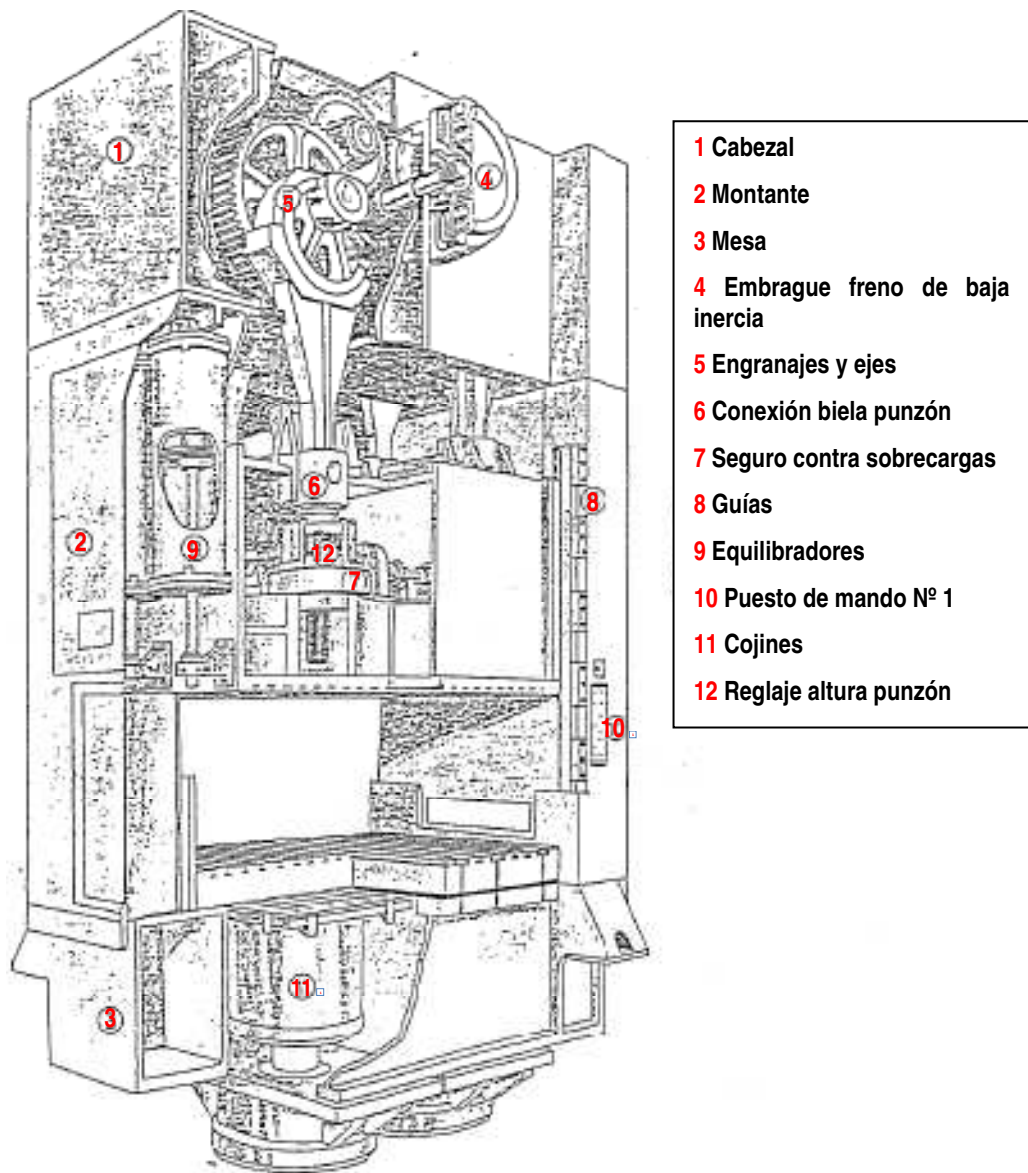


Figura 6. Sección de una prensa genérica de doble montante [6]

## 1.2.2. Elementos más importantes de las prensas mecánicas

### 1.2.2.1. Bastidor

Es la estructura de la prensa compuesto de tres piezas, mecanosoldadas y estabilizadas:

- Cabezal: Parte superior de la prensa que aloja la cadena cinemática y transmite la carga a los tirantes.
- Dos montantes: Soportan el Cabezal. Alojan los cuatro paneles de mando y el armario neumático.
- Base: Sobre la que apoyan los montantes. A su vez apoya sobre la viga soporte de prensa

Estos tres componentes del bastidor van ensamblados por cuatro tirantes, pretensados por gato hidráulico, y centrados por chaveta

### 1.2.2.2. Motor eléctrico

Es la fuente de energía de la prensa, el origen del movimiento que va a llegar al punzón a través de toda la cadena cinemática. Situado en la parte superior del Cabezal tiene a su eje enlazado con el volante por medio de correas trapezoidales o planas.

En las prensas de pequeña potencia suele usarse el motor asíncrono por su sencillez de construcción (es barato) y uso; basta conectarlo a la red trifásica y se obtiene energía mecánica. El inconveniente de este motor es que la velocidad es fija, si bien depende del número de polos, así se pueden construir motores que giren a 3.000, 1.500, 1.000, 750, etc., r.p.m. y de esta forma se obtendría un número fijo de golpes en la prensa, que para fabricar algunas piezas puede resultar lento y para otras puede ser rápido. Se puede optar por variadores mecánicos de velocidad, pero son voluminosos y el costo aumenta.

Los motores de corriente continua cada vez se usan menos porque las escobillas requieren mantenimiento, esto hace que se tenga que parar la máquina por el mantenimiento del motor. Sin embargo entre las ventajas de estos motores es que permiten variaciones de velocidad de hasta 5 veces la velocidad base, manteniendo el par o la potencia pero con la desventaja de necesitar una fuente de corriente continua, o un rectificador de potencia. Otro tipo es el motor trifásico de colector que permite variaciones de velocidad de 3 veces manteniendo el par, y es de conexión inmediata al ser de corriente alterna.

Hoy en día en la mayoría de las Prensas mecánicas se están reemplazando los motores de corriente continua por motores de corriente alterna con variador de frecuencia. Estos motores permiten ajustar la velocidad de giro variando la frecuencia de la corriente. Otro punto a favor es que el mantenimiento es mucho menor comparado a los de corriente continua.

### 1.2.2.3. Volante

Para comprender la utilidad del volante hay que asociarlo al concepto de almacenamiento de energía. En el arranque, motor y volante parten de velocidad nula, el motor trabajará con más carga porque tiene que arrastrar y llevar al volante a la velocidad de régimen. Una vez conseguido, el volante ya tiene almacenada una gran energía cinética (masa y velocidad).

$$E = \frac{1}{2} mV^2 \quad (1)$$

Parte de esta velocidad (por lo tanto energía) es cedida en forma de trabajo útil para deformar la chapa y esta energía es aportada luego por el motor durante la fase de no- trabajo de la prensa para que el volante llegue de nuevo a la velocidad de régimen.

Es importantísimo que el volante esté correctamente equilibrado porque es una gran masa moviéndose a alta velocidad y los “cabeceos” a que daría lugar serían grandes, es decir grandes tirones que al estar la prensa anclada, se traducirán en vibraciones que pueden dar lugar a roturas de ejes, tornillos, fatiga en rodamientos, etc.

Si se desconecta el motor, el volante quedaría girando durante muchos minutos debido a la elevada inercia, para evitarlo se usa un freno de volante que es una zapata reglable con fero do recambiable accionado electroneumáticamente por un cilindro de simple efecto y recuperación por muelle. No es posible desconectar el motor sin que se accione el freno del volante.

### 1.2.3. Funcionamiento de una Prensa mecánica

En las prensas mecánicas la energía se genera mediante un gran volante, accionado por un motor eléctrico. Un embrague acopla el volante con un eje excéntrico y una biela transforma el movimiento

rotativo en movimiento lineal alternativo. Debido al diseño de la cadena cinemática de estas prensas se pueden aplicar fuerzas muy grandes. La fuerza disponible en una prensa mecánica depende de la posición en la carrera; es muy alta en el punto muerto inferior. Por eso, es esencial la preparación adecuada, para evitar que se rompan los dados o las piezas del equipo. Las prensas mecánicas tienen grandes capacidades de producción, son fáciles de automatizar y requieren menos habilidad del operador que otras máquinas forjadoras, [4].

Para el buen funcionamiento y reducir el desgaste de las piezas de la cadena cinemática, las prensas mecánicas tienen un sistema de lubricación que distribuye aceite a todas las piezas de forma continua, de esta forma se minimizan las fuerzas de fricción y se mantienen las temperaturas de trabajo en el rango permitido. El sistema de lubricación es accionado con una bomba alimentada eléctricamente.

En la parte final de la cadena cinemática, al pie de biela se fija mediante uniones (semibridas) el carro que servirá para soportar el troquel. Esto quiere decir que el peso del carro y el troquel van a producir una tracción (estiramiento) en las bielas en todo momento. Si bien es cierto que este peso favorece el movimiento de descenso desde el P.M.S. hasta el P.M.I., cuando es el momento de subir se opone completamente al movimiento por lo que representa una carga importante a vencer por el motor eléctrico. Para compensar el peso del carro junto con el troquel se instalan los **equilibradores neumáticos**, que obtienen la energía de la línea de aire comprimido de la fábrica. Los equilibradores [5] son cilindros neumáticos de simple efecto, que están sujetos de la parte superior de la prensa (cabezal) y el vástago del cilindro se sujeta al carro. El número de cilindros está en función del diseño de la máquina, del tipo de cilindros y de la carga máxima que tengan que equilibrar (peso carro y troquel). Con este sistema el carro no está sujeto solo a la unión biela-husillo de regulación, sino que el carro también está sujeto a los equilibradores que tienen la misión de contrarrestar el peso del carro y las cargas que se le adicionen, haciéndolas igual a cero. La presión de trabajo de los equilibradores se regula en función del peso del troquel por eso es importante conocer el peso de los troqueles al momento de la preparación de la máquina. En la figura 6.5 se pueden ver los equilibradores y otros elementos de la cadena cinemática de la Prensa mecánica.

En las líneas de estampación, por lo general en el primer paso se da la forma básica a la pieza, por lo que en este paso se realiza la mayor deformación o embutición más profunda. Por esa razón la primera Prensa de la línea es de doble efecto. En este caso el troquel superior sigue estando sujeto a la cadena cinemática igual que en una prensa mecánica de simple efecto, el cambio es en el troquel inferior que tiene la capacidad de moverse de forma de amortiguar el golpe y adicionalmente tiene unas extensiones móviles que en el momento de la embutición sujetan la chapa para evitar que se arrugue la pieza y cambie de forma brusca el espesor en un lado más que en otro. Este sistema colocado en la parte inferior se conoce como cojín hidráulico. Como el nombre indica, este sistema es accionado de forma hidráulica.

Como se comentó anteriormente el embrague es el encargado de conectar el volante de inercia con la cadena cinemática, y el freno es el responsable de realizar la parada final en el P.M.S. Ambos son accionados de forma hidráulica.

Para realizar la colocación de los troqueles, la prensa cuenta con una mesa inferior móvil accionada por motores eléctricos, que facilitan las tareas de preparación. A su vez en la parte superior el carro cuenta con un sistema de ajuste de posición del troquel, también accionado por motores eléctricos.

Adicionalmente, para asegurar el buen funcionamiento de la máquina hay una serie de sensores que permiten monitorear los valores de temperatura y presión de ciertas áreas para determinar cuando la máquina está trabajando fuera del rango permitido y detectar algún problema que pueda estar ocurriendo.

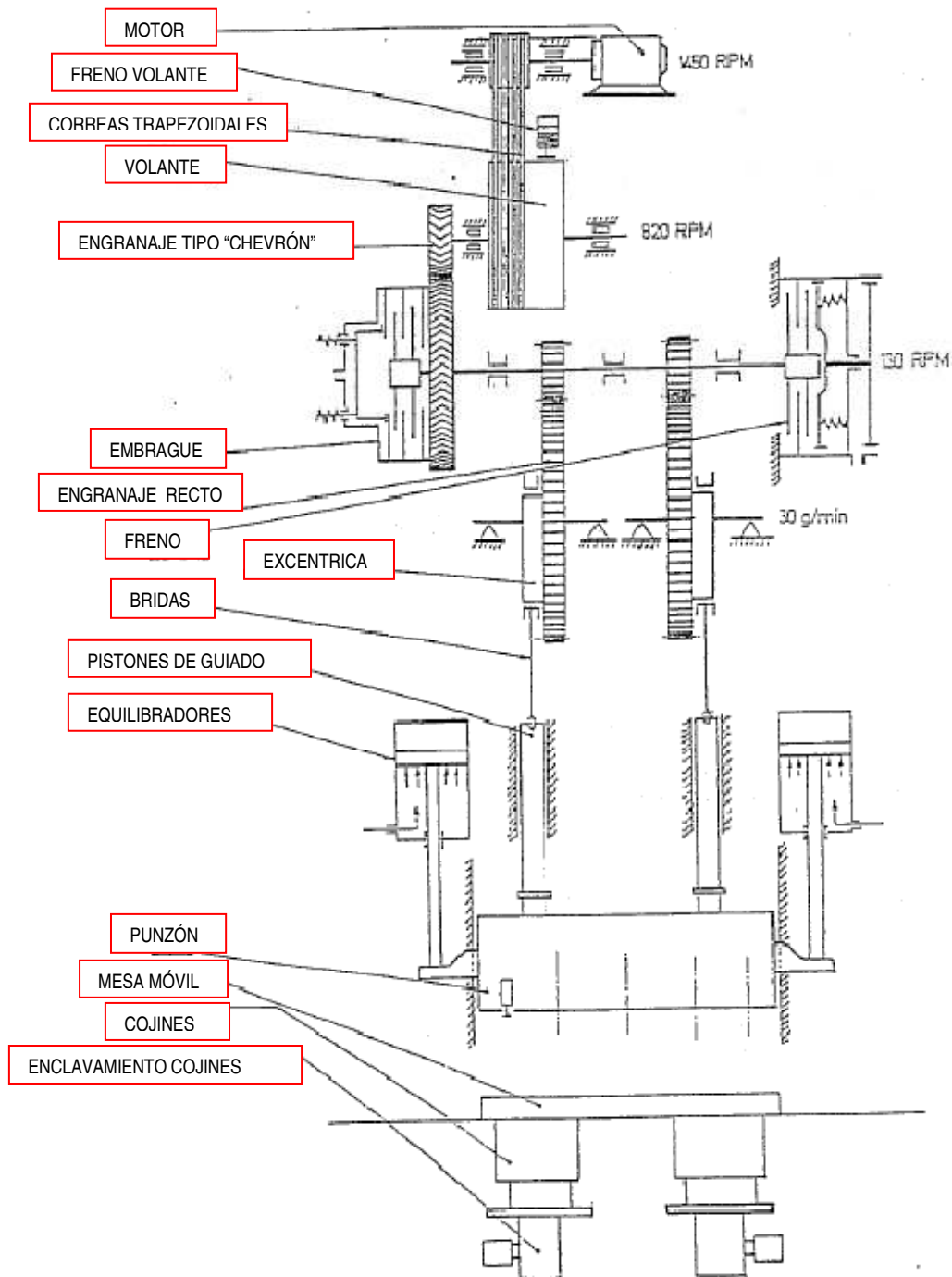


Figura 6.5 Cadena cinemática Prensa mecánica [5]

A continuación se enumeran los componentes y las fuentes de energía de la prensa mecánica:

**Tabla 2. Elementos de la prensa mecánica y fuente de energía**

ELEMENTO PRENSA MECÁNICA	FUENTE DE ENERGÍA
Motor	Alimentado eléctricamente
Equilibradores	Línea de aire comprimido de la fábrica
Cojín hidráulico	Sistema hidráulico accionado por bombas de forma eléctrica ubicadas en el foso (parte de debajo de la prensa mecánica)
Sistema móvil de carro y mesa para ajuste de posición del troquel	Accionado por motores eléctricos
Sistema de lubricación	Alimentado por bombas accionadas eléctricamente ubicadas en el foso
Embrague	Accionado hidráulicamente
Freno	Accionado hidráulicamente
Sistema de control y monitoreo de temperatura y presión	Alimentado eléctricamente

Fuente: elaborada por el autor.

#### 1.2.4. Ciclo de trabajo de una Prensa mecánica.

El motor eléctrico principal transmite el movimiento de rotación al volante de inercia. A su vez, el eje rápido se conecta con el volante de inercia a través del conjunto embrague-freno. La energía liberada por el volante de inercia se transmite por el eje rápido a las ruedas excéntricas dentadas y las bielas, de las cuales está suspendido el carro, convirtiéndose así el movimiento circular en rectilíneo.

Cada giro completo de la rueda excéntrica (360°), convierte el movimiento circular en rectilíneo en dos fases:

- 1) De 0° a 180° movimiento rectilíneo descendente
- 2) De 180° a 360° movimiento rectilíneo ascendente

A la posición de 180° se le llamará punto muerto inferior (P.M.I.) y a 0° ó 360°, se le llamará punto muerto superior (P.M.S.)

La longitud de recorrido ascendente/descendente está determinada por la excentricidad de la biela, a esta longitud se le denomina “carrera de la prensa” (ó luz de prensa)

De los pies de biela y a través de su conexión por el husillo de regulación, está el carro con todos los elementos y componentes que necesita para sus funciones (regulación y sobrecarga).

Todo comienza con el accionamiento del conjunto embrague freno (entrada de embrague y retirada del freno)

La máquina (carro) baja del P.M.S. (0°) a P.M.I. (180°) por empuje controlado a través de las bielas desarrollando la máxima fuerza al llegar el P.M.I.

La presión de trabajo de los equilibradores se ajusta según el peso del carro y el troquel. Durante el movimiento de descenso la presión de aire aumenta ligeramente en el interior del pistón de los equilibradores, pues al bajar el carro, los pistones de los equilibradores también bajan, con lo que disminuye el volumen de su cámara y por lo tanto aumenta un poco la presión. Esto incide en una

ligera oposición al movimiento hacia abajo (el aumento de presión trata de tirar hacia arriba) siendo por tanto las bielas las que están empujando hacia abajo. Este efecto evita la tracción o estiramiento de los elementos de unión (biela y husillo), pues en todo momento se evita la caída libre de la masa y los efectos negativos sobre los elementos de conexión, bielas y carro. En la figura 6 se puede ver el equilibrador señalado con el número nueve.

En la fase ascendente de 180° a 360°, la cadena cinemática, las excéntricas y bielas tienen que subir la carga, cosa que es facilitada por los equilibradores que ayudan a levantar el peso. Esto evita también que la carga no afecte negativamente sobre los elementos de unión, husillo y bielas (efecto de tracción) y ayudan a levantar la carga sin problemas al P.M.S.

Cada vez que se realiza un ciclo completo, se necesita parar la máquina en el P.M.S. dentro de unos límites. Se recomienda (según el fabricante de la prensa) parar entre +/- 10° del P.M.S. Para conseguir esto se tienen tres posibilidades:

- 1) Orden de parada en función de la velocidad
- 2) Control de la parada por frenada suave
- 3) Regulación correcta de la presión de los equilibradores

Las dos primeras son programadas en la máquina, la tercera se realiza con una regulación de la presión neumática de los equilibradores en función del peso suspendido. Cualquiera de las tres incide en el punto de parada en el P.M.S. Si se produce una desviación en la parada de +/- 10° del P.M.S. impide el inicio de un nuevo ciclo (máquina fuera del P.M.S.)

Aunque es posible hacer la parada a +/-10° del P.M.S., es recomendable realizar la parada entre 0° y +10°. La razón está en que si paramos a -10°, la máquina no termina la fase ascendente y al iniciar un nuevo ciclo, el carro tiene que subir de 350° (-10°), pasar por 0° e iniciar el descenso. Este ciclo somete la máquina a un movimiento brusco y rápido de cambio de dirección (subir-bajar), afectando a todos los elementos de la unión, cambiando de sentido las holguras (de tirar a empujar). Si se para la máquina entre 0° y +10°, este efecto se evita, pues al iniciar un nuevo ciclo, se pasa directamente a empujar de forma directa, estos detalles prolongan la vida de la máquina. A modo de ejemplo en la figura 7 se presenta la curva de posición y velocidad del pisador y el punzón de una prensa de doble efecto. En la figura 7.5 se puede ver la comparación de las curvas de una prensa de simple efecto biela-manivela y una prensa de doble efecto.

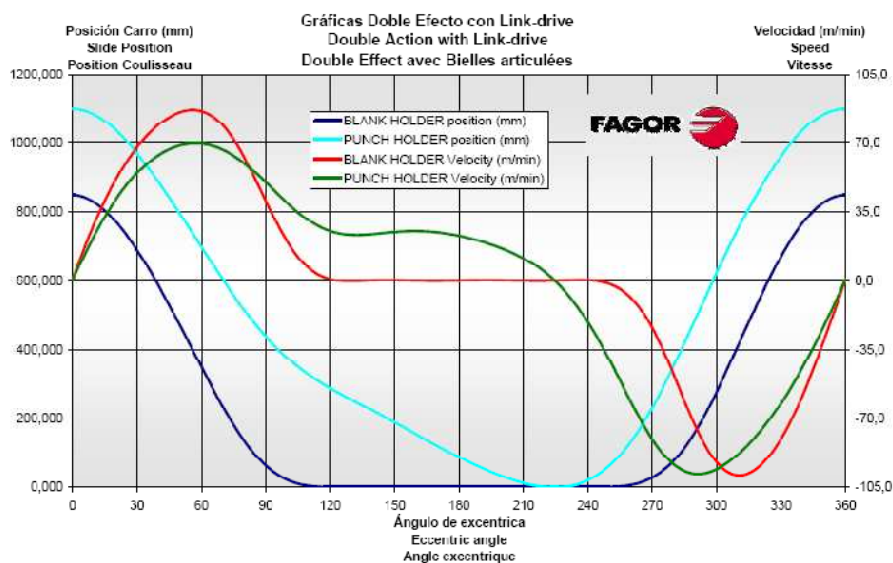


Figura 7. Curvas de Prensa de doble efecto. Pisador = blank holder, punch holder = embutidor. [FAGOR].



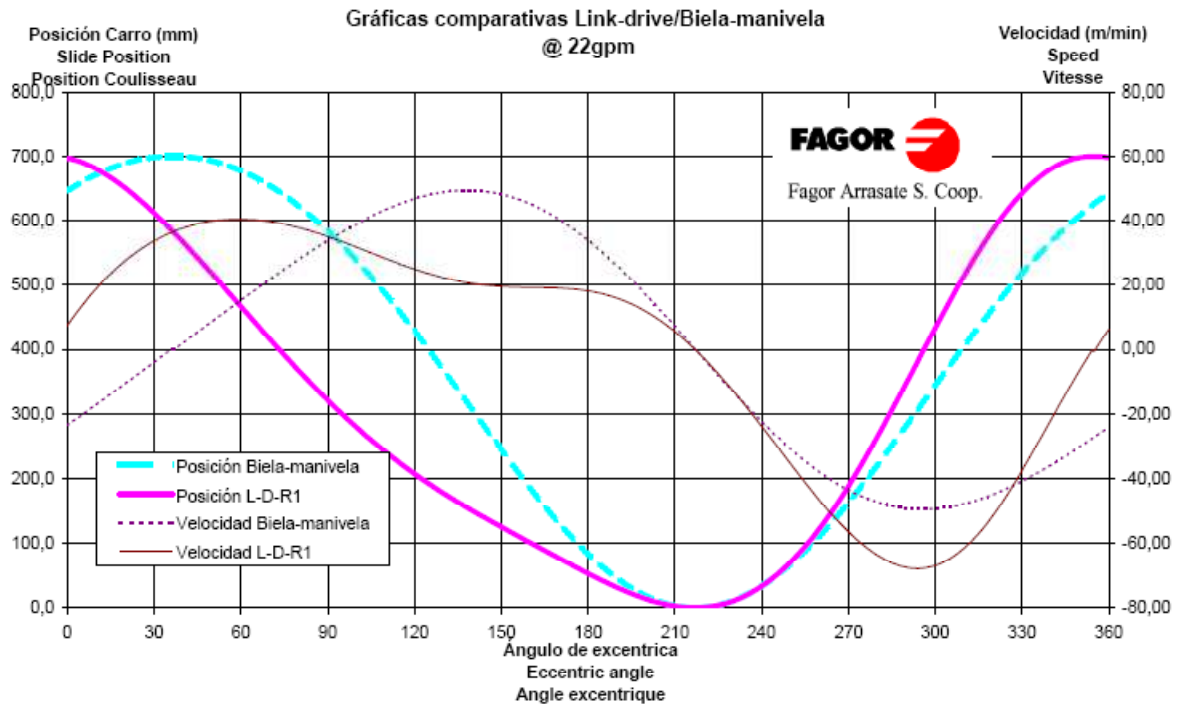


Figura 7.5 Comparación de curvas Prensa doble efecto (Link-Drive) y Prensa simple efecto (biela-manivela). [FAGOR].

### 1.2.5. Generación de la fuerza en la prensa mecánica

Para nombrar una prensa se suele decir, prensa mecánica de simple-efecto, no-articulada, de 400 Tm a 12,7 [mm]. Se tiende a pensar que el punzón cuando baja en su carrera descendente logra alcanzar una fuerza de 400 Tm a 12,7 [mm] del P.M.I. Esto no es cierto. Sólo hace falta fijarse que la máxima velocidad la alcanza el punzón a los 100º de recorrido de la excéntrica y la mínima (nula) en los puntos muertos; por lo tanto de 100º hasta el P.M.I. el punzón está decelerando, es decir la fuerza resultante que actúa sobre él es hacia arriba.

La fuerza se aplica cuando el punzón choca con el material a embutir. El punzón desciende animado de una energía cinética que le da el volante (es su almacén de energía) y al encontrar un obstáculo en su camino ejerce un Trabajo, pues hace una Fuerza sobre él y recorre un camino:

$$\text{Trabajo (T)} = \text{Fuerza (F)} \cdot \text{Desplazamiento (d)} \quad (2)$$

Como ejemplo, se puede citar el del martillo [6]. Al lanzar el martillo sobre el clavo, se pone una masa (martillo+mano) en movimiento, consiguiendo una Energía Cinética que se convertirá íntegramente en trabajo al golpear en el clavo y hacerle penetrar.

Si se supone que la masa es de 4 kg, la velocidad con que se mueve el martillo es de 70 Km/h y al golpear el clavo la velocidad se reduce a cero, la energía cinética que se pone en juego vale:

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2, \quad \text{entonces} \quad E_c = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot \left(70 \cdot \frac{1000}{3600}\right)^2 = 756 \text{ [J]}$$

Si en el primer golpe el clavo penetra 10 [mm] y en segundo golpe penetra 5 [mm], las fuerzas ejercidas por el clavo son:

$$F_1 = \frac{T}{d_1} = \frac{756}{0,01} = 75.600 \text{ [N]}$$

$$F_1 = \frac{T}{d_2} = \frac{756}{0,005} = 151.200 \text{ [N]}$$

$$F_2 = 2F_1$$

En el segundo golpe se hace el doble de fuerza que en el primero, sólo porque el clavo ha encontrado mayor resistencia en la pared; se está ante un hecho muy importante: Fuerza y Trabajo están ligados a través de una tercera magnitud que juega un papel fundamental: el recorrido durante el que se aplica esta Fuerza.

Si la resistencia de la pared es muy grande, la penetración del clavo será insignificante, y como toda la energía cinética del martillo se convierte en trabajo, la fuerza puede llegar a ser tan grande que puede doblar o romper el clavo.

En la prensa es análogo, cuando un obstáculo impide al punzón acabar la carrera de descenso y remontar el P.M.I., el volante cede energía, que se convierte en Trabajo, incluso puede llegar a pararse, con lo que ha dado toda su energía para realizar Trabajo y, como el recorrido será muy pequeño, puesto que el obstáculo se opone a que el punzón se mueva, la Fuerza será grandísima y puede romper el útil o las bielas como elementos más delicados.

La conclusión es inmediata: Una prensa con un movimiento prefijado por el mecanismo volante-biela puede ejercer cualquier valor de Fuerza, la cual va a depender fundamentalmente de la resistencia que encuentre el punzón en su descenso; así cortando chapa de 0,4 [mm] se hará más Fuerza que cortando el mismo formato en chapa de 0,2 [mm], o bien para una misma chapa a cortar se hará más **Fuerza cuanto más abajo se haya dejado el reglaje del punzón**. En cierto modo la prensa es “automática” porque da la Fuerza que se le pida. Pero obviamente si se exige mayor Fuerza que para la que está diseñada, se romperá.

Si se considera como ejemplo una prensa mecánica de simple-efecto, no-articulada, de 400 Tm a 12,7 [mm], tomando en cuenta las especificaciones, el fabricante de la prensa ha dimensionado los elementos para soportar una fuerza máxima  $F_{\text{máx}}$  de 400 Tm y un Par máximo  $C_{\text{máx}}=400X1$ , siendo  $X1$  el brazo del Par cuando el punzón está a 12,7 [mm] del punto muerto inferior (P.M.I.)

Si las 400 Tm en el seno del útil se ejercen antes de que el punzón llegue a los 12,7 [mm] del P.M.I. el par que debe vencer la Prensa excede al máximo para el que el embrague está dimensionado y patinará. Cuando esto ocurre hay un sistema de seguridad de “sobre Par” en el embrague.

Si las 400 Tm se ejercen después de rebasar los 12,7 [mm], el par será inferior al máximo y el embrague lo transmitirá “sin deslizar”. Incluso podría ocurrir que la fuerza fuese superior a las 400 Tm sin alcanzar el par máximo, pero las deformaciones en los órganos, bielas, tirantes, etc., sobrepasarán el límite elástico dado por el constructor y se romperán. Para evitarlo se coloca un seguro de sobrecarga que actúa para fuerzas superiores a las 400 Tm, protegiendo la prensa y evitando sorpresas desagradables.

Otra situación sería cuando se tiene una Prensa de simple efecto, articulada, cuya fuerza nominal es de 400 Tm a 25,4 [mm]. Lógicamente el embrague de esta prensa ha de ser más robusto que el del ejemplo anterior, ha de estar preparado para transmitir mayor Par, puesto que las especificaciones permiten hacer las 400 Tm a mayor distancia del punto muerto inferior. Sin embargo el dimensionamiento mecánico del resto de los órganos, es decir, las secciones, serán iguales pues ambas máquinas van a trabajar bajo una carga máxima de 400 Tm.

### 1.2.6. Factores para la selección de una Prensa mecánica

La adquisición de una prensa mecánica implica una gran inversión, por lo tanto se debe estudiar muy bien su aplicación, para que sea lo más versátil posible y permita la fabricación de un amplio rango de piezas. A continuación se listan un conjunto de factores que se deben tomar en cuenta para la selección de las prensas mecánicas [4]:

- a) El tipo de operación de formado y el tamaño y forma de las matrices (troqueles) y herramientas requeridas
- b) El tamaño y la forma de la pieza a fabricar
- c) La longitud de la carrera de la o las correderas, la cantidad de golpes por minuto, la velocidad y la altura de cierre (distancia de la parte superior de la cama a la parte inferior de la corredera bajada).
- d) La cantidad de correderas. Las prensas de acción sencilla tienen una corredera alternativa. Las de doble acción tienen dos correderas, que alternan en la misma dirección; se suelen usar para embutidos profundos, una corredera para el punzón y la otra para el portapieza. Las prensas de triple acción tienen tres correderas; se suelen usar para embutido en reversa y para otras operaciones complicadas de moldeo.
- e) La fuerza máxima requerida (capacidad o tonelaje de la prensa)
- f) El tipo de controles
- g) Las características de seguridad
- h) La forma de cambiar los troqueles. El cambio de troqueles en las prensas es muy importante, porque afecta la productividad (el tiempo de cambio puede ser de hasta algunas horas). Se han desarrollado sistemas de cambio rápido de troqueles, para mejorar la productividad. Un ejemplo es el sistema de **cambio de troqueles en pocos minutos** (SMED Single-minute Exchange of Die), que permite cambiar matrices en menos de 10 minutos usando sistemas hidráulicos o neumáticos automatizados. Estas técnicas son de especial importancia en sistemas de manufactura automatizados, con cómputo integrado.

### 1.3. Medición del consumo de energía

La medición del consumo de energía se puede hacer por varios métodos. Entre los más importantes están: (i) mediciones empíricas, (ii) método de agotamiento de batería, (iii) sistemas de gestión de energía (SGE).

**Mediciones empíricas.** Las mediciones empíricas son aquellas que se realizan directamente sobre el punto de la máquina o sistema que interese conocer su consumo eléctrico. Los valores que se pueden medir son potencia eléctrica, corrientes, histórico de voltajes, factor de potencia, entre otros. También se pueden realizar mediciones del flujo de aire en un determinado circuito para conocer el consumo de energía neumática. Estas mediciones son muy importantes porque dan un reflejo de la energía real consumida en el sistema. Muchas veces los estudios de consumo se realizan con la potencia que se coloca en la placa de los equipos, pero en la realidad es otra la energía consumida, de allí la importancia de este tipo de medición.

Para llevar a cabo las mediciones se requieren las herramientas adecuadas. Entre las más importantes están [1]:

*Potenciómetro:* este tipo de medidor sirve para medir la potencia consumida, la corriente consumida, el factor de carga y el factor de potencia. El medidor debe tener la opción de colocar una abrazadera o pinza para medir el consumo de corriente y sondas para medir el voltaje. Adicionalmente los valores deben poder ser almacenados sin afectar el normal funcionamiento del equipo o sistema. En la figura 8 se puede ver un potenciómetro de este tipo.

*Data logger (almacenador de datos):* se utilizan para monitorear y almacenar datos de consumo, corriente y temperatura, entre otros. Estos equipos son portátiles generalmente y capaces de aceptar diferentes entradas provenientes de los sensores.

*Medidores de flujo de aire:* hay de diversos tipos en el mercado, lo importante es que se ajuste al caudal de medida del sistema.



Figura 8 Potenciómetro digital con pinza

**Método de agotamiento de la batería.** Consiste en medir el consumo de energía para cargar una batería completamente agotada y luego contabilizar cuantas veces una máquina puede realizar una tarea con esta batería. Por ejemplo las carretillas son maquinarias que utilizan baterías recargables para evitar las emisiones de gases contaminantes en el interior de la fábrica. La medición consistiría en repetir la tarea con la carretilla hasta que se agote la batería, de esta forma se puede sacar el rendimiento de la batería y por lo tanto el consumo de energía por tarea realizada.

**Sistemas de gestión de energía (SGE).** En el mercado hay varias empresas que se dedican a suministrar los equipos y programas para los SGE. En España una de las más importantes es Circutor, con sede en Barcelona. Para entender lo que se puede hacer con un SGE se va a comentar de forma breve el alcance del Sistema Power Studio Scada de Circutor y cuáles son los requerimientos técnicos para su puesta en funcionamiento.

El Sistema de Gestión de Energía, Power Studio Scada, permite [7]:

- Configurar equipos de medida y control CIRCUTOR conectados a la red de comunicación
- Visualización en tiempo real de los parámetros procedentes de los equipos de medida instalados en campo
- Crear base de datos. Los datos captados se van almacenando en una base de datos a medida que se van generando.
- Registrar y consultar estos datos a modo de histórico en un ordenador mediante gráficos o tablas
- Acceder a los datos vía Servidor
- Exportación de datos a ficheros de texto y hoja de cálculo
- Acceder a la información mediante un explorador de Internet convencional
- Para generar tablas y gráficos se pueden seleccionar las variables requeridas, el período de tiempo (por calendario), intervalo (cada 15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 24 horas, 1 mes).

- Confeccionar pantallas SCADA combinando diferentes parámetros de diferentes equipos CIRCUTOR conectados a la red de comunicación, que permiten monitorear el sistema en tiempo real.
- Generar Informes o simular facturas eléctricas para la imputación de costes parciales.
- Gestión y control de eventos o sucesos programados por el usuario a modo de alarmas (por ejemplo enviar un correo electrónico), o acciones para automatización de procesos.
- La versión Deluxe permite interactuar con cualquier equipo de campo que disponga de comunicaciones con protocolo Modbus/RTU.
- Interactuar con cualquier aplicación SCADA del mercado mediante la opción de servidor OPC.

Lo más importante de los SGE como Power Studio Scada, es que la recogida de datos es automática y estos datos son almacenados y se puede consultar el histórico en cualquier momento, cuando el cliente lo desee.

El Power Studio Scada se divide en tres módulos, (i) el motor, (ii) el editor y (iii) el cliente. El motor es el módulo que se encarga de hacer posible la comunicación entre los equipos de medida Circutor y el programa, es también llamado "motor de comunicación". En el editor se realizan las configuraciones de informes, sucesos, alarmas etc. Es el módulo donde se configura el programa para luego visualizar los datos en el módulo de cliente.

Para hacer posible la medición y comunicación de los datos, se debe instalar una red de cableado en serie que conecte todos los equipos de medida Circutor y llegue por último al equipo que cambia la señal para que pueda ser procesada por el programa. En la figura 8.5 se puede ver un ejemplo de la red de cableado.

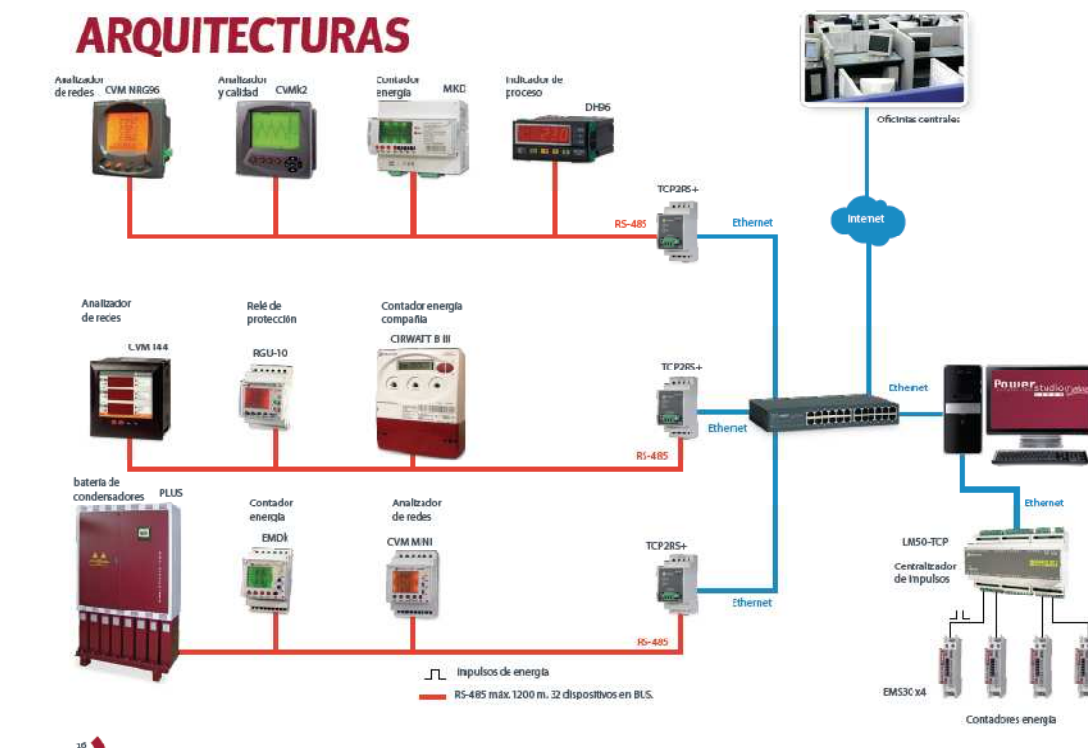


Figura 8.5 Red de cableado para Power Studio Scada [10]

La aplicación de un SGE como el Power Studio Scada es de mucha ayuda para determinar de forma automática el consumo de energía del sistema. Esto facilita la aplicación del Modelo de la Energía Incorporada al producto. Una vez determinada la energía consumida es necesario conocer los datos de producción. Hoy en día existen varios sistemas automáticos de captación de datos, un ejemplo es el

programa **Captor**. Con esta herramienta se puede conocer cuantas piezas se fabricaron, de qué modelo, determinar cuánto tiempo estuvo la máquina parada por alguna falla o falta de material, determinar el tiempo de preparación de la máquina. Con una herramienta como esta y el SGE Power Studio Scada, se puede facilitar el trabajo para aplicar el modelo de la EIP.

Como se ha comentado anteriormente, el modelo de EIP, desglosa la energía auxiliar entre todos los equipos o actividades que apoyan para la realización del proceso productivo. Para medir estos consumos de forma independiente de forma automática con el SGE, se tendrían que colocar tantos medidores de energía como equipos o actividades compongan la energía auxiliar. Instalar una red de medidores tan detallada es muy costoso por lo que generalmente se mide el consumo total de la línea productiva con un solo medidor. Para conseguir el desglose de la energía es necesario aplicar mediciones empíricas del consumo eléctrico y determinar los flujos de aire comprimido ó gas natural consumidos.

## CAPÍTULO 2. BASES PARA APLICAR EL MODELO DE LA ENERGÍA INCORPORADA AL PRODUCTO EN LA FABRICACIÓN DE PIEZAS ESTAMPADAS.

### 2.1. Línea de estampación

La línea de estampación en estudio está conformada por cinco prensas mecánicas de 400 Tm cada una, la primera es de doble montante de doble efecto y las otras cuatro de doble montante de simple efecto. Las prensas cuentan con un sistema de mesas móviles que salen del cuarto de prensa para facilitar la colocación de los troqueles. En la parte de debajo de la línea, llamada foso, que es la parte que no se ve, están los equipos del sistema hidráulico para el cojín hidráulico, los equipos del sistema de lubricación y los equipos del sistema neumático para suministrar el aire comprimido a los equilibradores y cojines neumáticos. También en el foso están las cintas transportadoras de la chatarra que se genera por los recortes de lámina durante el proceso de estampado. Algo que es importante destacar es que la línea cuenta con un sistema de cerramientos que minimizan el ruido generado por el proceso de estampación. El mayor ruido se genera en el interior del foso producto de la caída de la chatarra y del funcionamiento de los equipos del sistema hidráulico, por lo que se requieren medidas de protección auditiva para ingresar en el. En la figura 9 se puede ver una línea de estampación similar a la del estudio.



Figura 9. Línea de estampación

Para movilizar las piezas durante la fabricación se utilizan robots programables, esto hace que el proceso sea automatizado y seguro. Una vez terminada la pieza el robot la coloca en una cinta transportadora que la lleva hasta el operario, que la inspecciona y la coloca en el embalaje respectivo. Una vez lleno el embalaje es llevado hasta el almacén de productos terminados por una carretilla conducida por un operario.

Las actividades de preparación más importantes que se realizan antes de poner en marcha la línea de estampación para la producción de una pieza son:

- 1) Se retira el troquel de las cinco prensas ó de las que estuvieron en uso en la producción de la pieza anterior. Esto se realiza con la ayuda del movimiento de la mesa de cada prensa y de la

grúa de alta capacidad operada manualmente. Este paso termina cuando los troqueles quedan en el lugar asignado en el almacén de troqueles.

- 2) Se coloca el troquel en las prensas que sea necesario, para fabricar la nueva pieza. En este paso se colocan las velas (cilindros alargados metálicos), que se encargan de sujetar la lámina durante la operación de estampado, la configuración de estas velas es diferente de acuerdo a la forma de la pieza.
- 3) Se selecciona en cada prensa el programa de fabricación correspondiente a la pieza a fabricar
- 4) Si se requiere se quitan de los robots, los brazos con las ventosas y se instalan los brazos correspondientes a la pieza que se va a fabricar.
- 5) Se selecciona el programa adecuado en los robots para la pieza a fabricar.
- 6) Se abastece a la entrada de la primera prensa las láminas respectivas para la producción de la pieza, esto se realiza con la ayuda de una carretilla operada manualmente.

Como se puede ver la preparación de la línea de estampación para fabricar una nueva pieza tiene varias actividades. Mientras más rápido se consiga poner a punto la línea, se gana en tiempo de producción.

Es importante comentar que tanto los robots como las prensas tienen diversos programas de trabajo dependiendo de la pieza a fabricar. Estos programas son ingresados previamente durante la fase de puesta a punto de los troqueles y robots. Una vez quedan probados y definidos los programas en la fase de puesta a punto, el operario solo tiene que seleccionar el programa adecuado para fabricar la pieza. El trabajo de la puesta a punto de troqueles y robots lleva tiempo y se hace con personal especializado.

Debido a que una línea de estampación representa una gran inversión de capital, se debe investigar su empleo para producir una diversidad de partes, para varias aplicaciones. La versatilidad y diversidad de usos son factores importantes para la selección de las prensas mecánicas, en especial para modificaciones de productos y fabricar nuevos productos que respondan a cambios en la demanda del mercado.

## 2.2. Proceso de fabricación de la pieza

Las láminas se reciben ya cortadas en pallets (en lotes, apiladas una sobre otra), provenientes de otra fábrica y son descargadas del camión cerca de la entrada de la línea de estampación por una carretilla alimentada con una batería (recargable) y operada manualmente (operario). Al momento del uso del material la misma carretilla lleva el pallet hasta el lugar que corresponde al material de alimentación de la primera prensa.

Para transportar los troqueles hasta las prensas se utilizan grúas de gran capacidad, operadas de forma manual (operario). Para facilitar la colocación de troqueles, la mesa sale del cuarto de prensa y se colocan encima de ella, tanto el troquel inferior como el troquel superior. El sistema que moviliza la mesa es accionado por motores eléctricos. Luego los ajustes tanto del troquel superior, como del troquel inferior se realizan también mediante un sistema de motores eléctricos. Para retirar los troqueles de la prensa una vez terminada la producción, se utiliza el mismo procedimiento pero a la inversa y finaliza una vez son dejados los troqueles en el puesto que le corresponden en el almacén de troqueles.

El mecanismo para movilizar las piezas durante el proceso de estampación, es a través de robots, donde un robot se encarga de ingresar la pieza a la prensa y otro se encarga de sacarla, hasta llegar a la prensa final donde el robot coloca la pieza terminada en la cinta transportadora para su inspección y empaque, realizado de forma manual (operario).



Una vez lleno el embalaje viene una carretilla alimentada por una batería (recargable) y operada manualmente (operario) y lleva el embalaje hasta el almacén de productos terminados.

Una vez más al momento del despacho de la pieza se transporta el embalaje hasta el camión con una carretilla del mismo tipo.

Esta línea de estampación tiene un sistema automático de recuperación de chatarra integrado por cintas transportadoras que están en el foso de la prensa, que van a todo lo largo de la línea hasta llegar al punto de acopio de chatarra. Las cintas son accionadas por motores eléctricos.

El análisis se va a realizar desde que llega el pallets de láminas apiladas hasta que se monta el embalaje en el camión del cliente.

Para dar como resultado el producto final se deben cumplir todos los pasos de estampación necesarios para fabricar la pieza. El número de pasos varía de acuerdo a la pieza, pudiendo haber piezas que se hagan en solo tres pasos de estampación y otras que se hagan en el máximo de pasos, cinco. Para la fabricación de piezas de forma complicada se suele utilizar en el primer paso una prensa mecánica de doble efecto para conseguir una mayor profundidad de embutición, luego los otros pasos se realizan con prensas mecánicas de simple efecto, donde se termina de dar la forma a la pieza y recortar todo el material sobrante. Todos estos pasos de estampado son estudiados cuidadosamente en la fase de diseño con la finalidad de conseguir el mayor provecho de cada uno, sin llegar al límite de deformación plástica del material.

## 2.3. Entradas de energía durante el proceso de estampación

Para determinar la energía requerida para la fabricación de una pieza estampada para la carrocería del automóvil, como se comentó en el capítulo 1, se va utilizar el modelo de la energía incorporada al producto (EIP). Siguiendo este modelo hay que analizar la energía directa y la energía indirecta involucrada en el proceso de fabricación. Se va a comenzar el análisis con el estudio de la energía indirecta y luego se seguirá con los detalles de la energía directa, que se divide en teórica y auxiliar.

### 2.3.1. Energía indirecta

En la figura 9 se puede observar que todos los pasos de estampación se realizan en la zona donde está ubicada la línea de estampación. Como se comentó previamente, la energía indirecta se consume para mantener las condiciones del ambiente de producción. Para el caso en estudio se enumerarán las fuentes de consumo de energía indirecta para la zona donde está ubicada la línea de estampación, que de ahora en adelante la llamaremos “zona 1”.

Para mantener las condiciones productivas de la “zona 1” se consume la energía indirecta en varias actividades:

**Iluminación:** se usa para iluminar la “zona 1” lámparas de vapor de sodio de alta presión de 400 vatios (ver figura 3). En la zona hay instaladas 33 luminarias, las cuales se considera que están encendidas en todo momento. Para iluminar la parte interna de los cuartos de las prensas se usan tubos fluorescente T8 (26 mm) de 23 W. Hay un total de 24 tubos fluorescentes instalados en toda la línea. A la potencia de los bombillos hay que agregar la potencia consumida por los balastos.



Figura 10. Luminaria de vapor de sodio de alta presión

**Calefacción:** la calefacción no se usa en verano, por lo que en esta época del año se ahorra el costo en calefacción. La calefacción durante los otros meses del año, se consigue a través de tubos radiantes alimentados por gas natural (ver figura 11). El calor se produce debido a la emisión de radiación infrarroja proveniente de la superficie del tubo radiante [8]. La radiación que produce el equipo es similar a la producida por el sol, cuando la radiación infrarroja llega a la superficie de un objeto o a la piel de las personas se produce un calentamiento por radiación, a su vez, las superficies ya calientes transmiten calor al aire por convección y conducción, de esta forma el aire aumenta su temperatura. Este sistema de calefacción es más efectivo que el sistema de calefacción por aire caliente, debido a que el aire caliente sube lentamente, en cambio con el otro sistema, la velocidad de ascenso es mayor y es difícil que el aire caliente se mantenga en toda la zona ocupada, en la figura 12 se puede ver que con el sistema de calefacción convencional no se consigue calentar toda el área. Adicionalmente el consumo de energía es mayor.



Figura 11. Equipo calefactor de tubos radiantes [25]

En la figura 13 se puede ver como con el sistema de tubos radiantes se consigue una temperatura uniforme en el área ocupada. Este sistema consume menos energía que el sistema convencional.

Para el caso en estudio se usarán tubos radiantes de 6 metros de longitud de una capacidad nominal de calor de 18 kW, con gas suministrado a 20 mbar (G20). Por otro lado el soplador y sistema de ignición consumen energía eléctrica. En la zona 1 hay colocados 21 de estos equipos. Como se puede ver en este caso se va a tener un consumo eléctrico y un consumo de gas natural expresado en m<sup>3</sup>/h.

En esta parte hay que comentar que las empresas que suministran el gas natural, trabajan con varios planes de consumo para las industrias y es la Dirección de la fábrica, con la ayuda del departamento técnico que decide cual es el plan de suministro que mejor se ajusta a las necesidades. Si por alguna razón el consumo de gas es superior al indicado en el plan, se genera una penalización.

Por esa razón es muy importante monitorear el consumo de gas para no sobrepasar el límite establecido por el plan de consumo.

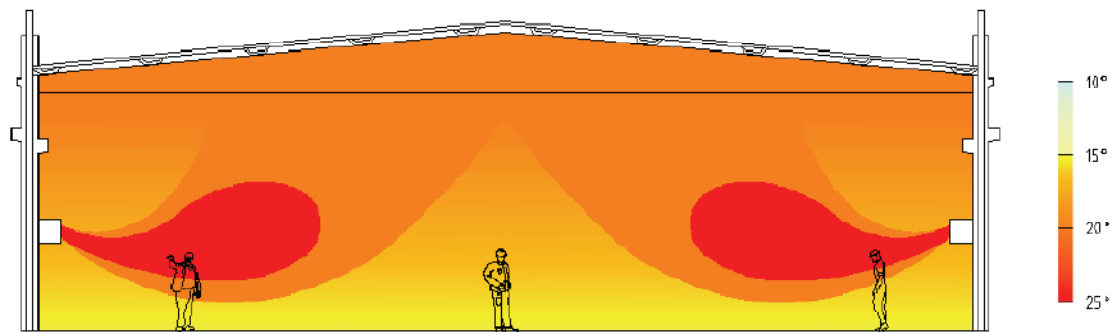


Figura 12. Nave calentada por calefacción convencional

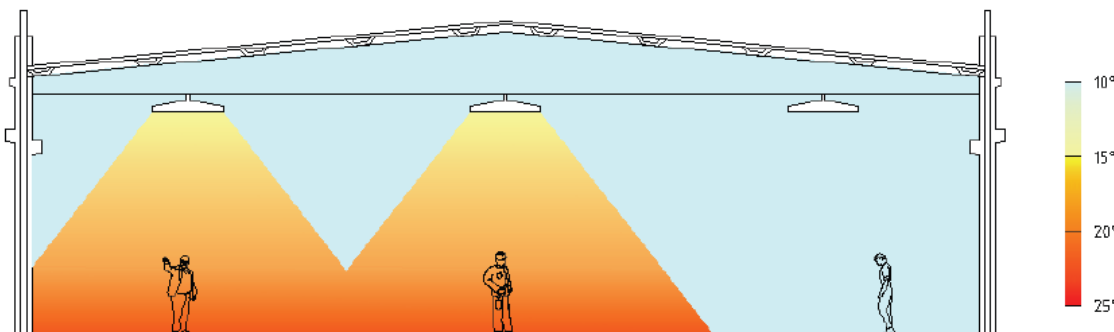


Figura 13. Nave calentada por tubos radiantes

**Limpieza de la zona:** para mantener la zona 1 se realiza la limpieza con una máquina de limpieza motorizada alimentada por batería y conducida por un operario. Para determinar la energía consumida por la limpieza se tendría que monitorear el consumo de la batería y establecer cuantas limpiezas en la zona 1 se pueden realizar con una carga de batería completa. Con respecto a esta actividad no se tienen datos precisos, por lo que se pudiera realizar un estudio más detallado de esta actividad. También es importante determinar la frecuencia de la limpieza y si es realizada cada vez que se cambian los troqueles o se realiza de forma diaria o varias veces al día. En la figura 14 se puede ver un ejemplo del equipo de limpieza.

Para determinar el consumo de energía indirecta por pieza se debe calcular el consumo de energía indirecta de todas las actividades (iluminación, calefacción, limpieza) por hora. El total de energía consumida se debe dividir entre el número de piezas fabricadas durante una hora. Hay que destacar que la energía indirecta que se consume para producir una pieza pequeña es la misma que se consume para producir una pieza grande, por lo que la energía indirecta será de mayor proporción con respecto al total de la energía incorporada, en la producción de una pieza pequeña, que en la producción de una pieza grande.



Figura 14. Máquina de limpieza industrial.

### 2.3.2. Energía directa

La energía directa se divide en dos: (i) energía teórica (ET) y (ii) energía auxiliar (EA).

#### Energía teórica

Como se comentó anteriormente la ET es la mínima cantidad de energía para fabricar un producto. Por lo general se calcula usando una expresión que relaciona las variables de producción con el consumo de energía. Para el caso de una pieza estampada no existe una expresión general para el cálculo de la energía requerida, solo hay expresiones para operaciones sencillas como doblado de láminas y embutición de recipientes cilíndricos. Los cálculos por Elementos Finitos sí permiten conseguir la fuerza requerida para deformar la pieza y conseguir la forma deseada. Hay que destacar que esta fuerza calculada es la mínima requerida y no incluye las pérdidas por fricción de los elementos de la cadena cinemática de la prensa. Por lo que la energía requerida será mayor que la teórica calculada. Por esta razón se va a considerar como energía teórica a la energía consumida por el motor eléctrico que alimenta al volante de inercia de la prensa mecánica. Para determinar el consumo de esta energía por pieza se tendría que medir la energía consumida por el motor durante una hora y este valor se divide entre el número de piezas fabricadas durante ese tiempo. La medición sería puramente empírica. Lo ideal sería hacer la medición para piezas de diferente tamaño y diferente espesor de lámina para ver las diferencias en la energía consumida. La energía teórica total sería la suma de la energía consumida por todos los motores de las prensas donde se realice el proceso de estampado.

#### Energía auxiliar

La energía auxiliar es la usada por todas las actividades que ayudan a llevar a cabo el proceso. Para el caso en estudio se tiene:

- Energía consumida por la batería de la carretilla para bajar el pallets de láminas del camión hasta el almacén y luego la energía consumida para colocarlo del almacén hasta la zona de producción en la primera prensa. Para sacar el gasto unitario de energía se dividiría la energía total consumida entre el número de láminas del pallet.
- Energía consumida por los robots para cargar y descargar la pieza de la prensa mecánica. Esto se repite hasta que la pieza es colocada en la cinta transportadora para su inspección y empaque.

- Energía neumática consumida por el sistema de equilibradores de todas las prensas y cojines neumáticos. Para determinar el gasto unitario se tendría que determinar el flujo de aire consumido en una hora y multiplicarlo por la energía para producir el aire comprimido y este valor se dividiría entre el número de piezas fabricadas en una hora.
- Energía consumida por el sistema de lubricación de todas las prensas
- Energía consumida por el sistema hidráulico que alimenta el cojín hidráulico
- Energía consumida para accionar la cinta que transporta la chatarra hasta el centro de acopio.
- Energía consumida por la cinta transportadora que mueve la pieza una vez terminada hasta el puesto de inspección y embalaje.
- Energía consumida por la batería de la carretilla que transporta el embalaje de productos terminados hasta el almacén y luego la energía consumida para llevar el embalaje del almacén hasta el camión del cliente. Igualmente para sacar el gasto unitario de energía se dividiría la energía total consumida entre el número de piezas por embalaje.
- Energía consumida en el modo standby de la prensa, durante la fase de preparación y limpieza

## 2.4. Detalle de la medición del consumo de energía

Con la idea de facilitar las mediciones del consumo de energía, para el caso en estudio se cuenta con el SGE, Power Studio Scada de Circutor. También se emplearán las mediciones empíricas y el método de agotamiento de la batería. A continuación se van a considerar en detalle los métodos de medida en cada caso. Hay que destacar que el alcance del trabajo es presentar los métodos de medición, dejando la realización de medidas para futuros trabajos.

Paso 1. Transporte del pallets de láminas desde el camión hasta el pie de línea. Para medir la energía consumida en este paso se utiliza el método de agotamiento de la batería. Primero se debe cargar la batería de la carretilla completamente y medir cuanto se consume de energía con un potenciómetro. Una vez colocada la batería en la carretilla se debe realizar el transporte del pallet desde el camión hasta el almacén al pie de línea, las veces que sean necesarias hasta que se agote la batería. La energía total utilizada para cargar la batería se divide entre el número de veces que se puede realizar el proceso y el resultado se divide entre el número de láminas que tiene el pallet transportado. Esto daría la energía incorporada para transportar la lámina desde el camión hasta el almacén al pie de línea.

Paso 2. Transporte del pallets de láminas desde el almacén al pie de línea hasta la zona de producción de la prensa 1. Se utiliza el mismo procedimiento que en el paso 1.

Paso 3. Transporte de troqueles a la mesa de prensa. Para realizar esta operación se requiere una grúa de gran capacidad y un operario. Para medir la energía consumida por la grúa se realiza una medición empírica con el potenciómetro. El valor total de la energía consumida se divide entre el número de piezas fabricadas con ese troquel, de esa forma se obtiene la energía consumida por pieza fabricada para mover el troquel. Hay que destacar que mientras más piezas se fabriquen con un mismo par de troqueles menor será la proporción de energía consumida por pieza por este proceso.

Paso 4. Ajuste de troqueles. Para ajustar los troqueles en la posición correcta se usan motores eléctricos instalados en la prensa para cumplir esa función. Igualmente se mide el consumo total con un potenciómetro y el resultado se divide entre el número de piezas fabricadas con ese par de troqueles.

Paso 5. Puesta a punto de la línea de estampación. Durante la puesta a punto de la línea de estampación se consume la energía de standby de las prensas y los robots y la energía consumida por todo el sistema de control y programación de las prensas. Esta energía puede ser medida de forma empírica o por el SGE. Una vez obtenida se divide entre el número de piezas fabricadas.

Paso 6. Movimiento de lámina a la prensa 1. El robot 1 toma la lámina y la coloca en la prensa 1. Para determinar el consumo unitario de este proceso se debe monitorear el consumo del robot como mínimo por una hora y luego el consumo total se divide entre el número de piezas que ha movido el robot en esa hora. El robot no solo consume energía durante el movimiento, también lo hace cuando está en espera o modo standby. Lo recomendable es hacer la medición con un potenciómetro.

Paso 7. Primer paso de estampado-embutido. Una vez se coloca la lámina en la prensa 1 se inicia el proceso de estampado. Como se comentó anteriormente la fuerza proviene del motor eléctrico que alimenta el volante de inercia. A su vez la prensa tiene un conjunto de sistemas auxiliares que ayudan a la ejecución del proceso. La medición del consumo de energía se debe realizar al menos por una hora en el motor eléctrico y en todos los sistemas auxiliares. El total de cada medida, se divide entre el número de piezas fabricadas en ese tiempo. Para realizar las mediciones se puede usar el SGE o se puede realizar de forma empírica con un potenciómetro. En el caso de la energía neumática se debe medir el flujo de aire comprimido utilizado en 1 hora y luego este valor se multiplica por el consumo eléctrico requerido para producirlo y este valor se divide entre el número de piezas fabricadas en ese tiempo. Todos los demás sistemas auxiliares son alimentados con energía eléctrica (la bomba del sistema de lubricación, la bomba del sistema hidráulico etc.).

Paso 8. Se retira la pieza de la prensa 1. Una vez finalizada la embutición de la prensa 1 el robot retira la pieza. Para determinar el consumo unitario se debe proceder igual que en el paso 6.

Paso 9. Se coloca la pieza en la prensa 2. La medición del consumo de este proceso se debe hacer igual que el paso 6.

Paso 10. Segundo paso de estampado. La medición del consumo de este proceso se debe hacer igual que el paso 7.

Paso 11. Se retira la pieza de la prensa 2. La medición del consumo se hace igual que el paso 6.

Paso 12. Movimiento de la pieza a la prensa 3. La medición de consumo se hace igual que el paso 6.

Paso 13. Tercer paso de estampado. Igual que el paso 7.

Paso 14. Se retira la pieza de la prensa 3. Igual que el paso 6.

Paso 15. Movimiento de la pieza a la prensa 4. Igual que el paso 6.

Paso 16. Cuarto paso de estampado. Igual que el paso 7.

Paso 17. Se retira la pieza de la prensa 4. Igual que el paso 6.

Paso 18. Movimiento de la pieza a la prensa 5. Igual que el paso 6.

Paso 19 Quinto paso de estampado. Igual que el paso 7.

Paso 20. Se retira la pieza de la prensa 5 y se coloca la pieza sobre la cinta transportadora. Igual que el paso 6.

Paso 21. La cinta transportadora lleva la pieza hasta el puesto de embalaje. Se mide el consumo de la cinta transportadora por una hora y se divide entre el número de piezas fabricadas durante ese tiempo.

Paso 22. Empaque de la pieza. Una vez la pieza llega al puesto de empaque un operario inspecciona la pieza y la coloca en el embalaje. En este caso la energía consumida proviene del operario.

Paso 23. Transporte del embalaje desde el lugar de empaque hasta el almacén. Una vez lleno el embalaje una carretilla conducida por un operario lo traslada hasta el almacén. Para medir el consumo de energía se procede igual que en el paso 1, por el método de agotamiento de la batería.

Paso 24. Se retiran los troqueles de las prensas. Se procede igual que el paso 3.

Paso 25. Transporte del embalaje desde el almacén hasta el camión del cliente. Igualmente se realiza con una carretilla conducida por un operario y la energía consumida se determina igual que en el paso 1, por el método de agotamiento de la batería.

Por lo comentado anteriormente, el proceso de medición de los consumos de energía se hace complejo por la cantidad de medidas que hay que realizar, así como por el tiempo que lleva realizarlas. El reto es sistematizar estas mediciones para hacerlas de forma rápida y fácil.

## CAPÍTULO 3. MEDIDAS GENERALES DE AHORRO DE ENERGÍA, RECOMENDADAS PARA EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE PIEZAS ESTAMPADAS.

### 3.1. Medidas generales de ahorro de energía por etapa del proceso de estampación

Las medidas de ahorro de energía propuestas se dividen en tres secciones: (i) transporte de material, (ii) proceso de fabricación, (iii) actividades para el mantenimiento de las condiciones de fabricación.

#### 3.1.1. Transporte de material

El transporte de material se realiza con carretillas alimentadas con batería recargable y con robots. Para reducir la energía consumida por estas actividades se pueden considerar las siguientes medidas:

##### **Robots:**

- Optimizar la trayectoria del movimiento de los robots durante el transporte de las piezas, de forma de reducir el número de cambios de dirección durante el recorrido [9]. Múltiples aceleraciones y deceleraciones y cambios de sentido de giro en los servomotores producen pérdida de energía que se disipa en forma de calor en las resistencias de calentamiento emplazadas en los armarios de potencia.
- Desactivar los robots durante una parada prolongada, ya que cuando el robot está parado, los servomotores siguen funcionando para mantener la posición del robot.

##### **Carretillas:**

- Se debe entrenar al operario de la carretilla para que realice una conducción eficiente. Si el operario realiza muchas aceleraciones bruscas y frenazos, lo más seguro es que la batería dure mucho menos.
- Se debe minimizar la trayectoria recorrida por la carretilla para realizar las operaciones. Esto va a depender de la ubicación de los almacenes, de los puntos de descarga de material y de la pericia del operario.
- Optimizar el peso de los pallets de láminas de forma de trabajar con el peso más adecuado (ni muy pesado, ni muy liviano).

#### 3.1.2. Proceso de fabricación. Estampado.

Como se comentó anteriormente para estampar una pieza, la energía es proporcionada por el motor eléctrico que alimenta al volante de inercia, y a su vez se consume energía por los sistemas auxiliares que ayudan a realizar el proceso. Se van a comentar las medidas de ahorro de energía de cada sistema por separado.



### Motor eléctrico.

- Cuando la prensa ha realizado el ciclo de embutición y se encuentra próxima al P.M.S., unos grados antes de llegar a él, el embrague deja de transmitir energía a la cadena cinemática, empleándose la energía cinética contenida en la prensa y la energía del sistema de equilibradores para llegar al P.M.S. Si todavía queda algo de energía en el P.M.S. es el freno hidráulico el encargado de parar la máquina. Actualmente, mediante la utilización de convertidores de cuatro cuadrantes o mediante variadores de frecuencia regenerativa, se puede conseguir aprovechar parte de la energía disipada en el freno, en torno al 1% durante la frenada [9]. Esta energía es devuelta a la propia red del consumidor para que sea usada por otra instalación del taller.
- Realizar un buen mantenimiento del embrague de la prensa. Si se encuentra desgastado el embrague al momento de embragar desliza el disco y se disipa la energía del motor en forma de calor.
- Pensar en colocar servo-prensas en futuras líneas de estampación [10]. En las servo prensas (ver figura 15) no se requiere volante de inercia, embrague, ni freno, todo el movimiento de la prensa (arranque, cambio de velocidad y parada) está controlado directamente por el servo motor. Entre las ventajas de esta prensa está la reducción del consumo de energía durante el proceso de estampado, debido a la reducción de las pérdidas por fricción en el embrague y freno, la energía almacenada durante la deceleración y a la optimización del movimiento de la prensa. Otro aspecto importante es que se pueden reducir los pasos de estampado gracias a que se pueden incorporar operaciones adicionales dentro del troquel debido a los múltiples ejes de trabajo. También se reducen los tiempos de ciclo de trabajo, como se puede ver en la figura 16.



Figura 15. Servo-prensa para paneles de automóvil. (Honda-Aida) [10]

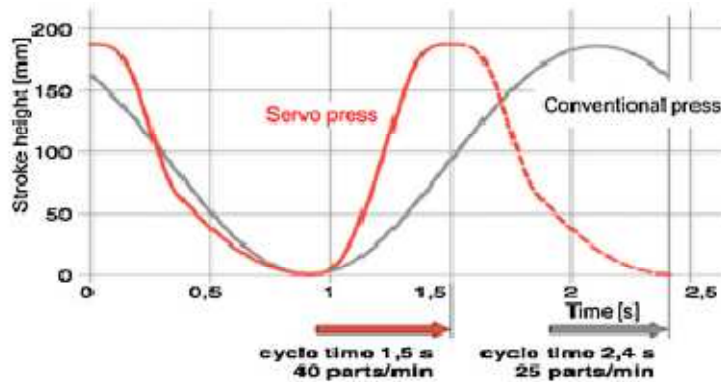


Figura 16. Disminución del tiempo de ciclo, así como la velocidad de impacto con servo-prensa. (Se logra un aumento en la producción de 150%) [10].

### Sistema de lubricación y sistema hidráulico

- Es muy importante el mantenimiento de los filtros de aceite para evitar pérdidas elevadas de presión en el sistema.
- Evaluar si la bomba tiene una potencia adecuada para el flujo de aceite que tiene que manejar o se puede colocar una bomba que trabaje de forma más eficiente. Una de las formas de comprobar la eficiencia de un motor es midiendo las temperaturas alcanzadas, si la temperatura medida es alta quiere decir que se pierde mucha energía en forma de calor [1]
- Se puede estudiar la posibilidad de colocar un variador de frecuencia en el motor eléctrico para que el sistema trabaje según la demanda de aceite.

### Sistema neumático para equilibradores y cojines

En el capítulo seis se estudiará en profundidad la implementación de medidas de ahorro en el sistema de aire comprimido y la recuperación de la inversión en el tiempo.

#### 3.1.3. Actividades para el mantenimiento de las condiciones del entorno de trabajo

La energía indirecta es consumida por las actividades que garantizan las condiciones de fabricación. En el caso de estudio serían, la iluminación, la calefacción y la limpieza. En el capítulo cuatro y cinco se comentarán las medidas de ahorro de energía que se pueden aplicar para la iluminación y la calefacción.

Para el caso de la limpieza la medida de ahorro más importante es evitar ensuciar, para conseguirlo los residuos se deben depositar en contenedores clasificados según el tipo de material, ubicados estratégicamente en las zonas productivas. Otra medida muy importante es concientizar a los empleados de la importancia de la limpieza en la zona de trabajo. Por otro lado el uso de sistemas motorizados para la limpieza, ayudan a ahorrar tiempo, que se traduce en mayor rendimiento de la mano de obra dedicada a la limpieza. En la figura 14 se puede ver una maquinaria del tipo industrial para la limpieza del suelo.

## CAPÍTULO 4. MEDIDAS DE AHORRO DE ENERGÍA EN CALEFACCIÓN

Para disminuir el costo unitario de un producto son muchas las medidas que se pueden implementar. Hay medidas que no cuestan nada, medidas de mediana inversión y medidas que son de gran inversión. Entre las actividades con mejores resultados para el ahorro de energía están: la calefacción, la iluminación y el sistema de aire comprimido. A continuación se estudiarán en detalle estas medidas de ahorro y cuál es el tiempo de retorno de la inversión de alguna de estas.

### 4.1. Estudio de la calefacción.

Para que el sistema de calefacción sea eficiente y produzca confort en los ocupantes, se debe cuidar muy bien la ubicación y orientación de los tubos radiantes. Como se comentó anteriormente, los tubos radiantes emiten radiación infrarroja similar a la emitida por el sol, que calienta las superficies que encuentran a su paso y éstas con el tiempo van calentando el aire de la zona ocupada. Muchas veces esta radiación se desaprovecha en zonas donde en realidad no hay ocupantes y en otros casos la intensidad de la radiación es superior a la necesaria, debido a la poca distancia entre el ocupante y el tubo radiante, generalmente esta sensación se produce cuando la altura del espacio es pequeña. Una forma de optimizar el rendimiento de los tubos radiantes es variando su orientación. A continuación se comentará un estudio [8] que relaciona la orientación del tubo radiante con la temperatura conseguida.

Uno de los parámetros básicos que determina las condiciones de confort térmico de un espacio calentado por tubos radiantes es la **temperatura radiante**. Por esta razón es muy importante conocer la distribución de la temperatura radiante del espacio que está siendo calentado por radiación. La distribución de la temperatura radiante en espacios de gran altura depende principalmente de la disposición de los tubos radiantes en el espacio. Para asegurar una distribución uniforme de la temperatura se debe conocer el rango efectivo de trabajo del calentador a lo largo de su eje transversal y eje longitudinal. También depende del área de los tubos radiantes, la dirección, el ángulo y la altura en que son colocados.

La temperatura radiante se define como la temperatura que tiene que tener una superficie radiante para igualar las condiciones de radiación producidas en un espacio por todas las superficies que reciben radiación directa o que son calentadas indirectamente. La temperatura radiante debe ser medida a la altura de la cabeza de las personas, debido a que es la parte más sensible a las radiaciones del cuerpo humano. Según la referencia [8] se puede tomar la altura de la cabeza a 1,3 m de una persona sentada y a 1,7 m para una persona de pie.

Para ilustrar como varía la temperatura radiante en una nave industrial según la disposición de los sistemas de tubos radiantes, se va a comentar un experimento extraído de la referencia [8].

#### 4.1.1. Experimento ilustrativo

El experimento tuvo lugar en la temporada de calefacción de 2.003/2.004 en una nave industrial en Polonia. La vista de la nave industrial se muestra en la figura 17.

El experimento fue hecho con calefactores de tubos radiantes, de la marca Solgaz, con cuatro potencias diferentes, 6, 9, 12 y 18 W. Estos se alimentaron con gas líquido (propano) proveniente de un cilindro de 11 kg colocado en el piso debajo del calefactor, utilizando una manguera de 10 mm de diámetro y 4 m de longitud. Cada calefactor fue alimentado eléctricamente por una línea a 230 V. Las electroválvulas fueron activadas y desactivadas mediante un interruptor. A continuación se comentan los detalles del experimento.

- Los calefactores fueron colocados en diferentes lugares, a diferentes alturas y a diferentes ángulos (a 20° y 30° con respecto al suelo).
- La altura de colocación depende de la densidad de radiación aceptada en el lugar, también depende de la capacidad del calefactor radiante y de la forma en que son colocados
- Durante las pruebas no se realizó ninguna actividad que pudiera afectar el funcionamiento y la medición de los calefactores. Solo estaban funcionando los dispositivos de medición.
- Un conjunto de termopares de Cu-Constantán se utilizaron para medir la temperatura de la superficie del suelo ( $t_{pd}$ ), con una precisión de  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ .
- Un termómetro de mercurio de laboratorio fue usado para medir la temperatura del aire en el interior de la nave ( $t_p$ ). El contenedor de mercurio fue protegido con una chaqueta de la radiación. El rango de medición va de 0 a  $+50^{\circ}\text{C}$ , con una precisión de  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$
- Un termómetro infrarrojo del tipo PT-02LD (fabricado en 1.999) fue utilizado para leer la temperatura de superficie  $t_i$  en los puntos seleccionados y luego los datos fueron transferidos al ordenador. El rango de medición del termómetro infrarrojo va de  $-40$  a  $+200^{\circ}\text{C}$  y la precisión de medición fue de  $0,1^{\circ}\text{C}$ .
- Durante el experimento no se pudo monitorear la temperatura de la superficie de los tubos radiantes, que podía variar cuando disminuía la presión del gas. En caso que esto sucediera se apreciaba el cambio de color en la superficie del tubo radiante y se procedía a cambiar el cilindro por uno lleno.
- Durante la realización de los experimentos, se consideró una distribución uniforme de la temperatura del aire interior debajo del calefactor.
- Se considera que la radiación solar que entra por las ventanas tiene poco efecto en el cambio de la temperatura radiante.

Para proporcionar estabilidad térmica en la nave, durante la primera hora se encendieron los calefactores de alta temperatura radiante. Al final tuvo lugar un gran aumento de la temperatura radiante. Luego cada hora se tomó la lectura de la pantalla de los termopares (Cu-Constantan) instalados justo encima del suelo.



Figura 17. Nave industrial donde se realizó el estudio de los tubos radiantes [8]

#### 4.1.1.1. Resultados del experimento

En la figura 18 se pueden ver los resultados de la distribución de la temperatura radiante de forma axial y transversal, de tubos radiantes colocados a 5 metros de altura de 6 kW, 9 kW y 18 kW. Los resultados indican que el perfil de temperaturas es similar en ambas direcciones, tanto axial como transversal, las curvas casi se solapan. Lo que sí es indudable es que la temperatura disminuye al aumentar la distancia desde el centro del tubo radiante. También la temperatura justo debajo del centro del tubo radiante va a depender de su capacidad, por otro lado, las temperaturas a 5 metros del centro se observa que son similares para las tres capacidades.

En la figura 19 se puede ver la distribución de la temperatura radiante para un tubo radiante de 6 kW a una altura de 4 metros para un ángulo de  $0^\circ$ ,  $20^\circ$  y  $30^\circ$ , así como para un tubo radiante de 9 kW y otro de 18 kW, ambos a 5 metros de altura, para los mismos ángulos de inclinación. Se observa que el perfil de temperatura se mantiene más alto del lado inclinado cuando el tubo radiante está a  $20^\circ$  y  $30^\circ$  que cuando está a  $0^\circ$ . Esto permite que el tubo radiante inclinado se pueda colocar a una mayor altura. En la figura 17.5 se puede ver un tubo radiante inclinado a modo de ejemplo.



Figura 17.5. Tubo radiante inclinado

Otro aspecto que es importante resaltar es que la pendiente de disminución de la temperatura con la distancia, cuando el tubo radiante está inclinado es ligeramente menor que cuando está paralelo al suelo, lo que permite una distribución más uniforme de la temperatura radiante para el caso inclinado.

Del experimento analizado anteriormente se puede concluir lo siguiente:

- 1.- Para tubos radiantes de diferente capacidad colocados a la misma altura, la temperatura debajo del tubo radiante va a ser mayor para el de mayor capacidad y menor para el de menor capacidad. La temperatura a 5 metros del centro del tubo radiante va a ser similar para todas las capacidades, con variaciones de uno a tres grados, que no son significativas, siendo la mayor temperatura para el tubo radiante de mayor capacidad. Figura 18.
- 2.- Se consigue una mejor distribución de la temperatura radiante cuando se coloca el tubo radiante inclinado. Por otro lado la temperatura debajo del tubo radiante inclinado es menor que si estuviera paralelo al suelo. Figura 19.
- 3.- El perfil de temperaturas de un tubo radiante es igual o casi igual en el sentido axial (lado más largo) y en el sentido transversal (lado más estrecho). Figura 18.

- 4.- Cuando se colocan los tubos radiantes inclinados se pueden colocar a una altura más alta, ya que la caída de temperatura radiante con la distancia es menor que en los tubos radiantes paralelos al suelo. Figura 19.

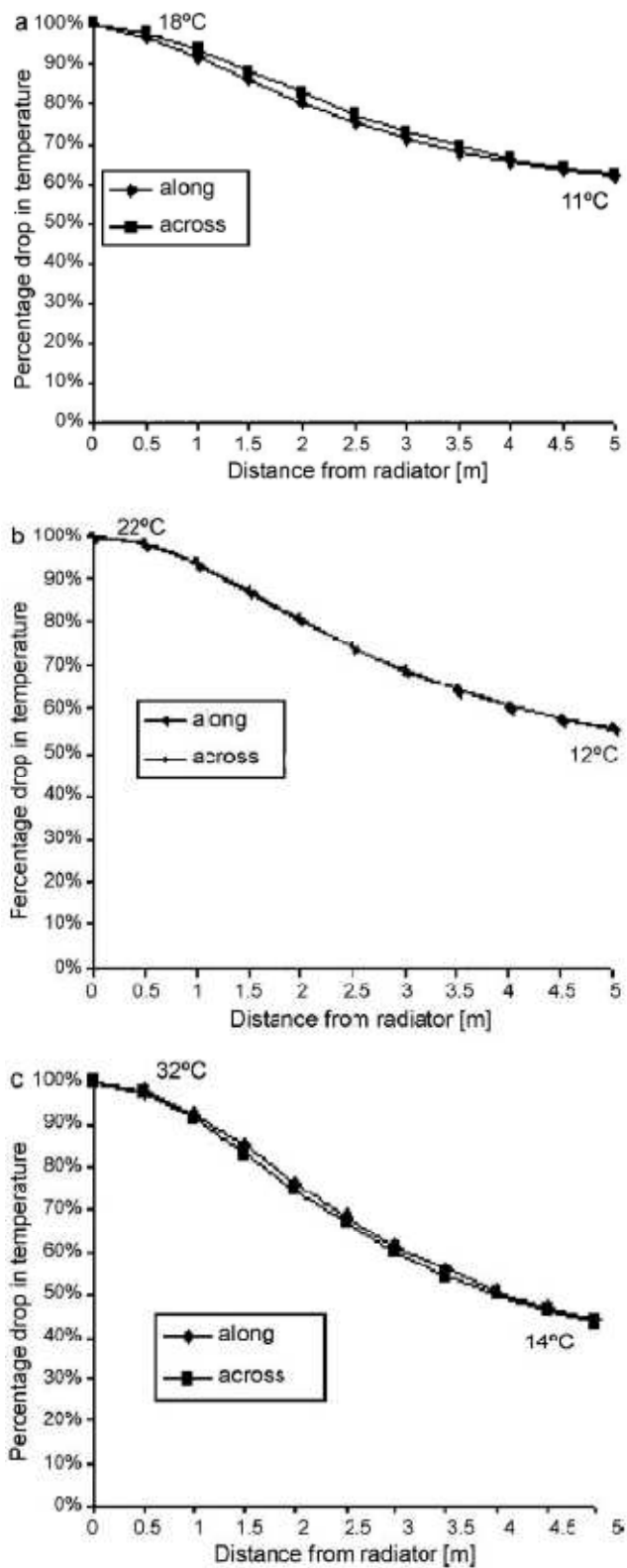
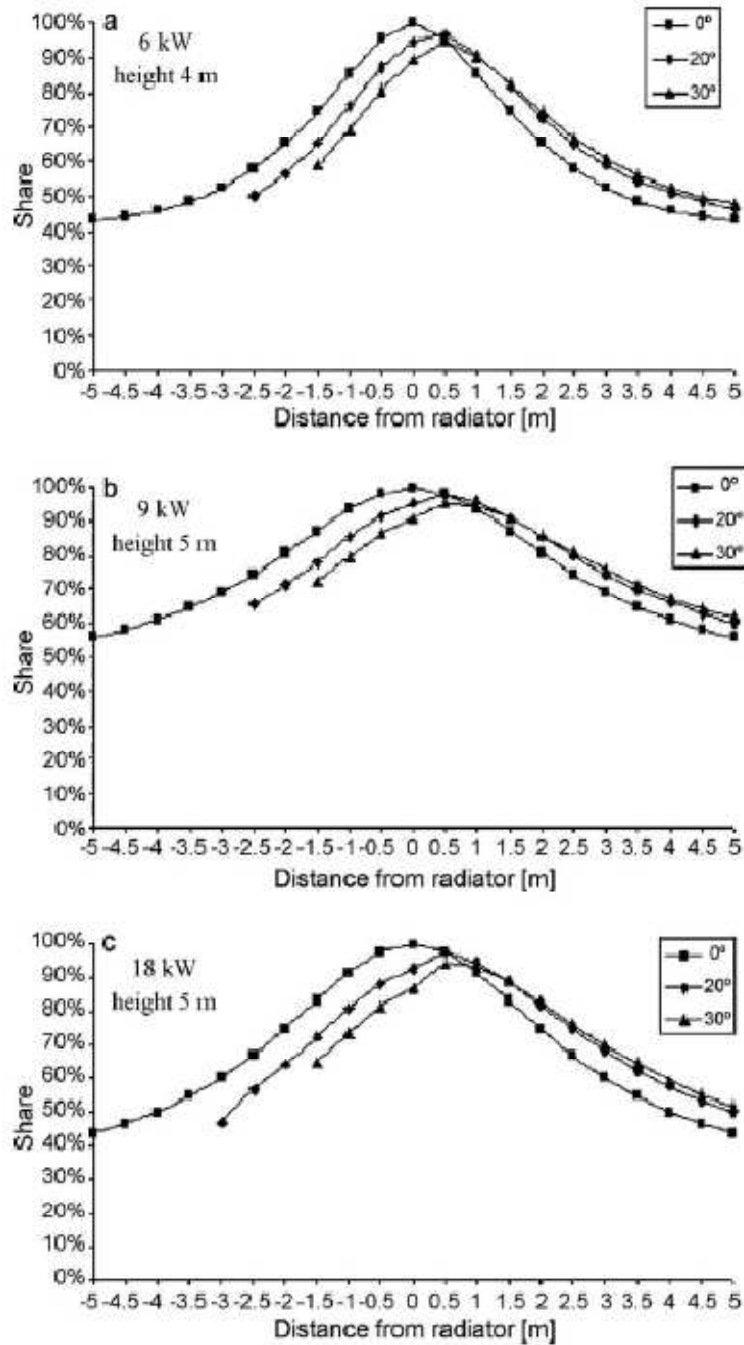


Figura 18. Distribución de la temperatura radiante de forma transversal y axial de un tubo radiante a 5 metros de altura de: a) 6 kW, b) 9 kW, c) 18 kW. [8]



**M**

Figura 19. Distribución de la temperatura radiante en relación al ángulo de suspensión del tubo radiante. [8]

#### 4.1.2. Medidas de ahorro en calefacción

De las conclusiones del experimento anterior se pueden deducir algunas medidas de ahorro importantes, al momento de diseñar un sistema de calefacción con tubos radiantes.

- Tomando en cuenta el punto 3, cuando se colocan los tubos radiantes en línea se puede aumentar la distancia entre ellos. Esto reduciría el número de tubos radiantes instalados y

evitaría sensaciones de disconfort por aumento de temperatura radiante debido al solapamiento de la radiación de los tubos radiantes contiguos. Esto reduciría el costo inicial de la instalación y el gasto de gas natural para la operación diaria.

- Tomando en consideración el punto 1, solo sería necesario colocar un tubo radiante de gran capacidad (18 kW) cuando la altura sea mayor a 5 metros, ya que debajo del tubo radiante se consiguen temperaturas de 32° C que no son confortables.
- Según 4 y 2, colocar el tubo radiante inclinado (20°, 30°) va a producir una mejor distribución de la temperatura y va a permitir que se pueda colocar a una mayor altura. Esta disposición evita las altas temperaturas radiantes debajo del calentador.

Para el caso en estudio la nave donde está colocada la línea de estampación tiene 21 tubos radiantes de 18 kW. Una parte importante de estos tubos (5) está colocada justo arriba de la línea de estampación donde solo hay operarios cuando se realiza el mantenimiento de las prensas mecánicas. Estos tubos se pueden mantener apagados ya que no contribuyen al confort de los operarios de la línea de estampación. Los otros tubos radiantes se pueden colocar inclinados a 30° para obtener un perfil de temperaturas más alto y una mejor distribución de la temperatura. Es cierto que apagar solo cinco calentadores no va a afectar el consumo total de gas y energía eléctrica de toda la fábrica, pero si este estudio se realiza en todas las zonas de trabajo el impacto en el ahorro será mayor y el confort de los empleados sin duda mejorará. Lo ideal sería hacer una prueba en la “zona 1”, con la instalación de tubos radiantes actual, midiendo la temperatura radiante en los puntos de mayor ocupación de operarios. Luego tomar las medidas de temperatura en los mismos puntos, después de apagar los tubos radiantes colocados en la parte superior de la línea de estampación y haciendo el trabajo de inclinar los otros tubos radiantes a 30°. Para poder comparar las temperaturas conseguidas en el interior, antes y después del cambio, es conveniente que las condiciones de temperatura exterior sean similares la noche y el día anterior a las medidas. El resultado del cambio en la “zona 1”, sería el ahorro de gas natural para el funcionamiento de 5 calentadores y la mejora de confort en la zona. La inversión que se tendría que hacer es el trabajo de inclinar los tubos radiantes, hasta 30°.



## CAPÍTULO 5. MEDIDAS DE AHORRO DE ENERGÍA EN ILUMINACIÓN

### 5.1. Motivación para cambiar la iluminación

Mejorar la iluminación en el lugar de trabajo tiene diversos efectos positivos en el desempeño de los trabajadores. En la literatura se pueden encontrar numerosos estudios en los que se ha medido el impacto del cambio de la iluminación en instalaciones industriales [11]. Muchos de estos estudios no están bien documentados, otros se nombran brevemente en algunos trabajos, otros son muy viejos, pero siguen vigentes. En la figura 20 se puede observar el resultado de varias investigaciones, donde casi todas demuestran un efecto de incremento en la producción, al mejorar la iluminación de las instalaciones industriales. Este gráfico no se puede utilizar para predecir el efecto del cambio en la iluminación de una instalación industrial, debido a las imprecisiones de las investigaciones y a la variedad de condiciones. Lo importante es que en casi todos los resultados hay una mejora en el rendimiento cuando se mejora la iluminación del ambiente de trabajo. Por otro lado, en la figura 21 se observa un gráfico que muestra cómo influye el cambio de la iluminación en la disminución de productos rechazados. En ambas graficas (figura 20 y 21) la línea punteada conecta el estado inicial y el estado final luego de la mejora.

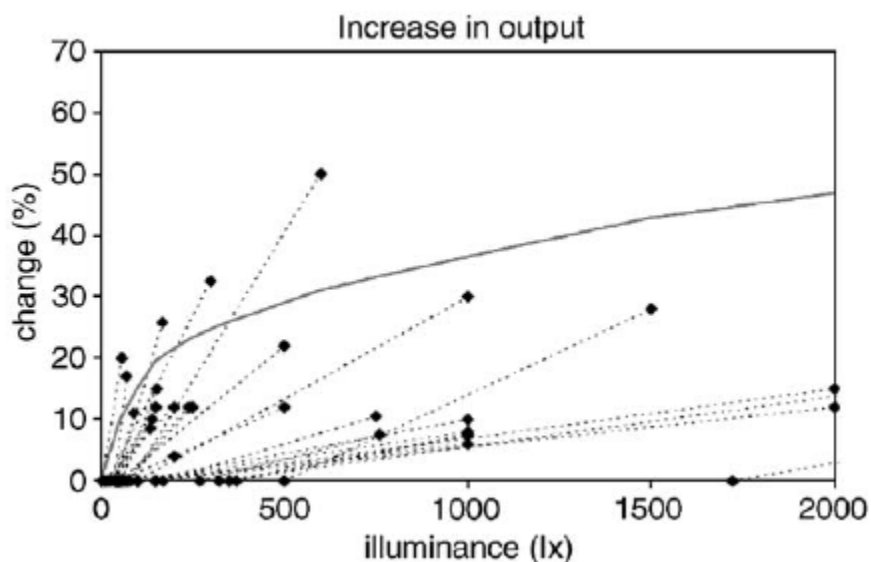


Figura 20. Efecto del cambio en la iluminación en el rendimiento productivo. Las líneas punteadas demuestran los resultados de los test individuales y la curva sólida demuestra el promedio de las pendientes. (29 casos). (Ruffer, 1925, 1927; Schneider, 1938; Goldstern y Putnoky, 1931; Bitterli, 1955; Stenzel, 1962a, b; Crouch, 1967; Lindner, 1975; Carlton, 1980). [11]

En la referencia [11] también se comentan una serie de mecanismos involucrados en el efecto del cambio de iluminación. Estos mecanismos pueden ser consultados en los anexos, en la parte 1.

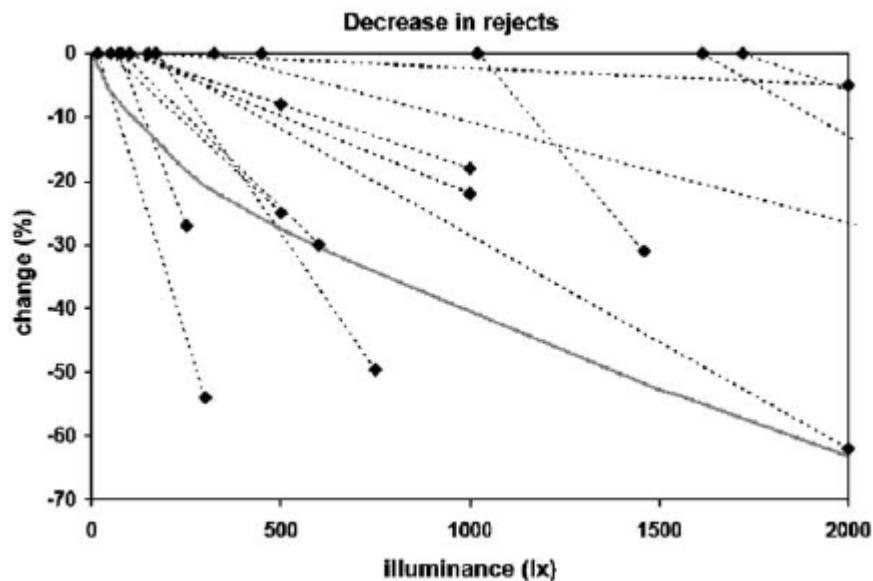


Figura 21. Efecto del cambio de la iluminación en el rechazo de productos. Las líneas punteadas demuestran los resultados de los test individuales y la curva sólida demuestra el promedio de las pendientes. (15 casos). (Goldstern y Putnoky, 1931; Schneider, 1938; Bitterli, 1955; Crouch, 1967; Lindner, 1975; Carlton, 1980; Buchanan et al., 1991) [11].

Otro aspecto muy importante a considerar es la temperatura del color, medida en kelvin [K]. Para demostrar qué tan importante es esta propiedad, se va a comentar un estudio realizado para medir la influencia de la temperatura del color en los trabajadores. El estudio completo se puede encontrar en la referencia [12], a continuación se describirá el experimento y los resultados más importantes del estudio.

Un total de 24 personas (20 hombres y 4 mujeres) voluntarias participaron en el estudio. Todos los participantes estaban alistados en la Armada de Infantería de los Estados Unidos en el Centro de Sistemas de la Armada en Natick, con una edad entre 18 y 30 años, todos con una agudeza visual normal y buena visión del color. Para realizar el experimento los participantes debían asistir cinco días consecutivos, de los 24 participantes, solo 15 pudieron conseguirlo porque sus horarios lo permitían, los otros 9 tuvieron sesiones separadas de 2 a 6 días debido a dificultades con los horarios. En la primera visita los participantes eran expuestos a la luz natural del día y en los siguientes cuatro días se colocaba un tipo diferente de luz artificial. Para controlar el ritmo circadiano, los participantes visitaban el lugar del experimento siempre a la misma hora del día, durante los cinco días del experimento. También estaban sometidos a un régimen de trabajo de igual cantidad de horas. Las luminarias utilizadas en el experimento fueron las siguientes: fluorescente (3.345 K), LED1 (4.175 K), LED 2 (5.448 K) y LED 3 (6.029 K). Las actividades que fueron evaluadas fueron las siguientes: dos tareas cognitivas (la tarea de planear una misión de forma verbal y una tarea de aprendizaje espacial de un mapa), tres tareas de agudeza visual y reconocimiento del color (platos pseudoisocromáticos, test de reconocimiento del tono del color de Farnsworth Munsell y el gráfico del ojo adaptado de Snellen) y adicionalmente, al comienzo y al final de cada experimento se hacía una medición del humor de los participantes a través de la forma estándar del Perfil del Estado del Humor (en inglés, The Profile of Mood States, POMS). El conjunto de experimentos se realizaba en una hora y media. La descripción de los experimentos en detalle se puede consultar en la referencia [12]. Las conclusiones fueron las siguientes:

- 1) El desempeño de una tarea de percepción visual muestra un tiempo de respuesta más rápido con una luz de mayor temperatura del color.

- 2) Las lámparas con temperatura del color más alta permiten generalmente incrementar el estado de alarma y disminuyen el estado de depresión generado por las bajas temperaturas del color que se consiguen con las lámparas fluorescentes tradicionales.
- 3) Las dos tareas cognitivas, una verbal y otra espacial, también muestran tiempos de reacción más rápidos en función de cuan alta sea la temperatura del color.
- 4) Se demostró a través de la batería de experimentos que dependiendo de la luz, se inducen mejoras en el estado del humor de los participantes, que permiten un tiempo de respuesta más rápido en tareas cognitivas.

## 5.2. Información previa para el análisis de la mejor opción de iluminación

En la actualidad hay diversas opciones en el mercado para reemplazar las lámparas ineficientes de alto consumo, por nuevas con un rendimiento mayor de lúmenes por kilovatio hora. En la industrial es común que las luminarias estén colocadas a gran altura. Cuando no es tan importante la definición del color las lámparas recomendadas son las de alta presión de sodio (HPS) y cuando el color es importante se recomienda utilizar las de halogenuros metálicos [13]. También, debido a la disminución de los precios de las lámparas LED se está viendo un aumento en su uso a nivel terciario y ya los fabricantes más importantes han comenzado a lanzar al mercado nuevos productos LED para aplicaciones industriales de gran altura. La idea de este apartado es analizar y comparar las características más importantes de las opciones de lámparas disponibles como: temperatura del color [K], flujo luminoso [lúmenes], inversión inicial [euros], consumo [kWh], durabilidad [horas], eficiencia [lúmenes/W], etc. En los anexos en la parte 2 se pueden encontrar las definiciones de algunas de estas características. También se dejará de lado por un momento el aspecto económico y se estudiará la conveniencia de instalar un sistema de lámparas de mayor consumo y de menor durabilidad, pero que a la larga se compensa por el aumento de la productividad en la fábrica. No siempre el sistema de lámparas de menor consumo es el mejor, hay que analizar el conjunto de los aspectos psicológicos y fisiológicos que permiten un mejor desempeño en el trabajador. Para comenzar el análisis se comentarán los niveles luminosos mínimos establecidos por el REAL DECRETO 486/1997 (BOE 23 abril 1997, núm. 97/1997).

En el anexo IV del REAL DECRETO 486/1997 (BOE 23 abril 1997, núm. 97/1997), [14], por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo en España, se puntualizan los niveles mínimos recomendados de intensidad luminosa en los lugares de trabajo. A continuación se presentan los valores recomendados en la tabla 3. Como información complementaria un lux es el resultado de dividir la cantidad de lúmenes suministrado por la(s) lámpara(s) entre el área total donde se proyecta la luz en metros cuadrados, por ejemplo si una lámpara es de 1.000 lúmenes y se coloca en un área de 1 metro cuadrado, entonces la iluminación será de 1.000 lux. En cambio si la misma lámpara se coloca en un área de 10 metros cuadrados la iluminación será de 100 lux.

También según el Real Decreto 486/1997, la iluminación de los lugares de trabajo deberá cumplir, además, en cuanto a su distribución y otras características, las siguientes condiciones:

- a) La distribución de los niveles de iluminación será lo más uniforme posible.
- b) Se procurará mantener unos niveles y contrastes de luminancia adecuados a las exigencias visuales de la tarea, evitando variaciones bruscas de luminancia dentro de la zona de operación y entre ésta y sus alrededores.
- c) Se evitarán los deslumbramientos directos producidos por la luz solar o por fuentes de luz artificial de alta luminancia. En ningún caso éstas se colocarán sin protección en el campo visual del trabajador.
- d) Se evitarán, asimismo, los deslumbramientos indirectos producidos por superficies reflectantes situadas en la zona de operación o sus proximidades.

e) No se utilizarán sistemas o fuentes de luz que perjudiquen la percepción de los contrastes, de la profundidad o de la distancia entre objetos en la zona de trabajo, que produzcan una impresión visual de intermitencia o que puedan dar lugar a efectos estroboscópicos.

**Tabla 3. Nivel mínimo de iluminación en lux según la zona o parte del lugar de trabajo**

Zona o parte del lugar de trabajo (*)	Nivel mínimo de iluminación en lux
1º Bajas exigencias visuales	100
2º Exigencias visuales moderadas	200
3º Exigencias visuales altas	500
4º Exigencias visuales muy altas	1.000
Áreas o locales de uso ocasional	50
Áreas o locales de uso habitual	100
Vías de circulación de uso ocasional	25
Vías de circulación de uso habitual	50

Fuente: Anexo IV Real Decreto 486/1997 (BOE 23 abril 1997, núm. 97/1997),[14].

\* El nivel de iluminación de una zona en la que se ejecute una tarea se medirá a la altura en que esta se realice; en el caso de zonas de uso general a 85 cm del suelo y en el de las vías de circulación general a nivel del suelo.

En la tabla 4 también se pueden ver niveles de iluminación recomendados para fábricas según otra fuente.

**Tabla 4. Niveles de iluminación recomendados para fábricas**

Tareas	Lux
Salas de control	500
Laboratorios	500
Oficinas de diseño gráfico	750
Montaje de precisión	1.500
Trabajo de precisión	1.000
Reparación e inspección	500
Almacenes	150
Limpieza, pulido, etc.	300

Fuente: [www.energytraining4europe.org](http://www.energytraining4europe.org)

Una de las mayores interrogantes a la hora de realizar el cambio del sistema de lámparas es seleccionar cuál es la mejor opción para el caso de estudio, pero qué debemos tomar en cuenta para determinar que una lámpara es mejor que otra. En la referencia [15] se muestra una metodología que permite comparar varias tecnologías de lámparas: LED, EEFL (lámpara fluorescente de electrodo externo), tubo fluorescente, bombillo incandescente y CFL (lámpara fluorescente compacta). Para hacer la comparación se asigna una puntuación del 0 al 1 a cada característica o factor de calidad considerado según el caso. Por ejemplo la lámpara que tenga mayor duración tendrá como valor de

factor de calidad 1 y la lámpara que dure la mitad del tiempo tendrá como factor de calidad 0,5. Entre las características consideradas están: costo, consumo, rendimiento del color, durabilidad, eficacia, eficiencia, distorsión total de armónicos (THD), factor de potencia (FP), reparación (piezas de recambio), deslumbramiento, contaminación y efectos biológicos. El subíndice “r”, quiere decir valor real de la lámpara considerada y “m” quiere decir valor máximo. A continuación en la tabla 5 se muestra el resultado del estudio.

**Tabla 5. Comparación del factor de calidad de varias tecnologías de lámparas [16]**

Parámetros reales	LED	EEFL	TUBO FLUORESCENTE	BOMBILLO INCANDESCENTE	CFL
<b>Ar</b> Factor de precio	+0.01	+0.00	+0.07	+1.00	+0.14
<b>Br</b> Factor de facturación	+1.00	+0.55	+0.77	+0.14	+0.58
<b>Cr</b> Factor de CRI	+0.75	+0.81	+0.65	+0.90	+0.65
<b>Dr</b> Eficiencia	+1.00	+0.64	+0.64	+0.09	+0.45
<b>Er</b> Eficacia	+1.00	+0.72	+0.83	+0.15	+0.66
<b>Fr</b> Duración	+0.50	+1.00	+0.20	+0.01	+0.10
<b>Gr</b> Factor de deslumbramiento	+0.00	+1.00	+0.00	+0.00	+0.00
<b>Hr</b> Factor de salud	+0.80	+0.50	+0.50	+0.90	+0.50
<b>Ir</b> Factor de Potencia	+0.60	+0.98	+0.60	+1.00	+0.60
<b>Jr</b> Factor de THD	+0.20	+1.00	+0.20	+1.00	+0.20
<b>Kr</b> Factor de recambios	+0.30	+0.50	+1.00	+0.00	+0.10
<b>Lr</b> Factor de contaminación	+0.90	+0.40	+0.30	+0.90	+0.40
<b>Mr</b> Factor ecológico	+1.00	+0.75	+0.64	+0.15	+0.49
$\Sigma$ (sumatoria de factores)	7.91	7.85	6.37	6.24	4.87
<b>Factor de calidad Q (%)</b>	<b>60.84</b>	<b>60.38</b>	<b>49</b>	<b>48</b>	<b>37.46</b>

Para calcular el factor de calidad se usa la siguiente expresión (3):

$$Q(\%) = \frac{A_r + B_r + C_r + D_r + E_r + F_r + G_r + H_r + I_r + J_r + K_r + L_r + M_r}{A_m + B_m + C_m + D_m + E_m + F_m + G_m + H_m + I_m + J_m + K_m + L_m + M_m} \times 100$$

$A_{real} = 23 \text{ Rs. (0,2 euros) / Precio de la lámpara (normalizado al precio de la lámpara incandescente más económica, por ejemplo 23 rupias = 0,2 euros)}$

$B_{real} = 0,096 \text{ Rs. (0,0008 euros) / rupias por hora de funcionamiento de la lámpara (normalizado al costo de funcionamiento más bajo de una lámpara LED, 0,096 Rs. / h [0,008 euros/hora])}$

$C_{real} = \text{CRI} / 99$  (Normalizado al CRI del LED)

$D_{real} = \text{Eficiencia} / 22$  (normalizado al LED al 22% de eficiencia)

$E_{real} = \text{Eficacia de la lámpara} / 113$  (normalizado a la eficacia del LED)

$F_{real} = \text{Vida de la lámpara (h)} / 100.000$  (normalizado a la vida de un electrodo de poca inducción LVD)

$G_{real} = 0$  (con deslumbramiento) y 1 (sin deslumbramiento)

$H_{real} = 0,5$  (Hg y efectos biológicos), 0,2-0,4 (Hg ó efectos biológicos, HV) y 1 (ningún efecto)

$I_{real} =$  Se coloca el factor de potencia más bajo conseguido por la lámpara

$J_{real} = 1$  para bajo THD, 0,2 – 0,3 para THD entre 32% - 78%, 0 para THD > 78%

$K_{real} = 1$  para facilidad de recambios, 0,2 – 0,3 por cambio, y 0 para reemplazo completo

$L_{real} = 1$  para seguro ambientalmente, 0,1 – 0,2 para IR/UV y 0 para emisiones suaves de rayos X

$M_{real} =$  Factor ecológico (la potencia más baja del LED dividido entre la potencia de otra lámpara equivalente)

Los valores máximos que van en el denominador de la expresión (3), se obtienen luego de calcular los valores reales y seleccionar el valor real máximo de cada categoría. Por ejemplo, para  $C_r$  el valor máximo es 0,9, por lo tanto el  $C_m$  será 0,9.

Según la tabla 5, se puede ver que la mejor opción según el porcentaje de factor de calidad más alto, son las lámparas LED, le siguen las EEFL (lámparas fluorescentes de electrodo externo), los tubos fluorescentes, los bombillos incandescentes y por último las CFL (lámparas fluorescentes compactas). La valoración de estas lámparas puede variar según el criterio que se utilice.

### 5.3. Análisis de la mejor opción de iluminación, estudio económico

Para elegir las lámparas que mejor se adapten a los requerimientos, se han investigado las características de varios tipos de lámparas. En los anexos, en la parte 3 se encuentran las características más importantes de las lámparas evaluadas. Los tipos de lámparas considerados han sido: vapor de mercurio de alta presión, vapor de sodio de alta presión, halogenuros metálicos y LED. Para facilitar la comparación de los tipos de lámparas se ha hecho una tabla para cada potencia de lámpara donde se han colocado las características técnicas más importantes. También se ha realizado una tabla donde se listan un grupo de luces LED con sus características más importantes. La idea es seleccionar un tipo de lámpara que cumpla con las especificaciones del lugar en estudio y que a su vez ahorre energía. También se va a analizar el caso cuando el ahorro no se da directamente por la reducción en el consumo de las lámparas, sino por el aumento de la productividad generado por las mejores condiciones de iluminación.

La zona en estudio es una sección de una nave industrial de 2.785 metros cuadrados y que tiene 33 campanas con lámparas de vapor de sodio de 400 W. Para la zona de trabajo se va a escoger de la tabla 3, un nivel de iluminación, entre exigencia visual moderada, 200 lux y exigencia visual alta, 500 lux. Se va a escoger un valor de 400 lux. La cantidad total de lúmenes requeridos sería la multiplicación del área en metros cuadrados por el valor de lux requerido. La intensidad luminosa requerida sería de 1.114.000 lúmenes. Si se tienen 33 luminarias, la intensidad luminosa por lámpara sería de 33.760 lúmenes. Otro aspecto importante es la temperatura del color de la luz, de esta forma se van a analizar varias opciones y las ventajas que tienen cada una.

### 5.3.1. Lámparas convencionales de vapor de sodio, vapor de mercurio y halogenuros metálicos

En la tabla 6.1 se puede ver la potencia, temperatura del color, índice de reproducción cromática, flujo luminoso y eficacia luminosa de las lámparas HID de 400 W investigadas. Las tecnologías de las lámparas son vapor de sodio de alta presión, vapor de mercurio de alta presión y halogenuros metálicos. Las lámparas que tienen la temperatura del color más baja son las de vapor de sodio de alta presión que van de 1.950 [K] a 2.100 [K], dependiendo del modelo. Una temperatura de color intermedia se consigue con las lámparas de vapor de mercurio de alta presión, que van de 3.500 [K] a 4.200 [K], según el modelo. El nivel más alto de temperatura del color se consigue con las lámparas de halogenuro metálico, 6.700 [K]. Como se comentó anteriormente, las lámparas con mayor temperatura del color aumentan el estado de alerta de los trabajadores y ayudan a mejorar el estado de humor, que en definitiva ayuda a mejorar los niveles productivos, se puede decir que desde el punto de vista de la temperatura del color las lámparas de halogenuro metálico serían las más favorables. Analizando el índice de reproducción cromática también las lámparas de halogenuro metálico serían las más favorables, ya que tienen el mayor índice (CRI=69), las de vapor de sodio de alta presión tienen el índice más bajo y las de vapor de mercurio de alta presión tienen un índice de reproducción cromática intermedio. En cuanto a la eficacia del uso de la energía, expresada en lúmenes por vatio, la mejor opción serían las lámparas de vapor de sodio de alta presión con 136,5 lúmenes/vatio. La opción menos eficaz sería las lámparas de vapor de mercurio de alta presión con 55-61 lúmenes/vatio y la opción intermedia sería la de halogenuro metálico con 82 lúmenes/vatio.

**Tabla 6.1 Características más importantes de las lámparas HID de 400 W. (Datos: ref. [19] y [20])**

Modelo	Marca	Forma	Tecnología	Potencia [W]	Temperatura del color [K]	Índice de reproducción cromática	Flujo luminoso @ 25°C [lm]	Eficacia luminosa @ 25°C [lm/w]
MASTER SON APIA PLUS Hg Free	Philips	Ovoidal	Vapor de sodio alta presión	400	2.100	25 (máx.)	53.600	134,0
MASTER SON APIA PLUS Xtra	Philips	Ovoidal	Vapor de sodio alta presión	400	1.950	25 (máx.)	55.400	136,5
MASTER SON APIA PLUS	Philips	Ovoidal	Vapor de sodio alta presión	400	2.000	25 (máx.)	55.400	136,5
MASTER HPI PLUS	Philips	Ovoidal	Halogenuro metálico	400	6.700	69	32.500	82,0
HPL Confort 400W	Philips	Ovoidal	Vapor de mercurio de alta presión	400	3.500	47	23.400	61,0
HPL-N 400W	Philips	Ovoidal	Vapor de mercurio de alta presión	400	4.200	50	22.000	55,0

De la tabla 6.2, se puede ver que en cuanto a la durabilidad al 50% de fallos, las lámparas de vapor de sodio de alta presión, son la mejor opción, las de vapor de mercurio de alta presión la peor opción y las de halogenuros metálicos se ubican en la posición intermedia. En cuanto al contenido de mercurio, la peor opción son las de vapor de mercurio de alta presión, la opción intermedia sería las de halogenuro metálico y la mejor opción las de vapor de sodio de alta presión. Tomando en cuenta el precio, la mejor opción serían las lámparas de vapor de mercurio de alta presión, la opción intermedia las de vapor de sodio de alta presión y la opción más desfavorable en cuanto al costo serían las de halogenuro metálico.

**Tabla 6.2 Características más importantes de las lámparas HID de 400 W, continuación. (Datos: ref. [19] y [20])**

Modelo	Marca	Forma	Tecnología	Potencia [W]	Vida al 5% de fallos [horas]	Vida al 50% de fallos [horas]	Luminosidad a las 20.000 horas de uso [%]	Contenido de Hg [mg]	Precio [euros]
MASTER SON APIA PLUS Hg Free	Philips	Ovoidal	Vapor de sodio alta presión	400	20.000	38.000	87	0	41,69
MASTER SON APIA PLUS Xtra	Philips	Ovoidal	Vapor de sodio alta presión	400	24.000	40.000	94	20	46,89
MASTER SON APIA PLUS	Philips	Ovoidal	Vapor de sodio alta presión	400	17.000	36.000	88	20	32,99
MASTER HPI PLUS	Philips	Ovoidal	Halogenuro metálico	400	5.000	20.000	60	67	52,99
HPL Confort 400W	Philips	Ovoidal	Vapor de mercurio de alta presión	400	6.000	20.000	a las 5.000 horas 80%	72	38,99
HPL-N 400W	Philips	Ovoidal	Vapor de mercurio de alta presión	400	6.000	16.000	a las 5.000 horas 85%	72	25,49

Ahora, si se asigna 1 punto para la mejor opción, 0,5 para la opción intermedia y cero para la peor opción, se obtiene la puntuación para cada lámpara según la característica técnica, como se muestra en la tabla 6.3.

**Tabla 6.3 Puntuación de lámparas de vapor de sodio de alta presión, vapor de mercurio de alta presión y halogenuros metálicos, según las características técnicas mencionadas.**

Característica técnica	Vapor de sodio de alta presión	Vapor de mercurio de alta presión	Halogenuro metálico
Temperatura del color [K]	0	0,5	1
Índice de reproducción cromática [RI]	0	0,5	1
Eficacia luminosa lúmenes/vatio	1	0	0,5
Durabilidad al 50% de fallos	1	0	0,5
Contenido de mercurio [mg]	1	0	0,5
Precio [euros]	0,5	1	0
<b>Total puntos</b>	<b>3,5</b>	<b>2,0</b>	<b>3,5</b>

En la tabla 6.3 se observa que la puntuación de las lámparas de vapor de sodio de alta presión es igual a la puntuación de las de halogenuro metálico. Ésta sería una valoración preliminar en cuanto a la tecnología, ahora hay que ver cómo se adapta la tecnología de vapor de sodio de alta presión y la de halogenuros metálicos a la instalación objeto de estudio. De este análisis quedan descartadas las lámparas de vapor de mercurio de alta presión.



En la tabla 6.4 se comentan las relaciones de euros por 1.000 lúmenes, euros por 1.000 [K] de temperatura del color y euros por 1.000 horas de uso. Cuando se dice euros se hace referencia al costo inicial de la lámpara. Se puede ver que la iluminación es más económica usando lámparas de vapor de sodio de alta presión, luego se igualan los costos cuando se trata de las lámparas de halogenuros metálicos y vapor de mercurio de alta presión. De forma inversa sucede con la temperatura del color donde es más económico con las lámparas de halogenuro metálico, de forma intermedia con las de vapor de mercurio de alta presión y muy alto el costo para las de vapor de sodio de alta presión. En cuanto a la durabilidad las lámparas de halogenuros metálicos presentan mayor costo, de forma intermedia las de vapor de mercurio de alta presión y el costo más bajo lo tienen las de vapor de sodio de alta presión.

**Tabla 6.4. Características más importantes de las lámparas HID de 400 W. Valores de euros/1.000 lúmenes, euros/1.000 [K] de temperatura del color, euros/1.000 horas de uso. (Datos: ref. [19] y [20])**

Modelo	Marca	Forma	Tecnología	Potencia [W]	Precio [euros]	euros/1.000 lúmenes	euros / 1.000 [K] temperatura del color	euros/ 1.000 horas
MASTER SON APIA PLUS Hg Free	Philips	Ovoidal	Vapor de sodio alta presión	400	41,69	0,78	19,85	1,10
MASTER SON APIA PLUS Xtra	Philips	Ovoidal	Vapor de sodio alta presión	400	46,89	0,85	24,05	1,17
MASTER SON APIA PLUS	Philips	Ovoidal	Vapor de sodio alta presión	400	32,99	0,60	16,50	0,92
MASTER HPI PLUS	Philips	Ovoidal	Halogenuro metálico	400	52,99	1,63	7,91	2,65
HPL Confort 400W	Philips	Ovoidal	Vapor de mercurio de alta presión	400	38,99	1,67	11,14	1,95
HPL-N 400W	Philips	Ovoidal	Vapor de mercurio de alta presión	400	25,49	1,16	6,07	1,59

En la tabla 6.5 se pueden ver las cantidades de lámparas necesarias para cumplir con la iluminación requerida de 400 lux y 500 lux. Es obvio que para mayor iluminación se va a requerir mayor cantidad de lámparas y mayor potencia. Lo que es interesante es ver cómo se requiere menor cantidad de lámparas usando la tecnología de vapor de sodio de alta presión, en promedio se requieren 20 lámparas para 400 lux y 25 para 500 lux. En cambio con vapor de mercurio se requieren en promedio 50 para 400 lux y 60 para 500 lux, más del doble de las lámparas requeridas de vapor de sodio de alta presión. Por otro lado, de las de halogenuros metálicos se requieren 34 para 400 lux y 43 para 500 lux. Por lo tanto la menor inversión inicial en lámparas se consigue colocando las de vapor de sodio de alta presión, también se ahorra en la compra de las campanas ya que serían menos cantidad de luminarias. La inversión inicial usando halogenuro metálico es más del doble que la inversión usando vapor de sodio de alta presión, pero estas lámparas tienen la ventaja de tener un mayor índice de reproducción cromática y mayor temperatura del color [K], que puede incidir en un aumento de la productividad y se puede compensar la inversión inicial. Las de vapor de mercurio de alta presión quedan descartadas por ser casi igual la inversión inicial a las de halogenuro metálico y por no ofrecer mayores beneficios.

**Tabla 6.5 Cantidad de lámparas HID de 400 W necesarias para un flujo luminoso de 400 lux y 500 lux, así como la inversión inicial en euros. (Datos: ref. [19] y [20])**

Modelo	Marca	Forma	Tecnología	Potencia [W]	Precio [euros]	400 lux	500 lux	400 lux	500 lux
						Cantidad lámp. 1.114.000 lúmenes	Cantidad lámp. 1.392.500 lúmenes	Inversión en lámparas [euros]	Inversión en lámparas [euros]
MASTER SON APIA PLUS Hg Free	Philips	Ovoidal	Vapor de sodio alta presión	400	41,69	21	26	866,47	1.083,08
MASTER SON APIA PLUS Xtra	Philips	Ovoidal	Vapor de sodio alta presión	400	46,89	20	25	942,88	1.178,60
MASTER SON APIA PLUS	Philips	Ovoidal	Vapor de sodio alta presión	400	32,99	20	25	663,37	829,22
MASTER HPI PLUS	Philips	Ovoidal	Halogenuro metálico	400	52,99	34	43	1.816,33	2.270,42
HPL Confort 400W	Philips	Ovoidal	Vapor de mercurio de alta presión	400	38,99	48	60	1.856,19	2.320,24
HPL-N 400W	Philips	Ovoidal	Vapor de mercurio de alta presión	400	25,49	51	63	1.290,72	1.613,40

En cuanto a la inversión inicial en campanas, se puede ver en la tabla 6.6 que la menor inversión inicial se consigue colocando la tecnología de vapor de sodio de alta presión, debido al menor número de lámparas requeridas y por lo tanto también de campanas. La opción de halogenuro metálico sería una opción intermedia y quedaría descartada la opción de vapor de mercurio de alta presión por ser la inversión inicial más alta. Otro punto importante es que con la opción de vapor de sodio de alta presión se ahorra en los costos de instalación, ya que son menos puntos de luz que con las otras opciones.

**Tabla 6.6 Inversión inicial en campanas requeridas con lámparas HID de 400 W, para un flujo luminoso de 400 lux y 500 lux. Se consideran dos modelos de campanas el CABANA 2 y el HPK080, ambas de la marca Philips. (Datos: ref. [19] y [20])**

Modelo	Marca	Forma	Tecnología	Potencia [W]	400 lux	500 lux	400 lux	500 lux	400 lux	500 lux
					Cantidad lámp. 1.114.000 lúmenes	Cantidad lámp. 1.392.500 lúmenes	Costo total campana CABANA 2 PHILIPS	Costo total campana CABANA 2 PHILIPS	Costo total campana HPK080	Costo total campana HPK080
MASTER SON APIA PLUS Hg Free	Philips	Ovoidal	Vapor de sodio alta presión	400	21	26	7.045,63	8.807,04	4.967,28	6.209,10
MASTER SON APIA PLUS Xtra	Philips	Ovoidal	Vapor de sodio alta presión	400	20	25	6.816,71	8.520,89	4.805,88	6.007,36
MASTER SON APIA PLUS	Philips	Ovoidal	Vapor de sodio alta presión	400	20	25	6.816,71	8.520,89	4.805,88	6.007,36
MASTER HPI PLUS	Philips	Ovoidal	Halogenuro metálico	400	34	43	11.002,89	13.753,62	8.192,18	10.240,23
HPL Confort 400W	Philips	Ovoidal	Vapor de mercurio de alta presión	400	48	60	16.138,72	20.173,40	11.378,03	14.222,54
HPL-N 400W	Philips	Ovoidal	Vapor de mercurio de alta presión	400	51	63	17.165,73	21.457,16	12.102,09	15.127,61

Haciendo un estudio de la potencia instalada, como se puede ver en la tabla 6.7, la opción de las lámparas de vapor de sodio de alta presión, es la que ofrece la menor potencia nominal instalada, seguida por la de halogenuro metálico. Se descarta la opción de las lámparas de vapor de mercurio de alta presión por ser más del doble la potencia instalada que con las de vapor de sodio de alta presión.

**Tabla 6.7 Potencia instalada utilizando lámparas HID de 400 W para una iluminación de 400 lux y 500 lux. (Datos: ref. [19] y [20])**

Modelo	Marca	Forma	Tecnología	Potencia [W]	400 lux	500 lux	400 lux	500 lux
					Cantidad lámp. 1.114.000 lúmenes	Cantidad lámp. 1.392.500 lúmenes	Potencia instalada [W]	Potencia instalada [W]
MASTER SON APIA PLUS Hg Free	Philips	Ovoidal	Vapor de sodio alta presión	400	21	26	8.313	10.392
MASTER SON APIA PLUS Xtra	Philips	Ovoidal	Vapor de sodio alta presión	400	20	25	8.043	10.054
MASTER SON APIA PLUS	Philips	Ovoidal	Vapor de sodio alta presión	400	20	25	8.043	10.054
MASTER HPI PLUS	Philips	Ovoidal	Halogenuro metálico	400	34	43	13.711	17.138
HPL Confort 400W	Philips	Ovoidal	Vapor de mercurio de alta presión	400	48	60	19.043	23.803
HPL-N 400W	Philips	Ovoidal	Vapor de mercurio de alta presión	400	51	63	20.255	25.318

Para complementar la información anterior se van a realizar tablas similares a la 6.5, 6.6 y 6.7, pero para lámparas de 250 W y se va a comparar con las de 400 W, para ver cuál sería la mejor opción.

**Tabla 7.1 Cantidad de lámparas HID de 250 W necesarias para un flujo luminoso de 400 lux y 500 lux, así como la inversión inicial en euros. (Datos: ref. [19] y [20])**

Modelo	Marca	Forma	Tecnología	Potencia [W]	Precio [euros]	400 lux	500 lux	400 lux	500 lux
						Cantidad lámp. 1.114.000 lúmenes	Cantidad lámp. 1.392.500 lúmenes	Inversión en lámparas [euros]	Inversión en lámparas [euros]
MASTER SON APIA PLUS Hg Free	Philips	Ovoidal	Vapor de sodio alta presión	250	34,74	38	47	1.303,04	1.628,80
MASTER SON APIA PLUS Xtra	Philips	Ovoidal	Vapor de sodio alta presión	250	39,49	36	44	1.405,49	1.756,86
MASTER SON APIA PLUS	Philips	Ovoidal	Vapor de sodio alta presión	250	26,99	36	44	960,60	1.200,75
MASTER HPI PLUS	Philips	Ovoidal	Halogenuro metálico	250	52,99	62	77	3.279,49	4.099,37
HPL Confort 250W	Philips	Ovoidal	Vapor de mercurio de alta presión	250	27,99	83	103	2.309,69	2.887,12
HPL-N 250W	Philips	Ovoidal	Vapor de mercurio de alta presión	250	16,99	88	110	1.490,30	1.862,88

Para lámparas de 250 W (tabla 7.1), la inversión inicial siempre será mayor a la de lámparas de 400W. El mayor incremento de la inversión se observa en las lámparas de halogenuro metálico de 250 W. De esta forma se descarta el uso de lámparas de 250 W.

**Tabla 7.2 Inversión inicial en campanas requeridas con lámparas HID de 250 W, para un flujo luminoso de 400 lux y 500 lux. Se consideran dos modelos de campanas el CABANA 2 y el HPK080, ambas de la marca Philips. (Datos: ref. [19] y [20])**

Modelo	Marca	Forma	Tecnología	Potencia [W]	400 lux	500 lux	400 lux	500 lux	400 lux	500 lux
					Cantidad lámp. 1.114.000 lúmenes	Cantidad lámp. 1.392.500 lúmenes	Costo total campana CABANA 2 PHILIPS	Costo total campana CABANA 2 PHILIPS	Costo total campana HPK080	Costo total campana HPK080
MASTER SON APIA PLUS Hg Free	Philips	Ovoidal	Vapor de sodio alta presión	250	38	47	12.002,69	15.003,37	8.964,51	11.205,64
MASTER SON APIA PLUS Xtra	Philips	Ovoidal	Vapor de sodio alta presión	250	36	44	11.389,14	14.236,42	8.506,26	10.632,83
MASTER SON APIA PLUS	Philips	Ovoidal	Vapor de sodio alta presión	250	36	44	11.389,14	14.236,42	8.506,26	10.632,83
MASTER HPI PLUS	Philips	Ovoidal	Halogenuro metálico	250	62	77	19.247,44	24.059,31	15.410,33	19.262,92
HPL Confort 250W	Philips	Ovoidal	Vapor de mercurio de alta presión	250	83	103	26.405,93	33.007,41	19.721,93	24.652,41
HPL-N 250W	Philips	Ovoidal	Vapor de mercurio de alta presión	250	88	110	28.069,29	35.086,61	20.964,25	26.205,31

En cuanto a las campanas requeridas para lámparas de 250 W (tabla 7.2), la cantidad siempre va a ser mayor que las requeridas por las de 400 W, por lo tanto la inversión inicial siempre será mayor con lámparas de 250 W. El mayor incremento de la inversión inicial en campanas, se consigue colocando lámparas de vapor de mercurio de 250 W, ya que es mayor la cantidad de lámparas a colocar. En cuanto a la inversión inicial en campanas también quedan descartadas las lámparas de 250 W.

**Tabla 7.3 Potencia instalada utilizando lámparas HID de 250 W para una iluminación de 400 lux y 500 lux. (Datos: ref. [19] y [20])**

Modelo	Marca	Forma	Tecnología	Potencia [W]	400 lux	500 lux	400 lux	500 lux
					Cantidad lámp. 1.114.000 lúmenes	Cantidad lámp. 1.392.500 lúmenes	Potencia instalada [W]	Potencia instalada [W]
MASTER SON APIA PLUS Hg Free	Philips	Ovoidal	Vapor de sodio alta presión	250	38	47	9.377	11.721
MASTER SON APIA PLUS Xtra	Philips	Ovoidal	Vapor de sodio alta presión	250	36	44	8.898	11.122
MASTER SON APIA PLUS	Philips	Ovoidal	Vapor de sodio alta presión	250	36	44	8.898	11.122
MASTER HPI PLUS	Philips	Ovoidal	Halogenuro metálico	250	62	77	15.472	19.340
HPL Confort 250W	Philips	Ovoidal	Vapor de mercurio de alta presión	250	83	103	20.630	25.787
HPL-N 250W	Philips	Ovoidal	Vapor de mercurio de alta presión	250	88	110	21.929	27.411

La potencia nominal instalada para lámparas de 250 W (tabla 7.3), siempre será mayor que la instalada para lámparas de 400 W, siendo mayor el incremento para las lámparas de halogenuro metálico de 250 W, seguida por las de vapor de mercurio de alta presión. También por potencia nominal instalada quedan descartadas las lámparas de 250 W.

### 5.3.2. Lámparas LED

En la tabla 8.1 se pueden ver las características técnicas más importantes de una selección de lámparas LED para aplicaciones de gran altura de varios fabricantes, Philips, Ofiled, Arezzo y HB Series (Módulos Led Osram). En cuanto a la temperatura del color se puede ver que la mayor llega a 6.500 [K] (LED HB Series) y la más baja llega a 3.000 [K] (marca Arezzo). Las lámparas Philips llegan a 4.000 [K]. El índice de reproducción cromática se mantiene con pocas variaciones para todos los modelos, con un promedio de 78 de CRI. La eficacia luminosa está entre 70 y 88,9 lúmenes por vatio.

**Tabla 8.1 Características de luminarias LED de varias capacidades y diferentes fabricantes para aplicaciones de gran altura. (Datos: ref. [20], [21], [22] y [23])**

Modelo	Marca	Forma	Tecnología	Potencia [W]	Temperatura del color [K]	Índice de reproducción cromática	Flujo luminoso @ 25°C [lm]	Eficacia luminosa @ 25°C [lm/w]	Durabilidad horas al 70% de luminosidad
Gentle Space	Philips	2 módulos	Led	145	4.000	76	11.720	81,0	75.000
		4 módulos	Led	292	4.000	76	23.440	80,0	75.000
LED-150W-OFILED	OFILED	Campana	Led	164	*	>75	14.266	87	50.000
LED-100W-EUROSUM	AREZZO	Campana	Led	100	3.000 /4.000 / 6.000	80	7.100	70	50.000
LED-120W-EUROSUM	AREZZO	Campana	Led	120	3.000 /4.000 / 6.000	80	8.800	70	50.000
HB-E40-WHT-120	HB SERIES	Foco	Led	120	2600-3200 K (LUZ CÁLIDA BLANCA) 5700-6500 K (LUZ DEL DÍA BLANCA)	*	10.500	87,5	35.000
HB-E40-WHT-180	HB SERIES	Foco	Led	180	2600-3200 K (LUZ CÁLIDA BLANCA) 5700-6500 K (LUZ DEL DÍA BLANCA)	*	16.000	88,9	35.000

\* Dato no disponible en el catálogo del fabricante

Sin embargo la mayor diferencia entre los modelos de lámparas LED estudiados, está en la durabilidad, siendo la Gentle Space de Philips la más duradera, con 75.000 horas, al 70% de luminosidad, les siguen las AREZZO y OFILED, con 50.000 horas de durabilidad y las HB Series con 35.000 horas de durabilidad.

En la tabla 8.2 se puede ver el costo unitario de cada modelo de luminaria, la inversión inicial en euros por cada 1.000 lúmenes y la inversión inicial en euros por cada 1.000 horas de uso. Si comparamos estos valores con los de las lámparas de HID de la tabla 6.4, se observa una gran diferencia. El valor más bajo de euros/1.000 lúmenes para lámparas HID es de 0,6 euros por cada 1.000 lúmenes y el más alto es de 1,67, en cambio para las luces LED el valor más bajo es de 37,29 euros por cada 1.000

lúmenes y el más alto de 91,72. Se está hablando de una diferencia de valores de casi 60 veces. Por otro lado para las lámparas de HID el valor más bajo de euros por 1.000 horas es de 0,92 y el más alto es de 2,65 euros por 1.000 horas. Para las luces LED el más bajo sería 10,64 euros por 1.000 horas y el más alto sería 24,53 euros por 1.000 horas. La diferencia de valores es de un promedio de 10 veces uno respecto al otro. Viendo solo estos dos valores característicos se puede decir que colocando LED la inversión inicial sería mayor que colocando lámparas HID.

**Tabla 8.2 Relación euros/1.000 lúmenes y euros/1.000 horas para luminarias LED para aplicaciones de gran altura. (Datos: ref. [20], [21], [22] y [23]).**

Modelo	Marca	Forma	Tecnología	Potencia [W]	Precio [euros]	euros/1.000 lúmenes	euros/1.000 horas
Gentle Space	Philips	2 módulos	Led	145	1075,00	91,72	14,33
		4 módulos	Led	292	1840,00	78,50	24,53
LED-150W-OFILED	OFILED	Campana	Led	164	532,00	37,29	10,64
LED-100W-EUROSUM	AREZZO	Campana	Led	100	535,12	75,37	10,70
LED-120W-EUROSUM	AREZZO	Campana	Led	120	785,32	89,24	15,71
HB-E40-WHT-120	HB SERIES	Foco	Led	120	636,00	60,57	18,17
HB-E40-WHT-180	HB SERIES	Foco	Led	180	780,00	48,75	22,29

Según la tabla 8.3 se puede ver que ningún modelo de LED estudiado contiene mercurio, lo que quiere decir que son amigables con el ambiente.

**Tabla 8.3 Características de luminarias LED de varias capacidades y diferentes fabricantes para aplicaciones de gran altura, continuación. (Datos: ref. [20], [21], [22] y [23])**

Modelo	Marca	Forma	Tecnología	Potencia [W]	Durabilidad horas al 70% de luminosidad	Luminosidad a las n horas de uso [%]	Contenido de Hg [mg]	Precio [euros]
Gentle Space	Philips	2 módulos	Led	145	75.000	40.000 horas (90%),	0	1075,00
		4 módulos	Led	292	75.000	75.000 horas (70%), 90.000 (50%)	0	1840,00
LED-150W-OFILED	OFILED	Campana	Led	164	50.000	50.000 horas (70%)	0	532,00
LED-100W-EUROSUM	AREZZO	Campana	Led	100	50.000	50.000 horas (70%) 20.000 horas (fuente potencia)	0	535,12
LED-120W-EUROSUM	AREZZO	Campana	Led	120	50.000	50.000 horas (70%) 20.000 horas (fuente potencia)	0	785,32
HB-E40-WHT-120	HB SERIES	Foco	Led	120	35.000	35.000 horas (70%)	0	636,00
HB-E40-WHT-180	HB SERIES	Foco	Led	180	35.000	35.000 horas (70%)	0	780,00

### 5.3.3. Comparación entre lámparas de tecnología convencional y LED

De la tabla 8.4 se puede ver la inversión inicial en luminarias LED para 400 lux y 500 lux, así como la potencia nominal instalada. La idea es comparar los datos de esta tabla con las tablas 6.5, 6.6 y 6.7 correspondientes a las lámparas HID. De la tabla 8.4, la inversión inicial más baja se consigue colocando luces LED-150W-OFILED, con un monto de inversión inicial de 41.542,69 euros para 400 lux y 51.928,36 euros para 500 lux. De la tabla 6.5 la inversión inicial más baja con HID se consigue colocando la MASTER SON APIA PLUS de Philips, con una inversión inicial de lámparas más campanas CABANA 2 (la opción de mayor precio) de 7.480,09 euros para 400 lux y 9.350,11 euros para 500 lux. Para el caso de 400 lux la inversión inicial en lámparas LED es 5,5 veces mayor y para 500 lux, igualmente. Ahora la inversión inicial más alta en luminarias LED se consigue instalando la Gentle Space de Philips, con una inversión de 102.180,03 euros para 400 lux y 127.725,04 euros para 500 lux. En el caso de las lámparas HID (tablas 6.5 y 6.6), la inversión inicial más alta se consigue instalando las lámparas de HPL-N 400W de vapor de mercurio de alta presión de la marca Philips con campanas CABANA 2, con una inversión inicial de 18.456,45 euros para 400 lux y 23.070,56 euros para 500 lux. También en ambos casos, para 400 lux y 500 lux la inversión inicial de luminarias LED es 5,5 veces mayor que la de las lámparas HID. Con todo que las lámparas LED duran el doble que las lámparas de vapor de sodio de alta presión de mejor calidad, nunca se compensaría el alto costo de las lámparas LED.

**Tabla 8.4 Cantidad de luminarias LED requeridas, inversión inicial y potencia instalada para una iluminación de 400 lux y 500 lux. (Datos: ref. [20], [21], [22] y [23])**

Modelo	Marca	Forma	Tecnología	Potencia [W]	Precio [euros]	400 lux	500 lux	400 lux	500 lux	400 lux	500 lux
						Cantidad lámp. 1.114.000 lúmenes	Cantidad lámp. 1.392.500 lúmenes	Inversión en lámparas [euros]	Inversión en lámparas [euros]	Potencia instalada [W]	Potencia instalada [W]
Gentle Space	Philips	2 módulos	Led	145	1075,00	95	119	102.180,03	127.725,04	13.782	17.228
		4 módulos	Led	292	1840,00	48	59	87.447,10	109.308,87	13.877	17.347
LED-150W-OFILED	OFILED	Campana	Led	164	532,00	78	98	41.542,69	51.928,36	12.806	16.008
LED-100W-EUROSUM	AREZZO	Campana	Led	100	535,12	157	196	83.961,08	104.951,35	15.690	19.613
LED-120W-EUROSUM	AREZZO	Campana	Led	120	785,32	127	158	99.414,37	124.267,97	15.191	18.989
HB-E40-WHT-120	HB SERIES	Foco	Led	120	636,00	106	133	67.476,57	84.345,71	12.731	15.914
HB-E40-WHT-180	HB SERIES	Foco	Led	180	780,00	70	87	54.307,50	67.884,38	12.533	15.666

Ahora hay que analizar el consumo de potencia que es en realidad el gasto mensual que va a producir el uso de las lámparas. De la tabla 8.4 para 400 lux usando LED, la potencia nominal más baja instalada sería de 12.533 [W] y la más alta sería de 15.690 [W], para 500 lux la potencia nominal más baja instalada sería de 15.666 [W] y la más alta de 19.613 [W]. De la tabla 6.7, para 400 lux usando lámparas HID la potencia nominal más baja instalada sería de 8.043 [W] y la más alta sería de 20.255 [W], para 500 lux la potencia nominal más baja instalada sería de 10.054 [W] y la más alta de 25.318 [W]. La potencia más alta instalada en las lámparas HID, tanto a 400 lux como a 500 lux, se consigue con las lámparas de vapor de mercurio de alta presión, que se descartaron desde el comienzo. Por lo tanto el valor anterior más alto lo tienen las lámparas de halogenuro metálico, para 400 lux, 13.711 [W] y para 500 lux, 17.138 [W]. De lo anterior se puede decir que la potencia nominal instalada con HID es menor tanto para 400 lux, como para 500 lux, con respecto a la tecnología LED, descartando la potencia instalada de las lámparas de vapor de mercurio de alta presión. Se puede concluir que la potencia nominal instalada es menor usando lámparas HID, tanto de vapor de sodio de alta presión, como de halogenuro metálico, en comparación con las lámparas LED.

Otro aspecto importante es el ahorro que se consigue en la instalación colocando las lámparas HID de vapor de sodio de alta presión, ya que son menos puntos de luz a colocar en comparación con los puntos de luz requeridos con las luminarias LED. La razón que se tengan que colocar más luminarias LED es que las prestaciones de estas lámparas son menores a las de vapor de sodio de alta presión, por lo que hay que colocar más lámparas para conseguir el nivel de iluminación requerido.

Lo que sí es un hecho es que las luminarias LED tienen una mayor reproducción cromática que las lámparas de vapor de sodio de alta presión. Una de las razones por las que las lámparas LED son todavía de baja potencia, es por el problema de la disipación del calor, al aumentar la potencia aumenta la cantidad de calor a disipar y si este calor no se logra disipar correctamente aumenta mucho la temperatura y esto incide directamente sobre la lámpara acortando su durabilidad. En los anexos en la parte 4 se amplía la información referente a la disipación de calor en las lámparas LED y cómo afecta su rendimiento.



Se puede decir que **no compensa económicamente en estos momento colocar luces LED en aplicaciones de gran altura**. La mejor opción son las lámparas de vapor de sodio de alta presión, siempre y cuando no sea muy importante la reproducción cromática. Para aplicaciones donde la reproducción cromática es importante se recomienda las lámparas de halogenuro metálico. Seguramente con el tiempo las lámparas LED van a seguir bajando de precio y se van a mejorar los dispositivos disipadores de calor, lo que va a permitir la construcción de lámparas de mayor potencia, un ejemplo del comienzo de estos avances es la lámpara Gentle Space de Philips que se puede ver en la figura 22. En la figura 23, también se puede ver la estructura para disipar el calor de las lámparas LED HB-Series.



Figura 22. Luminaria LED Gentle Space de Philips [20]



Figura 23. Lámpara LED HB Series (Modulo de Osram) [23]

Ahora, una vez descartadas las luces LED, las luces de halogenuro metálico pudieran ser una buena opción cuando se trata de conseguir una mayor temperatura del color. Como se comentó anteriormente se ha demostrado que una mayor temperatura del color ayuda a incrementar el estado de alerta de los operarios, incrementando la pro

ductividad. Es cierto que las lámparas de halogenuro metálico son más costosas y consumen más energía, pero este costo adicional puede ser ínfimo en comparación a las ganancias obtenidas con el aumento de la productividad. A continuación se muestran algunas cifras del estudio económico.

Para 400 lux, la inversión inicial de 20 lámparas de vapor de sodio de alta presión (942,88 euros) y 20 campanas CABANA 2 (6.816,71 euros), cuesta 7.760 euros. También para 400 lux, la inversión inicial de 34 lámparas de halogenuro metálico (1.816,33 euros) y 34 campanas CABANA 2 (11.002,89 euros), cuesta 12.819 euros. La inversión inicial colocando lámparas de halogenuro metálico sería 5.059 euros mayor que la inversión inicial de colocar lámparas de vapor de sodio de alta presión. También se tendrían que instalar 14 lámparas más de halogenuro metálico lo que incrementaría los costos de instalación. Por otro lado la potencia nominal de las lámparas de halogenuro metálico sería de 13.711 [W] y la de las lámparas de vapor de sodio de alta presión sería de 8.043 [W]. Esto implica que las de halogenuro metálico consumen 5.668 vatios más que las de vapor de sodio de alta presión. Suponiendo que las lámparas trabajan 20 horas al día durante 25 días al mes, se tendría un uso de 500 horas al mes, lo que supone un gasto adicional de las lámparas de halogenuro metálico de 2.834 kWh. Si calculamos que el kWh cuesta 12 centavos de euro, el gasto adicional por mes sería de 340 euros, usando las lámparas de halogenuro metálico. Otro aspecto que hay que considerar es que las lámparas de vapor de sodio duran el doble que las lámparas de halogenuro metálico. Entonces para hallar en realidad la diferencia de la inversión inicial se tendría que agregar el costo de las lámparas de reposición de halogenuro metálico (1.816,33 euros) más la diferencia de la inversión inicial entre los dos tipos de lámparas (5.059 euros). La diferencia de la inversión inicial sería de 6.875,33 euros. Las lámparas de vapor de sodio de alta presión duran en promedio 40.000 horas, que equivale a un uso de 6,67 años (80 meses), en cambio las de halogenuro metálico durarían 40 meses (3,33 años). Si se calcula el consumo adicional de las lámparas de halogenuro metálico durante 80 meses, daría 27.200 euros (340 euros\*80 meses) y si se añade el valor adicional de la inversión inicial (6.875,33 euros), daría un valor adicional de 34.075,33 euros para una luz de mayor temperatura del color que incide directamente en el aumento de la productividad. Esto daría un valor adicional de 5.108,75 euros por año. Con toda seguridad el aumento de la productividad va a conseguir ganancias superiores a los 5.108,75 euros al año. En el cálculo se ha despreciado el costo adicional de instalar 14 campanas más con respecto a las de vapor de sodio de alta presión, suponemos que este costo no afecta tanto el valor adicional, porque se hace con personal de mantenimiento de la propia fábrica. Este es un ejemplo de que colocando una opción de precio intermedio se pueden compensar los costos adicionales con el aumento de la productividad.

#### 5.4. Medidas recomendadas para ahorrar energía en iluminación

Para lograr ahorrar energía por iluminación se pueden seguir diferentes medidas, estas van a depender de la disponibilidad de recursos para ejecutar el proyecto de ahorro energético y del tiempo de retorno de la inversión que se quiera conseguir.

A continuación se sintetizan algunas medidas de ahorro, clasificadas en función del desembolso económico que suponen [16]:

- a) Medidas de nulo o bajo coste:
  - Limpiar las luminarias y pintar con colores claros las paredes y techos.
  - Reducir los niveles de iluminación hasta el mínimo recomendado para las actividades que se vayan a realizar en el recinto en cuestión.

- Aprovechar al máximo la luz natural, especialmente en nuevos edificios.
- b) Medidas que suponen una pequeña inversión inicial, pero que pueden amortizarse en pocos meses:
  - Sustituir siempre que sea posible, bombillas incandescentes por bombillas de bajo consumo y mayor vida útil.
  - Emplear temporizadores, detectores de movimiento o controladores del nivel de iluminación.
- c) Medidas con una inversión importante, pero que con todo pueden amortizarse en pocos años:
  - Instalar un nuevo sistema completo de iluminación diseñado para lograr los mínimos costes de operación.
  - Aumentar el tamaño de las ventanas o redistribuir las áreas de trabajo para aprovechar al máximo el uso de luz natural.
  - Instalar sistemas de control para iluminación, renovando cebadores de lámparas de descarga e incorporando bancos de condensadores para compensar la energía reactiva.

Si se desea rediseñar en forma eficiente el sistema de iluminación, es necesario tener en cuenta los siguientes puntos:

- Desarrollar un plan de iluminación para cada área. Hay que decidir qué nivel de iluminación y qué calidad es la adecuada basada en las actividades realizadas en cada área. (Más información en las normas ISO 8995 y DIN 5035).
- Considerar el uso de iluminación por focos para tareas específicas, permitiendo un menor nivel y/o calidad de iluminación de fondo.
- Medir la superficie de cada área de trabajo y calcular las necesidades energéticas de cada área. (Necesidades de iluminación (Lm) = nivel de iluminación (lux) x superficie a iluminar (m<sup>2</sup>)).
- Escoger un sistema de iluminación adecuado de acuerdo con la calidad requerida, características del área y el coste total a lo largo de su vida útil.
- Dividir las necesidades energéticas requeridas por la potencia de cada lámpara para determinar el número de lámparas necesarias.
- Tener en cuenta el color de las paredes. Normalmente las paredes blancas requieren menor iluminación que las oscuras ya que reflejan más la luz y provocan el efecto de expandir el espacio.

## CAPÍTULO 6. MEDIDAS DE AHORRO DE ENERGÍA EN AIRE COMPRIMIDO

### 6.1. Estudio del sistema de aire comprimido.

El uso de aire comprimido es común en la industria y en el sector de servicios y su producción y manejo es fácil y seguro. Sin embargo el costo de la energía en forma de aire comprimido es más alto que el costo de otras formas de energías, en la figura 24 se puede ver una comparación del costo de varios tipos de energía, como se puede observar, la energía en forma de aire comprimido duplica a la energía eléctrica y casi triplica al vapor. Se toma como regla, que se puede usar el aire comprimido en la industria cuando se consiguen ganancias significativas en la productividad, se mejora la seguridad y se reducen los tiempos de trabajo. Del total de la energía consumida por la industria en Europa y en Estados Unidos el 10% se destina para la producción de aire comprimido y en China es cerca del 9,4% del total [17].

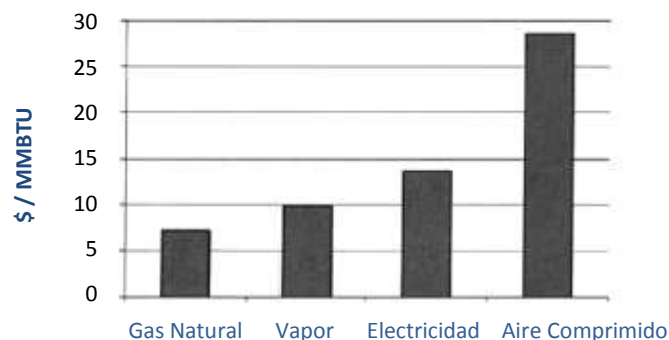


Figura 24. Costo de la energía según el tipo [17]

Para tener idea de cómo se reparten los costos durante el ciclo de vida de un compresor para producir aire comprimido se presenta la figura 25. Se puede observar que más del 75% de los costos se van en la energía consumida durante el uso del compresor. Los factores que más influyen en el costo de producción del aire comprimido son el tipo de control del compresor y el tamaño apropiado del compresor. En la mayoría de los casos, en la industria se le da mucha importancia a la energía perdida a través de superficies, por esa razón, se invierte tiempo y dinero en aislar superficies o mejorar el aislante ya colocado, pero no se presta atención a probablemente una de las fuentes de energía más costosas en las instalaciones industriales, el aire comprimido. Esta forma de energía se visualiza como algo que es gratis y solo se presta atención al cambio de filtros y fugas del sistema cuando baja la presión y esto influye directamente en el proceso productivo.

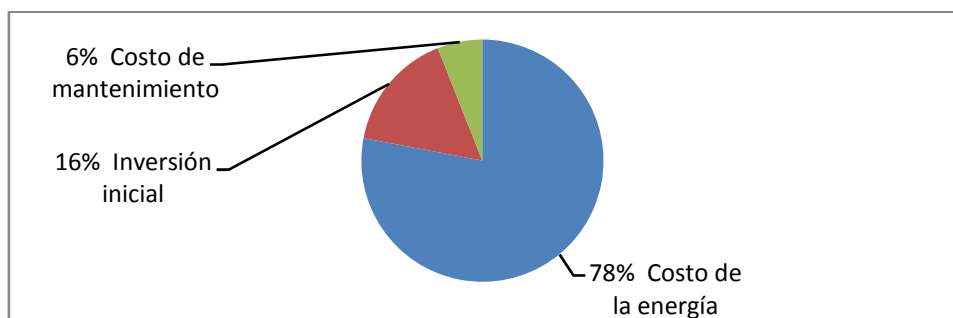


Figura 25. Costos durante el ciclo de vida de un compresor para producir aire comprimido [17].

Se ha demostrado que realizando pequeñas mejoras en el sistema de aire comprimido se consiguen grandes ahorros, con tiempos de retorno de inversión cortos. Entre las mejoras que se pueden realizar destacan: reducción de fugas, ajuste del suministro con la demanda, reducción de la presión si lo permite el proceso, usar un compresor más pequeño para cargas parciales, alimentar al sistema con aire proveniente del exterior a temperatura más baja, usar el calor generado por el sistema para calentar el aire para la calefacción de algunas áreas de la fábrica en invierno, usar motores de alta eficiencia, apagar el sistema en las noches y durante el descanso de almuerzo. En la figura 26 se puede ver el potencial de ahorro de energía que se puede conseguir con diferentes medidas.

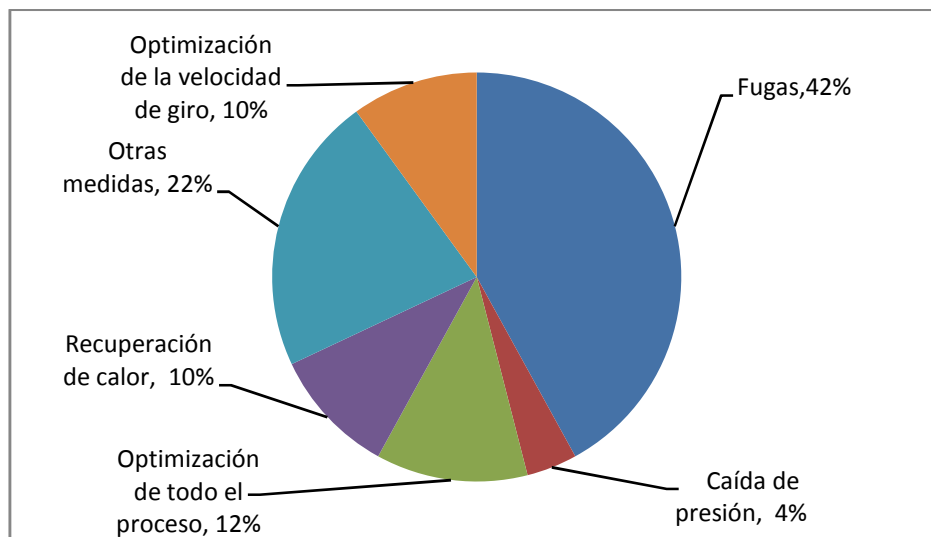


Figura 26. Potencial de ahorro de energía para diferentes opciones en la producción de aire comprimido [17].

Según la SMC Corporation [18], empresa dedicada a ofrecer productos para soluciones de ahorro de energía en sistemas de aire comprimido, recomienda los siguientes 10 puntos para disminuir el consumo en los sistemas de aire comprimido:

- Reduzca la presión de aire al mínimo necesario
- Adecue el tamaño de los componentes neumáticos a las necesidades reales de rendimiento
- Filtre y seque el aire de forma apropiada
- Use únicamente productos de calidad
- Mientras no se consuma aire comprimido aisle la línea de suministro mediante el uso de válvulas de dos vías
- Detenga el soplado de aire cuando no lo necesite
- Genere vacío usando eyectores multietapa con vacuostatos.
- Cuando sea posible seleccione componentes de bajo consumo energético
- Compruebe periódicamente el consumo de aire
- Evite y reduzca las fugas de aire

Por otro lado la referencia [17] cita las siguientes medidas que se pueden implementar para mejorar el sistema de aire comprimido:

- Usar motores de alta eficiencia
- Utilizar variadores de velocidad (VSD Variable Speed Drive)
- Prevenir fugas

- Reducir las caídas de presión
- Usar el calor del agua de refrigeración de los compresores
- Usar el aire exterior cuando está a menor temperatura que el aire interior

### 6.1.1. Ahorro de energía usando motores de alta eficiencia.

Con la mejora de los procesos de fabricación, los cambios en el diseño y materiales más adecuados, se ha logrado reducir las pérdidas de los motores eléctricos. Los motores de alta eficiencia pueden llegar a tener una eficiencia de 2 a 8% mayor que la de los motores estándar [17]. En la tabla 9 se puede ver la eficiencia de varios motores estándar y de alta eficiencia para varios modos de carga (50%, 75% y 100%).

**Tabla 9. Eficiencia de motores estándar y de alta eficiencia para varios estados de carga [17].**

HP	Incremento en el precio (US\$)	Carga 50%			Carga 75%			Carga 100%		
		E std	Eae	Eae-E std	E std	Eae	Eae-E std	E std	Eae	Eae-E std
1	21	70,05	75,28	5,23	74,43	79,49	5,06	77	81	3,97
1,5	25	76,04	80,06	4,02	78,03	81,28	3,25	78,5	82,55	4,05
2	27	77,20	80,02	2,82	79,29	83,07	3,78	81	84	2,55
3	60	77,78	82,44	4,66	79,87	84,55	4,68	81,5	85	3,51
4	61	81,07	83,69	2,62	82,39	85,24	2,85	82,9	86	3,06
5,5	68	81,15	84,35	3,20	84,73	86,50	1,77	85,3	88	2,45
7,5	91	84,07	85,51	1,44	86,23	87,58	1,35	86,61	90	2,89
15	100	84,92	88,32	3,40	86,45	89,85	3,40	87,94	90	2,50
20	111	86,03	88,51	2,48	87,58	91,05	3,47	88,95	92	2,69
25	186	87,61	90,26	2,65	88,39	91,66	3,27	89,5	92	2,30
30	273	88,43	90,89	2,46	89,32	91,73	2,41	90,7	92	1,13
40	371	88,15	90,39	2,24	90,54	91,91	1,37	90,36	93	2,49
50	678	89,63	91,16	1,53	89,86	92,58	2,72	92,06	93	1,22
60	887	87,89	90,07	2,18	91,31	92,09	0,78	91,78	93	1,22
75	1172	88,77	90,86	2,09	90,19	92,72	2,53	92,44	93	0,58

En la tabla 10 se puede ver el tiempo de retorno de la inversión en años, para varios motores de alta eficiencia de diferentes capacidades. Se puede observar que el tiempo de retorno de la inversión más bajo es de 0,53 años y el de mayor tiempo es de 5,72 años. Considerando que la vida útil media de los motores es de 20 años, el tiempo de retorno de la inversión en todos los casos es menor a la tercera parte de la vida útil del motor. Lo ideal es que el tiempo de recuperación de la inversión sea menor a 2 años. En la tabla se pueden ver varios casos donde se cumple esta condición.

**Tabla 10. Ahorro de energía y retorno de la inversión para motores de alta eficiencia [17]**

HP	Cant (Nº)	Incremento en el precio (US\$)	Carga 50%			Carga 75%			Carga 100%		
			Energía ahorrada (MWh)	Ahorro (US\$/año)	Retorno inv. (años)	Energía ahorrada (MWh)	Ahorro (US\$/año)	Retorno inv. (años)	Energía ahorrada (MWh)	Ahorro (US\$/año)	Retorno inv. (años)
1	3.968	24	74	4.370	2,05	96	6.118	1,59	127	8.158	1,19
1,5	331	21	6	394	1,8	7	458	1,55	10	611	1,16
2	1.653	25	28	1.814	2,25	53	3.421	1,19	71	4.562	0,89
3	2.976	27	122	7.798	1,02	174	11.115	0,71	232	14.873	0,53
4	13.556	60	393	25.169	3,22	620	39.675	2,04	827	52.900	1,53
5,5	331	65	16	1.022	2,1	12	792	2,71	16	1.056	2,04
7,5	661	91	19	1.194	5,05	25	1.598	3,77	33	2.131	2,83
15	165	147	21	1.351	1,8	31	1.957	1,24	41	2.609	0,93
20	3.306	197	404	25.888	2,52	811	51.883	1,26	1081	69.177	0,94
25	992	246	156	9.989	2,44	282	18.046	1,35	376	24.061	1,01
30	331	257	11	682	2,33	82	5.261	1,62	110	7.014	1,21
40	661	231	140	8.938	1,71	123	7.852	1,95	164	10.469	1,46
50	331	281	58	3.721	2,5	152	9.746	0,95	203	12.994	0,71
60	827	574	257	16.417	2,89	130	8.295	5,72	173	11.060	4,29
75	165	518	60	3.862	2,22	106	6.763	1,27	141	9.018	0,95

### 6.1.2. Ahorro de energía variando la velocidad

Muchos Sistemas de Aire Comprimido (SAC) están diseñados para operar a una carga del 100%, sin embargo la mayoría operan a carga total solo por cortos períodos, esto frecuentemente produce que el sistema sea ineficiente por largos períodos. Esta situación puede ser mejorada variando la capacidad del sistema para hacerla coincidir con la carga requerida en el momento. Como la potencia requerida por el motor, es función del cubo de la velocidad, una pequeña disminución de la velocidad produce grandes reducciones en la potencia. En la figura 27 se puede ver como varía la potencia consumida con la velocidad.

El método más usado es la modulación de la velocidad del motor, bomba, compresor o ventilador, usando variadores de velocidad (frecuencia). Los variadores de frecuencia proporcionan un control continuo, ajustando la velocidad del motor a la capacidad requerida en el momento. El uso de variadores de frecuencia es muy importante porque se consigue un ahorro de energía considerable y se reduce el mantenimiento del equipo.

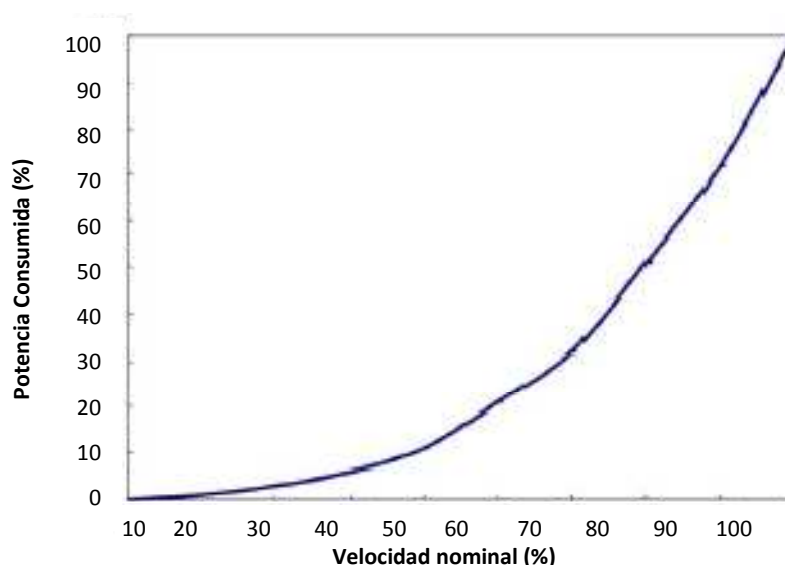


Figura 27. Relación entre la velocidad y la reducción de potencia consumida por el motor [17]

En la tabla 11 se puede ver como se ahorra en la factura de energía en US\$ implementando el variador de velocidad. En la tabla 12 se puede ver el tiempo de retorno de la inversión en años, para motores de diferentes capacidades que se les ha colocado un variador de velocidad. En esta tabla se puede observar claramente que para motores de baja capacidad el tiempo de retorno de la inversión es muy alto, por lo que la colocación del variador de velocidad no es viable para motores de estas capacidades, también se puede ver que mientras mayor es la reducción de la velocidad, el tiempo de retorno de la inversión disminuye y se hace más viable la inversión.

**Tabla 11. Ahorro de la factura (US\$) usando variador de velocidad [17].**

Potencia del motor HP	Reducción de la velocidad					
	10%	20%	30%	40%	50%	60%
0,25	7.295	14.590	20.227	24.205	27.521	29.511
0,5	3.655	7.311	10.135	12.129	13.790	14.787
0,75	6.239	12.478	17.300	20.703	23.539	25.240
1	25.020	50.040	69.373	83.020	94.393	101.216
1,5	3.120	6.239	8.650	10.351	11.769	12.620
2	20.797	41.595	57.665	69.009	78.462	84.134
3	56.342	112.683	156.220	186.952	212.562	227.928
4	341.832	683.664	947.806	1.134.260	1.289.638	1.382.865
5,5	11.439	22.877	31.716	37.955	43.154	46.274
7,5	31.196	62.392	86.498	103.514	117.694	126.202
15	16.071	32.141	44.559	53.325	60.630	65.013
20	417.206	834.412	1.156.799	1.384.366	1.574.005	1.687.789
25	155.980	311.959	432.489	517.569	588.469	631.009
30	62.392	124.784	172.996	207.028	235.387	252.403
40	166.378	332.757	461.322	552.073	627.700	673.076
50	103.986	207.973	288.326	345.046	392.312	420.672
60	313.850	627.700	870.220	1.041.411	1.184.070	1.269.666
75	773.970	1.547.940	2.146.008	2.568.173	2.919.978	3.131.060

**Tabla 12. Tiempo de retorno de la inversión para la reducción de la velocidad con variador de velocidad [17]**

Potencia del motor HP	Retorno de la inversión (en años) según la reducción de velocidad					
	10%	20%	30%	40%	50%	60%
0,25	113,79	56,89	41,04	34,29	30,16	28,13
0,5	58,28	29,14	21,02	17,56	15,45	14,41
0,75	39,77	19,89	14,34	11,99	10,54	9,83
1	30,52	15,26	11,01	9,20	8,09	7,54
1,5	21,27	10,63	7,67	6,41	5,64	5,26
2	16,64	8,32	6,00	5,02	4,41	4,11
3	12,02	6,01	4,33	3,62	3,19	2,97
4	9,70	4,85	3,50	2,92	2,57	2,40
5,5	7,81	3,91	2,82	2,35	2,07	1,93
7,5	6,47	3,23	2,33	1,95	1,71	1,60
15	4,62	2,31	1,66	1,39	1,22	1,14
20	4,15	2,08	1,50	1,25	1,10	1,03
25	3,88	1,94	1,40	1,17	1,03	0,96
30	3,69	1,85	1,33	1,11	0,98	0,91
40	3,46	1,73	1,25	1,04	0,92	0,86
50	3,32	1,66	1,20	1,00	0,88	0,82
60	3,23	1,61	1,16	0,97	0,86	0,80
75	3,14	1,57	1,13	0,95	0,83	0,78

### 6.1.3. Ahorro de energía mediante la prevención de fugas

Las fugas de aire son la principal causa de pérdida de energía en las instalaciones industriales de aire comprimido. El costo de las fugas de aire comprimido es el costo de la energía para comprimir el aire que se fuga, desde la presión atmosférica hasta la presión de trabajo.

La cantidad de aire que se fuga depende de:

- La presión de la línea
- De la temperatura del aire en el punto de la fuga
- La temperatura del aire a la entrada del compresor



- Del área de la fuga

Las fugas de aire por lo general ocurren en las juntas, conexiones de bridas, codos, reducciones, sistemas de válvulas, filtros, mangueras, válvulas de alivio, extensiones y equipos conectados a la línea de aire comprimido. La eliminación total de fugas es difícil de conseguir por lo que se considera como aceptable un promedio de 20% de fugas. El costo de la fuga de aire comprimido se incrementa exponencialmente con el diámetro de la fuga. En la figura 28 se puede ver la relación.

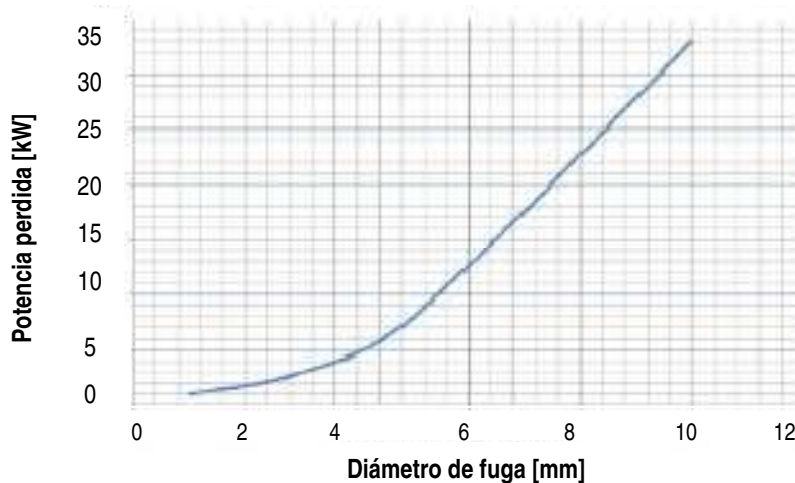


Figura 28. Dependencia de la pérdida de energía según el diámetro de la fuga a una presión de 600 KPa (6 bar). [17]

Cuando se detecta una fuga de aire, ésta debe ser reparada preferiblemente cuando la planta no está en operaciones, en otras ocasiones se le coloca una abrazadera alrededor de la zona de la fuga hasta que se puede realizar la reparación.

La mejor forma de detectar fugas es usando un detector acústico ultrasónico, que puede reconocer los silbidos de alta frecuencia asociados con las fugas de aire. El detector de fugas acústico ultrasónico es la principal herramienta que garantiza el éxito en los programas de disminución de fugas. Estos aparatos ayudan a detectar las fugas por mínima que sea y sin importar el ruido generado en la planta. En la figura 29 se puede ver un detector de fugas ultrasónico.



Figura 29. Detector de fugas ultrasónico [17]

En la tabla 13, se puede ver cómo influye el tamaño de la fuga en el volumen de aire perdido ( $m^3/año$ ) y la energía perdida ( $kWh/año$ ). Si se calcula que el kWh cuesta en promedio 9 céntimos de euro, se puede ver también en la tabla la pérdida en euros cuando la línea está a 6,9 bar. Según la ref. [17], el potencial de ahorro por disminución de fuga puede superar el 30% de ahorro.

**Tabla 13. Pérdida de aire y energía para diferentes tamaños de fuga**

Diámetro del orificio [cm]	Pérdida de aire (m <sup>3</sup> /año)	Pérdida de energía (kWh/año)	Pérdida euros/año
0,08	15.670	1.500	135,00
0,16	62.890	6.040	543,60
0,32	249.290	24.240	2.181,60
0,64	991.500	97.000	8.730,00
0,96	2.237.960	218.500	19.665,00

Nota: basado en operación continua y orificio a 6,9 bar (689,5 kPa). El costo promedio del kWh está calculado a 9 céntimos de euro.

#### 6.1.4. Ahorro de energía usando aire exterior.

Generalmente el sistema de aire comprimido toma el aire del recinto donde se encuentra. Cuando este aire se calienta, se expande y el compresor tiene que hacer más trabajo para comprimirlo. Por eso una opción de ahorro, es tomar el aire exterior cuando sea más frío que aire interior del cuarto. Esto hace que el compresor trabaje mucho menos. Se define como regla que por cada 3 °C de disminución, se ahorra un 1% de energía [17].

#### 6.1.5. Ahorro de energía debido a la caída de presión

En muchos casos, la presión del SAC se puede bajar mientras no afecte el rendimiento de los procesos de la planta. La mayoría de los sistemas tienen una aplicación crítica que determina la presión mínima de operación. La regla que se emplea es que por cada 13 kPa (0,13 bar) que se disminuya la presión de la línea de aire comprimido, se ahorra el 1% de energía [17]. En la tabla 14 se ve un ejemplo de cómo disminuye la potencia consumida con la disminución de la presión, para un compresor recíprocante de 150 hp. En la tabla 15 se ve también el efecto de la reducción de presión en la potencia consumida.

**Tabla 14. Consumo de potencia de un compresor alternativo de 150 hp a varias presiones de salida [17]**

Presión de salida (kPa)	Radio de Presión	Potencia (kW)
876,6	9,0	116,40
835,2	8,6	116,80
784,9	8,1	110,50
747,7	7,7	111,90
705,0	7,3	109,90
657,4	6,8	103,20
607,8	6,3	102,70
547,8	5,7	99,30
500,3	5,2	93,00
452,7	4,7	91,62
424,5	4,4	90,90

**Tabla 15. Efecto de la reducción de la presión de salida en la potencia consumida [17]**

Reducción de presión		Potencia ahorrada (%)		
Desde (kPa)	Hasta (kPa)	1 etapa- enfriado por agua	2-etapas enfriado por agua	2-etapas enfriado por aire
680	610	4	4	2,6
680	550	9	11	6,5

### 6.1.6. Ahorro de energía mediante recuperadores de calor

Entre un 80-93% de la energía usada por un compresor industrial es convertida en calor. En muchos casos, un recuperador de calor diseñado de forma adecuada puede recuperar de 50 a 90% de la energía térmica disponible y ponerla a disposición para el trabajo en forma de aire o agua caliente. La energía recuperada se destina para complementar la calefacción de la planta, para el calentamiento en los procesos industriales, para precalentar agua o aire para ser usada en los procesos industriales.

### 6.1.7. Ahorro de energía mediante boquillas eficientes

Un chorro de aire a alta velocidad crea un vacío parcial en el espacio de los alrededores, que atraerá el aire del ambiente hacia la corriente de aire. Este efecto ocurre en todas las corrientes o chorros de aire, incluyendo el aire comprimido existente en un tubo abierto. Este efecto puede ser corregido por una boquilla diseñada específicamente para amplificar el flujo de aire comprimido 25 veces. Las boquillas ahorradoras de aire tienen áreas de descarga más pequeñas que las áreas de entrada, así el flujo de aire comprimido proveniente del sistema es reducido instalando una boquilla ahorradora de aire. Según la ref. [17], reemplazando las boquillas viejas por boquillas ahorradoras, se logra disminuir el consumo de aire comprimido en las estaciones de trabajo. Se ha reportado en algunos trabajos (por ejemplo, el de Zeucher citado en la referencia [17]), que el uso de boquillas eficientes puede reducir el consumo de energía de un 30-60%. En la tabla 16 se puede ver el retorno de la inversión de un proyecto colocando boquillas ahorradoras.

**Tabla 16. Ahorro mediante la instalación de boquillas ahorradoras de aire [17]**

Ahorro anual		Dólares	Costo del proyecto	Retorno de la inversión
Recursos	CO <sub>2</sub> (lb)			
953.000 kWh	2.200.000	\$63.900	\$380	1 mes

### 6.1.8. Ahorro de energía por mantener limpias las superficies del compresor y el intercooling.

Los filtros del sistema de aire comprimido se utilizan para remover agua, aceite, vapor de aceite, sucio y otros contaminantes del sistema. Los filtros bloqueados incrementan la caída de presión del sistema y producen un incremento de la energía consumida. Por cada 0,14 bar de incremento en la caída de presión aumentan en 1% los costos de la energía consumida.

Las trampas de condensado recogen y remueven el líquido del SAC. Las trampas se colocan donde se recoge la humedad en el punto más bajo del sistema de distribución. La colocación inadecuada de las trampas o el mal funcionamiento de alguna de ellas, hace que se pierda energía y se comprometa el funcionamiento del sistema. Las trampas de operación manual son las menos efectivas porque requieren de un ajuste continuo para funcionar correctamente. Las de flotador mecánico y las trampas operadas por solenoide electrónico son las más efectivas. Las trampas de condensado requieren una inspección periódica para asegurarse de que éstas no fallen. Por ejemplo las trampas de condensado,

donde la válvula se queda abierta, porque se encuentra atascada, hace que se pierda aire comprimido al ambiente. Las trampas de condensado que permanecen cerradas por algún fallo, causan que el condensado regrese al sistema, pudiendo dañar componentes y hacer que caiga la presión.

Un mantenimiento inadecuado puede bajar la eficiencia de compresión e incrementar las fugas de aire y la variabilidad de la presión, esto permite que aumenten las temperaturas, que no se controle bien la humedad y se produzca una contaminación excesiva del sistema. Un mantenimiento adecuado reduce todos estos problemas y ahorra energía.

Un mantenimiento adecuado incluye los siguientes puntos:

- El bloqueo de los filtros del sistema de tuberías incrementa la caída de presión. Cuando la caída de presión en los filtros sea mayor a 0,14-0,20 bar, estos deben ser reemplazados y removidos los elementos de lubricación. Se debe considerar inspeccionar todos los elementos anualmente. También se puede considerar colocar los filtros en paralelo para disminuir la velocidad y de esta forma, disminuir la caída de presión. Se puede esperar un ahorro del 2% de la energía consumida por aire comprimido haciendo el cambio de los filtros de forma más frecuente.
- Se deben mantener limpias las superficies del compresor y del intercooler. Un enfriamiento pobre del motor puede incrementar la temperatura y la resistencia del devanado del motor, acortar la vida del motor y adicionalmente incrementar su consumo. Mantener el compresor y el motor lubricados correctamente y limpios. Se debe tomar una muestra del lubricante del compresor y este debe ser analizado cada 1000 horas (6 semanas aproximadamente) y se debe chequear que está en el nivel adecuado. Por otro lado la buena lubricación ayuda a evitar la corrosión y la degradación del sistema.
- Inspección de ventiladores y bombas de agua para conseguir el máximo rendimiento.
- Inspeccionar las trampas de condensado para asegurar que estas no están atascadas, esto ayuda a prevenir la pérdida de aire comprimido al ambiente y por lo tanto se ahorra energía, en el caso que se mantengan cerradas evita que se produzcan fallos en los elementos del sistema y que se produzca una caída en la presión.
- Si se usa compresores con correas, se deben chequear las correas y realizar el ajuste correspondiente. Una buena norma es hacer esta operación cada 400 horas de uso (cada quince días aproximadamente).
- Chequear la calidad del agua (pH y total de sólidos disueltos) del sistema de enfriamiento por agua, así como el flujo y la temperatura. Se deben de limpiar y cambiar los filtros de los intercambiadores de calor según las especificaciones del fabricante.
- Minimizar las fugas
- Colocar reguladores de presión que cierren cuando se exceda la presión del sistema
- Se debe hacer un estudio previo de los niveles de presión de aire comprimido requeridos por los equipos, de forma de no alimentarlos con una presión mayor, ya que esto acorta la vida de los equipos y hace que el mantenimiento sea más costoso. Una forma de adecuar la presión del aire comprimido al proceso, es a través de un regulador de presión antes de la entrada del equipo y en algunos casos es el equipo el que realiza internamente la regulación.

En la tabla 17 se muestran las medidas que han aplicado tres industrias diferentes para reducir el consumo de energía por aire comprimido. Lo que llama la atención, es que el periodo de recuperación de la inversión de las medidas que han realizado no excede los 1,2 años.

**Tabla 17. Ahorro de la energía consumida por aire comprimido y tiempo de retorno de la inversión para diferentes medidas de ahorro en diferentes tipos de industrias [17]**

Tipo de planta	Procesamiento de alimentos	Procesamiento de alimentos	Planta de cajas corrugadas
kWh ahorrados	925.400/año	1.897.700/año	573.180/año
Ahorro en los costos de energía	\$114.000/año	\$142.300/año	\$42.977/año
Costo del proyecto	\$128.000	\$167.900	\$13.140
Periodo de retorno de la inversión	1,1 años	1,2 años	0,3 años
Medidas seleccionadas	Control de capacidad adecuado	Instalación de un compresor más pequeño para períodos de menor producción	Control de capacidad adecuado
	Reemplazo de secadores y filtros		Remoción de secadores
	Instalación de tanque de aire	Reconfiguración de la tubería para reducir pérdidas de presión	innecesarios para la operación
	Distribución correcta de la tubería	Reemplazo de drenajes por válvulas activadas por nivel	Reemplazo de terminales con flujo libre por amplificadores tipo Venturi

## 6.2. Aplicación de algunas medidas en la empresa.

Una de las medidas que se han tomado en la fábrica en estudio, para disminuir la energía consumida por el sistema de aire comprimido, es la instalación de válvulas de dos vías en las líneas principales del sistema de aire comprimido, la idea de esta válvula es cerrar el suministro de aire comprimido de la línea principal mientras este no sea requerido, de esta forma no se pierde el aire comprimido a través de las fugas de la línea principal cuando no hay demanda. Con esta medida se ha logrado pasar de consumir el 13% de la energía en aire comprimido a consumir solo el 9%. Entre las medidas por realizar están: reparación de fugas, realizar mediciones de la temperatura de los motores del sistema de aire comprimido para ver si están trabajando de manera eficiente, en la temporada de invierno y otoño tomar el aire del exterior para disminuir el trabajo efectuado por los compresores, hacer un estudio de la presión mínima requerida por los procesos, para regular la presión del sistema de aire comprimido. Todo este plan de mejoras va acompañado del mantenimiento y limpieza programada de los equipos que componen el sistema de aire comprimido. Se espera que con la aplicación de estas medidas se consiga un ahorro de un 7% adicional. Si esto es así, se estaría hablando de un ahorro en energía del 11% respecto al consumo total al inicio.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### **Relativas al Modelo de la Energía incorporada al producto**

La aplicación del Modelo de la Energía Incorporada al Producto, requiere conocer en detalle el proceso de fabricación del producto y las entradas de energía que llegan al sistema.

La persona responsable de realizar las mediciones de consumos de energía, tiene que conocer los equipos de medición disponibles en el mercado y las técnicas de medición. También es valorable que tenga experiencia previa en trabajos de medición de consumos en instalaciones eléctricas industriales.

La medición de los consumos de energía se debe realizar siguiendo un programa de mediciones, elaborado previamente, que cumpla con los requerimientos del modelo de la EIP. De esta forma se hacen solo las mediciones que vayan a aportar algo a la implementación del modelo y no se desperdicia tiempo y dinero en mediciones sin sentido.

Para facilitar el trabajo de mediciones, es importante tener bien rotulados los cuadros eléctricos y disponer de planos de los diagramas eléctricos de todas las maquinarias involucradas en el estudio, así como las especificaciones eléctricas de éstas. También es importante disponer de un plano donde se visualice la distribución de las líneas eléctricas en la zona de producción. Por ejemplo, tener bien definido desde donde se alimentan las luminarias, la calefacción, los robots, la grúa, el motor, etc. Otra situación se da cuando la energía entra por un solo punto de la máquina y se quiere conocer como se distribuye entre sus elementos, en este caso, las mediciones se tendrían que hacer en los circuitos del interior de la máquina.

Las mediciones de consumos se deben realizar en intervalos de una hora. Por otro lado se tiene que recopilar la información de producción de la hora que se ha medido, por ejemplo, qué pieza se fabricó, de qué modelo, cuántas se hicieron, tanto buenas, como malas, hubo alguna parada de la línea, se requirió algún mantenimiento. La recopilación de la información de producción se puede realizar mediante sistemas automáticos de información de producción.

Los Sistemas de Gestión de Energía son una herramienta que bien utilizada facilitan el trabajo de medición de consumos para la implementación del modelo de EIP. Para ser bien utilizado el SGE, se debe diseñar previamente en función de los requerimientos de medición del modelo.

La aplicación del Modelo de la Energía Incorporada al Producto es muy importante porque permite enfocar los esfuerzos de ahorro en el área donde se está consumiendo más energía, de esta forma se rentabilizan las inversiones destinadas a conseguir la disminución del consumo de energía en la fábrica.

### **Relativas a las medidas de ahorro en la zona de producción**

Por muy pequeño que parezca el ahorro conseguido en un proceso, hay que ver que este se va a repetir muchas veces y entonces el ahorro se multiplica por las “n” veces que se haga el proceso. De esta forma es que se puede evaluar la importancia de la medida de ahorro implantada. Toda medida, por pequeño que sea el ahorro en el consumo de energía, es importante.

Se puede decir que las medidas que mayor ahorro de energía reportan son aquellas dirigidas a eliminar los movimientos innecesarios durante el proceso de fabricación, por ejemplo, minimizar los movimientos innecesarios de los robots y las carretillas. Otro grupo de medidas importantes es el mantenimiento de piezas clave como el embrague, filtros, etc., que ayudan al buen funcionamiento de las prensas.

Una forma de bajar los costos de producción de piezas estampadas en el futuro cercano se puede conseguir empleando la nueva generación de servoprensas. En las servo prensas no se requiere

volante de inercia, embrague, ni freno, todo el movimiento de la prensa (arranque, cambio de velocidad y parada) está controlado directamente por el servo motor. Entre las ventajas de esta prensa está la disminución del consumo de energía durante el estampado, debido a la reducción de las pérdidas por fricción en el embrague y freno, la energía almacenada durante la deceleración y a la optimización del movimiento de la prensa. Otro aspecto importante es que se pueden reducir los pasos de estampado gracias a que es posible incorporar operaciones adicionales dentro del troquel debido a los múltiples ejes de trabajo. Así mismo se reducen los tiempos de ciclo de trabajo. Otra ventaja de estas prensas es que se aumenta la calidad de acabado de las piezas y se logra mayor deformación del material sin llegar a la rotura. Esto es posible debido al control de la velocidad y aceleración de la prensa durante el golpe. Se puede en un mismo golpe deformar el material con diferentes aceleraciones, tanto positivas como negativas.

## **Relativas al análisis particular de la calefacción, iluminación y aire comprimido**

### **En relación a la calefacción**

Un sistema de calefacción por tubos radiantes se debe diseñar tomando en cuenta la altura de instalación para determinar la capacidad del tubo radiante más conveniente, así se evita un exceso de temperatura radiante justo debajo del calefactor, por otro lado se debe conocer el radio de acción del tubo radiante, para distribuirlos correctamente en el ambiente, de forma de no solapar la radiación de uno con la del otro, o dejar espacios sin radiación. Los experimentos demuestran que se consigue una temperatura similar a la misma distancia del centro del tubo radiante, tanto de forma longitudinal, como de forma transversal.

Cuando se coloca el tubo radiante ligeramente inclinado a  $20^\circ$  ó  $30^\circ$ , los experimentos han demostrado que se consigue aumentar la temperatura radiante conseguida, esto permite colocar el tubo radiante a mayor altura. Otro punto a favor de colocar los tubos radiantes inclinados, es que la temperatura decae con una pendiente más suave, respecto al centro del aparato, así se consigue una distribución más uniforme de la temperatura radiante.

Los factores más importantes que se deben tomar en cuenta para el ahorro en calefacción son: (i) la capacidad del tubo radiante [kW]: una selección correcta de la capacidad garantiza que la energía consumida produce el nivel de confort óptimo requerido por los trabajadores, en cambio una capacidad excesiva consume más energía y produce más bien discomfort, (ii) el radio de acción del tubo radiante se debe considerar para distribuirlos correctamente, sin dejar zonas sin radiación o por el contrario solapar las radiaciones de dos o más calefactores, (iii) Inclinación de los tubos radiantes: se pueden inclinar los tubos radiantes para conseguir un aumento de la temperatura radiante.

Para evaluar las medidas de ahorro por calefacción, lo ideal sería realizar una prueba en la zona en estudio cambiando la inclinación de los tubos radiantes y apagando los que estén en la parte de arriba de la prensa, para ver el comportamiento de la temperatura antes y después del cambio y evaluar si en realidad compensa. Quizá con el cambio, el ahorro en gas no sea significativo, pero sí se puede conseguir un aumento en la productividad mejorando el confort de los trabajadores.

### **En relación a la iluminación**

Se ha demostrado según varios estudios, que aumentando la temperatura del color de la luz se aumenta el nivel de alerta de los trabajadores y por lo tanto se aumenta la productividad y se disminuye la cantidad de piezas rechazadas.

Las lámparas de vapor de sodio de alta presión son la opción con la inversión inicial más baja y la menor potencia nominal instalada, el único inconveniente es que la temperatura del color es muy baja, no superando los 2.100 [K].

Se han descartado las lámparas de vapor de mercurio de alta presión por ser la potencia nominal instalada más del doble que las de vapor de sodio de alta presión y por requerirse más del doble de lámparas.

Se han descartado las lámparas LED, debido a que la potencia nominal instalada siempre es un poco mayor que las lámparas HID y debido a que la inversión inicial es 5,5 veces mayor. Otro punto desfavorable es que se necesitan más cantidad de lámparas LED para conseguir el mismo efecto de iluminación, en algunos casos más del doble.

Colocando lámparas de halogenuro metálico se logra aumentar la temperatura del color a 6.700 [K], pero a un costo adicional de 5.108,75 euros al año con respecto a las lámparas de vapor de sodio de alta presión, considerando tanto la inversión inicial adicional como la potencia nominal instalada adicional. Es claro que la inversión se recupera con las mejoras que se pueden conseguir en la productividad de los trabajadores al incrementar su estado de alerta por el aumento de la temperatura del color.

Para el caso en estudio, si se cambian las lámparas actuales de vapor de sodio de alta presión por lámparas de halogenuro metálico, los estudios indican que debería aumentar la productividad. Si se lograra aumentar la productividad, se estaría bajando el costo por pieza en energía indirecta, como iluminación y calefacción, y por otro lado se reduciría el costo en mano de obra por pieza producida, como resultado de la reducción del tiempo de producción. Sería ideal poder hacer una prueba piloto en la fábrica cambiando las lámparas de vapor de sodio de alta presión, por halogenuro metálico, solo en el área en estudio, para ver cómo influye el cambio de temperatura de color en los trabajadores.

### **En relación al aire comprimido**

El cambio a motores de alta eficiencia es viable para los sistemas de aire comprimido, debido a que el tiempo más desfavorable de retorno de la inversión es de 5,7 años, considerando que un motor puede durar en promedio 20 años, compensa hacer el cambio. El tiempo más corto de recuperación de la inversión es de medio año.

Colocar un variador de frecuencia es viable para motores por encima de 1,5 kW. Por el contrario el tiempo de recuperación de la inversión para motores de baja capacidad es muy alto, pudiendo llegar en el peor de los casos, a 113,75 años para un motor de 0,2 kW, considerando que un motor dura en promedio 20 años, no es viable desde ningún punto de vista. Otro aspecto importante, es que mientras mayor es la reducción de la velocidad y mayor la capacidad del motor, menor es el tiempo de recuperación de la inversión.

Reparar las fugas del sistema de distribución de aire comprimido siempre es una buena opción para ahorrar energía. Por ejemplo una fuga de un centímetro de diámetro a 6,7 bar, puede generar pérdidas de 20.000 euros al año, esto es más o menos el sueldo que cobra un trabajador de una fábrica en un año. Quiere decir que por cada fuga de un centímetro que reparamos se tendría el dinero para pagar el sueldo de un año de un trabajador de la fábrica. Viéndolo así, reparar las fugas compensa desde todo punto de vista. Estudios avalan que con la reparación de fugas se puede llegar a ahorrar hasta el 30% de energía.

Trabajar con el aire exterior a temperatura más baja, hace que por cada 3º C de diferencia de temperatura se ahorre en promedio el 1% de la energía total.

Ajustando la presión de trabajo, hace que por cada 13 kPa (0,13 bar) que se disminuya la presión, se ahorre en promedio el 1% de la energía total.

Otras medidas, como la instalación de boquillas eficientes, el aprovechamiento del calor generado por el sistema de compresores usando un inter-cooler para calentar agua o aire, la limpieza de las superficies del intercooler y los compresores, el cambio oportuno de filtros y la revisión de trampas de condensado, son algunas medidas que también ayudan a ahorrar energía.



El potencial de ahorro en aire comprimido es muy grande y son muchas las medidas que se pueden implementar para conseguirlo. Se puede decir que el potencial de ahorro en aire comprimido es mayor que el conseguido en iluminación y calefacción.

Un ahorro en la generación de aire comprimido, implica un ahorro en el costo de fabricación de piezas estampadas, ya que las prensas mecánicas utilizan el aire comprimido como energía auxiliar para llevar a cabo el proceso de estampación.

## **Aportaciones al proyecto**

Se demuestra que las medidas de ahorro de energía en iluminación, calefacción y aire comprimido son viables.

Para la iluminación: se demuestra a través de un experimento que se consiguen mejoras en la productividad cuando se aumenta la temperatura del color de la luz. Se determina cual es la mejor opción en estos momentos para iluminar naves industriales de gran altura según el criterio de menor costo de inversión inicial y ahorro de energía y también según la opción de costo intermedio pero con aumento de la productividad por el incremento de la temperatura del color.

Para la calefacción: se demuestra a través de un experimento que haciendo pequeños ajustes en la orientación de los tubos radiantes se consiguen mejoras en la distribución de temperaturas, que hace aumentar el confort de los trabajadores.

Para el aire comprimido: se demuestra el tiempo de recuperación de la inversión para varias medidas de ahorro. Con esta información se puede enfocar la atención y los recursos en la medida que consiga mayor ahorro y la que permita recuperar la inversión en el menor tiempo posible.

Se desglosa la energía requerida para fabricar una pieza estampada, para aplicar el modelo de la EIP. Esta información puede ser tomada como guía para hacer futuros trabajos de medición para aplicar el modelo.

Se proponen algunas medidas de ahorro para el proceso de fabricación de piezas estampadas.

Se profundiza en cómo se genera la fuerza en las prensas mecánicas. Esta información a veces no está clara y se piensa que la prensa siempre aplica la fuerza para la que ha sido diseñada, por ejemplo 400 Tm y en realidad la prensa da la fuerza que le pide el proceso de estampación hasta los límites de diseño.

## **Sugerencias para desarrollos futuros**

Considerar como una opción de ahorro de energía el uso de las servoprensas para el desarrollo de nuevos proyectos de piezas estampadas.

Para realizar las mediciones de consumos se recomienda la instalación de un Sistema de Gestión de Energía (SGE), teniendo claro previamente las necesidades de medición para aplicar el modelo de EIP. Esto es porque luego de estar instalado el sistema cuesta más realizar cualquier cambio, tanto a nivel de instalación física como de programación.

Se recomienda realizar una prueba colocando lámparas de halogenuro metálico en una zona específica de la fábrica para evaluar el desempeño de los trabajadores y si es posible realizar mediciones del estado de ánimo, para comprobar que en realidad se consigue alguna mejora en la productividad colocando este tipo de lámparas.

Se recomienda también hacer en una zona de la fábrica pequeños cambios en la orientación de los tubos radiantes para ver las mejoras en la distribución de la temperatura. Si las mejoras son considerables, se puede pensar en tomar estas medidas en toda la fábrica. En este caso se mediría la mejora, según aumente el confort de los trabajadores luego de los cambios.

Para ahorrar energía en aire comprimido se recomienda como primera opción realizar un buen mantenimiento del sistema y corregir las fugas de mayor tamaño en las líneas. La opción de disminuir la presión de trabajo si el sistema lo permite y reemplazar las boquillas actuales por boquillas de alta eficiencia también se pueden considerar como medidas importantes.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Abdelaziz E.A., Saidur R., Mekhilef S. "A review on energy saving strategies in industrial sector". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011), pp. 150-168. Journal homepage: [www.elsevier.com/locate/rser](http://www.elsevier.com/locate/rser)
- [2] Seow Y., Rahimifard S. "A framework for modeling energy consumption within manufacturing systems". *CRIP Journal of Manufacturing Science and Technology* 4 (2011), pp. 258-264. Journal homepage: [www.elsevier.com/locate/cirpj](http://www.elsevier.com/locate/cirpj)
- [3] He Y., Liu F., Wu T., Zhong F-P, Peng B. "Analysis and estimation of energy consumption for numerical control machining". *Proc. IMechE Vol. 226 Part B: Journal Engineering Manufacture* (2011), pp. 255-266.
- [4] Kalpakjian, Serope y Schmid, Steven R.: "Manufactura, Ingeniería y Tecnología". Cuarta Edición. Prentice-Hall. México 2.002, pp. 432-434 y pp. 357-360.
- [5] Domínguez Aragón Javier: "Formación en Equilibradores". Noviembre 2.003. Gestamp Palencia.
- [6] Curso de Prensas Departamento de Mantenimiento Gestamp Palencia.
- [7] Manual de Instrucciones 1/4 (M98232301-01-10A). SOFTWARE DE GESTIÓN ENERGÉTICA POWERSTUDIO SCADA Versión 3.0. [www.circutor.es](http://www.circutor.es)
- [8] Dudkiewicz Edyta, Jezowiecki Janusz. "The Influence of orientation of a gas-fired direct radiant heater on radiant temperature distribution at a work station". *Energy and Buildings*, 43 (2011) pp. 1222-1230. Journal homepage: [www.elsevier.com/locate/enbuilt](http://www.elsevier.com/locate/enbuilt)
- [9] García Revilla, Julio César: "Medidas de ahorro y mejora de la eficiencia energética en equipos industriales incluyendo métodos regenerativos". Proyecto Fin de Carrera (7 de julio de 2.009). Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad de Valladolid, pp. 67-71.
- [10] Osakada K., Mori K., Altan T., Groche P. "Mechanical servo press technology for metal forming". *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 60 (2011), pp. 651-672. Journal homepage: <http://ees.elsevier.com/cirp/default.asp>
- [11] Juslén Henri, Tenner Ariadne. "Mechanisms involved in enhancing human performance by changing the lighting in the industrial workplace". *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35 (2005) pp. 843-855. Journal homepage: [www.elsevier.com/locate/ergon](http://www.elsevier.com/locate/ergon)
- [12] Hawes Breanne K., Brunyé Tad T., Mahoney Caroline R., Sullivan John M., Aall Christian D. "Effects of four workplace lighting technologies on perception, cognition and effective state" *International Journal of Industrial Ergonomics* 42 (2012), pp. 122-128. Journal homepage: [www.elsevier.com/locate/ergon](http://www.elsevier.com/locate/ergon)
- [13] Lee Alex H.W. "Verification of electrical energy savings for lighting retrofits using short- and long-term monitoring". *Energy Conversion & Management* 41 (2000), pp. 1999-2008. Journal homepage: [www.Elsevier.com/locate/enconman](http://www.Elsevier.com/locate/enconman)
- [14] Real Decreto 486/1997 (BOE 23 de abril 1997, núm. 97/1997). Anexo IV
- [15] Khan N., Abas N. "Comparative study of energy saving light sources". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011), pp. 296-309. Journal homepage: [www.elsevier.com/locate/rser](http://www.elsevier.com/locate/rser)
- [16] Martínez G., Amaya; Valero D., Alicia; et al: "Disminución de costes energéticos en la Empresa". Editado por Fundación Confemetal. ([www.fundacionconfemetal.es](http://www.fundacionconfemetal.es)). Madrid, 2006. Pp. 52-68, 201-203.
- [17] Saidur R., Rahim N.A., Hasanuzzaman M. "A review on compressed-air energy use and energy savings". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) pp. 1135-1153.

- [18] Ahorro Energético SMC. Energy Savings Solution. Pág. 4. <http://energysaving.smc.eu>
- [19] Tarifa Alumbrado Profesional, actualización Mayo 2012, Philips.  
[http://www.lighting.philips.es/connect/tools\\_literature/index.wpd](http://www.lighting.philips.es/connect/tools_literature/index.wpd)
- [20] <http://www.ecat.lighting.philips.es/l/lamparas-profesionales/24034/cat/#>
- [21] [www.ofiled.com](http://www.ofiled.com)
- [22] <http://www.luces-led.com/Product/Campana-LED-Arezzo-V2>
- [23] <http://synergylightingusa.com/tag/hb-e40-wht-120-n/>
- [24] <http://edison.upc.edu/curs/llum/lampara-luminaria/lampara-descarga-clases.html> . Javier García Fernández, Oriol Boix, <http://edison.upc.edu/curs/llum> | [edison.ee@upc.edu](mailto:edison.ee@upc.edu)
- [25] Tubos radiantes Ambirad. [www.ambirad.co.uk](http://www.ambirad.co.uk)

## ANEXOS

### Anexo 1. Mecanismos para la mejora del rendimiento al cambiar la iluminación [11]

#### 1. Rendimiento visual.

Cuando las personas pueden ver mejor en el área de trabajo, ellos pueden tener mejor rendimiento

##### Cadena 1

- A. La iluminación influye en el grado de rendimiento visual
- B. El rendimiento visual influye en el rendimiento de una tarea
- C. El rendimiento de una tarea influye en el rendimiento individual total

#### 2. Confort visual

Reducir el disconfort por deslumbramiento ayuda a mejorar el rendimiento porque incrementa el grado de concentración del trabajador

##### Cadena 2

- A. El disconfort por deslumbramiento crea la sensación de dolor o molestia
- B. La sensación de dolor y molestia afectan las posibilidades de concentrarnos en una tarea
- C. Los niveles de concentración influyen en el rendimiento individual

#### 3. Ambiente visual

La iluminación influye en el ambiente visual, que es parte del ambiente de trabajo, esto influye en el rendimiento

##### Cadena 3

- A. La iluminación afecta el ambiente de trabajo por medio del ambiente visual
- B. El ambiente de trabajo influye en el bienestar y los sentimientos
- C. Efectos positivos incrementan el rendimiento individual

#### 4. Relaciones interpersonales

Como las personas ven a cada uno de sus compañeros influye en lo que sienten de cada uno, esto influye en la cooperación y la productividad

##### Cadena 4

- A. La iluminación influye en la apariencia de las personas
- B. La apariencia de las personas influye en las relaciones interpersonales
- C. Las relaciones interpersonales influyen en los equipos de trabajo

#### 5. Reloj biológico

La luz ajusta el reloj biológico, que controla el ritmo circadiano y este influye en el rendimiento a ciertas horas

##### Cadena 5

- A. La exposición a la luz influye en el reloj biológico
- B. El reloj biológico influye en el ritmo circadiano
- C. El ritmo circadiano influye en el desempeño individual de los trabajadores por turno

## 6. Estimulación

La luz estimula procesos psicológicos y fisiológicos, que aumentan el rendimiento

### Cadena 6a

- A. El nivel de luz y la temperatura del color influyen en el humor
- B. Un mejor humor mejora el rendimiento individual (ver mecanismo 2)

### Cadena 6b

- A. El incremento del nivel de iluminación disminuye la tendencia a dormirse medido por ondas delta EEG
- B. La tendencia a dormirse influye en el rendimiento individual

## 7. Satisfacción por el trabajo

Mejorando las condiciones de iluminación se puede aumentar la satisfacción por el trabajo mediante la vía de la importancia del trabajo y la autonomía, que influye en el rendimiento

### Cadena 7a

- A. La mejora de la iluminación proporciona al trabajador la señal que su trabajo es importante
- B. La percepción que una tarea es importante influye en la satisfacción del trabajo
- C. La satisfacción por el trabajo realizado influye en el desempeño individual del trabajo

### Cadena 7b

- A. La sensación de controlar las condiciones de iluminación incrementan la sensación de autonomía
- B. La sensación de autonomía influye en la satisfacción del trabajo
- C. La satisfacción por el trabajo realizado influye en el desempeño individual del trabajo

## 8. Solución de problemas

Resolviendo los problemas de iluminación de los que se quejan los trabajadores, incrementan el bienestar y la motivación de los trabajadores, que aumenta el rendimiento

### Cadena 8a

- A. Resolver los problemas de lo que los empleados se quejan incrementa el bienestar y la motivación
- B. El bienestar y la motivación influyen en el rendimiento individual (ver cadena 2)

### Cadena 8b

- A. Emplear balastos de alta frecuencia en vez de los magnéticos elimina los parpadeos de luz
- B. Los parpadeos de luz causan fatiga y cansancio visual que resulta en un desempeño menos sostenido
- C. Disminuyendo la fatiga y el cansancio visual aumenta el rendimiento individual.

## 9. El efecto halo

La creencia en la superioridad de una tecnología nueva o producto puede resultar en una mejora del rendimiento

### **Cadena 9**

- A. Las personas consideran como algo positivo la buena iluminación
- B. Esta consideración influye en el rendimiento individual

### **10. Proceso de cambio**

Una buena gestión del cambio aumenta los efectos positivos del cambio en la iluminación y de esta forma se disminuyen los efectos negativos

### **Cadena 10**

- A. Cambiar la iluminación es un proceso de cambio
- B. La gestión del cambio influye en el resultado del proceso de cambio
- C. El resultado del proceso de cambio influye en el desempeño individual

## **Anexo 2. Características técnicas de las lámparas**

(Tomado del catálogo de “Tarifa Alumbrado Profesional 2012” de Philips) [19]

### **Temperatura de color e índice de reproducción cromática**

La “apariencia de color” de una lámpara hace referencia al color de la luz que emite. La luz blanca que produce una lámpara puede variar desde tonalidades cálidas a frías, definidas así en función de las sensaciones psicológicas que nos producen.

En las fuentes de luz incandescentes, la temperatura de color de la luz está estrechamente relacionada con la temperatura física del filamento (medida en Kelvin). Al variar la temperatura del filamento varía también la apariencia de la luz. Cuanto más baja es la temperatura del filamento más cálida o dorada nos parece la luz mientras que al aumentar la temperatura la luz nos resulta más fría o azulada.

En las lámparas de descarga no hay filamentos, por tanto la temperatura de color no puede venir determinada por una temperatura física real. Se establece la “temperatura de color correlacionada”, que se obtiene por comparación con una fuente incandescente o cuerpo negro que tenga la misma apariencia de color que la lámpara de descarga que se esté analizando.

Con frecuencia se piensa que una vez elegida la temperatura de color, la impresión de color queda determinada, en realidad no es así.

Debe seleccionarse también la capacidad de reproducir los colores de la fuente: el Índice de Reproducción Cromática (IRC).

La temperatura de Color y el Índice de Reproducción Cromática son parámetros completamente independientes. Como ejemplo sirva pensar en la diferencia entre la luz solar y una lámpara incandescente. Ambas tienen una reproducción cromática excelente, puesto que en su espectro se encuentran todos y cada uno de los colores, pero la apariencia de color es diferente, ya que en el caso de la luz solar su temperatura de color al mediodía es fría, mientras que la de las lámparas incandescentes es cálida, por lo que producen diferentes sensaciones sobre los espacios y colores iluminados.

La mayoría de las lámparas de descarga tienen un aspecto discontinuo, es decir, su espectro no contiene todos los colores. En función de los colores que tiene el espectro, la reproducción del color puede ser desde muy deficiente, como en el caso de las lámparas de vapor de mercurio de baja

presión, hasta excelente, como es el caso de lámparas fluorescentes con alto índice de reproducción cromática.

**El índice de Reproducción Cromática y la Temperatura de Color vienen indicados según la Norma Europea por el código que aparece tras la potencia en la nomenclatura de la lámpara. Ejemplo: Master TL-D Super 80 36W / 840**

### Índice de Reproducción cromática (IRC)

El primer dígito: 8, indica que el Ra de la lámpara es superior a 80. Lo que significa que los colores de los objetos iluminados con este tipo de luz, serán muy próximos a los que veríamos bajo la luz natural, que tuviera la misma temperatura de color que esta lámpara. El índice de Reproducción Cromática se obtiene como una nota de examen. Esta nota es el resultado sobre la comparación de 8 ó 14 colores muestra. Un 100 significa que todos los colores se reproducen perfectamente, y conforme nos vamos alejando de 100, podemos esperar mayor dispersión sobre todos los colores.

Podemos esperar en función del Ra la siguiente fiabilidad:

Ra < 60 pobre

60 < Ra < 80 buena

80 < Ra < 90 muy buena

90 < Ra < 100 excelente

### Temperatura del color (Tc)

Los dos siguientes dígitos: 40 ó 65 hacen referencia a la Temperatura de Color de la lámpara, indican que esta es de 4.000 K ó 6.500 K respectivamente.

Para las aplicaciones generales de iluminación de interior, la normativa DIN 5035 divide la luz en tres clases de color:

Blanco cálido (Tc < 3.300 K)

Blanco neutro (3.300 K < Tc < 5.000 K)

Luz fría (Tc > 5.000 K)

### Vida de las lámparas (h)

Existen varias formas de definir la vida de una lámpara o de un conjunto de lámparas incluidas en una instalación de alumbrado, entre las que pueden destacarse las siguientes:

Vida individual: Número de horas de encendido después del cual una determinada lámpara muere.

Vida media: Valor medio estadístico que resulta del análisis y ensayo de una población de lámparas trabajando en condiciones de laboratorio. Se define como el tiempo transcurrido hasta que falla el 50% de las lámparas de un lote representativo trabajando en condiciones especificadas.

La metodología de ensayo incluye siempre un ciclo de conmutación, que varía de acuerdo con el tipo de lámpara y que está relacionado con las condiciones de trabajo previstas.



Para lámparas fluorescentes se suelen emplear ciclos de conmutación de 3 horas (2 horas y 45 minutos encendidas y 15 minutos apagadas), mientras que las de descarga el ciclo suele ser de 12 horas (11 horas encendidas y 1 hora apagadas).

La variación de estos ciclos en las aplicaciones donde estén instaladas las lámparas puede hacer aumentar o disminuir la vida proporcionada por el fabricante.

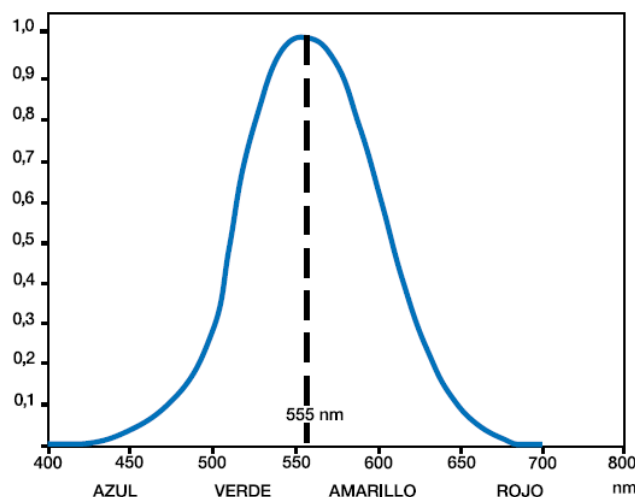
Vida útil: Es el dato que determina los períodos de reposición. Se fija estudiando las curvas de depreciación y de supervivencia. Normalmente se fija cuando las pérdidas entre las dos curvas suman un 20% o un 30%.

Las principales causas de fallo de una lámpara de descarga son dos: la degradación de los electrodos, resultante del agotamiento del material emisor de electrones o bien el cambio gradual en la composición del gas de relleno. En ambos casos se hace necesaria una tensión de arco superior a la que puede proporcionar la fuente de alimentación. En el caso de las lámparas de descarga de alta presión pueden producirse fallos por la fuga del material emisor debido a corrosión de los hilos pasantes o a fatiga del material que constituye el tubo de descarga.

## Flujo luminoso

El flujo luminoso expresa la cantidad total de luz emitida por segundo, por una fuente de luz ponderada respecto a la sensibilidad espectral del ojo humano. Esto es debido a que la capacidad del ojo humano de enviar información al cerebro sobre la imagen que ve, es diferente en función del color que produce el estímulo. La unidad de flujo luminoso es el lumen (lm).

Sensibilidad del ojo humano



## Influencia de la temperatura en el flujo de las lámparas fluorescentes

En el proceso de generación de luz de las lámparas fluorescentes la temperatura tiene una influencia muy importante.

Para cada tipo de lámpara fluorescente existe una temperatura óptima para la que el flujo luminoso es máximo. Para algunas lámparas fluorescentes la temperatura óptima es de 25 °C y para otras de nueva generación la temperatura está optimizada a 35 °C.

Por encima o por debajo de la temperatura óptima existen pérdidas de flujo importantes. Este es el motivo por el que el diseño de luminarias capaces de evacuar el calor generado por la lámpara o de

utilizarlo para mantener la temperatura dentro del intervalo adecuado, si se trata de aplicaciones a bajas temperaturas, es tan importante en el caso de las lámparas fluorescentes.

La presión de vapor de mercurio en el interior del tubo de descarga viene definida por la temperatura dentro de él. Cuando la temperatura ambiente es baja, el número de átomos de mercurio en estado gaseoso que pueden interaccionar son los electrones liberados es insuficiente y la salida de luz decrece rápidamente (especialmente por debajo de los 15°C – 25 °C). Cuando la temperatura es excesivamente alta (superior a 30 °C – 40 °C) el número de átomos de mercurio en estado gaseoso es demasiado alto y absorben la energía radiada entre sí convirtiéndola en calor, provocando un descenso del flujo luminoso.

La presión de vapor de mercurio en el interior de la lámpara está relacionada directamente con el punto más frío de la lámpara, también llamado “punto frío”. La posición de funcionamiento de la lámpara influye en la localización del punto frío

### **Intensidad luminosa**

La intensidad luminosa es el flujo luminoso radiado por una fuente de luz en una dirección específica. Es un concepto que expresa la concentración de luz en una dirección concreta. La intensidad luminosa se expresa en candelas (cd).

En las lámparas reflectoras la magnitud que informa sobre la cantidad de luz irradiada por la lámpara es la intensidad luminosa y no el flujo, ya que el reflector hace que la luz se emita en una dirección determinada.

La apertura de haz, que se expresa en grados ( $^{\circ}$ ), determina la concentración o dispersión de la luz producida por la lámpara, un haz muy estrecho concentrará la luz en una dirección muy correcta, conforme se aumenta la apertura del haz menos concentración se tendrá. Haces anchos se suelen utilizar para alumbrado general o iluminación a corta distancia, mientras que los haces estrechos se emplean en alumbrado de acento o cuando la distancia a la superficie u objeto que se quiere iluminar es grande.

### **Anexo 3. Iluminación Industrial. Tipos de lámparas. [16] y [24]**

Una buena iluminación es esencial para el bienestar y la salud. La iluminación en las empresas debe tener como objetivo fundamental, garantizar las óptimas condiciones para desarrollar las tareas correspondientes de los trabajadores, garantizando al mismo tiempo la máxima eficiencia energética. Está comprobado que una correcta iluminación puede influir en el estado de ánimo de los empleados y por lo tanto, combinada con otros elementos, contribuye a un aumento de la productividad.

La iluminación puede suponer hasta el 10% de la factura eléctrica de muchas fábricas. Por experiencia se tiene que el 30% de este consumo por iluminación se puede reducir usando las nuevas tecnologías y aplicando un plan de gestión adecuado.

Lo primero que se debe hacer es verificar si el ahorro de entre un 5 y un 30% por aplicar las medidas de ahorro en iluminación, reportarán beneficios que justifiquen la inversión en el tiempo.

## Tipos de lámparas

Las lámparas son los aparatos encargados de transformar la energía eléctrica en energía lumínica [15]. Existe un conjunto variado de lámparas según la aplicación, según la clasificación más utilizada se tiene:

- **Lámparas incandescentes**
  - o No halógenas
  - o Halógenas
- **Lámparas de descarga**
  - o De vapor de mercurio
  - o De vapor de sodio
- **LED (Light Emitting Diode)**

### Lámparas incandescentes

Fueron la primera forma de generar luz a partir de energía eléctrica. Son dispositivos formados por una ampolla de vidrio que contiene un gas inerte, argón o criptón, y un filamento de wolframio.

Su principio de funcionamiento es simple: se hace pasar una corriente eléctrica por un filamento hasta que alcanza una temperatura tan alta (alrededor de los 2.000 °C) que emite radiaciones visibles para el ojo humano. Para evitar que el filamento se queme en contacto con el aire, se rodea con una ampolla de vidrio a la que se le ha hecho el vacío o se ha rellenado con un gas inerte. El conjunto se completa con unos elementos de soporte y conducción de la corriente eléctrica y un casquillo normalizado que sirve para conectar la lámpara a la luminaria.

En general los rendimientos de este tipo de lámparas son bajos debido a que la mayor parte de la energía consumida se convierte en calor. Sólo alrededor del 10% de la energía se convierte en luz visible.

Entre las lámparas incandescentes no halógenas se distinguen las que se han rellenado con un gas inerte y aquellas en que se ha hecho el vacío en su interior. La presencia del gas supone un notable incremento de la eficacia luminosa de la lámpara dificultando la evaporación del material del filamento y permitiendo el aumento de la temperatura de trabajo del filamento.

Actualmente las lámparas con gas son más utilizadas, reduciéndose el uso de las de vacío a aplicaciones ocasionales en alumbrado general con potencias de hasta 40 W.

Tabla. Características de una lámpara de gas frente a una lámpara al vacío.

	Lámpara con gas	Lámparas de vacío
Temperatura del filamento	2.500°C	2.100 °C
Rendimiento luminoso de la lámpara	10-20 lm/W	7,5-11 lm/W
Duración	1.000 horas	1.000 horas

Tabla tomada de la referencia [16]

En la tabla anterior se utiliza la unidad de rendimiento luminoso lm/W. El lumen (lm) es la unidad de medida del flujo luminoso, definido como la potencia (W) emitida en forma de radiación luminosa a la

que el ojo humano es sensible. El rendimiento luminoso da una idea de cuál es la energía útil y se define como el cociente entre el flujo luminoso producido y la potencia eléctrica consumida, que viene con las características de las lámparas (25 W, 60 W). Cuanto mayor sea mejor será la lámpara y menos gastará.

El color de la luz emitida por una lámpara incandescente habitual, es ligeramente amarillento, debido a la mayor proporción de fotones emitidos en la zona de menor energía del espectro visible. Para obtener luz más blanca e intensa se utilizan lámparas incandescentes halógenas, que permiten que el filamento alcance una temperatura más elevada sin que el wolframio llegue a fundir.

La duración de las lámparas incandescentes está normalizada; siendo de 1.000 horas para las normales, de 2.000 horas para halógenas en aplicaciones generales y de 4.000 horas para halógenas en aplicaciones especiales.

**Lámparas de descarga.** Las lámparas de descarga constituyen una forma alternativa de producir luz de una manera más eficiente y económica que las lámparas incandescentes. Por eso su uso está tan extendido hoy en día.

La luz emitida se consigue por excitación de un gas sometido a descargas eléctricas entre dos electrodos, situados en un tubo lleno con un gas o vapor ionizado.

La luz emitida no es blanca (por ejemplo en las lámparas de sodio a baja presión es amarillenta), por lo que la capacidad de reproducir los colores de estas fuentes de luz, es en general, peor que en el caso de las lámparas incandescentes. Sin embargo, es posible mejorar la reproducción de los colores y aumentar la eficacia de estas lámparas, recubriendo el tubo con sustancias fluorescentes, convirtiendo las nocivas emisiones ultravioletas en luz visible.

Según el gas contenido en la lámpara y la presión a la que esté sometido tendremos diferentes tipos de lámparas, cada una de ellas con sus propias características luminosas.

### **Lámparas de vapor de mercurio:**

Baja presión:

- Lámparas fluorescentes

Alta presión:

- Lámparas con halogenuros metálicos
- Lámparas de vapor de mercurio a alta presión
- Lámparas de luz de mezcla

### **Lámparas de vapor de sodio:**

- Lámparas de vapor de sodio a baja presión
- Lámparas de vapor de sodio a alta presión

Las propiedades varían mucho de unas a otras y esto las hace adecuadas para unos usos u otros.

La forma de las lámparas de descarga varía según la clase de lámpara considerada. Sin embargo todas tienen una serie de elementos en común como el tubo de descarga, los electrodos, la ampolla exterior o el casquillo.

Para su correcto funcionamiento, las lámparas de descarga requieren de la presencia de dos dispositivos: cebadores y balastos.

- Los cebadores (también llamados ignitores) son dispositivos que suministran un breve pico de tensión entre los electrodos del tubo, necesario para iniciar la descarga y vencer así la resistencia inicial del gas a la corriente eléctrica. Tras el encendido, continúa un período transitorio durante el cual, el gas se estabiliza y que se caracteriza por un consumo de potencia superior al nominal.
- Los balastos, por el contrario, son dispositivos que sirven para limitar la corriente que atraviesa la lámpara y evitar así un exceso de electrones circulando por el gas que aumentaría el valor de la corriente hasta producir la destrucción de la lámpara.

En este tipo de lámparas las pérdidas se centran en dos aspectos: las pérdidas por calor y las pérdidas por radiaciones no visibles (ultravioleta e infrarrojo). El porcentaje de cada tipo de pérdida dependerá de la lámpara con que se trabaje. El rendimiento energético de un tipo de lámparas de descarga, concretamente las fluorescentes, está legislado a través de una directiva europea.

Por otro lado, al hablar del rendimiento de las lámparas de descarga, hay que diferenciar entre el rendimiento de la fuente de luz y la de los elementos auxiliares necesarios para su funcionamiento, por ejemplo los balastos.

Los dos aspectos básicos que afectan a la duración de estas lámparas son:

- La depreciación del flujo, que se produce por ennegrecimiento de la superficie del tubo donde se va depositando el material emisor de electrones que recubre los electrodos, localizados en los extremos del tubo.
- El deterioro de los componentes de la lámpara debido a la degradación de los electrodos por agotamiento del material emisor que los recubre. Otras causas son un cambio gradual de la composición del gas de relleno y las fugas de gas en lámparas de alta presión.

Es claro que poco puede hacer el usuario para intervenir sobre estos dos aspectos. Sin embargo, sí que es importante atender a los siguientes factores externos que influyen en el funcionamiento de la lámpara: la temperatura ambiente y el número de encendidos.

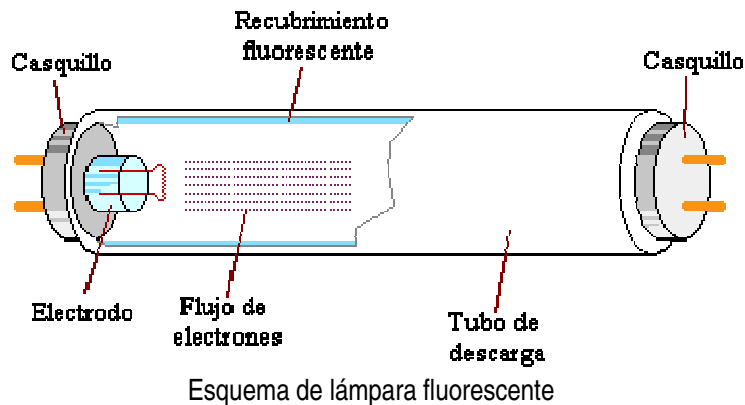
- Las lámparas de descarga son, en general, sensibles a las temperaturas exteriores. Dependiendo de sus características de construcción (tubo desnudo, ampolla exterior...) se verán más o menos afectadas. Las lámparas a alta presión, por ejemplo, son sensibles a las bajas temperaturas por tener problemas de arranque. Por el contrario, la temperatura de trabajo estará limitada por las características térmicas de los componentes (200 °C para el casquillo y entre 350 °C y 520 °C para las ampollas según el material y tipo de lámpara).
- El número de encendidos es muy importante para establecer la duración de la lámpara de descarga ya que el deterioro de la sustancia emisora de los electrodos depende en gran medida de este factor. Es por ello que debe evitarse encender y apagar continuamente este tipo de lámparas.

## Lámparas de vapor de mercurio [24]

### Lámparas fluorescentes

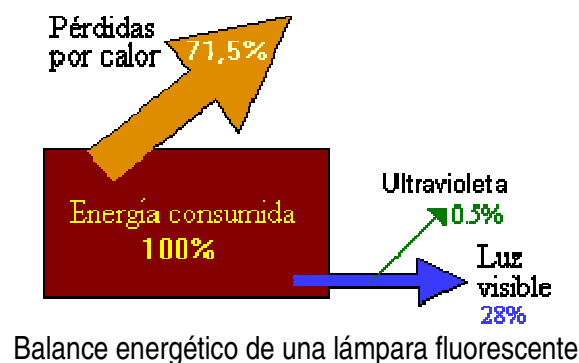
Las lámparas fluorescentes son lámparas de vapor de mercurio a baja presión (0.8 Pa). En estas condiciones, en el espectro de emisión del mercurio predominan las radiaciones ultravioletas en la banda de 253.7 nm. Para que estas radiaciones sean útiles, se recubren las paredes interiores del tubo

con polvos fluorescentes que convierten los rayos ultravioletas en radiaciones visibles. De la composición de estas sustancias dependerán la cantidad y calidad de la luz, y las cualidades cromáticas de la lámpara. En la actualidad se usan dos tipos de polvos; los que producen un espectro continuo y los trifósforos que emiten un espectro de tres bandas con los colores primarios. De la combinación de estos tres colores se obtiene una luz blanca que ofrece un buen rendimiento de color sin penalizar la eficiencia como ocurre en el caso del espectro continuo.



Las lámparas fluorescentes se caracterizan por carecer de ampolla exterior. Están formadas por un tubo de diámetro normalizado, normalmente cilíndrico, cerrado en cada extremo con un casquillo de dos contactos donde se alojan los electrodos. El tubo de descarga está relleno con vapor de mercurio a baja presión y una pequeña cantidad de un gas inerte que sirve para facilitar el encendido y controlar la descarga de electrones.

La eficacia de estas lámparas depende de muchos factores: potencia de la lámpara, tipo y presión del gas de relleno, propiedades de la sustancia fluorescente que recubre el tubo, temperatura ambiente... Esta última es muy importante porque determina la presión del gas y en último término el flujo de la lámpara. La eficacia oscila entre los 38 y 91 lm/W dependiendo de las características de cada lámpara.



La duración de estas lámparas se sitúa entre 5000 y 7000 horas. Su vida termina cuando se desgasta la sustancia emisora que recubre los electrodos, hecho que se incrementa con el número de encendidos, impide el encendido al necesitarse una tensión de ruptura superior a la suministrada por la red. Además de esto, hemos de considerar la depreciación del flujo provocado por la pérdida de eficacia de los polvos fluorescentes y el ennegrecimiento de las paredes del tubo donde se deposita la sustancia emisora.

El rendimiento en color de estas lámparas varía de moderado a excelente según las sustancias fluorescentes empleadas. Para las lámparas destinadas a usos habituales que no requieran de gran precisión su valor está entre 80 y 90. De igual forma la apariencia y la temperatura de color varía según las características concretas de cada lámpara.

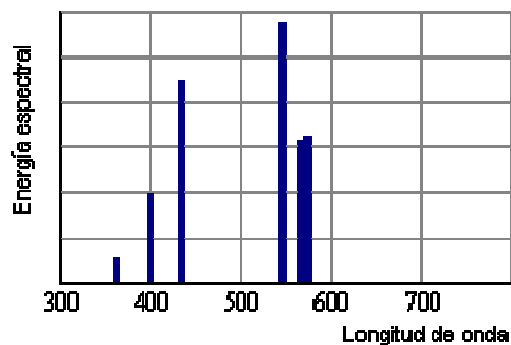
Apariencia de color	T <sub>color</sub> (K)
Blanco cálido	3000
Blanco	3500
Natural	4000
Blanco frío	4200
Luz día	6500

Las lámparas fluorescentes necesitan para su funcionamiento la presencia de elementos auxiliares. Para limitar la corriente que atraviesa el tubo de descarga utilizan el balasto y para el encendido existen varias posibilidades que se pueden resumir en arranque con cebador o sin él. En el primer caso, el cebador se utiliza para calentar los electrodos antes de someterlos a la tensión de arranque. En el segundo caso tenemos las lámparas de arranque rápido en las que se calientan continuamente los electrodos y las de arranque instantáneo en que la ignición se consigue aplicando una tensión elevada.

Más modernamente han aparecido las lámparas fluorescentes compactas que llevan incorporado el balasto y el cebador. Son lámparas pequeñas con casquillo de rosca o bayoneta pensadas para sustituir a las lámparas incandescentes con ahorros de hasta el 70% de energía y unas buenas prestaciones.

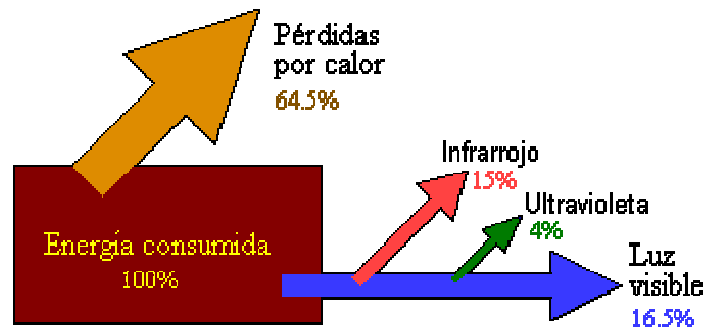
### Lámparas de vapor de mercurio a alta presión

A medida que se aumenta la presión del vapor de mercurio en el interior del tubo de descarga, la radiación ultravioleta característica de la lámpara a baja presión pierde importancia respecto a las emisiones en la zona visible (violeta de 404.7 nm, azul 435.8 nm, verde 546.1 nm y amarillo 579 nm).



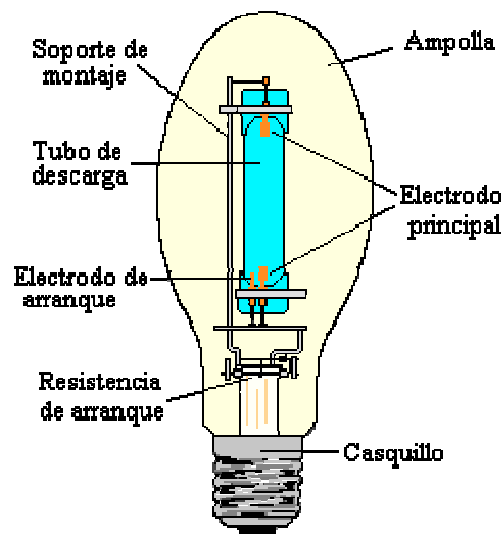
Espectro de emisión sin corregir de lámpara de vapor de mercurio de alta presión

En estas condiciones la luz emitida, de color azul verdoso, no contiene radiaciones rojas. Para resolver este problema se acostumbra a añadir sustancias fluorescentes que emitan en esta zona del espectro. De esta manera se mejoran las características cromáticas de la lámpara. La temperatura de color se mueve entre 3500 y 4500 K con índices de rendimiento en color de 40 a 45 normalmente. La vida útil, teniendo en cuenta la depreciación se establece en unas 8000 horas. La eficacia oscila entre 40 y 60 lm/W y aumenta con la potencia, aunque para una misma potencia es posible incrementar la eficacia añadiendo un recubrimiento de polvos fosforescentes que conviertan la luz ultravioleta en visible.



Balance energético de una lámpara de mercurio a alta presión

Los modelos más habituales de estas lámparas tienen una tensión de encendido entre 150 y 180 V que permite conectarlas a la red de 220 V sin necesidad de elementos auxiliares. Para encenderlas se recurre a un electrodo auxiliar próximo a uno de los electrodos principales que ioniza el gas inerte contenido en el tubo y facilita el inicio de la descarga entre los electrodos principales. A continuación se inicia un periodo transitorio de unos cuatro minutos, caracterizado porque la luz pasa de un tono violeta a blanco azulado, en el que se produce la vaporización del mercurio y un incremento progresivo de la presión del vapor y el flujo luminoso hasta alcanzar los valores normales. Si en estos momentos se apagara la lámpara no sería posible su reencendido hasta que se enfriara, puesto que la alta presión del mercurio haría necesaria una tensión de ruptura muy alta.

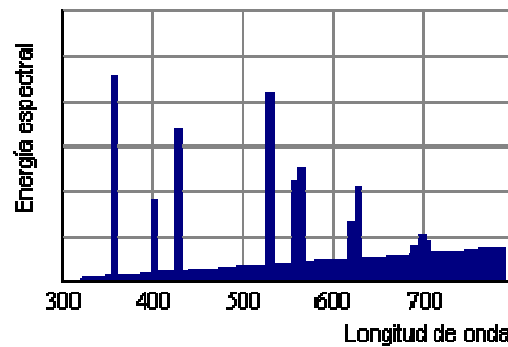


Lámpara de mercurio a alta presión

### Lámparas de luz de mezcla

Las lámparas de luz de mezcla son una combinación de una lámpara de mercurio a alta presión con una lámpara incandescente y habitualmente, un recubrimiento fosforescente. El resultado de esta mezcla es la superposición, al espectro del mercurio, del espectro continuo característico de la lámpara incandescente y las radiaciones rojas provenientes de la fosforescencia.

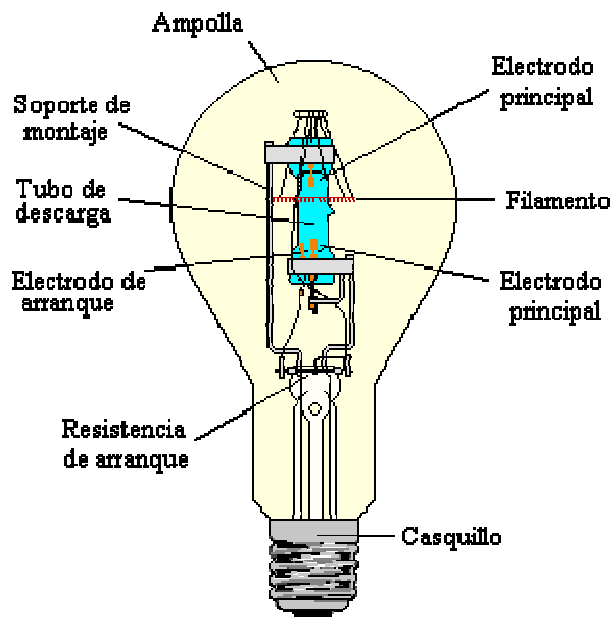




Espectro de emisión de una lámpara de luz de mezcla

Su eficacia se sitúa entre 20 y 60 lm/W y es el resultado de la combinación de la eficacia de una lámpara incandescente con la de una lámpara de descarga. Estas lámparas ofrecen una buena reproducción del color con un rendimiento en color de 60 y una temperatura de color de 3600 K.

La duración viene limitada por el tiempo de vida del filamento que es la principal causa de fallo. Respecto a la depreciación del flujo hay que considerar dos causas. Por un lado tenemos el ennegrecimiento de la ampolla por culpa del wolframio evaporado y por otro la pérdida de eficacia de los polvos fosforescentes. En general, la vida media se sitúa en torno a las 6000 horas.

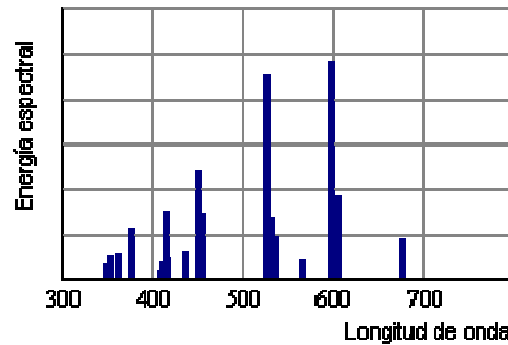


Lámpara de luz de mezcla

Una particularidad de estas lámparas es que no necesitan balasto ya que el propio filamento actúa como estabilizador de la corriente. Esto las hace adecuadas para sustituir las lámparas incandescentes sin necesidad de modificar las instalaciones.

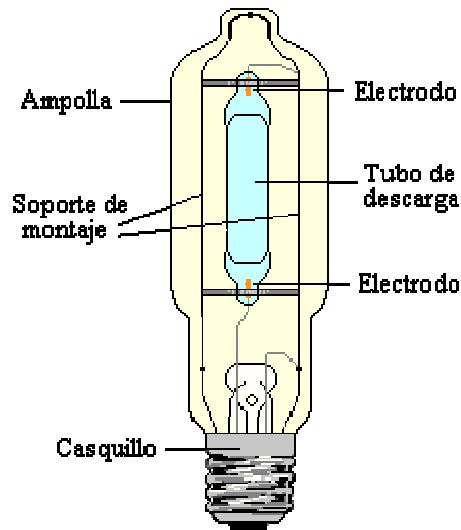
### Lámparas con halogenuros metálicos

Si añadimos en el tubo de descarga yoduros metálicos (sodio, talio, indio...) se consigue mejorar considerablemente la capacidad de reproducir el color de la lámpara de vapor de mercurio. Cada una de estas sustancias aporta nuevas líneas al espectro (por ejemplo amarillo el sodio, verde el talio y rojo y azul el indio).



Espectro de emisión de una lámpara con halogenuros metálicos

Los resultados de estas aportaciones son una temperatura de color de 3000 a 6000 K dependiendo de los yoduros añadidos y un rendimiento del color de entre 65 y 85. La eficiencia de estas lámparas ronda entre los 60 y 96 lm/W y su vida media es de unas 10000 horas. Tienen un periodo de encendido de unos diez minutos, que es el tiempo necesario hasta que se estabiliza la descarga. Para su funcionamiento es necesario un dispositivo especial de encendido, puesto que las tensiones de arranque son muy elevadas (1500-5000 V).



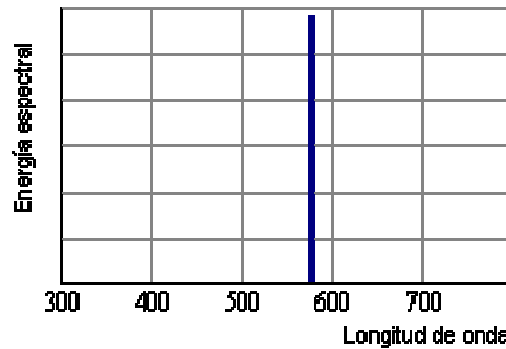
Lámpara con halogenuros metálicos

Las excelentes prestaciones cromáticas la hacen adecuada entre otras para la iluminación de instalaciones deportivas, para retransmisiones de TV, estudios de cine, proyectores, etc.

## Lámparas de vapor de sodio

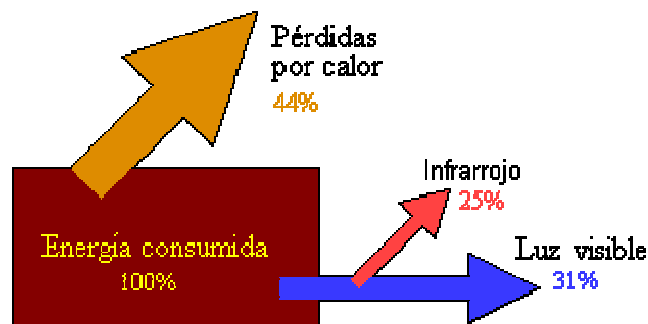
### Lámparas de vapor de sodio a baja presión

La descarga eléctrica en un tubo con vapor de sodio a baja presión produce una radiación monocromática característica formada por dos rayas en el espectro (589 nm y 589.6 nm) muy próximas entre sí.



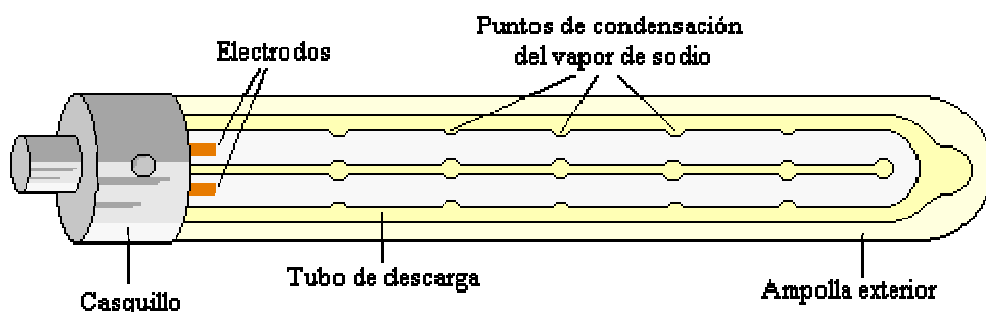
Espectro de una lámpara de vapor de sodio a baja presión

La radiación emitida, de color amarillo, está muy próxima al máximo de **sensibilidad** del ojo humano (555 nm). Por ello, la eficacia de estas lámparas es muy elevada (entre 160 y 180 lm/W). Otras ventajas que ofrece es que permite una gran comodidad y agudeza visual, además de una buena percepción de contrastes. Por contra, su monocromatismo hace que la reproducción de colores y el rendimiento en color sean muy malos haciendo imposible distinguir los colores de los objetos.



Balance energético de una lámpara de vapor de sodio a baja presión

La vida media de estas lámparas es muy elevada, de unas 15000 horas y la depreciación de flujo luminoso que sufren a lo largo de su vida es muy baja por lo que su vida útil es de entre 6000 y 8000 horas. Esto junto a su alta eficiencia y las ventajas visuales que ofrece la hacen muy adecuada para usos de alumbrado público, aunque también se utiliza con finalidades decorativas. En cuanto al final de su vida útil, este se produce por agotamiento de la sustancia emisora de electrones como ocurre en otras lámparas de descarga. Aunque también se puede producir por deterioro del tubo de descarga o de la ampolla exterior.



Lámpara de vapor de sodio a baja presión

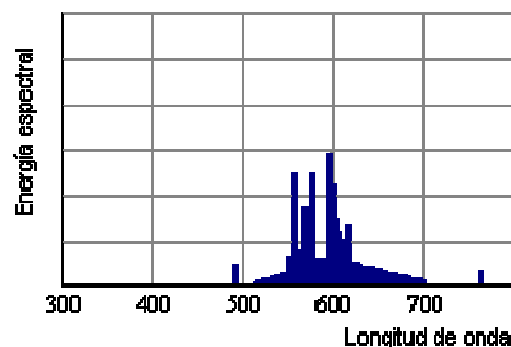
En estas lámparas el tubo de descarga tiene forma de U para disminuir las pérdidas por calor y reducir el tamaño de la lámpara. Está elaborado de materiales muy resistentes pues el sodio es muy corrosivo y se le practican unas pequeñas hendiduras para facilitar la concentración del sodio y que se vaporice a la temperatura menor posible. El tubo está encerrado en una ampolla en la que se ha practicado el

vacío con objeto de aumentar el aislamiento térmico. De esta manera se ayuda a mantener la elevada temperatura de funcionamiento necesaria en la pared del tubo (270 °C).

El tiempo de arranque de una lámpara de este tipo es de unos diez minutos. Es el tiempo necesario desde que se inicia la descarga en el tubo en una mezcla de gases inertes (neón y argón) hasta que se vaporiza todo el sodio y comienza a emitir luz. Físicamente esto se corresponde a pasar de una luz roja (propia del neón) a la amarilla característica del sodio. Se procede así para reducir la tensión de encendido.

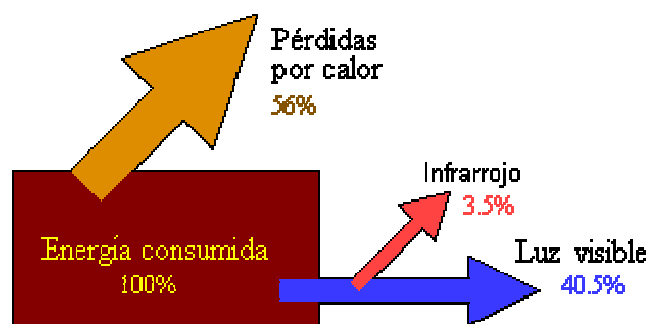
### Lámparas de vapor de sodio a alta presión

Las lámparas de vapor de sodio a alta presión tienen una distribución espectral que abarca casi todo el espectro visible proporcionando una luz blanca dorada mucho más agradable que la proporcionada por las lámparas de baja presión.



Espectro de una lámpara de vapor de sodio a alta presión

Las consecuencias de esto es que tienen un rendimiento en color ( $T_{color} = 2100\text{ K}$ ) y capacidad para reproducir los colores mucho mejores que la de las lámparas a baja presión ( $IRC = 25$ , aunque hay modelos de 65 y 80). No obstante, esto se consigue a base de sacrificar eficacia; aunque su valor que ronda los 130 lm/W sigue siendo un valor alto comparado con los de otros tipos de lámparas.

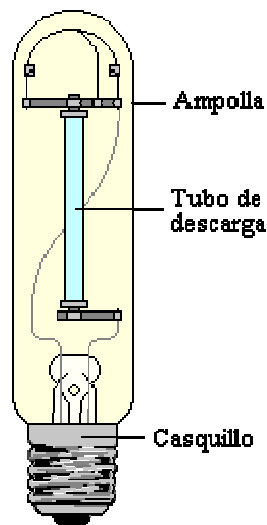


Balance energético de una lámpara de vapor de sodio a alta presión

La vida media de este tipo de lámparas ronda las 20000 horas y su vida útil entre 8000 y 12000 horas. Entre las causas que limitan la duración de la lámpara, además de mencionar la depreciación del flujo hay que hablar del fallo por fugas en el tubo de descarga y del incremento progresivo de la tensión de encendido necesaria hasta niveles que impiden su correcto funcionamiento.

Las condiciones de funcionamiento son muy exigentes debido a las altas temperaturas (1000 °C), la presión y las agresiones químicas producidas por el sodio que debe soportar el tubo de descarga. En su interior hay una mezcla de sodio, vapor de mercurio que actúa como amortiguador de la descarga y xenón que sirve para facilitar el arranque y reducir las pérdidas térmicas. El tubo está rodeado por una

ampolla en la que se ha hecho el vacío. La tensión de encendido de estas lámparas es muy elevada y su tiempo de arranque es muy breve.



Lámpara de vapor de sodio a alta presión

Este tipo de lámparas tienen muchos usos posibles tanto en iluminación de interiores como de exteriores. Algunos ejemplos son en iluminación de naves industriales, alumbrado público o iluminación decorativa.

## LED (Light Emitting Diode) [16]

Además de las lámparas incandescentes y las de descarga, la tecnología LED constituye una alternativa real a las necesidades de iluminación, señalización y alumbrado en numerosos ámbitos empresariales. La tecnología LED de alta luminosidad reúne diversas ventajas y sus aplicaciones crecen cada día. Se trata de un sistema moderno, seguro y rentable que supone ahorros de energía eléctrica, en gastos de mantenimiento y reposición y en emisiones de CO<sub>2</sub>. En el anexo 4 se explica en detalle este tipo de lámparas.

## Luminarias

Las luminarias poseen una doble función: por un lado, sirven de soporte y conexión a la red eléctrica a las lámparas y, además, deben cumplir una serie de características ópticas, mecánicas y eléctricas para conseguir un funcionamiento eficiente.

Desde el punto de vista óptico, la luminaria es responsable del control y la distribución de la luz emitida por la lámpara. Es importante que en el diseño de su sistema óptico se cuide la forma y distribución de la luz, el rendimiento del conjunto lámpara-luminaria y el deslumbramiento que pueda provocar en los usuarios.

Además las luminarias deben ser de fácil instalación y mantenimiento. Para ello, los materiales empleados en su construcción han de ser los adecuados para resistir el ambiente en que deba trabajar la luminaria y mantener la temperatura de la lámpara dentro de los límites de funcionamiento. Todo ello sin perder de vista aspectos no menos importantes como la economía o la estética.

Los dispositivos de control de iluminación más comúnmente encontrados se muestran en la siguiente tabla:

Sistema de control	Descripción	Coste unitario referencial en euros	Ahorro estimado (%)	Usos comunes
Reloj programable	Reloj programable que abre/cierra uno o más interruptores según el programa prefijado	45-90	15	Instalaciones de iluminación con funcionamiento cíclico
Temporizador	Cierra el circuito de iluminación durante un determinado periodo de tiempo	30	15	En áreas donde la iluminación se necesita durante períodos cortos de tiempo: pasillos, escaleras etc...
Fotocélula	Dispositivo localizado en un circuito que abre y cierra un interruptor de acuerdo con la luz recibida	48-60	20	Las fotocélulas aportan automatización en el sistema de encendido del alumbrado, maximizando el uso de la luz natural
Sensores de movimiento	Conectan y desconectan las luces en respuesta a la presencia o ausencia de ocupantes	60	20	Fábricas y comercios con ocupación intermitente y con gran número de salas
Equipos de conexión electrónica o balastos electrónicos	Estabilizan la emisión de luz para asegurar un encendido y una operación correcta de las lámparas, aumentando por tanto su vida útil	30-60	25-30	Equipo auxiliar para lámparas de descarga (tubos fluorescentes, bombillas de larga vida, lámparas de sodio y mercurio)

## Anexo 4. LEDs Información técnica

(Tomado del catálogo de "Tarifa Alumbrado Profesional 2012" de Philips)

### LED ó SSL

El término SSL (Solid State Lighting) hace referencia al hecho de que la luz en un LED es emitida por un objeto sólido, en lugar de un gas como es el caso de los tubos fluorescentes o lámparas de descarga de alta intensidad.

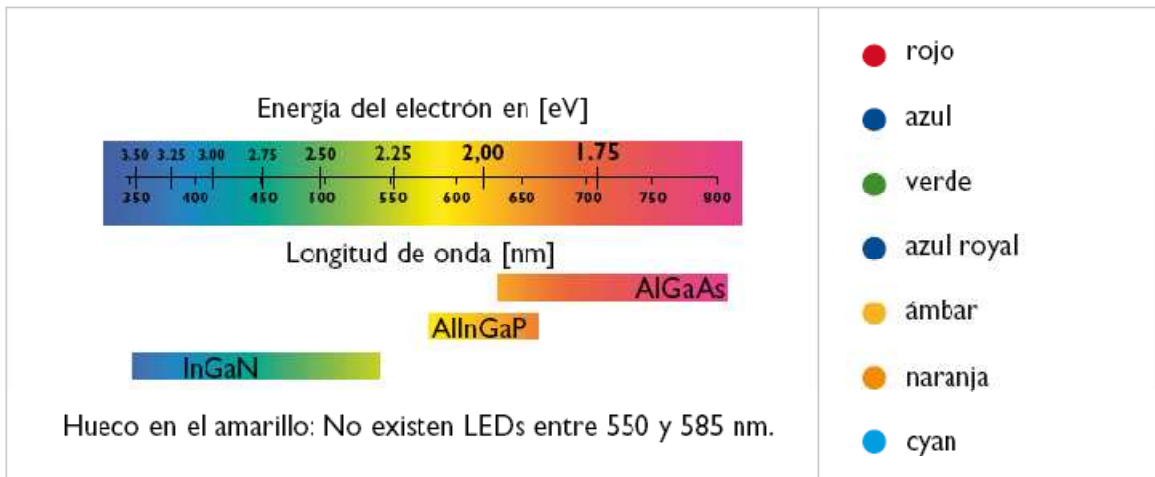
#### ¿Qué es un LED?

LED viene de las siglas en inglés Lighting Emitting Diode (Diodo emisor de luz). El LED es un diodo semiconductor que al ser atravesado por una corriente eléctrica emite luz. La longitud de onda de la luz emitida y por tanto el color depende básicamente de la composición química del material semiconductor utilizado.

Cuando la corriente atraviesa el diodo se libera energía en forma de fotón. La luz emitida puede ser visible, infrarroja o casi ultravioleta.

Los LEDs convencionales están realizados sobre la base de una gran variedad de materiales semiconductores inorgánicos produciendo los siguientes colores.

## Materiales y colores



### Ventajas de usar LEDs

#### Generales:

- Vida larga (hasta 50.000 horas)
- Reducción de costes de mantenimiento
- Mayor eficacia que las lámparas incandescentes y halógenas
- Sin radiación IR ni UV
- Puede usarse ópticas de plástico de alta eficiencia

#### Seguridad/bajas temperaturas:

- Capaz de encender a bajas temperaturas (hasta -40 °C)
- Trabaja a baja tensión en continua
- Alta eficacia en ambientes fríos
- Sellado de por vida en luminarias estancas

#### Medioambiente:

- No contiene mercurio

### Cómo se genera la luz blanca

Puesto que la luz que obtenemos de un LED es monocromática, es decir, una vez fabricado el chip solo emiten en un determinado color de los anteriormente citados, una pregunta interesante sin duda es: ¿cómo se puede producir con un LED luz blanca y de buena reproducción de color?. Se puede hacer mediante dos métodos:

La mezcla de luz de tres chips: un chip azul, otro verde y otro rojo, mediante la combinación de un chip azul o ultravioleta y fósforo como se hace con el principio de la fluorescencia.

El primer caso rara vez se usa para producir un LED blanco, aunque si se hace para realizar juegos de colores, puesto que regulando la intensidad de cada uno de ellos se puede pasar por todo el espectro de colores.

Mediante el segundo caso se puede obtener luz blanca fría o cálida en función de los fósforos que utilizemos. Si se usa un LED azul con fósforos amarillos, se tendrá un LED blanco frío y relativamente de buena reproducción cromática. IRC sobre 70. En el caso de usar fósforos rojos y verdes junto al chip azul podemos obtener un LED blanco cálido de mejor reproducción cromática, IRC > 80 pero conseguiremos algo menos de flujo.

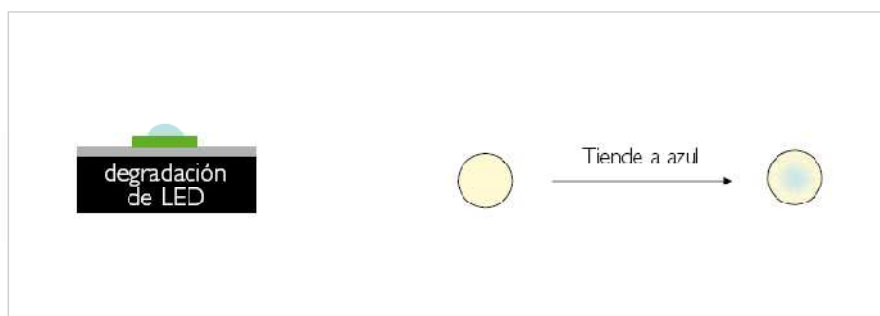


## Gestión del calor

Los LEDs en su haz de luz, emiten luz fría, es decir no emiten rayos infrarrojos, sin embargo los LEDs no son 100% eficientes ya que entre un 50% y un 90% de la energía que se les aplica se convierte en calor. Este calor es disipado dentro del propio LED y es necesario que pueda abandonar el chip para que funcione adecuadamente, puesto que los LEDs no son capaces de soportar temperaturas elevadas sin sufrir una disminución en la vida, flujo y cambios en el color.

La disminución del flujo lumínico es permanente debido al envejecimiento de los materiales ópticos primarios y del propio material semiconductor, el calor excesivo aplicado de forma continuada acelera la degradación del LED provocando cambio de color en los LEDs blancos.

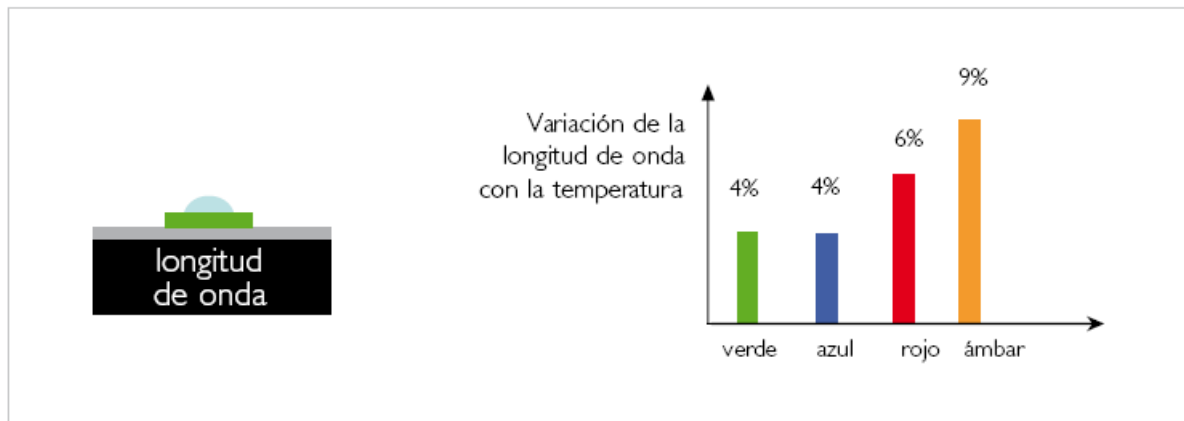
Disminución del flujo lumínico: permanente  
Ej.: envejecimiento del fósforo



En los LEDs de colores el calor provoca una variación de la longitud de onda y por tanto del color. Dependiendo de éste, la variación puede ser más o menos acusada.

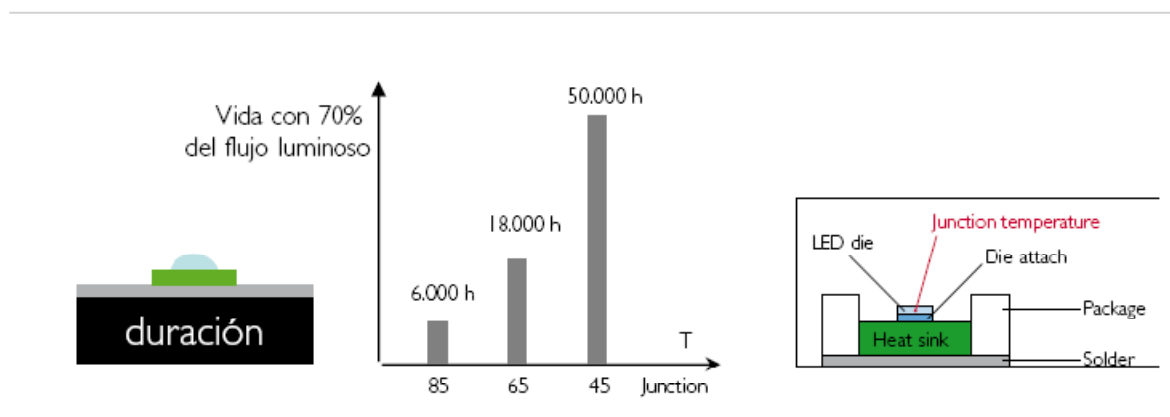


### Variación del color



La característica que se ve más afectada por el calor es la vida del LED. En la siguiente gráfica se puede observar las variaciones de la vida dependiendo de la temperatura de unión del LED.

### Disminución de la vida



Por último, otro elemento al que afecta las variaciones de temperatura es el flujo luminoso y su eficacia. Las bajas temperaturas hacen que el LED funcione con un mayor rendimiento. A menores temperaturas el flujo y la eficacia es mayor que a temperatura ambiente.

### Cambio temporal de la salida lumínica

