

Informe Final – Volumen 2

PROCESOS Y TECNOLOGÍAS A NIVEL NACIONAL E INTERNACIONAL

DETERMINACIÓN Y PRIORIZACIÓN DE ALTERNATIVAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA LOS SUBSECTORES MANUFACTUREROS CÓDIGOS CIU 19 A 31 EN COLOMBIA A PARTIR DE LA CARACTERIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO PARA SUS DIFERENTES PROCESOS, USOS Y EQUIPOS DE USO FINAL



Presentado a:

UPME

Presentado por:

CORPOEMA

Bogotá, Diciembre 17 de 2014



CONTENIDO

1. PROCESOS INDUSTRIALES ELÉCTRICOS.....	1
1.1 MOTORES ELÉCTRICOS DE ALTA EFICIENCIA.	1
1.1.1 Generalidades operativas del motor eléctrico.	2
1.1.2 Naturaleza de las pérdidas en los motores eléctricos	3
1.1.3 Incremento de la eficiencia en los motores asincrónicos.....	7
1.1.4 Motores de alta eficiencia	12
1.2 VARIADORES DE VELOCIDAD O FRECUENCIA	20
1.2.1 Evaluación tecnológica de Variadores de Velocidad para Motores Eléctricos...	20
1.2.2 Bombas.....	23
1.2.3 Planta de bombeo:.....	26
1.2.4 Ventiladores	26
1.2.5 Compresores	28
1.2.6 Máquinas centrífugas y máquinas-herramientas	30
1.2.7 Bandas transportadoras.....	31
1.3 ILUMINACIÓN EFICIENTE.....	33
1.3.1 Consumo energético	33
1.3.2 Etiquetado energético	34
1.3.3 Etiquetado ecológico	35
1.3.4 Valoración económica y medioambiental	35
1.3.5 Sistemas de iluminación.....	36
1.4 EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE ILUMINACIÓN	40
1.4.1 Consideraciones generales.	41
1.4.2 Evaluación comparativa de sistemas de iluminación	45
1.4.3 HID vs Inducción.....	49
1.4.4 Fluorescente de inducción vs LED.....	55
1.5 CHILLERS EFICIENTES.....	59

1.5.1	Introducción	59
1.5.2	Compra de Equipos y Chillers Eficientes Energéticamente	60
1.5.3	Evaluación de cambio de chillers en base a mejoramiento de la EE	62
1.5.4	Recomendaciones para Compra de Chilers	65
1.5.5	Optimización de Sistemas de Agua Refrigerada Existentes.....	66
1.5.6	Temperatura del Suministro de Agua de los Chillers.....	66
1.5.7	Punto de ajuste del control de temperatura del agua del condensador	66
1.5.8	Secuenciación del chiller	67
2.	<u>PROCESOS INDUSTRIALES TÉRMICOS.....</u>	68
2.1	CALDERAS.....	68
2.1.1	Clasificación de calderas	69
2.1.2	Determinación de la eficiencia de una caldera.....	74
2.1.3	Factores que afectan la eficiencia de una caldera.....	79
2.1.4	Calderas Eficientes.	79
2.1.5	Criterios para la selección de una caldera	83
2.1.6	Oportunidades Para Mejorar La Eficiencia Energética De La Caldera	84
2.2	INDUSTRIA LADRILLERA	91
2.2.1	Proceso Productivo De Las Ladrilleras	91
2.2.2	Tipos de Hornos	97
2.2.3	Eficiencia Térmica de los Hornos.	102
2.2.4	Propuestas de mejoramiento.	106
2.2.5	Evaluación de la eficiencia energética.	109
2.3	SIDERURGIA Y METALURGIA	110
2.3.1	Descripción de proceso.....	110
2.3.2	Metalurgia.....	114
2.3.3	Descripción industria en Colombia.	116
2.3.4	Clasificación de los hornos.....	116
2.3.5	Impacto de innovaciones en el sector.	120
2.3.6	Impacto de recuperación energética.....	126

2.3.7	Consumos específicos de energía de cada tipo de horno.	127
2.4	LA INDUSTRIA DEL VIDRIO	128
2.4.1	Proceso de formado.....	130
2.4.2	Procesos utilizados.....	132
2.4.3	Demanda de Energía en la industria del vidrio.....	135
2.4.4	Niveles de emisión y consumo.....	139
2.5	INDUSTRIA DE PRODUCCIÓN DE COQUE	142
2.5.1	Hornos de alto horno – de recuperación de subproductos.....	142
2.5.2	Hornos de no-recuperación (NRO)	144
2.5.3	Tipos de Hornos de no recuperación	144
2.5.4	Eficiencia energética:	146
2.5.5	Comparación de las tecnologías de producción de coque	147
2.6	INDUSTRIA DEL CEMENTO	148
2.6.1	Proceso de producción del cemento.	148
2.6.2	Proceso Productivo.	149
2.6.3	Tecnologías de producción	150
2.6.4	Balances de materia y energía del proceso de producción de cemento.....	150
2.6.5	Consumo Energético.	151
2.6.6	Medidas o cambios tecnológicos para el aumento de eficiencia energética en el proceso de producción cemento.....	156
2.6.7	Eficiencia energética en la industria cementera colombiana	157
2.6.8	Aspectos ambientales	160
2.7	HORNOS DE CURADO.....	161
2.7.1	Proceso de curado en la pintura electrostática	162
2.7.2	Hornos de curado.....	164
2.7.3	Hornos de curado por resistencia eléctrica y convección forzada.	164
2.7.4	Hornos a gas por convección forzada	166
2.7.5	Hornos de paneles infrarrojos	169
2.7.6	Fallas frecuentes que afectan la eficiencia energética de Los Hornos de Curado	
	171	

2.8 BIBLIOGRAFÍA.....177

TABLAS

Tabla 1. Distribución típica de pérdidas en motores de diseño NEMA B.....	6
Tabla 2. Distribución promedio de pérdidas en motores Diseño NEMA B	6
Tabla 3. Distribución de pérdidas en un motor eff1 de 18,5 kW 1500 rpm	7
Tabla 4. Reducción de pérdidas en los conductores para aumentar la eficiencia en un punto	9
Tabla 5. Eficiencia nominal para motores trifásicos diseño NEMA B.....	12
Tabla 6. Nombres de algunos motores de alta eficiencia	13
Tabla 7. Eficiencia nominal mínima de motores trifásicos de inducción de alta eficiencia TEFC de acuerdo al EPACKT.....	13
Tabla 8. Rangos de potencia de las aplicaciones industriales típicas.....	20
Tabla 9. Ejemplos de requerimientos de inicio relacionados con aplicaciones típicas.....	21
Tabla 10. Aspectos relacionados con la parada de la operación	23
Tabla 11. % de energía eléctrica dedicada a iluminación en el sector servicios	33
Tabla 12. Aplicaciones de diferentes tipos de lámparas	38
Tabla 13. Pérdidas energéticas por el tipo de equipo auxiliar empleado.....	39
Tabla 14. Sustentación lumínica de diferentes tipos de lámparas	47
Tabla 15. Comparación de las propiedades de Inducción vs HID.....	52
Tabla 16. Luminancias corregidas para las HPS y las de inducción	53
Tabla 17. Comparación de luminaria HPS vs Inducción	54
Tabla 18. Comparación de las propiedades de las lámparas Fluorescentes vs LED.....	56
Tabla 19. Luminancias corregidas para la luminaria con dos fluorescentes y las dos luminarias LED	57
Tabla 20. Comparación de luminaria fluorescente vs dos luminarias LED	58
Tabla 21. Ahorro por tiempo de operación y tarifa	61
Tabla 22. Recomendaciones de eficiencia en chillers enfriados por aire	61
Tabla 23. Recomendaciones de eficiencia en chillers enfriados por agua.....	62
Tabla 24. Estimado de ahorros por mejora de eficiencia en chiller enfriado por agua.....	64
Tabla 25. Estimado de ahorros por mejora de eficiencia en chiller enfriado por aire.....	65
Tabla 26. Correlación del índice de BACHARACH con % de pérdidas	78
Tabla 27. Relación teórica aire/combustible.....	88
Tabla 28. Tipo de Hornos para elaboración de ladrillo	97
Tabla 29. Consumo promedio de energía en la industria ladrillera según el tipo de horno (mj/ton)	103
Tabla 30. Distribución del consumo de energía eléctrica en la industria ladrillera	105
Tabla 31. Distribución energética general promedio del horno de llama invertida (Colmena)	110
Tabla 32. Descripción de los Hornos por fusión	117

Tabla 33. Descripción de los Hornos industriales.....	117
Tabla 34. Estimación de incrementos de temperatura global en condiciones de baja y alta demanda de acero y su influencia sobre la ruta de proceso y consumo de metálicos para el año 2050.	121
Tabla 35. Consumos energéticos de los hornos de acerías.....	128
Tabla 36. Tipos de Vidrio y sus Características.....	129
Tabla 37. Consumo de energía en el proceso del vidrio	138
Tabla 38. Reducción de misiones para varias tecnologías en la industria del vidrio	140
Tabla 39. Consumo de energía del ventilador SCR.....	141
Tabla 40. Comparación de las tecnologías de obtención de coque. (Colombia)	147
Tabla 41. Consumos específicos en los diferentes Procesos Productivos.	149
Tabla 42. Balance de materia de 1 tonelada de cemento por vía seca.....	150
Tabla 43. Balance de materia de 1 tonelada de cemento por vía húmeda.	150
Tabla 44. Balance térmico de un horno largo vía seca con intercambiador de calor y con enfriador de satélites.....	152
Tabla 45. Características y balance térmico de enfriadores planetarios.	153
Tabla 46. Características y balance térmico de un enfriador de parrilla Fuller.	154
Tabla 47. Consumo de Energía por Tonelada de Cemento, utilizando como combustible carbón. (Proceso vía Seca Planta Típica).	155
Tabla 48. Consumo de Energía por Tonelada de Cemento, utilizando como combustible Gas Natural. (Proceso Vía Húmeda, Planta Típica)	155
Tabla 49. Requerimientos de energía eléctrica para los Centros de Costos de Energía definidos en la planta.	156
Tabla 50. Variables de control y potenciales de ahorro.....	157
Tabla 51. Especificaciones técnicas del horno de curado eléctrico	166
Tabla 52. Especificaciones técnicas horno de curado a Gas.....	168
Tabla 53. Especificaciones técnicas horno de curado Infrarrojo.....	171

FIGURAS

Figura 1. Consumo energético de motores en diferentes aplicaciones.....	2
Figura 2 Concepto de eficiencia de un motor eléctrico	2
Figura 3. Distribución de pérdidas en un motor eff1 de 18,5 kW rendimiento 92,2%	7
Figura 4. Correspondencia de motores eficientes IE1/IE2 con EFF1/EFF2	8
Figura 5. Tipos de curvas de Torque vs-velocidad.....	22
Figura 6. Consumo de potencia de una bomba con control por estrangulamiento Vs una con control de velocidad	24
Figura 7. Resistencia total del sistema, pérdidas por fricción mas perdidas por presión estática.	25
Figura 8. Dos sistemas de bombeo con el mismo resultado	25
Figura 9. Plantas de bombeo	26

Figura 10. Consumo de potencia relativo para diferentes métodos de control de flujo.....	27
Figura 11. Sistema de chiller.....	28
Figura 12. Energía ahorrada usando un VSD sobre una unidad de aire comprimido de tornillo	29
Figura 13. Compresor de refrigeración con variador.	30
Figura 14. Modos de operación de una sierra de alta inercia: (a) Operación de corte; (b)Frenado.	30
Figura 15. Energía consumida durante un período de aceleración: (a) Motor Standard; (b) Motor de polos intercambiables;(c) Variador de velocidad (VSD).....	31
Figura 16. Potencia requerida por una banda transportadora	31
Figura 17. Ahorros de energía en una banda transportadora usando un control de velocidad comparada con el sistema típico de velocidad constante	32
Figura 18 Presentación comercial de lámparas tipo A y E.....	35
Figura 19. Tipos de luminarias.....	40
Figura 20. Sustentación lumínica de diferentes tipos de lámparas	47
Figura 21. Factor S/P para diferentes tipos de lámparas.....	49
Figura 22- Costos de iluminación del caso base HPS vs Inducción.....	55
Figura 23- Costos de iluminación del caso base HPS vs Inducción.....	59
Figura 24. Elementos generales de una caldera.....	68
Figura 25. Caldera estándar.....	69
Figura 26. Pérdidas de energía en una caldera	76
Figura 27. Caldera de condensación.....	81
Figura 28. Caldera de baja temperatura	82
Figura 29. Caldera de Biomasa (Pellets)	83
Figura 30. Flujo de energía en la caldera.....	84
Figura 31. Distribución de calor en la operación de la caldera	85
Figura 32. Preparación y moldeo de arcilla	93
Figura 33. Moldeo de arcilla	93
Figura 34. Secador artificial de arcilla moldeada	95
Figura 35. Horno de Llama Invertida (Colmena)	99
Figura 36. Horno Hoffman	100
Figura 37. Esquema general de un Horno Túnel Ladrillero	101
Figura 38. Quemadores de gas y carbón en horno tunel (Izq) -Descarga (Der).....	102
Figura 39. Consumo Térmico de la Industria Ladrillera Nacional.....	104
Figura 40. Diagrama Sankey Distribución de energía eléctrica en una ladrillera.....	104
Figura 41. Consumo específico promedio de energía en la industria ladrillera nacional ..	105
Figura 42 (a) Consumo de energía eléctrica y térmica por equipos. (b) Ahorros potenciales de energía eléctrica y térmica por equipos.....	108
Figura 43. Flujos de energía en un horno de llama invertida (Colmena)	110
Figura 44. Esquema productivo en el proceso siderúrgico.	112
Figura 45. Etapas del Proceso Productivo.	112

Figura 46. Fases del proceso metalúrgico.	114
Figura 47. Horno de arco eléctrico.	118
Figura 48. Horno de oxígeno básico	119
Figura 49. Influencia de la metalización de hierro esponja sobre el consumo específico de energía eléctrica para una carga del 100% de hierro esponja.	122
Figura 50. Esquema de un horno eléctrico alimentado mediante carga caliente de hierro esponja por transporte neumático.	123
Figura 51. Formado Automático de Botellas.....	131
Figura 52. Proceso de fusión, afinado, homogenización y acondicionamiento.	137
Figura 53. Hornos de Alto Horno con recuperación de sub productos.....	143
Figura 54. Hornos de Coquización tipo Colmena del Altiplano Cundi-Boyacense	145
Figura 55. Principios de transferencia de calor en hornos verticales y hornos de solera..	146
Figura 56. Diagrama de Bloques del Proceso Productivo del cemento.	148
Figura 57. Enfriador de cuba vertical.....	159
Figura 58. Horno de curado de pintura	162
Figura 59. Curva de curado Epoxi	163
Figura 60. Curva de curado poliéster-Tgic.....	163
Figura 61 Curva de curado epoxi/poliéster	163
Figura 62. Circulación de aire en Horno de curado eléctrico	165
Figura 63. Circulación de aire en horno de Curado a Gas	168
Figura 64. Panel Infrarrojo- Emisión de calor	170

1. PROCESOS INDUSTRIALES ELÉCTRICOS

1.1 MOTORES ELÉCTRICOS DE ALTA EFICIENCIA.

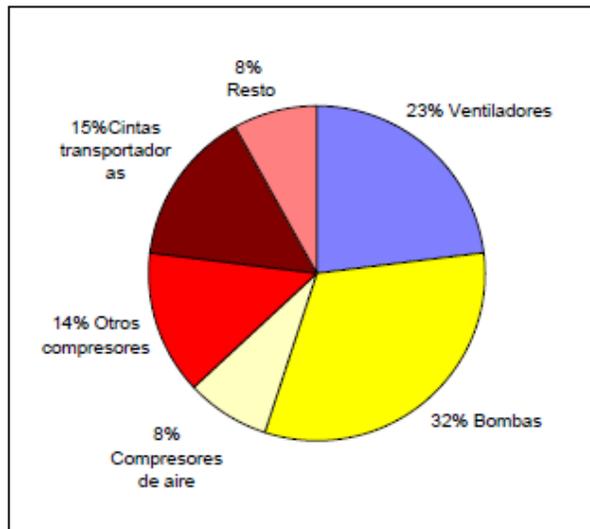
Los motores eléctricos asincrónicos (MA) son máquinas eléctricas con aplicación en todos los sectores de la economía que consumen cerca del 50% de la energía eléctrica generada en el mundo. Fundamentalmente toman energía eléctrica de la red y la transforman en potencia mecánica para múltiples usos. Hay dos tipos de MA, los de rotor de jaula de ardilla y los de rotor de anillos rozantes (Tiravanti, 2010). Su gran uso se debe a la sencillez de su fabricación, su alta confiabilidad y buen nivel de eficiencia.

El constante aumento de los costos de la energía eléctrica y la sensibilidad frente a la conservación del medio ambiente motivaron a los países industrializados como USA y algunos europeos a adoptar políticas y aprobar legislaciones respecto al uso de la energía. Como el motor eléctrico más usado es el asincrónico de jaula de ardilla, se identificó entre las medidas más prometedoras para el ahorro de energía, fijar un mejoramiento obligatorio de la eficiencia de estos motores. Un estudio adelantado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos de América en 1990 proyectó que para el año 2010, la industria ahorraría 240 mil millones de KWh anualmente reemplazando motores y accionamiento de eficiencia estándar, por otro que fueran solo de 2 a 6% más eficientes.

Los países subdesarrollados han demorado el adoptar esta política energética ya que el uso de motores más eficientes es bastante inferior a los países industrializados debido a que, no tienen en cuenta el costo real de la energía como criterio de compra, y no se fijan en la relación eficiencia frente a costos totales durante la vida útil del equipo, y solo ven el bajo costo inicial. De hecho no se analiza suficientemente que los motores con mayor eficiencia, aunque más costosos inicialmente, gracias a los costos de operación más bajos, retribuyen la diferencia en un plazo adecuado. Por lo que es importante conocer cuáles son las características electromecánicas de los motores de alta eficiencia, sus ventajas y las limitaciones que pueden presentar en su aplicación.

El valor del motor eléctrico eficiente está en la variedad de sus aplicaciones, todas las cuales son importantes en el sector de servicios como se puede apreciar en la figura siguiente, que muestra la distribución del consumo energético de los motores eléctricos en las diferentes aplicaciones (Motores de alta eficiencia - Motors-Electrics.com)

Figura 1. Consumo energético de motores en diferentes aplicaciones



Fuente (Motores de alta eficiencia - Motors-Electrics.com)

1.1.1 Generalidades operativas del motor eléctrico.

1.1.1.1 Concepto de eficiencia.

La eficiencia (n) de un motor eléctrico como se muestra en la figura siguiente, es la medida (porcentaje) de su capacidad de convertir la potencia eléctrica que toma de la red en potencia mecánica útil.

Figura 2 Concepto de eficiencia de un motor eléctrico



Fuente (SIEMENS Energy & Auromation, 2012)

$$n = \frac{\text{Potencia mecánica}}{\text{Potencia eléctrica}} \times 100$$

Y como Potencia mecánica de salida = Potencia eléctrica de entrada – pérdidas

Se tiene que:

$$n = \left(1 - \frac{\text{Perdidas}}{\text{Pot. eléctrica de entrada}}\right) * 100$$

1.1.2 Naturaleza de las pérdidas en los motores eléctricos

(Schneider Electric, 2010)

Las pérdidas corresponden a la potencia eléctrica que se transforma y disipa en forma de calor en el proceso de conversión de la energía eléctrica en mecánica. Por su naturaleza las pérdidas se agrupan en 5 áreas: pérdidas en el cobre del estator, pérdidas en el cobre del rotor, pérdidas en el núcleo, pérdidas por fricción y ventilación y pérdidas adicionales.

1.1.2.1 Pérdidas en los conductores.

Las pérdidas en los conductores dependen del cuadrado de la corriente y se dividen en dos zonas: estator (I^2R en las bobinas del estator) y rotor (I^2R en los bobinados del rotor).

1.1.2.2 Pérdidas en los conductores del estator.

Estas pérdidas son función de la corriente que fluye en el devanado del estator y la resistencia de ese devanado. Son mínimas al operar en vacío y se incrementan con el aumento de carga.

La corriente de línea en el estator en función del factor de potencia (FP), puede expresarse como:

$$I_L = \frac{\text{potencia eléctrica de entrada}}{\sqrt{3} * \text{Voltaje de línea} * FP}$$

Para mejorar la operación del motor, es importante identificar la relación entre la eficiencia (EF) y el factor de potencia (FP). Al despejar el factor de potencia la ecuación se reescribe:

$$FP = \frac{\text{Potencia mecánica de salida}}{\sqrt{3} * \text{voltaje de línea} * I_L * EF}$$

Por tanto el factor de potencia decrece al incrementar la eficiencia. Para que el factor de potencia permanezca constante, la corriente del estator debe reducirse en proporción al aumento de la eficiencia. Si se quiere que el factor de potencia mejore, la corriente debe disminuir más de lo que la eficiencia aumente, esto es difícil de lograr desde el punto de vista del diseño pues hay que cumplir otras restricciones operacionales como el momento máximo.

Por otra parte la corriente de línea se puede expresar:

$$I_L = \frac{\text{Potencia mecánica de salida}}{\sqrt{3} * \text{voltaje de salida} * FP * EF}$$

La anterior ecuación muestra que las pérdidas en el estator (I^2R) son inversamente proporcionales al cuadrado de la eficiencia y del factor de potencia. Las pérdidas en los conductores del estator dependen de la resistencia del bobinado, así para un motor dado la resistencia del bobinado es inversamente proporcional al peso del bobinado del estator, es decir a mas material conductor en el estator menos pérdidas.

1.1.2.3 Pérdidas en los conductores del rotor

Estas pérdidas son directamente proporcionales a la resistencia del bobinado del rotor, dependen del cuadrado de la corriente que circula en el bobinado del rotor (barras y anillos) y del flujo magnético que atraviesa el entrehierro. En vacío son prácticamente cero y se incrementan con el cuadrado de la corriente en el rotor y con la temperatura, se pueden expresar en función del deslizamiento:

$$\text{Pérd. Rotor} = \frac{(PMS + \text{Pérdidas } F \text{ y } V)}{1 - S} S$$

PMS. : Potencia Mecánica de Salida

F y V: Fricción y Ventilación

S: Deslizamiento

1.1.2.4 Pérdidas en el núcleo magnético.

Estas pérdidas están formadas por las pérdidas por corrientes de Eddy y las del fenómeno de histéresis, incluyendo las pérdidas superficiales en la estructura magnética del motor. Las pérdidas en el núcleo del rotor debido al flujo magnético principal, son virtualmente cero.

1.1.2.5 *Pérdidas por Histéresis.*

Como el flujo de excitación cambia de dirección en el núcleo magnético, la remanencia hace que se forme el ciclo de histéresis, relacionado con la energía gastada en magnetizar y desmagnetizar el núcleo continuamente. Estas pérdidas dependen del flujo máximo de excitación, de la frecuencia de variación del flujo y de la característica del material que determina el ancho del ciclo de histéresis.

1.1.2.6 *Pérdidas por corrientes de Eddy.*

Se originan en las corrientes inducidas o corrientes de Eddy en las láminas magnéticas del núcleo estático que son inducidas por el flujo magnético giratorio estático. Así por la ley de Faraday el campo magnético variable en el tiempo crea campos eléctricos de trayectoria cerrada en el núcleo magnético y como el acero es un material conductor estos campos hacen circular corrientes (corrientes de Eddy) a través de su trayectoria cerrada, por esta razón el núcleo magnético se hace de láminas magnéticas. Por consiguiente estas pérdidas dependen del flujo magnético máximo, de la frecuencia de variación del flujo magnético y de la resistividad del acero magnético.

1.1.2.7 *Pérdidas por fricción y ventilación.*

Las pérdidas por fricción y ventilación son debidas a la fricción en los rodamientos y a las pérdidas por resistencia del aire al giro del ventilador y de otros elementos rotativos del motor, en función de las dimensiones de este, de la velocidad, del tipo de rodamiento, de la carga y de la lubricación usada. Estas pérdidas quedan fijadas por el tipo de diseño, y como son un porcentaje pequeño de las pérdidas totales del motor, las mejoras que se pueden hacer en el diseño para reducirlas no se reflejan significativamente en la eficiencia del motor.

1.1.2.8 *Pérdidas adicionales en carga.*

Estas pérdidas están relacionadas con la carga y se supone que varían con el cuadrado del momento de salida, son difíciles de determinar por medio de mediciones directas o de cálculos. Su naturaleza es muy compleja, dependen de muchos factores de diseño y de fabricación del motor. Algunos de los elementos que influyen en estas pérdidas son: el diseño del devanado, la relación entre la magnitud del entrehierro y la abertura de las ranuras; la relación entre el número de las ranuras del estator y del rotor, la inducción en el entrehierro; las condiciones en la superficie del rotor, el tipo de contacto superficial entre las barras y las laminaciones del rotor.

1.1.2.9 *Distribución de las pérdidas.*

Dentro de un intervalo limitado de eficiencia, las diferentes pérdidas analizadas son independientes unas de las otras. Aunque, cuando se procuran mejoras sustanciales en la

eficiencia, se encuentra que las mismas están fuertemente entrelazadas. El diseño final de un motor es un balance entre las diferentes pérdidas, con el objeto de lograr una eficiencia elevada y aun poder satisfacer otros requerimientos operacionales como el momento de arranque, la corriente de arranque, el momento máximo y el factor de potencia.

La forma en que se distribuye relativamente estas pérdidas depende del tipo y tamaño del motor y, para tener una idea general, en la Tabla 1 se muestra como se distribuyen las pérdidas en motores de diseño NEMA B de distinta potencia nominal. En esta tabla se puede evidenciar que a potencia nominal resulta relativamente amplio el intervalo que varía cada una de las pérdidas dependiendo de la potencia del motor.

Tabla 1. Distribución típica de pérdidas en motores de diseño NEMA B

Potencia (HP)	5	50
Tipo de pérdidas	% Pérdidas	% Pérdidas
Conductores Estator	40	38
Conductores Rotor	20	22
Núcleo Magnético	29	20
Fricción y Ventilación	4	8
Adicionales en Carga	7	12
Eficiencia %	83	90.5

Potencia (HP)	100	200
Tipo de pérdidas	% Pérdidas	% Pérdidas
Conductores Estator	28	30
Conductores Rotor	18	18
Núcleo Magnético	13	15
Fricción y Ventilación	14	10
Adicionales en Carga	27	29
Eficiencia %	91.5	93

Fuente: Andreas Jhon ENERGY-EFFICIENT

Es importante para los diseñadores entender la forma en que se distribuyen las pérdidas con el objetivo de realizar cambios para aumentar la eficiencia del motor. En general la distribución de pérdidas promedio para los motores diseño NEMA B puede resumirse en la Tabla 2.

Tabla 2. Distribución promedio de pérdidas en motores Diseño NEMA B

Componentes Pérdidas en el Motor	% Pérdidas totales
Pérdidas Conductores Estator	37
Pérdidas Conductores Rotor	18
Pérdidas Núcleo Magnético	20
Pérdidas Fricción y Ventilación	9
Pérdidas Adicionales en carga	16

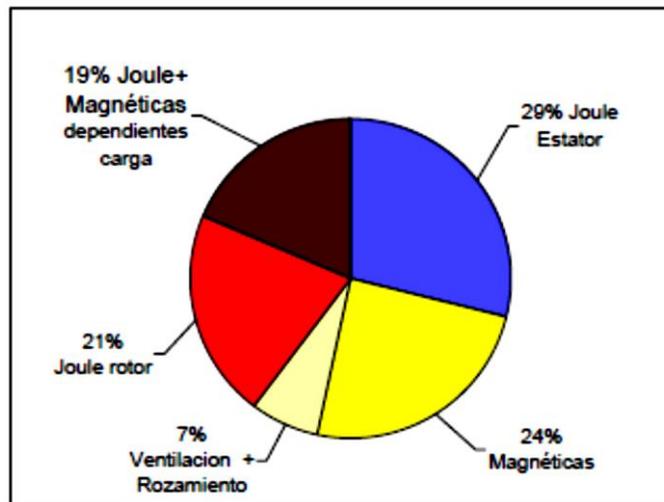
Para que el motor de inducción cumpla con los rendimientos mínimos indicados en el acuerdo Europeo, la Ley EEact y la Ley EPact, este se tiene que optimizar teniendo en cuenta donde se originan las pérdidas. En la tabla y figura siguiente se presentan los valores característicos de un motor de 18,5kW 1500/min con un rendimiento del 92,2%.

Tabla 3. Distribución de pérdidas en un motor eff1 de 18,5 kW 1500 rpm

Potencia Nominal cedida al eje		18500	[W]
Potencia Electrica Absorbida		20085	[W]
Total de Pérdidas	100%	1585	[W]
Pérdidas Magnéticas	29%	454	[W]
Pérdidas Joule Estator	24%	376	[W]
Pérdidas Joule Rotor	21%	329	[W]
Pérdidas dependientes de la carga Joule y magnéticas	19%	297	[W]
Pérdidas ventilación y rozamiento	7%	110	[W]

Fuente (Motores de alta eficiencia - Motors-Electrics.com)

Figura 3. Distribución de pérdidas en un motor eff1 de 18,5 kW rendimiento 92,2%



Fuente (Motores de alta eficiencia - Motors-Electrics.com)

1.1.3 Incremento de la eficiencia en los motores asíncronos

Hay tres niveles de eficiencia en motores eléctricos que se clasifican en orden creciente de eficiencia como IE1, IE2, e IE3, según la International Electrotechnical Commission (IEC por sus siglas en inglés) o EFF3, EFF2 y EFF1 según clasificación de European Committee of Manufactures of Electrical Machines and Power Electronics (CEMEP). En esta escala el empleo de motores de alta eficiencia (EFF1) y variador de velocidad reduce los requerimientos energéticos hasta en un 40% (3) con la consiguiente reducción de emisiones contaminantes. Para la Unión Europea (EU por sus siglas en inglés) en 2009 se estimaba que

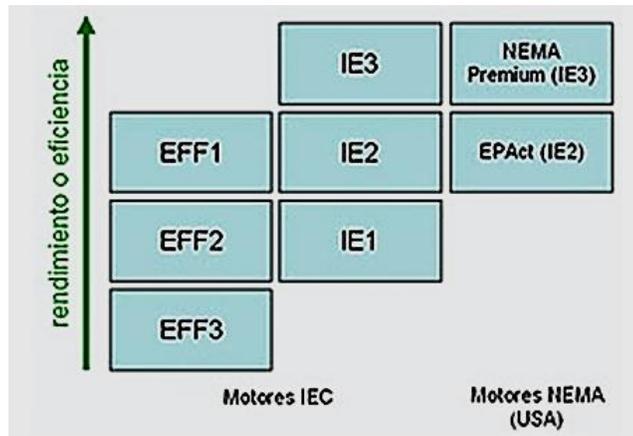
la sustitución de los motores convencionales EFF3 por motores EFF2 supondría un ahorro de hasta 6TWh al año, que con un precio de 0,09 € por kWh, la EU ahorraría más de 540 millones de € al año. (3)

La aparición de las nuevas normas IEC 60034-2-1:2007 y 60034-30:2008 armonizó a nivel mundial el criterio de medición del rendimiento o eficiencia de los motores de baja tensión (<1000V) con rotor de jaula de 0,75 a 375kW de 2, 4 y 6 polos, y fijó las nuevas clases de eficiencia (IE= International Efficiency), que de menor a mayor rendimiento son las siguientes (6):

- IE1 (standard efficiency, similar al antiguo EFF2)
- IE2 (high efficiency, similar al antiguo EFF1)
- IE3 (premium efficiency)

La Figura 4, muestra las equivalencias entre las diferentes nomenclaturas de eficiencia.

Figura 4. Correspondencia de motores eficientes IE1/IE2 con EFF1/EFF2



Fuente (siemens, 2011)

El incremento de la eficiencia en los motores asíncronos de jaula de ardilla se obtiene con la reducción de sus pérdidas.

Según aumenta la potencia de salida y en consecuencia la eficiencia nominal, también aumenta el grado de dificultad y el costo para mejorar la eficiencia de un motor. Teniendo en cuenta solamente las pérdidas en los conductores del estator y del rotor para mejorar un punto en la eficiencia, se requiere un aumento creciente en la reducción de estas pérdidas, según se puede observar en la Tabla 4, elaborada para valores promedio de los diseños NEMA B.

Tabla 4. Reducción de pérdidas en los conductores para aumentar la eficiencia en un punto

HP	Eficiencia Original	Eficiencia Incrementada	Reducción requerida en pérdidas en conductores
1	73	74	8
5	83	84	11
25	89	90	16
50	90.5	91.5	19
100	91.5	92.5	28
200	93	94	38

Fuente: (IDAE, 2007)

Las pérdidas en el motor pueden reducirse hasta un promedio de un 50% a través del uso de mejores materiales, optimizando la geometría, ajustando mejor el motor con la carga y mejorando el proceso de fabricación.

Cuando se intenta alcanzar una máxima eficiencia de un motor, debe considerarse que ésta pueda incrementarse por dos métodos distintos. Uno es seguir el camino por el que la mejoría se logra principalmente a base de adicionar materiales empleando tecnologías más caras. El otro es optimizar el diseño del motor usando métodos de optimización. La diferencia entre los dos enfoques es que en el primer caso la mejoría se logra modificando un diseño existente, mientras que en el segundo caso se obtienen diseños totalmente nuevos.

En la primera variante, el incremento de los materiales implica fundamentalmente aumentar el volumen del material activo (acero magnético y material conductor de la corriente) y las mejoras tecnológicas significan usar aceros magnéticos de mejor calidad, utilizar un mayor factor de llenado en las ranuras, aumentar el número de ranuras del estator y del rotor, etc.

Las características de diseño de la mayoría de los motores de alta eficiencia son:

- Las pérdidas en los conductores del estator disminuyen aumentando el área disponible para los conductores mediante la colocación en las ranuras de conductores de más sección o a través de un incremento de las dimensiones de las ranuras. Una variación en la configuración del devanado puede llevar también a una disminución de estas pérdidas, si se logra disminuir con ello la longitud de las cabezas de bobina y en consecuencia la resistencia del bobinado estatórico.
- Las pérdidas en los conductores del rotor pueden reducirse aumentando la cantidad del material conductor (en las barras y en los anillos), usando materiales de mayor conductividad, así como aumentando el flujo total que atraviesa el entrehierro. La

magnitud de estos cambios está limitada por las siguientes restricciones: momento mínimo de arranque requerido, corriente máxima de arranque permisible y el factor de potencia mínimo aceptable.

- Las pérdidas en el núcleo magnético se minimizan haciendo que el motor opere con inducciones más bajas que las normales y para compensar incrementando la longitud de la estructura ferromagnética. Esto reduce las pérdidas por unidad de peso, pero debido a que el peso total aumenta, la mejoría respecto a pérdidas no es proporcional a la reducción unitaria de éstas. La disminución en la carga magnética también reduce la corriente de magnetización y también influye positivamente en el factor de potencia.
- Las pérdidas por fricción y ventilación están asociadas a los ventiladores y a la cantidad de ventilación requerida para extraer el calor generado por otras pérdidas en el motor, al igual que las pérdidas en el cobre, las del núcleo y las adicionales. Según se reducen las pérdidas que generan calor, es posible reducir el volumen de aire requerido para moverlas, de esta manera se pueden reducir las pérdidas por ventilación. Esto resulta válido especialmente en el caso de motores cerrados con ventilación externa forzada. Otra forma es el logro de un mejor diseño aerodinámico. Uno de los subproductos importantes de la reducción de las pérdidas de ventilación, es la disminución de los niveles de ruido.
- Las pérdidas adicionales se pueden reducir mediante un diseño optimizado del motor y mediante un proceso cuidadoso de producción. Como estas pérdidas están asociadas al procesamiento, tal como las condiciones superficiales del rotor, se pueden minimizar a través de un control cuidadoso del proceso de fabricación. Las pérdidas adicionales son las más difíciles de controlar en el motor, debido al gran número de variables que contribuyen a las mismas.

A continuación se presentan las mejoras obtenidas en los motores de alto rendimiento para alcanzar el objetivo fijado en el Acuerdo Europeo y las Leyes Americanas (Motores de alta eficiencia - Motors-Electrics.com).

- **Pérdidas por efecto Joule estator**
Aumentar la cantidad cobre alojado en las ranuras del estator
Mayor tamaño de ranura
Disminuir cabeza de bobina
- **Pérdidas Magnéticas**
Mejorar la calidad de la chapa magnética
Disminuir el grosor de las chapas que componen el empilado del motor
Mejorar los procesos de fabricación, evitar rebabas
Aumento entrehierro
Mejorar el factor de bobinado. Por ej Motor de 2 capas
Aumentar el tamaño del empilado, longitud del paquete magnético

- **Pérdidas por efecto Joule en el rotor**

Aumentar la inducción en el entrehierro

Aumentar tamaño de las barras conductoras del rotor

Aumentar la conductividad de las barras, utilizar rotores de cobre.

- **Pérdidas Mecánicas**

Optimización de la ventilación: Utilización de ventiladores más eficientes

Disminuir las pérdidas por rozamiento: Utilización de rodamientos con bajo nivel de pérdidas y rodamientos más pequeños.

En muchos casos las pérdidas mecánicas no son debidas al propio motor sino que existe un sistema de transmisión que hace que debido a las pérdidas que en éste se originan, disminuya el rendimiento global del accionamiento.

Este fenómeno se puede evitar controlando las tensiones de las transmisiones por correas. También hay que estudiar la posibilidad de sustituir el sistema de correas o de reductor con caja de engranajes por accionamiento directo mediante regulación de velocidad.

- **Pérdidas dependientes de la carga Joule y magnéticas (SIEMENS Energy & Automation, 2012)**

Este tipo de pérdidas no dejan de ser pérdidas por efecto Joule y magnéticas que se originan en el cobre del estator, en el aluminio o cobre del rotor y en la chapa magnética y aunque son análogas a las indicadas anteriormente se tratan por separado, ya que para su determinación se usan métodos distintos a los utilizados en los apartados anteriores. Estas pérdidas se pueden reducir mediante la actuación sobre los siguientes parámetros:

- Modificación del número ranuras del rotor N2
- Inclinación ranuras del rotor
- Bobinado paso acortado
- Devanado 2 capas
- Conexión en triángulo/estrella
- Grupos en paralelo
- Tamaño espineta rotor
- Resistencia transversal del rotor
- Forma de las ranuras del rotor
- Mejorando el mecanizado
- Actuando sobre el entrehierro

1.1.4 Motores de alta eficiencia

Aunque no existe una definición unificada mundialmente sobre lo que es un motor de alta eficiencia, una revisión histórica de su desarrollo nos da una noción más clara de este concepto.

1.1.4.1 Desarrollo de los Motores de Alta Eficiencia

Hasta el año 1960 los diseñadores y fabricantes de motores de inducción siguieron la tendencia de diseñar los motores para lograr una alta eficiencia, a pesar de que en ese entonces los materiales no tenían un gran desarrollo el diseño electromagnético centrado en la eficiencia consiguió que se fabricaran motores de eficiencias aceptables.

El bajo costo de la energía eléctrica en ese entonces hacía que la eficiencia no fuera un parámetro que incidiera en los costos de operación. Por eso durante el periodo de 1960 hasta 1975 los fabricantes cambiaron su tendencia y se centraron en diseñar motores para conseguir un costo mínimo, sobre todo en el rango de 1 a 250 HP. Con este fin se disminuyó la cantidad de material activo, y los materiales fueron seleccionados para alcanzar mínimos requerimientos de eficiencia. En este contexto en 1977 NEMA recomendó marcar la placa de los motores trifásicos con una EFICIENCIA NOMINAL NEMA. La Tabla 5 muestra los rangos de eficiencia para motores trifásicos de Diseño NEMA B, aquí se define un valor mínimo para la eficiencia para cada nivel de eficiencia.

Tabla 5. Eficiencia nominal para motores trifásicos diseño NEMA B

HP	Rango de Eficiencia Nominal	Eficiencia Nominal Promedio
5	78 – 85	82
10	81 – 88	85
25	85 – 90	88
50	88 – 92	90
75	89.5 – 92.5	91
100	90 – 93	91.5
150	91 – 93.5	92.5
200	91.5 – 94	93
250	91.5 – 94.5	93.5

La crisis energética de la década del 70 hizo que los costos de la energía eléctrica comenzaran a incrementarse a un ritmo de aproximadamente del 12% anual. En este contexto los costos de operación de un motor por consumo de energía hicieron que la eficiencia fuera un parámetro importante en la selección del motor. En este contexto en 1974 algunos fabricantes empezaron a usar métodos para diseñar motores con una eficiencia mayor que la exigida por la Norma NEMA. Así se diseñó una línea de motores de

alta eficiencia con pérdidas 25% menores que el motor promedio diseño NEMA B, esto se llamó la primera generación de motores de alta eficiencia.

Luego del desarrollo de esta primera generación de motores de alta eficiencia, muchos fabricantes entraron en la tendencia de diseñar motores con el objeto de lograr una alta eficiencia, usando un diseño, materiales y procesos de fabricación mejorados. Cada fabricante identificó su motor con un nombre, como se muestra en la Tabla 6, entre ellos tenemos:

Tabla 6. Nombres de algunos motores de alta eficiencia

Fabricante	Nombre del motor
General Electric	Energy Saber
Realince Electric Co	XE Energy Efficient
Baldor Electric Co	Super E
Magnetek/Louis Allis	Spartan High Efficiency
US Electrical Motors	Corro- DutyPremium Efficiency
Siemens	Premium Efficiency
Toshiba	Premium Efficiency

En 1992 en USA se expidió el documento Energy Policy Act of 1992 (EPACT'92). En cuanto a los motores el EPACT cubre motores de inducción de jaula de ardilla de 1 a 200 HP, de 2, 4 y 6 polos y de propósito general diseños NEMA A y B. Las eficiencias mínimas exigidas por el EPACT está escritas en la Tabla 12-10 de la Norma NEMA MG1.1997. La Tabla 7 muestra las eficiencias para algunas potencias extraídas de la Tabla 12-10.

Tabla 7. Eficiencia nominal mínima de motores trifásicos de inducción de alta eficiencia TEFC de acuerdo al EPACT

HP	6 polos	4 polos	2 polos
5	87.5	87.5	87.5
10	89.5	89.5	89.5
25	91.7	92.4	91
50	93	93	92.4
75	93.6	94.1	93
100	94.1	94.5	93.6
150	95	95	94.5
200	95	95	95

1.1.4.2 Normas sobre Motores de Alta eficiencia (1) (3)

En varios países se han dado legislaciones para obligar el uso de motores de alta eficiencia, entre estos mencionaremos a algunos.

- USA. En 1992 se dio la EPACT'92, esta ley determinó que a partir del 24 de Octubre de 1997 todos los motores de uso general que se instalen en USA deben de tener una eficiencia que cumpla la tabla 12-10 de la Norma NEMA MG1.1997. Esto incluye motores de una sola velocidad, de 2,4 y 6 polos, diseño NEMA A y B, cerrados (TEFC) o abiertos (ODP), de 1 a 200 HP.
- CANADÁ. En 1992 en Canadá se dio la legislación llamada Energy Efficient Act y fue acatada a partir de Diciembre de 1997. Los valores de eficiencia y características de los motores son los mismos que el EPACT'92.
- MÉXICO. En Mayo de 1998 expidió la Norma Oficial Mexicana NOM-016-ENER-1997 EFICIENCIA ENERGÉTICA DE MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICA, la cual da los límites de eficiencia, los métodos de prueba y marcado para motores de inducción tipo Jaula de ardilla de uso general entre 1 y 200 HP. Esta Norma entro en cumplimiento en junio de 1998.

Para la EU recientemente se han emitido normas tendientes a impulsar el uso de los motores eficientes entre las cuales destacan (3).

- EU MEPS (European Minimum Energy Performance Standard) Establece los niveles mínimos de eficiencia de los motores eléctricos en el mercado Europeo.
- Publicación oficial de las normas de la Comisión Europea 640/2009 y 641/2009 que establecen los requisitos de Ecodesing como norma de funcionamiento para motores eléctricos.(23 de julio de 2009)
- A partir del 16 de junio de 2011 es de obligado cumplimiento para motores entre 0,75 kW y 375 kW una clasificación mínima de IE2.
- A partir de 2015 el rendimiento mínimo de motores de 7, 5 a 375 kW será el IE3.
- A partir del 2017 los motores 0,75 kW a 5,5 kW deberán cumplir con IE3.

1.1.4.3 Guía de selección de motores de alta eficiencia

- **Decisión inicial de compra.**

Al considerar la posibilidad de compra de un nuevo motor eléctrico, el ingeniero responsable debe valorar la rentabilidad económica de pagar un costo adicional por el motor de alta eficiencia frente al ahorro derivado de un menor consumo energético. Algo importante en esta decisión es el tiempo de amortización de la inversión. Generalmente estas iniciativas de ahorro industrial consideran dos o tres años el periodo de tiempo necesario para reintegrar el dinero invertido. Para el especialista el criterio de operación que determina la idoneidad de una u otra elección es el número de horas de trabajo del motor. Los motores escasamente utilizados (por ejemplo, motores de accionamiento de válvulas de control) por baja potencia requerida y/o pocas horas de trabajo no serán

candidatos a elegir para ser motores de alta eficiencia. Sin embargo, los que operen de tal forma que determinen un consumo energético elevado serán una buena oportunidad de instalar un motor de alta eficiencia.

Considerando valores medios de carga del motor (75%), de mejora de eficiencia entre el motor estándar y el motor de alta eficiencia (entre el 2% al 5%), de costo de compra del motor, de periodo de amortización de tres años y del precio de la energía, se puede decir que es interesante la compra de un motor de alta eficiencia en los siguientes casos:

- En los motores entre 10HP y 75HP cuando operan 2500 horas anuales o más.
- En los motores de potencias distintas a las anteriores (pequeños y grandes motores) cuando operan 4500 horas o más.

1.1.4.4 *Ventajas, limitaciones y aplicabilidad de los motores de alta eficiencia*

- **Ventajas**

- El hecho de que se tenga una eficiencia mayor significa que se disminuye los costos de operación del motor y se puede recuperar la inversión adicional en un tiempo razonable, sobre todo si se opera a una carga cercana a la potencia nominal. Se debe recordar que en un año el costo de la energía es aproximadamente seis veces el costo de compra del motor.
- Los motores de alta eficiencia tienen por lo general un menor deslizamiento (mayor velocidad de operación) que los motores de eficiencia estándar, debido a los cambios que se producen en los parámetros del motor. La mayor velocidad puede ser ventajosa en muchos casos, pues mejora la ventilación.
- Los motores de alta eficiencia son normalmente más robustos y mejor construidos que los motores estándar, lo que traduce en menores gastos en mantenimiento y mayor tiempo de vida.

- **Limitaciones**

- El hecho de que los motores de alta eficiencia operan a una velocidad mayor, puede ocasionar un incremento en la carga, sobre todo cuando se accionan ventiladores o bombas centrífugas, esto debe valorarse en cada situación.
- El momento de arranque y el momento máximo son en algunos diseños ligeramente mayores y en otros ligeramente menores, por lo tanto es necesario analizar detalladamente en cada aplicación.
- La corriente de arranque suele ser mayor. Esto puede provocar que se sobrepasen los límites máximos de caída de voltaje en la red. También puede influir en la capacidad de los equipos de maniobra, aunque muchas veces se puede operar con los mismos que se usan con los motores estándar y algunas veces sólo es necesario cambiar los elementos térmicos.

- La corriente transitoria en el arranque, que tiene su máximo en el primer medio ciclo, se aumenta por la tendencia a un mayor valor de la relación X/R. Aunque esta corriente puede no afectar el tamaño del arrancador, sí se afecta el disparo instantáneo del interruptor del motor, por lo que hay que buscar un compromiso entre la coordinación del interruptor y los disparos del arranque.
- El factor de potencia del motor puede ser menor que un motor estándar. Un estudio reciente realizado por Bonnett (1997) encontró que los motores de alta eficiencia construidos en USA, en el intervalo de 3 a 10 HP tienen un factor de potencia mayor que los estándares, inferior en el intervalo de 15 a 40 HP, aproximadamente igual de 50 a 100 HP y de nuevo menor de 125 HP en adelante.
- **Aplicabilidad.**
Los motores de alta eficiencia pueden aplicarse favorablemente en los siguientes casos:
 - Cuando el motor opera a una carga constante y muy cerca del punto de operación nominal.
 - Cuando se usan para reemplazar a motores sobredimensionados.
 - Cuando se aplican conjuntamente con Variadores electrónicos de frecuencia (Variable Frequency Drives) para accionar bombas y ventiladores, pueden lograr ahorros de hasta más del 50% de la energía.
 - Como parte de un Programa de Uso eficiente de la Energía Eléctrica.
 - En instalaciones nuevas.

1.1.4.5 Cálculo de ahorro de energía.

A continuación se presenta un ejercicio numérico con datos para el mercado internacional¹, en el que se calcula el ahorro anual y el tiempo de recuperación de la inversión adicional al comprar un motor de alta eficiencia frente a uno convencional. (2)

$$A_{\text{anual}} = 0,746 \times \text{HP} \times R \times \text{TR} \times \left(\frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} \right)$$

Aanual = Ahorro anual

HP = Potencia del motor

R = tarifa de la energía suministrada (\$/kWh)

TR = Horas de operación al año

E1 = Eficiencia del motor estándar

E2 = Eficiencia del motor de alta eficiencia

M1 = Motor de eficiencia estándar

M2 = Motor de alta eficiencia

¹ Al término de presente estudio se presentará este ejercicio con datos para el mercado Colombiano

0,746 factor de conversión (KWh/HP)

$$\text{Rec Adicional} = (\$M2 - \$M1)/A\text{anual}$$

Motor de 40 HP, 2 polos, 3600 rpm

Motor de eficiencia estándar M1

E1 = 89,5 %

Precio = US\$ 980

Motor de alta eficiencia M2

E2 = 93,6%

Precio US\$1300

Aanual = 0,746 x 40 x 0,18 x 4500 x (1/0,895 - 1/0,936)

Aanual = US\$1184

Rec Adicional = (1300 - 980)/1184

Rec Adicional = 0,27 años = 3,2 meses

Tiempo de retorno de la inversión total (TR)

$$TR = \frac{VC}{A\text{anual}}$$

TR = 1300/320 = 4 años

A continuación se presenta un ejemplo acerca de la recuperación de la inversión con motores eficientes (Tiravanti, 2010)

EJEMPLO.

Un motor grande 200 hp, 1800 rpm (460volts) que opera casi continuamente, en un ambiente a carga completa. Ciclo de funcionamiento: 8,000 horas por año):

	Motor standard	Motor de alta Eficiencia
Eficiencia	92.4%	96.2%
Potencia de salida (0.7457.kW/hp)	149.1kW	149.1 kW
Potencia de entrada	161.4kW	155.0kW
Pérdida a una carga del 100%	12.3kW	5.9kW
Ahorros de potencia		6.4kW
Costo mayor del motor		\$2.608
Ahorro de energía a una carga Del 100%		51,200kWh por año
Ahorro en dólares a \$0.0553 por kWh(*)		\$2,831.36 por año
Recuperación		11 meses

Fuente: (Tiravanti, 2010)

El ahorro es permanente. Una vez recuperada la inversión, el ahorro continúa durante toda la vida útil del motor.

- Guía Práctica de cálculo de Potencia de motores eléctricos en algunas aplicaciones del sector servicios. (Tiravanti, 2010)

Potencia para el motor que acciona una bomba:

$$P = Q \cdot d \cdot h / n$$

P = potencia en kW

Q = caudal en m³/s

d = pesos específico en N/dm³

h = elevación en m

n = rendimiento mecánico

Potencia para elevación de agua.

$$P = Q \cdot h / 75n$$

P = potencia en CV
Q = caudal en m³/s
h = elevación en m
n = rendimiento mecánico

Potencia de un Motor para un ascensor

$$P = \frac{1}{2} \cdot f \cdot \frac{v}{1.000} \cdot n$$

P = potencia den kW
f = fuerza en N
v = velocidad en m/s
n = rendimiento mecánico

En ascensores y montacargas, el peso de la cabina y la mitad de la carga útil queda compensada por el contrapeso.

Potencia absorbida por un ventilador.

$$P = Q \cdot p \cdot 9,81 / 1000 \cdot n$$

P = potencia en kW
Q = Caudal en m³/s
p = presión en mm c.d.a (columna de agua)
n = rendimiento mecánico.

1.2 VARIADORES DE VELOCIDAD O FRECUENCIA

Los VSDs (Variable Speed Drive) tienen una amplia variedad de posibles aplicaciones en los motores eléctricos. En el sector industrial es posible identificar algunas funciones típicas cubriendo la mayoría de aplicaciones con motores, es decir, compresores, bombas centrífugas y ventiladores, robótica, máquinas herramientas, motores para manejo de materiales, máquinas de proceso pequeñas y medianas, etc.

La Tabla 8 muestra los rangos típicos de potencia de los usos más comunes. Los VSDs (variadores) están normalmente incorporados a sistemas más o menos complejos. Dependiendo de la máquina accionada, será posible:

- controlar la velocidad (angular o lineal), el torque, la posición, la aceleración o el frenado;
- optimizar la energía o el consumo de material, siempre que puede encontrarse un sensor adecuado y que el algoritmo de control pueda ser definido;
- combinar varias máquinas y controlar sus velocidades de manera coordinada;
- comunicarse con distintos sistemas o diferentes niveles de jerarquía en el mismo sistema, el accionador (drive) y la máquina se consideran como una sola unidad dentro de una estructura que agrupa el proceso completo

Tabla 8. Rangos de potencia de las aplicaciones industriales típicas

Application	P<10 kW	10<P<50 kW	50<P<500 kW	P>500 kW
Robotics				
Machine Tools				
Material Handling				
Small and medium process machines				
Large machines (e.g. mills, compressors)				
Centrifugal machines (excluding large machines)				
Replacement of thermal engines				

Fuente: 2005. VSDs for electric Motor Systems, ISR University of Coimbra

1.2.1 Evaluación tecnológica de Variadores de Velocidad para Motores Eléctricos

Las posibilidades ofrecidas por los VSDs se potencian al integrarlos con sistemas de fabricación automatizados. Los criterios de selección de VSDs involucran el conocimiento de una cierta cantidad de datos básicos que incluyen: energía requerida, fuente de voltaje disponible, requisitos de torque/velocidad, rango de velocidades y precisión de velocidad. Un variador debe ser capaz de:

- Iniciar la carga en forma controlada;
- Manejar la carga de acuerdo con los requisitos de funcionamiento;
- Detener esta carga conforme a los criterios relacionados con el modo de funcionamiento;

Para cumplir estas tres funciones, comunes a todas las aplicaciones, puede ser necesario añadir la sincronización con otros dispositivos en el sistema.

Para iniciar una carga el torque electromagnético del motor debe ser mayor que el torque resistivo total. La diferencia da el torque de aceleración, que es una función de la inercia total del sistema y del tiempo de aceleración necesario. La tabla siguiente muestra algunos ejemplos de requerimientos de inicio relacionados con aplicaciones típicas.

Tabla 9. Ejemplos de requerimientos de inicio relacionados con aplicaciones típicas

STARTING		
<i>Requirements</i>	<i>Typical applications</i>	<i>Possible solutions</i>
Limiting mechanical shocks	Belt conveyor, escalator, conveyor for fragile products	Speed ramp
Eliminating backlash	Gearings, transmission handling line	Parabolic or S-shaped ramp
High inertia machine	Centrifuge	Motor with high starting torque
Machine with high resistive torque	Crusher, Grinder	
Load with driving torque	Lift	System operating in 2 or 4 quadrants
Frequent starting in a given time	Handling machine	Appropriate thermal rating
Within a time limit	Centrifuge smoke extractor	Speed ramp
Within a time and space limit	Ski lift	Special acceleration control

Fuente: 2005. VSDs for electric Motor Systems, ISR University of Coimbra

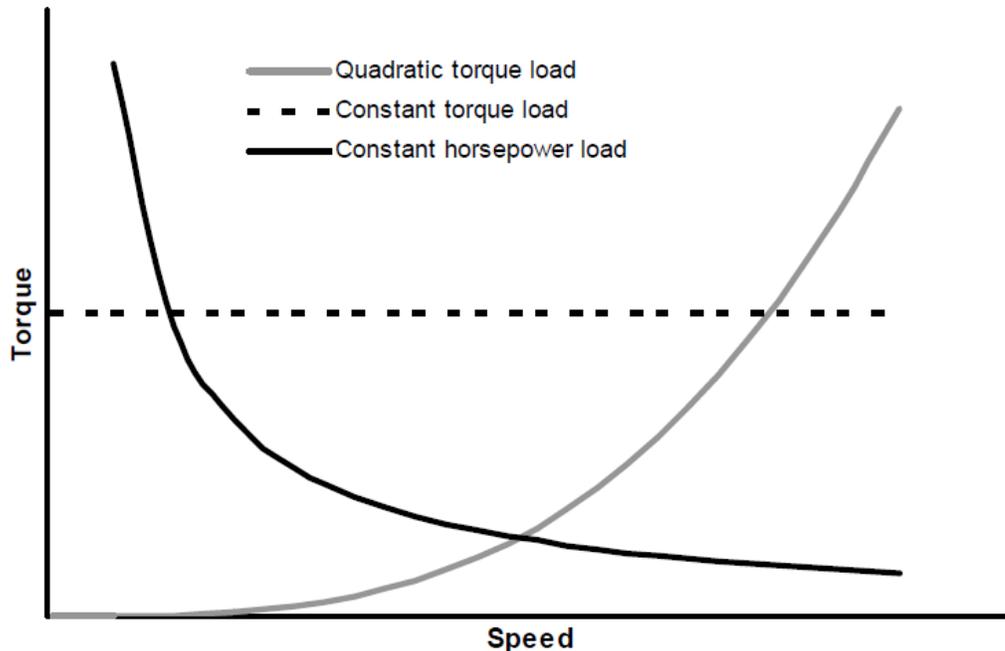
En aplicaciones que requieren una amplia gama de velocidades y/o control exacto de velocidad, la técnica más adecuada es utilizar variadores de velocidad electrónicos (VSDs). Los variadores pueden ajustar la velocidad del motor a los requisitos de carga. Las cargas manejadas por los motores pueden clasificarse en tres grupos principales de acuerdo a si el torque requerido aumenta, disminuye o permanece constante cuando la velocidad aumenta (Figura 5). La potencia mecánica es igual al producto del torque por la velocidad angular. En las bombas centrífugas y ventiladores (cargas de torque cuadrático) la potencia requerida varía aproximadamente con el cubo de la velocidad del motor. Esto significa que en un sistema de ventilador, aproximadamente se requiere solo la mitad de la potencia total para mover el 80% del caudal nominal.

En cuanto a la velocidad de respuesta, las bombas y los ventiladores controlados por VSDs pueden responder a las cambiantes condiciones más rápido y más fiable que las

válvulas o los dampers. Esto es particularmente cierto en los extremos de los rangos de flujo donde las válvulas son altamente no lineales, incluso cuando están equipadas con compensadores de linealización. En el caso de cargas que satisfacen la ley del cubo (ej.: bombas y ventiladores centrífugos), se pueden obtener reducciones significativas en el consumo, en comparación con el control de flujo por estrangulación. Los VSDs pueden hacer también que los motores de inducción operen más rápido que sus rangos normales de velocidad máxima, siempre y cuando los rotores puedan soportar mayores velocidades de operación. Por lo tanto los VSDs tienen también el potencial de extender el rango de funcionamiento útil de compresores, bombas y ventiladores. De las muchas aplicaciones (como ventiladores de tiro forzado) que están limitadas por la capacidad de bomba o ventilador, un motor y VSD adecuadamente seleccionadas pueden extender su capacidad en los extremos, tanto por lo alto como por lo bajo.

Los VSDs también aíslan los motores de la línea, lo cual puede reducir el stress del motor y la ineficiencia causada por variaciones en el voltaje de línea, desbalance de fases y mala calidad en las formas de onda del voltaje de línea. En algunas aplicaciones los VSDs pueden manejar varios motores simultáneamente. Por ejemplo un VSD PWM se podría utilizar para manejar dos motores de inducción de 50 kW con exactamente la misma frecuencia. Esta forma de aplicación puede proporcionar ahorro en costos.

Figura 5. Tipos de curvas de Torque vs-velocidad



Carga de torque cuadrático (e.g. ventiladores centrífugos y bombas); Carga de torque constante (por ejemplo, bandas transportadoras, bombas de desplazamiento positivo); Carga de potencia constante (tracción, bobinadoras, laminadoras, etc.).

Fuente: 2005. VSDs for electric Motor Systems, ISR University of Coimbra

La detención o parada de un sistema o motor puede llevarse a cabo de diferentes maneras dependiendo del comportamiento requerido por la aplicación. La Tabla 10 resume los principales aspectos relacionados con la operación de parada.

Tabla 10. Aspectos relacionados con la parada de la operación

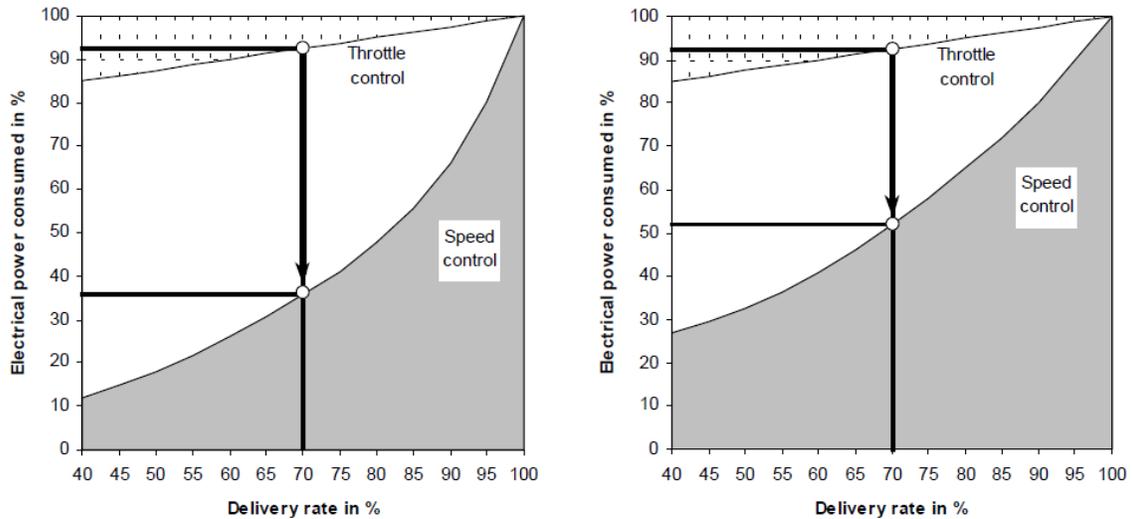
STOPPING		
<i>Requirement</i>	<i>Typical applications</i>	<i>Possible solutions</i>
Simple stopping	Fans	Freewheel or mechanical brake
Limit mechanical shocks	Belt conveyor drives	Deceleration ramp, torque limitation
Backlash elimination	System incorporating gears	Parabolic deceleration ramp
Short time	Emergency stop centrifuges	Speed ramp, DC injection
Load with driving torque	Lifts, hoists	Reversing drive
Electrical braking without motor heating, with or without regeneration	Rolling mills, electric traction	Rheostatic or regenerative braking

Fuente: 2005. VSDs for electric Motor Systems, ISR University of Coimbra

1.2.2 Bombas

Bombeo simple: En las bombas centrífugas sin cabeza de presión estática (e.g. circuito cerrado), la potencia consumida es proporcional al cubo de la velocidad, como se muestra en la Figura 6 (a) si el usuario desea reducir el flujo en el proceso, puede utilizar una válvula de control, o alternativamente se puede controlar la velocidad de la bomba usando un VSD. Aunque ambas técnicas cumplen el objetivo deseado, la energía consumida es significativamente mayor cuando se utiliza la palanca de la válvula. Si existe la necesidad de elevar el fluido, es decir una cabeza, el sistema de bombeo debe superar la presión estática correspondiente, como se muestra en la Figura 6 (b).

Figura 6. Consumo de potencia de una bomba con control por estrangulamiento Vs una con control de velocidad



a) Sin cabeza de presión estática, b) Con cabeza de presión estática.

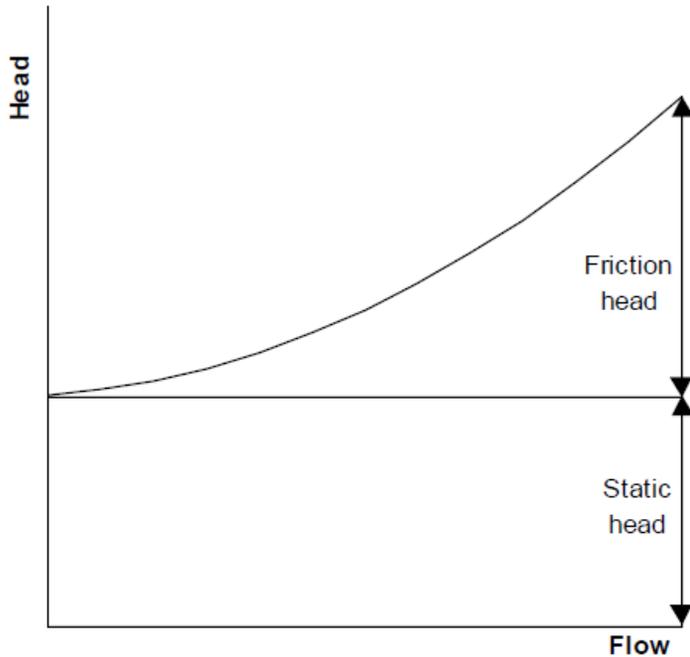
Fuente: 2005. VSDs for electric Motor Systems, ISR University of Coimbra

En estos sistemas de bombeo la energía mecánica se utiliza para superar la fricción en las tuberías y para realizar el trabajo mecánico asociado con la elevación del fluido contra la gravedad como se muestra en la

Figura 7.

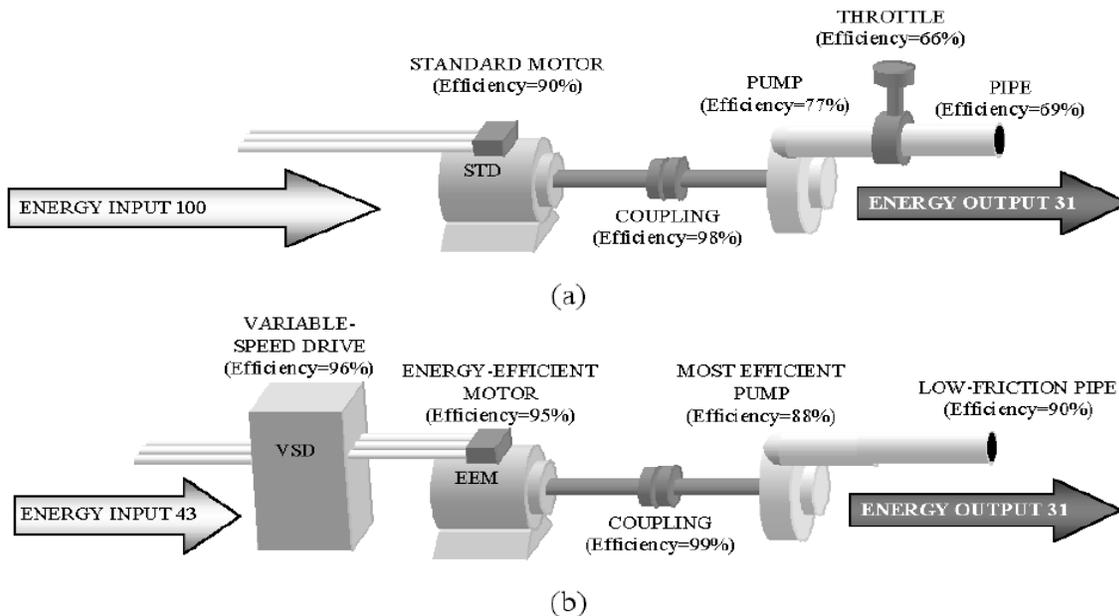
La eficiencia global del sistema de bombeo depende de la eficiencia de los diferentes componentes del sistema. La Figura 8 muestra un ejemplo de la potencia absorbida por un sistema de bomba con diferentes componentes. Para la misma potencia final, el sistema ineficiente absorbe más del doble de la potencia absorbida por el sistema optimizado.

Figura 7. Resistencia total del sistema, pérdidas por fricción mas perdidas por presión estática.



Fuente: 2005. VSDs for electric Motor Systems, ISR University of Coimbra

Figura 8. Dos sistemas de bombeo con el mismo resultado



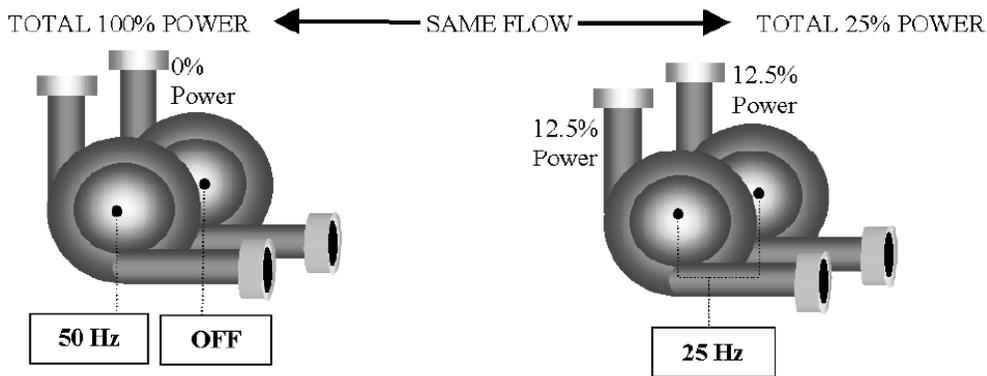
(a) Sistema convencional (Eficiencia total = 31%); (b) Sistema de bombeo energéticamente eficiente combinando tecnologías eficientes (Eficiencia total = 72%).

Fuente: 2005. VSDs for electric Motor Systems, ISR University of Coimbra

1.2.3 Planta de bombeo:

En muchas aplicaciones de bombeo se utilizan varias bombas en paralelo para producir el caudal necesario. Se pueden conseguir importantes ahorros de energía si operamos las bombas a una velocidad reducida en lugar de encender y apagar las bombas según la demanda. Por ejemplo, en un sistema de dos bombas con pequeña cabeza de presión estática, con tuberías independientes circuitos, ambas bombas operando al 50% del caudal nominal de funcionamiento requieren aproximadamente el 25% de la potencia necesaria para una sola bomba funcionando al 100%. Otras ventajas tienen que ver con el menor desgaste y la eliminación de los choques por encendido y apagado. También es posible controlar el golpe de ariete que perjudica las tuberías por medio de aceleración y desaceleración controlada por el VSD.

Figura 9. Plantas de bombeo



Fuente: 2005. VSDs for electric Motor Systems, ISR University of Coimbra

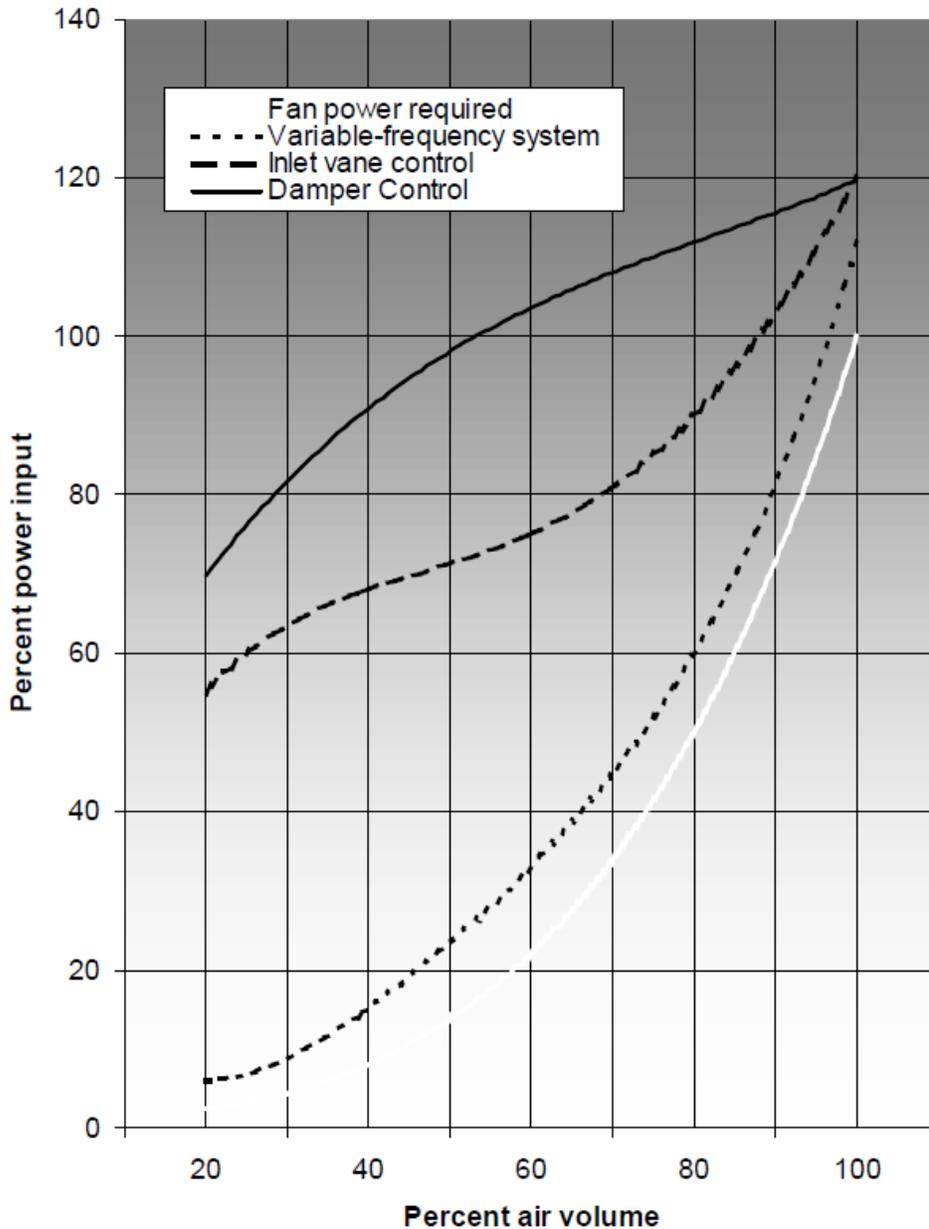
1.2.4 Ventiladores

Se pueden conseguir ahorros de energía significativos introduciendo variadores de velocidad en los ventiladores incluso con motores bastante cargados. La

Figura 10 ilustra los ahorros potenciales con un VSD versus los métodos comunes de estrangulación. Se desperdicia gran cantidad de energía por estrangular el flujo de aire comparado con sistemas de velocidad variable. El peor método de control son los dampers (amortiguadores) a la salida, seguidos por el control de vanes (paletas) en la entrada.

Para conseguir el 50% del flujo nominal, un VSD puede ahorrar 80% y 68% de la energía consumida en comparación con dampers a la salida y vanes de entrada, respectivamente.

Figura 10. Consumo de potencia relativo para diferentes métodos de control de flujo

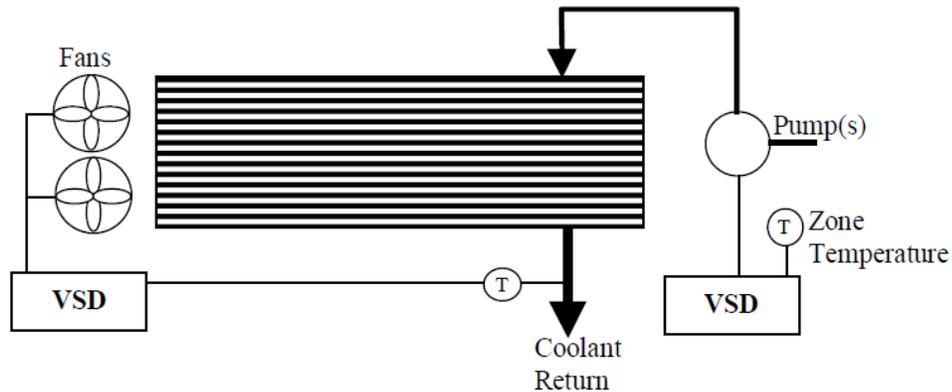


Fuente: 2005. VSDs for electric Motor Systems, ISR University of Coimbra

Ejemplo: En un sistema de enfriamiento Chiller (Figura 1.29), los VSDs se pueden aplicar para modular la velocidad de la bomba, basada en el control de la temperatura de zona, o para controlar la velocidad del ventilador, basada en la temperatura de retorno de

refrigerante. El resultado es una temperatura constante en el espacio controlado y una operación más eficiente.

Figura 11. Sistema de chiller

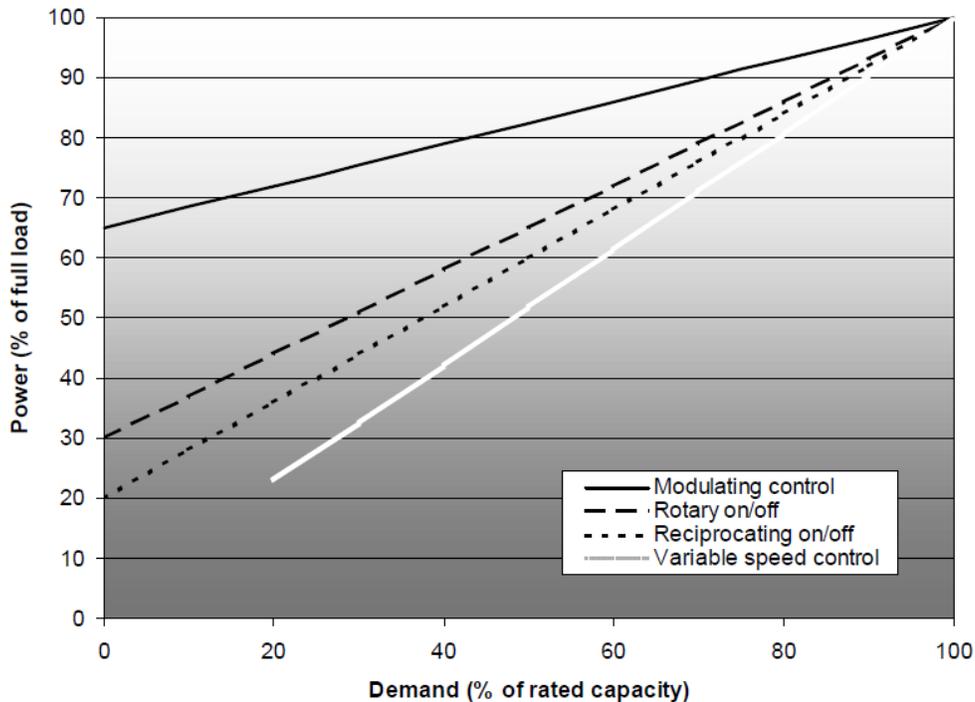


Fuente: 2005. VSDs for electric Motor Systems, ISR University of Coimbra

1.2.5 Compresores

Las unidades de aire comprimido de tornillo rotativo y de pistón son esencialmente cargas de torque constante y también pueden beneficiarse de la aplicación de control de velocidad variable. Los ahorros relacionados con el uso de control de velocidad variable dependen del sistema de control que está siendo reemplazado. La Figura 12 muestra los ahorros de energía alcanzados con la instalación de un VSD a una unidad de aire comprimido de tornillo rotativo, en comparación con otros métodos de control de flujo a carga parcial. En un compresor, con control de modulación, si la demanda es un 50% de la capacidad nominal, el ahorro de energía asociado con la integración de un VSD es de alrededor del 38%.

Figura 12. Energía ahorrada usando un VSD sobre una unidad de aire comprimido de tornillo

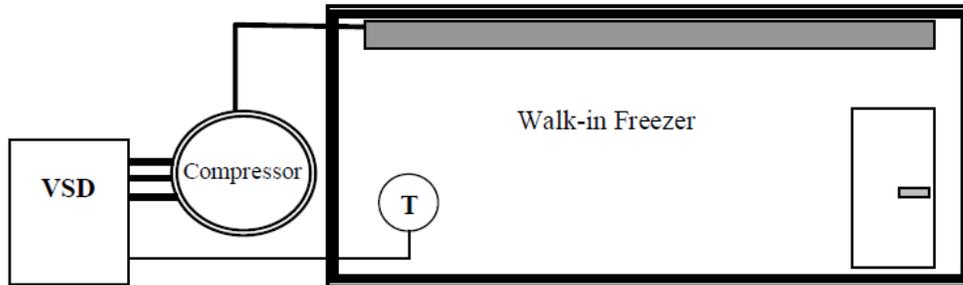


Fuente: 2005. VSDs for electric Motor Systems, ISR University of Coimbra

El ahorro de energía con cargas de torque constante es considerablemente menor que con bombas centrífugas o ventiladores que obedecen la ley del cubo y la probabilidad de que la adaptación sea costo eficiente por motivos solo energéticos se reduce. Además, se debe tener cuidado para garantizar la adecuada lubricación a velocidades reducidas. Sin embargo, la introducción de las unidades de aire comprimido de tornillo con variadores integrados de fábrica ha permitido reducir este costo adicional de manera significativa. Estas máquinas, por tanto, merecen ser consideradas para las nuevas aplicaciones con muchas horas de operación al año y cuando existe una demanda variable. Ahorros adicionales se logran mejorando el control de presión, reduciendo la presión media generada.

Otro ejemplo de aplicación de VSD son los compresores para refrigeración. (Figura 1.31). El uso de VSDs para controlar la temperatura (operación cabeza flotante de presión) en los bombas/compresores de refrigeración (ej.: cuartos fríos) puede eliminar el ciclo de encendido/apagado con gran ahorro de energía. El control de la temperatura también puede ser mejorado en términos del diferencial entre temperaturas internas y externas.

Figura 13. Compresor de refrigeración con variador.

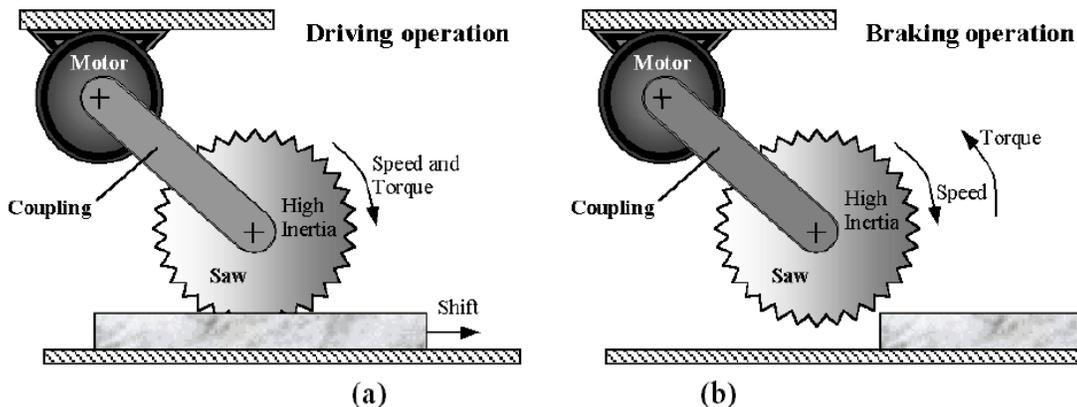


Fuente: 2005. VSDs for electric Motor Systems, ISR University of Coimbra

1.2.6 Máquinas centrífugas y máquinas-herramientas

En cargas de alta inercia (por ejemplo máquinas-herramientas) y / o de alta velocidad (por ejemplo máquinas centrífugas), con operación frecuente de acelerado y frenado, es posible ahorrar cantidades significativas de energía. Cuando se operan este tipo de cargas generan una gran cantidad de energía cinética, que en un proceso de frenado, se puede regenerar a la red, si se utiliza un VSD regenerativo (mismo proceso regenerativo que se utiliza en ascensores). Tornos de alta velocidad con un alimentador automático o sierras de alta inercia (Figura 14) son ejemplos de este tipo de cargas.

Figura 14. Modos de operación de una sierra de alta inercia: (a) Operación de corte; (b) Frenado.

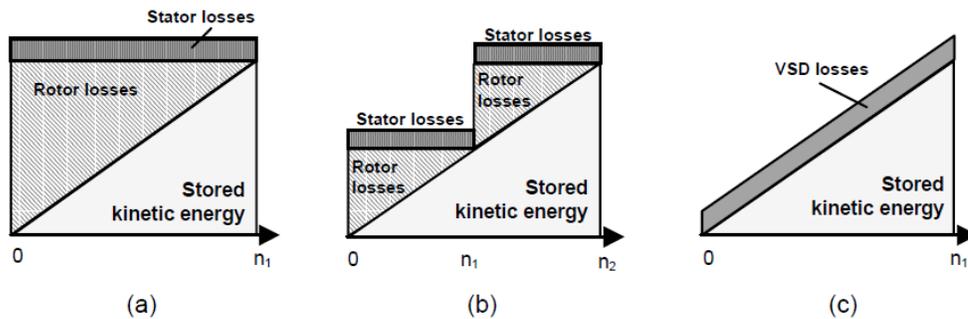


Fuente: 2005. VSDs for electric Motor Systems, ISR University of Coimbra

De hecho, cuando una sierra de alta inercia o un torno de alta velocidad están operando la velocidad y el torque están en la misma dirección, pero cuando termina la operación, normalmente se necesita una parada rápida. Así, la energía de frenado puede ser reinyectada a la red, en lugar de ser disipada a través de una resistencia. Otro aspecto

importante es el proceso de aceleración. Como puede verse en la Figura 15, si el motor simplemente se enciende situación (a), sin ningún control de velocidad, las pérdidas del rotor serán mayores que si se utiliza un motor de polos cambiables (situación (b)). Una técnica de aceleración más eficiente utiliza un variador (situación (c)), que reducirá significativamente el consumo de energía, comparativamente con las otras técnicas mencionadas.

Figura 15. Energía consumida durante un período de aceleración: (a) Motor Standard; (b) Motor de polos intercambiables; (c) Variador de velocidad (VSD)

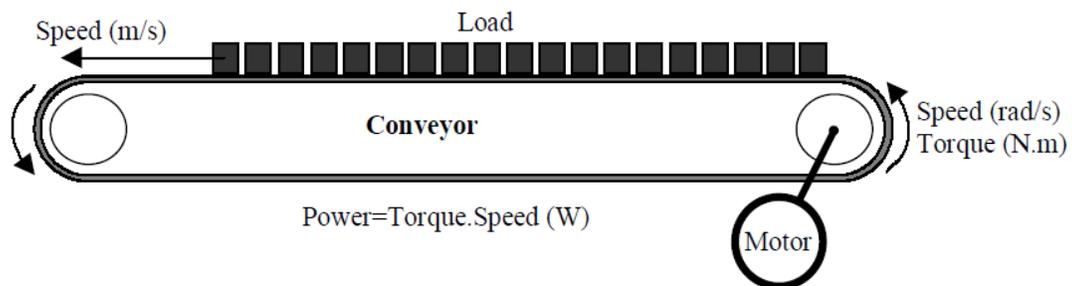


Fuente: 2005. VSDs for electric Motor Systems, ISR University of Coimbra

1.2.7 Bandas transportadoras

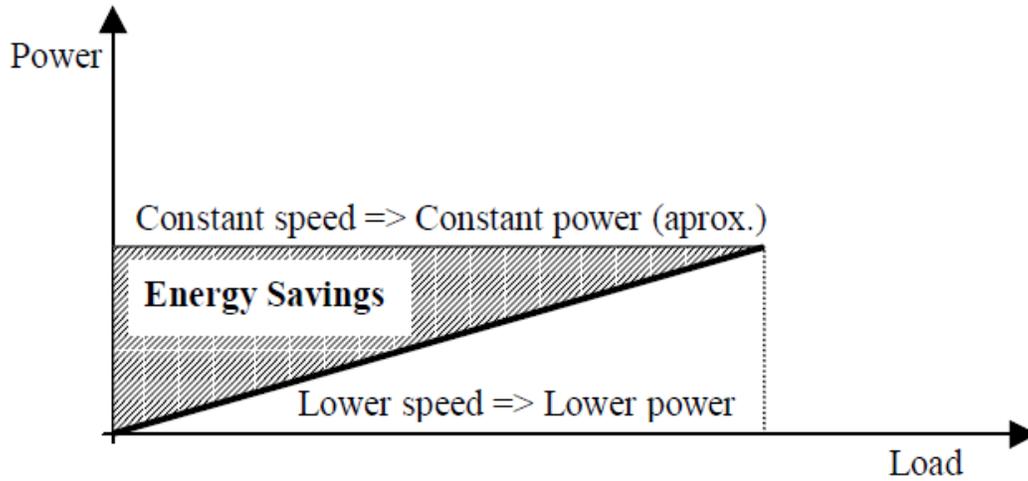
En los dispositivos de torque *constante* (ejemplo: *bandas transportadoras horizontales*), el torque es aproximadamente independiente de la carga transportada (depende sólo de la fricción). Por lo general, la cantidad de material manipulado en una banda transportadora es controlado a través de la regulación de la cantidad de material entrante, mientras que el torque y la velocidad permanecen más o menos constantes. Pero, si la entrada de materiales a la banda transportadora cambia (se reduce), es posible reducir la velocidad (el torque es el mismo) y, como puede verse en la figura siguiente, se conseguirá ahorro de energía proporcional a la reducción de velocidad.

Figura 16. Potencia requerida por una banda transportadora



Fuente: 2005. VSDs for electric Motor Systems, ISR University of Coimbra

Figura 17. Ahorros de energía en una banda transportadora usando un control de velocidad comparada con el sistema típico de velocidad constante



Fuente: 2005. VSDs for electric Motor Systems, ISR University of Coimbra

1.3 ILUMINACIÓN EFICIENTE

La iluminación hoy en día es fundamental en el desarrollo de las actividades sociales, comerciales e industriales. La tecnología actualmente es versátil y adaptable a las distintas necesidades, y más eficiente energéticamente. El consumo energético en iluminación representa en muchos edificios un alto porcentaje del consumo eléctrico, puede alcanzar en algunos casos a más del 50 %. La Tabla 11 muestra datos para la comunidad de Madrid España.

Tabla 11. % de energía eléctrica dedicada a iluminación en el sector servicios

Sector	% de energía eléctrica dedicada a iluminación
Oficinas	50 %
Hospitales	20-30 %
Industria	15 %
Colegios	10-15 %
Comercios	15-70 %
Hoteles	25-50 %
Residencial	10-15 %

Fuente (IDAE, 2006)

Este alto consumo crea un potencial de ahorro, energético y económico, factible al usar equipos eficientes, junto con sistemas de regulación y control adaptados a las necesidades del espacio a iluminar. A continuación se desarrollan algunos tópicos importantes para la eficiencia energética en la iluminación.

1.3.1 Consumo energético

La potencia del sistema de iluminación instalado y del tiempo que está encendido son los factores determinantes del consumo energético y sus variaciones pueden afectar la eficiencia energética de la instalación. Al evaluar medidas de mejoramiento de eficiencia se debe hacer un análisis costo/efectivo balanceando la inversión frente a la reducción del consumo de energía en el futuro.

1.3.1.1 Potencia Instalada

Se obtiene sumando la potencia unitaria de todas las lámparas instaladas, se debe tener en cuenta que es necesario incluir la potencia del equipo auxiliar (en caso de que la lámpara lo requiera).

1.3.1.2 Horas de Uso

Las horas de uso de una instalación son función de la actividad que se desarrolla en el espacio en análisis, la luz natural disponible y el sistema de control usado.

1.3.1.3 Consumo Energético

El consumo energético se calcula multiplicando la Potencia Instalada por las Horas de Uso.

1.3.2 Etiquetado energético

La principal forma para obtener un ahorro energético en iluminación es emplear un sistema de iluminación con componentes que posean una clasificación de eficiencia energética alta.

En la Unión Europea (EU por sus siglas en inglés) a fin de informar al consumidor se expedieron una serie de directivas en el año 1992² y 1998³, para establecer el etiquetado energético que permite conocer el consumo del producto y compararlo con otro de la misma aplicación dando al usuario la oportunidad de hacer el balance costo efectivo.

Este etiquetado crea siete clases de eficiencia energética, identificadas con una letra desde la A (más eficiente) a la G (menos eficiente)(2). Por ejemplo una lámpara de **clase A**, consume casi tres veces menos que una de **clase G**, lo que representa un ahorro energético y, económico atractivo para los hogares y edificios en general.

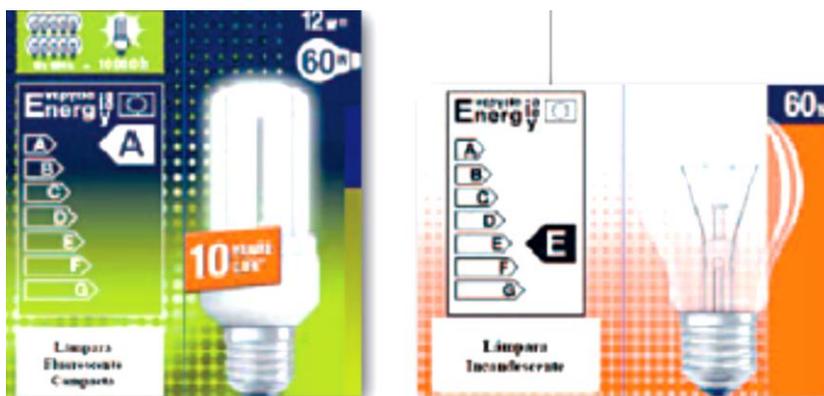
Las directivas establecen que el empaque de las lámparas debe tener esta etiqueta, informando además la potencia de la lámpara (W), su flujo luminoso (lm) y vida media (h).

En la figura siguiente se muestra el empaque de una Lámpara Fluorescente Compacta (LFC) de clase energética A y de una Lámpara Incandescente de clasificación energética E. Estas lámparas son equivalentes en flujo luminoso; no obstante, la clasificada A energéticamente consume un 80 % menos de energía y su vida útil es 10 veces superior, que la incandescente clasificada E.

² Directiva Europea 92/75/CEE de 22 de septiembre de 1992, establece el etiquetado de lámparas para informar sobre sus características energéticas.

³ Directiva 98/11/CE de la Comisión de 27 de enero de 1998, establece el etiquetado energético de lámparas de usos doméstico

Figura 18 Presentación comercial de lámparas tipo A y E



Fuente (IDAE, 2006)

1.3.3 Etiquetado ecológico

En la EU, las lámparas, además de la etiqueta energética, pueden obtener la Etiqueta Ecológica Comunitaria o Eco-Etiqueta⁴ que es un distintivo de calidad ambiental aplicable a las lámparas eléctricas de bajo consumo, así como a las lámparas fluorescentes compactas con balasto electrónico y los tubos fluorescentes. No se incluyen en ella lámparas fluorescentes compactas con reactancia magnética, lámparas de proyectores, lámparas fotográficas y lámparas solares.

La Eco-Etiqueta establece que las lámparas eléctricas deben tener un bajo consumo de energía, y, ofrecer una garantía de vida media superior a las 10.000 horas con un sostenimiento del flujo superior al 70 % al cabo de ese tiempo.

Para tener etiqueta ecológica se deben cumplir las siguientes características:

- Reducción del consumo energético.
- Contenido en mercurio estrictamente limitado.
- Aumento del control de calidad del producto y de su durabilidad.
- Reducción de los residuos gracias al uso de embalajes reciclables.
- Mejor información a los consumidores para un uso óptimo.

1.3.4 Valoración económica y medioambiental

Cambiar una instalación de alumbrado existente por una más eficiente energéticamente (sistemas de control, lámparas más eficientes, etc.) implica una inversión inicial que reduce los costos de operación y mantenimiento venideros. La pregunta es si los ahorros futuros justifican el gasto inicial.

⁴Los criterios de concesión están fijados en la Decisión 2002/747/CE de la Comisión de 9 de Septiembre de 2002

Para el análisis de costos son necesarios los siguientes datos (IDAE, 2006):

- Número y tipo luminarias necesarias.
- Precio de la luminaria.
- Número y tipo de lámparas necesarias.
- Precio de la lámpara.
- Consumo por luminaria/proyector, incluyendo las pérdidas de los equipos.
- Tarifas de energía eléctrica.
- Vida útil de la lámpara.
- Horas de funcionamiento anual de la instalación.
- Financiación y amortización.

1.3.5 Sistemas de iluminación

Los sistemas de iluminación tienen tres componentes principales que son; las fuentes de luz, los equipos auxiliares y las luminarias cuyas funciones e importancia en un sistema de iluminación eficiente se describen a continuación.

1.3.5.1 Fuente de Luz.

En un sistema de iluminación la fuente de luz son las lámparas y producen la luz de diferentes maneras, lo que origina los diversos tipos de tecnología y de lámparas. A continuación se hace un resumen de los diferentes tipos de lámparas (2).

- **Incandescentes.** Calientan un cuerpo sólido hasta alcanzar su grado de incandescencia. Para ello se hace pasar una corriente eléctrica por un filamento de Wolframio que se calienta hasta que emite radiación visible por el ojo humano. Una variante son las lámparas incandescentes halógenas en las cuales se evita la evaporación del wolframio incorporando un gas halógeno. Estas lámparas por su baja eficiencia están en desuso.
- **De Descarga.** Generan la luminosidad provocando una descarga eléctrica entre dos electrodos en el seno de un gas que se excita. Existen varios tipos dependiendo del gas y la presión de trabajo.
 - *Fluorescentes Tubulares:* Funcionan con mercurio a baja presión, por su color y baja luminosidad son adecuadas para interiores de poca altura; oficinas, locales públicos, industria, etc. Después de las incandescentes son las segundas en consumo. Sus presentaciones más comerciales son T8 (26 mm de diámetro) y T5 (16 mm de diámetro). para su funcionamiento necesitan equipo auxiliar electrónico, por lo que tiene una buena eficiencia luminosa del orden de 104 lm/W.
 - *Fluorescentes Compactas.* Elaboradas con uno o varios tubos fluorescentes doblados, de mayor eficiencia y vida útil que las incandescentes. Existe una versión integrada que lleva incorporado el equipo auxiliar y se pueden montar directamente en el mismo portalámparas de las incandescentes.

- *Fluorescentes sin electrodo* (o de inducción). Emiten la luz por la transmisión de energía en un campo magnético, junto con una descarga en gas. Tienen una larga vida útil de la orden de 60000 h, limitada solo por los componentes electrónicos.
- *Vapor de Mercurio a Alta Presión*. Aunque su eficacia es menor, por su mayor potencia emiten mayor flujo luminoso que las fluorescentes. Se utilizan en grandes áreas (calles, naves industriales, etc).
- *Halogenuros Metálicos*. Además del relleno de mercurio poseen halogenuros metálicos que mejoran la capacidad de reproducir color, con mejor eficacia. Se aplican mucho en alumbrado público, comercial, fachadas, monumentos, etc.
- *Halogenuros Metálicos Cerámicos*. Combinan la tecnología de los halogenuros metálicos con la de las lámparas de sodio de alta presión (quemador cerámico), el tubo cerámico frente al de cuarzo de los halogenuros permite trabajar a mayor temperatura alargando la vida útil hasta 15000 h, con mejor eficacia luminosa y estabilidad de color, por lo que son lámparas muy adecuadas para su uso en sector terciario (comercios, oficinas, hoteles, etc.).
- *Vapor de Sodio de baja presión*. La descarga eléctrica se produce en un tubo con vapor de sodio a baja presión generando una radiación prácticamente monocromática. Son de las lámparas más eficaces del mercado, pero su uso está limitado a aplicaciones en las cuales el color (amarillento) no sea importante (autopistas, túneles, etc.). Tiene la desventaja del tamaño que obliga a usar luminarias muy grandes para grandes potencias.
- *Vapor de Sodio a alta presión*. Mejora la reproducción cromática respecto a las de baja presión pero disminuye un poco su eficacia, que de igual manera sigue alta con respecto a otro tipo de lámparas. Se han hecho populares debido a su larga vida útil y eficacia; remplazan muy bien a las de mercurio. Se emplean en instalaciones exteriores de tráfico e industriales e interiores comerciales e industriales. Se dispone de una versión de mayor presión (Sodio Blanco) con muy buena reproducción cromática pero menor eficacia que las de sodio, útiles para aplicaciones exigentes en la reproducción cromática, como vitrinas comerciales y edificios pintorescos.
- **Los Diodos Emisores de Luz (LED: Light Emitting Diode)**). La luminosidad se origina provocando una descarga en un cuerpo sólido. Se basan en semiconductores que transforman directamente la corriente eléctrica en luz. Al no poseer filamentos su vida útil es del orden de 50000 horas, son un 80% más eficientes que las incandescentes y gana rápidamente espacio en el mercado.

La tabla siguiente resume las aplicaciones para los diferentes tipos de lámparas.

Tabla 12. Aplicaciones de diferentes tipos de lámparas

	Incand. Estándar	Halógena	Fluorescente Tubular	Fluorescente Compacta	Mercurio Alta Presión	Halogenuro	Sodio Alta Presión	Sodio Baja Presión	Halogenuro Metálico Cerámico	Inducción	Sodio Blanco
Oficinas			X	X		X			X	X	X
Tiendas (general)	X	X	X	X		X			X	X	X
Tiendas (exposición)	X	X	X	X		X			X	X	X
Deportes (interiores)			X			X			X		
Industrial			X		X	X	X		X		
Doméstico (seguridad)	X			X							
Industrial (seguridad)			X					X			X
Deportes						X	X		X		
Grandes Áreas		X			X	X	X		X		
Doméstico	X	X	X	X							
Alumbrado Público					X		X	X	X	X	X

Fuente (IDAE, 2006)

1.3.5.2 Equipos auxiliares.

Los equipos auxiliares más populares son los balastos, arrancadores o cebadores y condensadores, al igual que transformadores para las lámparas halógenas de baja tensión. Para los equipos electrónicos se reúnen en un solo elemento. Determinan en gran parte la economía y eficiencia de la lámpara en lo referente a producción de luz. Estos equipos consumen energía que se debe tener en cuenta al evaluar el sistema de iluminación.

- Balastos. Estabiliza el consumo de corriente de la lámpara a sus parámetros óptimos (tensión, frecuencia e intensidad).
- Arrancadores. Proporciona en el momento del encendido la tensión requerida para el cebado de la lámpara, puede ser eléctrico, electrónico o electromecánico. Suponen una pérdida entre el 0,8 y 1,5% de la potencia de la lámpara. Deben ser concordantes con el tipo y potencia de la lámpara para cuidar su vida útil.
- Condensadores. Corrige el factor de potencia ($\cos\phi$) a los valores establecidos por las normas vigentes. Con lo que finalmente se reduce la potencia reactiva consumida que se refleja en un menor consumo energético y por

consiguiente en mayor eficiencia. Las pérdidas en el condensador son del orden del 0,5 a 1% de la potencia de la lámpara.

Las principales tecnologías de los equipos auxiliares son:

- *Resistiva.* Emplea una resistencia como el balasto, de baja eficiencia actualmente en desuso.
- *Inductiva. Equipos electromagnéticos.* Es la tecnología más empleada en proceso de sustitución por equipos electrónicos.
- *Electrónica.* En muchos casos elimina la necesidad del condensador y desempeña las funciones de balasto y cebador, con lo que se puede ahorrar hasta un 25 o 30% en comparación con balastos electromagnéticos. En combinación con equipos electrónicos de regulación y combinación con luz natural el ahorro puede llegar hasta el 70%.

Las pérdidas de la potencia de la lámpara, desde el punto de vista energético, en función de tipo de equipo auxiliar que se emplee se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Pérdidas energéticas por el tipo de equipo auxiliar empleado.

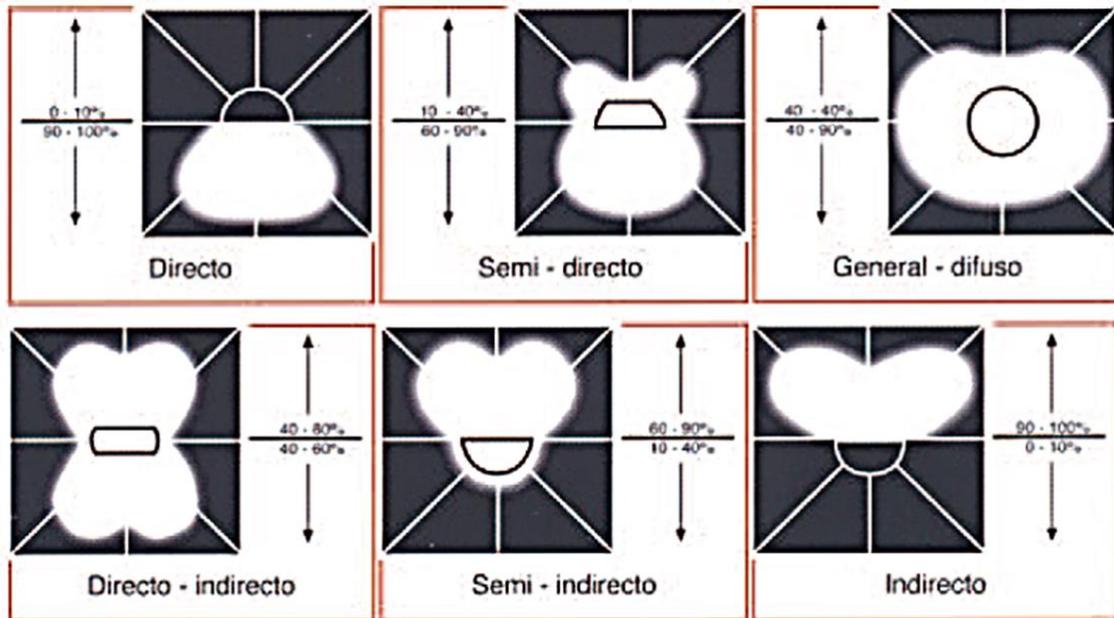
Rango de pérdidas		Tipo de Equipo Auxiliar		
Tipo de lámpara	Electromagnético estándar (Resistivo)	Electromagnético bajas pérdidas (Inductivo)	Electrónico	
Fluorescencia	20-25 %	14-16 %	8-11 %	
Descarga	14-20 %	8-12 %	6-8 %	
Halógenas baja tensión	15-20 %	10-12 %	5-7 %	

Fuente (IDAE, 2006)

1.3.5.3 Luminarias

Se encargan de distribuir, filtrar o transformar la luz emitida por las lámparas. Incluyen los dispositivos necesarios para el soporte, fijación y protección de la lámpara y de ser necesario los circuitos auxiliares y los medios de conexión a la red. Su eficiencia se mide en términos de la relación existente entre el flujo luminoso que sale de ella y el flujo luminoso de la lámpara, por lo que su elección es importante en la determinación de la eficiencia del sistema. Se clasifican en función de su distribución fotométrica como se presenta en la Figura 19 (según CIE).

Figura 19. Tipos de luminarias



Fuente (Schneider Electric, 2010)

1.4 EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE ILUMINACIÓN

Un sistema de iluminación consiste esencialmente de los siguientes elementos:

- Fuente lumínica
- Luminaria, y
- Equipos de control

Más allá de los equipos, seleccionar el sistema de iluminación para una aplicación específica requiere de la consideración de factores adicionales. Un primer aspecto vital son los estándares apropiados de iluminación, esenciales para la seguridad, la comodidad y la productividad.

Dada la complejidad de la temática, se recomienda buscar la asesoría de expertos de las empresas de energía o de los fabricantes de equipo de iluminación o consultores, antes de reemplazar equipos o mejorar el sistema de iluminación.

Se aconseja también consultar a los fabricantes para obtener la información más actualizada posible relacionada con las características de funcionamiento de sus productos y la intercambiabilidad de las lámparas y componentes de los circuitos, debido principalmente a los rápidos cambios de la industria de la luminotecnía.

Antes de tratar el aspecto de la reducción de los costos del servicio de iluminación, es necesario presentar algunas consideraciones fundamentales para la selección apropiada del

sistema de iluminación y posteriormente se harán análisis comparativos muy generales sobre diferentes fuentes de iluminación, sin entrar en detalles de aplicaciones porque estas son específicas a cada necesidad.

1.4.1 Consideraciones generales.

1.4.1.1 ¿Cuánta luz necesito?

En los últimos 50 años se ha realizado una gran cantidad de trabajo por parte de oftalmólogos, organizaciones estatales, universidades, organizaciones tales como la Commission Internationale de L'Eclairage (CIE) o la Illuminating Engineering Society (IES) de USA, y la propia industria de la iluminación, para determinar las necesidades visuales fundamentales⁵. Este trabajo es el fundamento de las normas para Iluminación. El estándar es ampliamente conocido en todo el mundo y sus recomendaciones son la base para la mayoría de las prácticas de iluminación que se emplean en el mundo y en Colombia⁶. En él no solamente se dan los valores recomendados de iluminación (iluminancia) para una gran variedad de actividades⁷, sino que también considera los efectos del deslumbramiento directo de las luminarias y otras condiciones necesarias para tener buenas condiciones de iluminación.

1.4.1.2 Recomendaciones estándar

Las iluminancias estándar recomendadas en la norma *no son por sí mismas el único criterio* para una buena iluminación puesto que se deben tener en cuenta otros factores, tales como, el confort visual, el color de la luz y el "ambiente" de la instalación. Sin embargo, las iluminancias recomendadas constituyen la base para el diseño de la iluminación.

Las tareas típicas y sus respectivas iluminancias dan una idea de los valores recomendados para tareas que tienen diferentes grados de complejidad visual⁷

1.4.1.3 Uso de la luz natural

En algunas situaciones, principalmente en talleres, museos y otros lugares en donde la calidad de la dirección de la luz y la iluminancia deben ser estrictamente controladas, se debería excluir la luz natural pero a la mayoría de la gente le encanta. La iluminación con luz natural se puede solamente suministrar a una distancia limitada de las ventanas o de las claraboyas y está solamente disponible durante parte del día (sin embargo, en las

⁵ Han participado en este trabajo asociaciones como la CIE(<http://www.cie.co.at/>), la IES de USA (<http://www.iesna.org/>), y a nivel nacional, el ICONTEC y el RETIE del Ministerio de Minas y Energía en su artículo 16 . Ver Bibliografía al final

⁶ RETIE (Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas). Ministerio de Minas y Energía (2008) Bogotá. Colombia

⁷ RETIE, página 85, Niveles de iluminancia.

condiciones particulares de Colombia este recurso puede explotarse más apropiadamente). Por esta razón es necesario utilizar siempre luz artificial correctamente controlada.

Las grandes ventanas de vidrio desprovistas de cortinas presentan problemas a la visión, siendo especialmente incómodas durante la noche cuando ellas parecen como si fueran paredes negras brillantes, además de que durante el día pueden ser antieconómicas debido a la gran cantidad de calor solar que dejan pasar al recinto (principalmente en tierra caliente). El uso de vidrio especial o voladizos que produzcan sombras, reducen estos problemas y también la incomodidad visual. Los beneficios del uso de luz natural no deben pasar desapercibidos y debe sacarse la mayor ventaja posible de este invaluable recurso. El nivel de luz natural varía por ejemplo con el clima, hora del día y por lo tanto hace necesaria la utilización de luz artificial suplementaria para mantener los niveles de iluminación adecuados. La luz natural debe controlarse para mantener un nivel de iluminación razonablemente constante en el sitio de trabajo.

1.4.1.4 Apariencia

Un cuarto en el cual la luz se concentra en un plano de trabajo horizontal y poca o casi ninguna luz cae sobre las paredes o techos, produce una atmósfera depresiva. En cuartos de más de 25 m², la sensación de claustrofobia se puede mitigar usando paredes ligeramente coloreadas pero en áreas de más de 100 m², en donde el campo visual es muy extenso, es más efectivo dejar que la luz alcance el techo. Los reflectores de la mayoría de las luminarias industriales están dotados de ranuras que permiten que una pequeña fracción de luz esté dirigida hacia arriba para disminuir el "efecto de túnel".

En general, no solamente se da énfasis a la necesidad de lograr condiciones de iluminación efectivas, por razones de rendimiento visual, sino que también se busca que los ambientes sean visualmente atractivos.

1.4.1.5 Efecto de la edad de los trabajadores

A medida que envejecemos, la dificultad para ver detalles aumenta y esto se corrige parcialmente con anteojos. Aumentar la iluminación ayuda pero es prácticamente imposible predecir las proporciones de gentes de diferentes edades presentes en un lugar de trabajo. Esto no se ha tenido en cuenta en las iluminancias que recomienda el RETIE.

1.4.1.6 Seguridad

Una buena iluminación es esencial para la seguridad. Las instituciones que velan por la salud y la seguridad siempre recomiendan que la iluminación debe ser "apropiada y adecuada" y para ello se tienen en cuenta los estándares de nivel de iluminancia, como los del RETIE.

1.4.1.7 Deslumbramiento

Se consideran dos tipos de deslumbramiento.

- **Deslumbramiento directo**

El deslumbramiento directo de las fuentes de luz y el reflejado por otras superficies dentro del campo visual, pueden ser incómodos (deslumbramiento incómodo) o pueden reducir la visibilidad (algunas veces hasta un grado peligroso). Pero también se pueden producir ambos efectos simultáneamente. El deslumbramiento no está limitado a la iluminación eléctrica (artificial). El deslumbramiento intenso puede provenir de ventanas mal ubicadas y la mayoría de la gente experimenta en ambientes exteriores tanto el deslumbramiento directo como el reflejado, como por ejemplo, cuando se conduce de frente al sol.

Afortunadamente, el deslumbramiento directo de la iluminación eléctrica se puede generalmente evitar. El contraste entre la fuente de luz y el medio ambiente alrededor se puede reducir por varios métodos, por ejemplo, reduciendo la superficie de brillo (luminancia) de la luminaria por medio de pantallas y permitiendo que una mayor cantidad de luz alcance las paredes y el techo.

- **Deslumbramiento reflejado**

El deslumbramiento reflejado es más difícil de manejar y es una deficiencia común que se presenta en oficinas y en otras situaciones, en donde se encuentran dentro del campo visual superficies brillantes de objetos ligeramente coloreados. Ejemplos típicos de deslumbramiento reflejado son: (a) Oficinas de dibujo en donde la líneas de los lápices se vuelven invisibles debido a que la luz reflejada eleva su brillo al nivel del brillo del papel; y (b) imágenes reflejadas de luminarias en pantallas de montajes de exhibición visual. En estas y en otras situaciones similares, el problema del deslumbramiento reflejado se puede resolver o minimizar a un nivel aceptable, colocando luminarias apropiadas para la tarea y en algunas situaciones, utilizando luminarias con una distribución de luz más apropiada ^c.

El deslumbramiento reflejado reduce significativamente la capacidad de ver apropiadamente las tareas visuales, reduciendo la productividad. Tales problemas no son siempre fáciles de resolver y lo mejor es buscar una asesoría profesional.

El deslumbramiento directo de la iluminación eléctrica puede causar considerable incomodidad, dependiendo del tipo de trabajo que se realice. La norma RETIE recomienda limitar el nivel de incomodidad por deslumbramiento. Los índices que limitan el deslumbramiento para diferentes tareas y situaciones se dan en la norma y no deben excederse.

^c En general, ver Building Research Establishment (BRE) Digest No. 256 *Office Lighting for Good Visual Task Conditions* y para áreas de video ver CIBSE Technical Memorandum No.6 *Lighting for Visual Display Units*. N.T.: Además ver el *IES-Handbook*.

1.4.1.8 Iluminación y consumo de energía

El éxito de cualquier programa dirigido a reducir el uso de la energía y los costos totales depende de la identificación de los factores de costo individuales.

La evaluación de los factores de costo en iluminación debe incluir los siguientes costos:

- Costos de capital
 - Costo del equipo de iluminación
 - Costo de instalación y materiales
- Costos de operación
 - Costo de reemplazo de las lámparas
 - Costo de mantenimiento y de limpieza
 - Costo de electricidad

Un análisis de costos para la mayoría de los sistemas de iluminación con lámpara corrientes de filamento de tungsteno muestra que el costo de la energía eléctrica es el mayor factor de costo.

Los principales factores que influyen en el uso de la energía en una instalación, para un estándar dado de iluminación, son:

- a) Eficacia de la lámpara (luz por vatio de potencia consumido para el tipo de lámpara empleada)
- b) Rendimiento de la luminaria
- c) Esquema del diseño de la iluminación
- d) Decoración y muebles
- e) Estándares de mantenimiento
- f) Uso apropiado de interruptores y controles.

Los puntos (a-e) están relacionados con la eficiencia fundamental de la instalación, mientras que (f) está relacionado con la administración y utilización de la instalación en relación con las necesidades del usuario y los patrones de ocupación de las áreas iluminadas.

Cuando se considera el rendimiento de sistemas de iluminación, es importante estimar su costo verdadero. Es fácil pasar por alto otros factores que inciden en el costo, tales como el menor número de luminarias requeridas, el uso de controles, la reflectancia de las superficies y el patrón de uso del sistema de iluminación. Es también útil estimar las ventajas o desventajas de costos alternativos de capital y los períodos de retorno de la inversión, incluyendo aún si es el caso, ayudas financieras y/o reducciones de impuestos en los cálculos.

1.4.1.9 Selección del tipo de lámpara

Hay tres tipos principales de lámparas eléctricas: Lámparas de filamento de tungsteno, lámparas de descarga (en éstas se incluyen los tubos fluorescentes) y los LED (Light-Emitting Diodes). La eficacia luminosa se da en lúmenes por watt y se deben tener en cuenta las pérdidas de los controles y balastos de las fluorescentes, de los circuitos de las lámparas de descarga y de los circuitos de alimentación de los LEDs.

Cuando se diseña una nueva instalación se debería seleccionar el tipo de lámpara con la mayor eficacia posible y con las características apropiadas para la instalación como son propiedades de color (aparición y reproducción de color (CRI: Color Rendering Index), vida útil o período de servicio, etc.

Para una instalación existente, cambiar las lámparas por más eficientes reducirá el consumo de energía eléctrica y por consiguiente, el costo de operación. Algunos cambios envuelven una pequeña inversión de capital o ninguna, mientras que en otras ocasiones es necesario agregar, cambiar controles o cambiar el tipo de luminaria y/o su posición.

Las lámparas fluorescentes y las de descarga necesitan de un dispositivo de encendido (arrancador o starter) y un dispositivo para controlar el flujo de corriente a través de la lámpara una vez se enciende (balasto). Normalmente se emplea un condensador para corregir el factor de potencia y reducir la corriente que se consume a una potencia dada.

1.4.2 Evaluación comparativa de sistemas de iluminación

Al proponer un sistema de iluminación, es necesario considerar los niveles de iluminación requeridos en el espacio a iluminar de acuerdo a la norma, la cual a su vez tiene relación directa con la actividad a desarrollar en el lugar. El sistema se construye con luminarias y dependiendo del tipo y de la potencia de las lámparas es posible configurar diferentes sistemas alternativos con diferentes tipos de luminarias, diferente potencia de las lámparas, diferente número de ellas y distribución espacial. La situación entonces es ciertamente compleja y la selección de un sistema dentro de los varios alternativos es objeto de análisis apropiados. Debido entonces a la complejidad de las situaciones reales, en este informe solamente se compararán diferentes fuentes de iluminación desde el punto de vista de las características de las lámparas, su inversión inicial y su rendimiento económico, dejando de lado la complejidad de las situaciones reales que se encuentran en la práctica.

1.4.2.1 Factores considerados en la evaluación

Para la evaluación de alternativas para las lámparas y/o luminarias es necesario tener en cuenta los siguientes factores.

- **Luminancia**

La luminancia de una luminaria alternativa debe ser aproximadamente igual a la de la existente. La cantidad de lúmenes emitidos por la lámpara debe ser aproximadamente igual

a la de la fuente existente. Un aspecto importante es el tipo de luminaria empleada y su factor, aspecto complejo por la diversidad de luminarias disponibles en el mercado.

- **Eficacia lumínica**

Esta magnitud es la cantidad de lúmenes producidos por unidad de potencia eléctrica demandada (Lumen/Watt = lm/W). La eficacia lumínica es un factor determinante para el ahorro de energía.

- **Vida útil**

Cuando se aplica a las lámparas la palabra "vida", ésta tiene dos significados diferentes:

- Tiempo después del cual la lámpara deja de funcionar;
- Tiempo después del cual la luz emitida se ha reducido, por el proceso de deterioro normal, a un nivel tan bajo que es más económico reemplazar la lámpara, aunque aún funcione eléctricamente. Este es el período de "servicio económico" o "vida útil".

Las lámparas de filamento y los LEDs están dentro de la primera definición de "vida". La vida nominal para los tipos más comunes bajo condiciones especificadas está definida en estándares internacionales y se acepta como un compromiso práctico entre eficacia y vida útil.

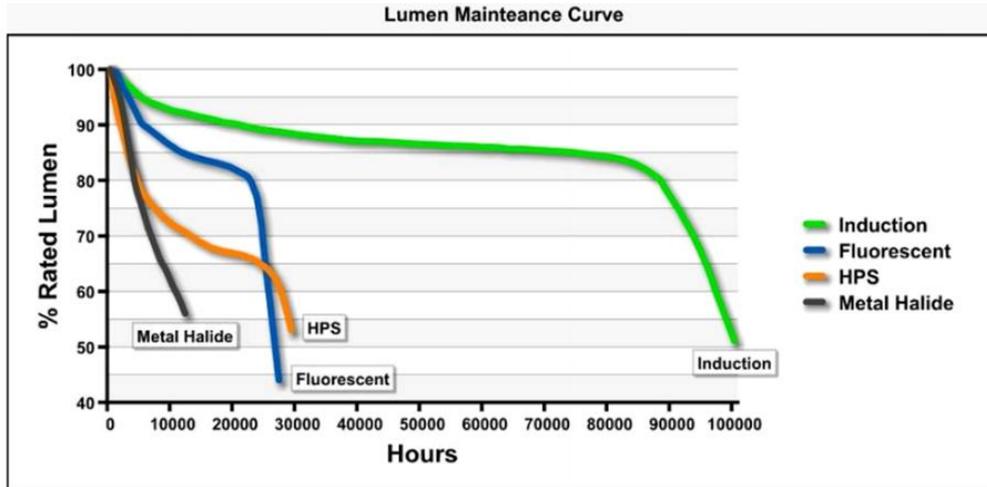
Las lámparas de descarga y las fluorescentes están dentro de la segunda definición. La vida de las lámparas de descarga es un tema complicado y no hay estándares sobre el significado de "vida". Las lámparas fluorescentes actuales y las lámparas de descarga soportan varios miles de horas pero durante ese tiempo la luz emitida disminuye continuamente, de tal manera que si las lámparas se operan hasta que fallen eléctricamente, la luz emitida puede llegar a ser la mitad o menos de la luz emitida al comienzo. En la práctica, las lámparas de descarga y las fluorescentes deben cambiarse en el momento en que resulte más económico para una instalación particular. Por esta razón se suele emplear el concepto de "sustentación lumínica" que es el porcentaje de luminancia que tiene la fuente después de un número de horas de utilización referido a la luminancia inicial⁸.

La Figura 20 muestra la sustentación lumínica de diferentes tipos de lámparas. Como puede observarse tienen dos tipos de comportamientos: Decrecimiento continuo hasta el final de su vida de modo aproximadamente lineal (Metal Halide). Las restantes tienen un decrecimiento continuo y luego un punto de inflexión después del cual decaen aceleradamente. Debajo de este punto, la sustentación decae tan rápidamente que el punto de inflexión se puede considerar el fin de la "vida de servicio o útil". Por tanto para los efectos de este estudio se considerará una eficacia promedio para la del Metal Halide

⁸ En inglés se emplea Light Depreciation o Lumen Maintenance

hasta el final de su vida y para las demás, desde el inicio hasta el punto de inflexión. La tabla siguiente muestra entonces las vidas de “servicio económico o útil” y la sustentación lumínica promedio estimada para el tiempo de servicio económico. Estos valores son los que se emplearán para la evaluación de las lámparas.

Figura 20. Sustentación lumínica de diferentes tipos de lámparas



Fuente: Adendo, distribuidor de Kuhmo Electric USA

Tabla 14. Sustentación lumínica de diferentes tipos de lámparas

Vida de servicio (horas)	Sustentación lumínica (% de luminancia inicial)			
	Metal Halide	Fluorescente	HPS	Inducción
0	100%	100%	100%	100%
12000	55%			
20000			66%	
25000		80%		
85000				85%
Promedio depreciación vida servicio	78%	90%	83%	93%

• **Visión y Percepción**

El método tradicional de medir la cantidad de luz producida por una fuente luminosa se basa en el Lumen fotópico. Este método proporciona los lúmenes "en bruto" que figuran

en los catálogos de las lámparas. El método del lumen fotópico se basa en el campo de visión central del ojo de 2 grados que es sólo el 0,02% del campo visual humano total.

Hay dos tipos de foto-receptores en el ojo humano: conos (con pico de sensibilidad en la región verde-amarillo del espectro de color) y los bastones (con pico de sensibilidad en la región azul-verde). Los bastones superan enormemente en número a los conos en el ojo (esto explica por qué sólo vemos tonos grises en condiciones de muy poca luz). Sin embargo, en el campo central de visión de 2º, los conos son los foto-receptores predominantes. Dado que los lúmenes fotópicos se basan en la sensibilidad de los conos, es evidente que cuanto mejor sea la calidad de color de la luz, mejor la "capacidad de ver". Ambos conos y bastones contribuyen a cómo el ojo percibe la luz para las tareas diurnas, pero los lúmenes fotópicos por sí solos no pueden reflejar lo bien que el ojo realmente "ve". Los lúmenes escotópicos, que se basan en la sensibilidad de los bastones, también deben ser considerados cuando se estima la calidad y la cantidad de iluminación en un espacio.

Debido entonces a la importante discrepancia entre lúmenes fotópicos y la percepción en general, los cálculos de iluminación no se deben basar sólo en lúmenes fotópicos (lúmenes gruesos) o mediciones de luz. Los métodos tradicionales de cálculo comparan los niveles de iluminación "lúmenes contra lúmenes". El elemento humano debe tenerse en cuenta al determinar la cantidad y calidad de la luz en un espacio.

La relación de luminancia escotópica (o lúmenes) frente a la luminancia fotópica en una lámpara se llama la relación S / P, que es un multiplicador que determina el brillo visual aparente de una fuente de luz, así como la cantidad de luz que emite una lámpara que es útil al ojo humano (denominado también lúmenes visualmente eficaces, VELs: Visually Effective Lumens).

La luminancia inicial de una lámpara se calcula entonces como

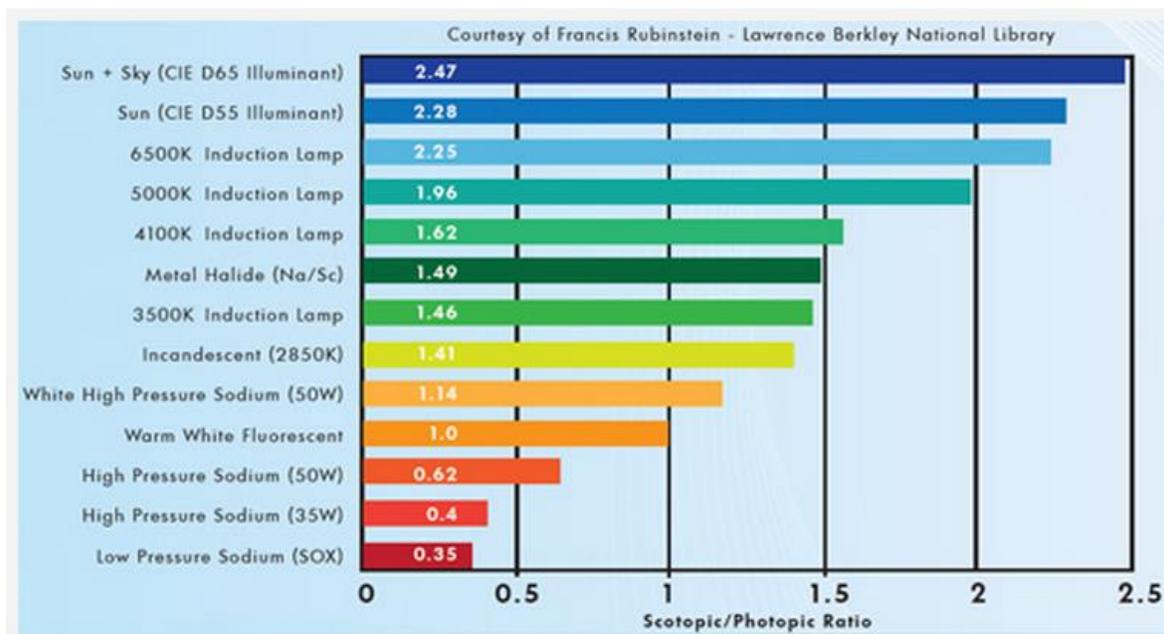
Lúmenes iniciales modificados = (Lúmenes fotópicos) x (lúmenes escotópicos/ lúmenes fotópicos)

Lúmenes iniciales modificados = (Lúmenes fotópicos) x (S/P)

La Figura 21 muestra el cociente S/P para diferentes tipos de lámparas⁹.

⁹ Manual Philips Lighting's Lamp Specification and Application Guide, que además contiene información sobre el tipo de lámpara, temperatura de color y CRI de diferentes lámparas

Figura 21. Factor S/P para diferentes tipos de lámparas



Fuente: <http://lumenistics.com/consider-photopic-scotopic-mesopic-vision-before-specifying-lumen-requirements/>

Puesto que algunas fuentes luminosas sufren una dramática pérdida de eficiencia a medida que las lámparas envejecen a partir de 40% de la vida nominal, entonces se debe incluir la sustentación lumínica en la ecuación (los factores de sustentación del flujo publicados suelen reflejar la diferencia entre lúmenes iniciales y los lúmenes promedio al 40% de la duración nominal)¹⁰. La ecuación para considerar los “lúmenes modificados al final de la vida” es:

Lúmenes de trabajo modificados al final de la vida = (Lúmenes fotópicos) x (lúmenes escotópicos/ lúmenes fotópicos) x sustentación lumínica

Lúmenes de trabajo modificados al final de la vida = (S/P) x sustentación lumínica

1.4.3 HID vs Inducción

Dentro de las diversas técnicas para producir y excitar un plasma de gas, la HID emplea electrodos dentro del tubo para arrancar el plasma y mantenerlo excitado, mientras que en las lámpara de Inducción la excitación es externa al tubo (por lo que el tubo solamente contiene el gas). Esta diferencia es supremamente importante porque aumenta la durabilidad de la lámpara HID y al no emplear electrodos consumibles, la emisión del

¹⁰ Es preciso leer en los catálogos del fabricante de la lámpara las notas asociadas para determinar en qué momento de la vida de la lámpara se toma la lectura lumen 'media'.

plasma no se ve contaminada por los elementos que componen los electrodos. A continuación se describen ambas tecnologías.

1.4.3.1 Lámparas HID

En esta sección se consideran de manera general las lámparas HID. Las lámparas de descarga de alta intensidad (lámparas HID: High Intensity Discharge Lamps) son un tipo de lámpara de descarga de gas eléctrico que produce luz por medio de un arco eléctrico entre los electrodos de tungsteno contenidos dentro de un tubo de descarga de cuarzo o alúmina fundido translúcido o transparente. Este tubo se llena con sales de metales y gas. El gas facilita la formación inicial del arco. Una vez que se inicia el arco, calienta y evapora las sales de metal que forman un plasma, lo que aumenta en gran medida la intensidad de la luz producida por el arco y reduce su consumo de energía. Las lámparas de descarga de alta intensidad son un tipo de lámpara de arco.

Las lámparas de descarga de alta intensidad hacen que la luz sea más visible por unidad de energía eléctrica consumida que las lámparas fluorescentes e incandescentes ya que una mayor proporción de su radiación es luz visible, en contraste con el calor.

Varios tipos de químicos se utilizan en los arcos de las lámparas HID, dependiendo de las características deseadas de la intensidad de luz, temperatura de color correlacionada, índice de rendimiento de color (CRI), la eficiencia energética y vida útil. Variedades de lámpara HID incluyen:

- Lámparas de vapor de mercurio
- Lámparas de halogenuros metálicos (MH)
- Lámparas MH cerámica
- Lámparas de vapor de sodio
- Lámparas de xenón de arco corto

El elemento que produce luz de estos tipos de lámparas es una descarga de arco bien estabilizado contenido dentro de un tubo de arco sobre la pared refractaria con carga superior a 3 W / cm^2 ($19,4 \text{ W / in}^2$).

Las lámparas de vapor de mercurio fueron las primeras lámparas HID disponibles en el mercado. Originalmente se producen una luz de color verde azulado, pero las versiones más recientes pueden producir luz con un tinte de color menos pronunciado. Sin embargo, las lámparas de vapor de mercurio están cayendo en desgracia y están siendo sustituidas por vapor de sodio y halogenuros metálicos.

Las lámparas de halogenuros metálicos y de halogenuros metálicos de cerámica se pueden fabricar para emitir luz blanca neutra útil para aplicaciones donde la apariencia normal del color es fundamental, como la televisión y la producción de películas, en salones de juegos deportivos, faros de automóviles, y la iluminación de acuarios.

Las lámparas de vapor de sodio de baja presión son extremadamente eficientes. Producen una luz amarillo-naranja intenso y tienen una CRI efectiva de casi cero, los artículos observados bajo esta luz aparecen monocromáticos. Esto las hace particularmente eficaces como luces de seguridad fotográficos. Lámparas de sodio de alta presión tienden a producir una luz mucho más blanca, pero todavía con una coloración naranja-rosado característico. Nuevas versiones de color corregido que producen una luz más blanca ya están disponibles, aunque se sacrifica algo de eficiencia para mejorar el color.

Al igual que las lámparas fluorescentes, las lámparas HID requieren un balasto para iniciar y mantener sus arcos. El método utilizado para iniciar el arco varía: lámparas de vapor de mercurio y algunas lámparas de haluros metálicos emplean por lo general un tercer electrodo cerca de uno de los electrodos principales, mientras que otros tipos de lámparas se arrancan empleando pulsos de alto voltaje.

1.4.3.2 Lámparas de inducción

Una lámpara sin electrodos o luz de inducción es una lámpara de descarga de gas en el que la potencia requerida para generar la luz es transferida desde fuera de la envoltura de la lámpara al gas en el interior a través de los campos electromagnéticos, en contraste con una lámpara de descarga de gas típico que utiliza electrodos internos alimentados por conductores que pasan a través de la envoltura de la lámpara. Hay tres ventajas de la eliminación de los electrodos:

- Vida de la lámpara extendida, debido a que los electrodos son por lo general el factor que limita la vida de la lámpara.
- La capacidad de utilizar las sustancias generadoras de luz con mayor eficiencia que reaccionarían con los electrodos de metal en las lámparas normales.
- Mejora de la eficiencia de la fuente luminosa debido a que la fuente se puede hacer muy pequeña y sin acortamiento de vida, un problema de las lámparas con electrodos.

Una lámpara de inducción consta de cuatro elementos:

- Bombilla con gas, carente de electrodos y conexiones
- Se describen abajo dos sistemas de lámparas de plasma, que utilizan ondas de radio para energizar la lámpara llena de vapor de azufre o haluros metálicos, fluorescentes y lámparas de inducción, sobre la base de una bombilla de lámpara fluorescente convencional en el que se induce corriente por una bobina externa de alambre por medio de inducción electromagnética.

La tabla siguiente muestra comparativamente las principales propiedades de las lámparas de inducción frente a las lámparas HID.

Tabla 15. Comparación de las propiedades de Inducción vs HID

Propiedad	Inducción	HID
Eficacia	Hasta 90 lúmenes / vatio	40-100 lúmenes / vatio
Durabilidad	De alta resistencia - no tiene electrodo o filamento, resistente a choques y vibraciones	Frágil - tiene partes móviles, bombillas de vidrio y filamento
Vida útil	100.000 horas	15.000 a 25.000 horas
Depreciación lumínica	5% a 2.000 horas	30% a 40% en 2.000 horas
Tolerancia al frío	- 40 F (puede requerir tiempo de calentamiento a baja temperatura)	- 40 F (puede requerir más tiempo de calentamiento a baja temperatura)
Rendimiento	Activa instantáneamente, sin parpadeo o resplandor	Necesita 5-10 minutos de calentamiento, puede parpadear y el brillo
Temperaturas de color	Múltiples Opciones (2700-6500 Kelvin)	Opciones limitadas (3.000 a 5.000 Kelvin)
Representación de color	Promedio 80 CRI	5-93 CRI
Dimerizable?	No - a menos balasto especial	No
Garantía	de 3 a 10 años	1 a 2 años
Costo	Costo inicial alto	De bajo costo inicial, pero requiere cambio de lámparas regulares y el reemplazo de balasto

Para efectos de esta evaluación, consideraremos los siguientes dos productos:

- 1 luminaria de 400W HPS (Sodio Alta Presión) o Metal Halide, cuyo precio puede estar por el orden de \$400.000 a \$500.000, depende del modelo y de la marca.
- 1 Luminaria de 150W de inducción, que podemos emplear para hacer ese cambio y que puede estar por el orden de \$700.000.

Es importante anotar que estos precios son indicativos pues existe un muy amplio espectro de luminarias, de diferentes características y propiedades por lo que esta comparación se fundamente en costos indicativos y no específicos para ninguno de los dos productos.

La tabla siguiente muestra el efecto de incorporar el concepto de luminancia de trabajo modificada en tanto al inicio como al final de la vida útil. La luminancia de la luminaria de HPS es 4 veces superior pero al considerar la luminancia de trabajo considerando la escotópica, ésta ya no es sino 50% superior. Y luego al considerar la luminancia corregida al final de la vida de servicio, la HPS tiene solamente un 20% de mayor luminancia modificada. Pero la diferencia enorme está en el CRI de la HPS que es muy bajo, en una rápida sustentación lumínica de la HPS y la corta vida de la HPS (1/4 de la vida de la lámpara de inducción) y una mayor demanda de potencia.

Tabla 16. Luminancias corregidas para las HPS y las de inducción

Tipo Lámpara	CRI	Sistema (Watts)	Luminancia Fotópica Inicial (Lúmenes)	Coefficiente (S/P)	Luminancia Trabajo Modificada (Lúmenes)	Vida nominal (hr)	Depreciación Luminica (%)	Luminancia Final Vida Modificada (Lúmenes)	Eficacia Modificada Fin Vida ((Lumenes/Watt)
HPS	21	400	29,788	0.57	16,979	24,000	66%	11,206	28.0
Inducción	80	150	6,800	1.62	11,015	100,000	85%	9,363	62.4
Nota:									
Depreciación luminica									
HPS a 20.000 hrs									
Inducción a 85.000 hrs									

La tabla siguiente muestra los parámetros empleados para la evaluación de dos productos comerciales. Se consideran todos los costos de los productos durante una vida útil de 85.000 horas, que es la vida útil de la lámpara de inducción mientras que a la de HPS se consideran 20.000 horas y para cubrir las 85.000 horas es necesario comprar 5 lámparas, de las cuales la última queda todavía con 15.000 de vida.

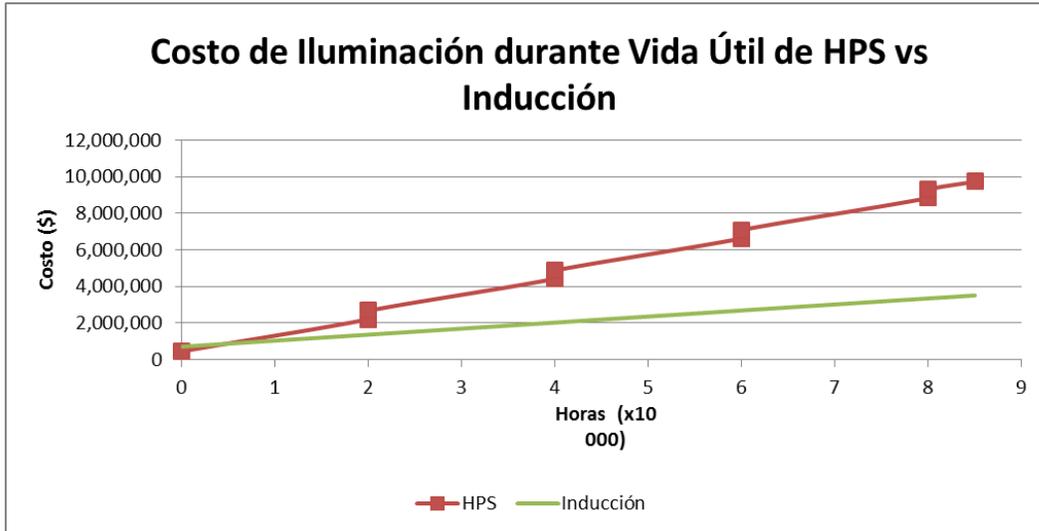
La parte de resultados muestra que durante 85.000 horas, la lámpara de inducción con 12 horas al día de servicio tiene una vida útil de 236 meses, produce un ahorro de energía de 21.250 kWh y una reducción de emisiones de 5.8 t CO₂. A la tarifa de \$432.50/kWh que corresponde a industrial con contribución y a nivel 1, produce un ahorro de \$10.740.544 y su relación ahorro a inversión es de 15. La rentabilidad de la inversión es de 6.5% mensual.

Tabla 17. Comparación de luminaria HPS vs Inducción

DATOS DE ENTRADA	Tecnología		RESULTADOS	Actual	Alternativa
	Actual	Alternativa		HPS	Inducción
			Luminancia (Lum)	29800	6795
			Factor S/P	0.57	1.62
			Luminancia INICIAL modificada (Lum)	16,986.0	11,007.9
			Comparables, % de mayor luminancia inicial corregida		NO -35%
			Luminancia FINAL modificada (Lum)	11,210.8	9,356.7
			Comparables, % de mayor luminancia FINAL corregida		NO -17%
			Ahorro energía durante vida útil solución alternativa (kWh)		21,250.0
			Emisiones reducidas (kgCO2/vida útil)		5,843.8
			Vida útil solución alternativa (meses)		236
			Número de recambios lámpara durante vida útil solución alternativa	3	0
			Costo total para duración igual a Vida Útil de Alternativa	\$ 16,954,871	\$ 6,214,327
			Ahorro durante vida útil	\$ 0	\$ 10,740,544
			Ahorro / Inversión Alternativa	0	15
			Ahorro mensual	0	\$ 45,489
			Rentabilidad (%/mes)	0	6.5%
Producto	HPS	Inducción			
Punto de compra					
Marca	Genérica	Kuhmo			
Modelo	Genérico	Kuhmo			
Paquete	\$ 450,000	\$ 700,000			
Número unidades	1	1			
Precio Unitario	\$ 450,000	\$ 700,000			
	Actual	Alternativa			
Tecnología	HPS	Inducción			
Potencia (W)	400	150			
Costo inversion (\$)	\$ 450,000	\$ 700,000			
Vida Nominal (hr)	24,000	100,000			
Vida Útil (hr)	20,000	85,000			
Eficacia (Lum/Watt)	74.5	45.3			
Sustentación promedio	66%	85%			
CRI (%)	21%	80%			
Factor S/P	0.57	1.62			
Factor luminaria	1.0	1.0			
Otros datos de entrada					
Tarifa (\$/kWh)	Ind CC Noct NI	432.4962			
Factor de uso (hr/día)		12			
Coefficiente emisiones (kgCO2/kWh)		0.275			

La figura siguiente muestra el costo de la iluminación de estos dos productos en el caso base anteriormente descrito.

Figura 22- Costos de iluminación del caso base HPS vs Inducción



Es evidente entonces la ventaja que representa la utilización de las lámparas de inducción sustituyendo a las lámparas HPS tradicionales. En este caso es importante resaltar que si bien la luminancia inicial corregida y la luminancia final corregida son inferiores a la de HPS seleccionada en este caso, al final de la vida útil de la inducción la diferencia con la de HPS a las 20.000 horas es solamente de -17%, pero la HPS debe cambiarse en ese momento y es necesario adicionar los costos de mantenimiento que requiere el reemplazo de la lámpara de HPS.

Es muy conveniente considerar las siguientes características de las lámparas de inducción comparadas con las HID recordando el aspecto supremamente importante de la sustentación lumínica. Como se puede observar las lámparas HID no sostienen la luminancia durante la vida útil y comienzan su depreciación desde el inicio de su instalación, exceptuando la fluorescente. Este es un factor muy importante a considerar y constituye para las lámparas de inducción una ventaja muy importante.

1.4.4 Fluorescente de inducción vs LED

Una opción comparativa de consideración actualmente es el uso de lámparas fluorescentes vs LED.

La tabla siguiente muestra las propiedades comparativas entre estos dos tipos de lámparas. Primero que todo, la eficacia lumínica de los LED es un poco superior a los tubos fluorescentes, en general, pero depende específicamente del producto y por tanto es necesario verificar con el fabricante. Pero para iluminación de recintos desde el cielo raso, tiene la ventaja de que la tecnología del LED es planar y por tanto frente a los tubos fluorescentes que radian axialmente en todas direcciones, estos últimos requieren de

reflectores apropiados para dirigir parte de la luminancia hacia la parte inferior. Los LED tienen vida superior a los tubos fluorescentes, tienen un CRI ligeramente mayor y son más costosos.

Tabla 18. Comparación de las propiedades de las lámparas Fluorescentes vs LED

Propiedad	Fluorescentes	LED
Eficiencia	50 a 100 lúmenes / vatio	100 + Lúmenes / Watt
Durabilidad	Fluorescentes de alta calidad son de servicio pesado - no tienen filamento, resistentes al choque y vibración	De alta resistencia - no tiene electrodo o filamento, resistencia a golpes y vibraciones
Vida útil	30.000 horas o más (nuevos modelos)	Hasta 100.000 horas
Depreciación Lumínica	Mínima	Moderadamente baja
Tolerancia al frío	-10 F	-30 F (instantánea on)
Rendimiento	Puede requerir tiempo de calentamiento	Activa instantáneamente, sin parpadeo
Temperaturas de color	Múltiples opciones (3.000-6.500)	Opciones múltiples (2.700 a 6.500 Kelvin)
Rendición de color	Promedio 75 al 80	Promedio 80 a 85 CRI
Dimerizable?	Algunos	Mayoría
Garantía	De 1 a 3 años	Por lo general 5 años
Costo	Bajo costo inicial	Alto costo inicial

Consideremos en este caso dos luminarias, una con un tubo fluorescentes (1x54 T5) y dos luminarias LED (2x40 W) como suministrada en el mercado colombiano. La razón para ello es que la luminaria considerada tiene un solo tubo (para efecto comparativo) y para alcanzar una luminancia más alta con las luminarias de LED, se consideran dos. La tabla siguiente muestra las luminancias modificadas con el factor S/P tanto al comienzo como al final de la vida útil, las cuales son comparables.

Tabla 19. Luminancias corregidas para la luminaria con dos fluorescentes y las dos luminarias LED

Tipo Lámpara	CRI	Sistema (Watts)	Luminancia Fotópica Inicial (Lúmenes)	Coficiente (S/P)	Luminancia Trabajo Modificada (Lúmenes)	Vida nominal (hr)	Sustentación Luminica (%)	Luminancia Final Vida Modificada (Lúmenes)	Eficacia Modificada Fin Vida ((Lumenes/Watt)
LED x2	80%	80.0	4,400	1.90	8,360	50,000	100%	8,360	104.5
Fluorescente T5 HO x1	85%	62.0	5,000	1.91	9,550	25,000	93%	8,882	143.3

La tabla siguiente muestra los parámetros empleados para la evaluación de los dos productos comerciales comparados. Se consideran todos los costos de los productos durante una vida útil de 50000 horas, que es la vida útil de las dos luminarias LED mientras que luminaria con un tubo 54 T5 HO se consideran de 25.000 horas y para cubrir las 50.000 horas es necesario comprar una segunda luminarias de reemplazo a las 25.000 horas.

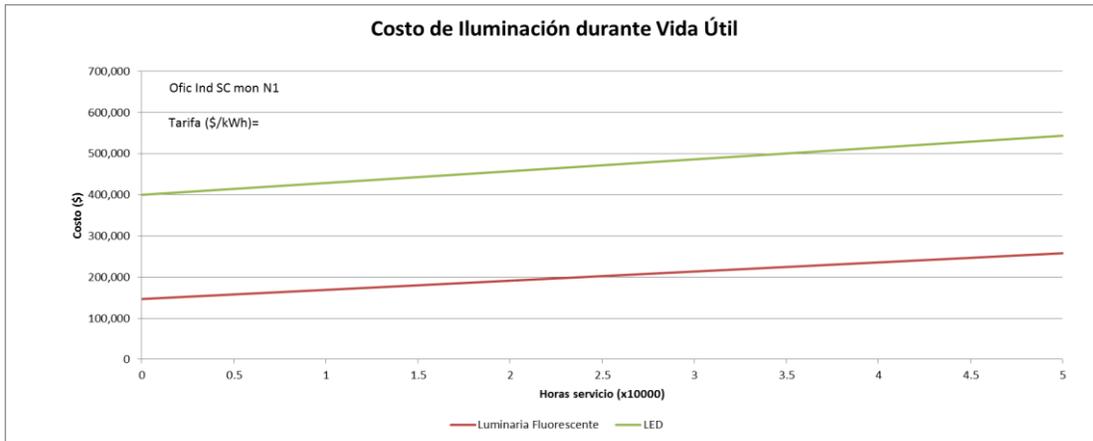
La parte de resultados muestra que durante 50.000 horas, la luminaria s LED con 12 horas al día de servicio tiene una vida útil de 139 meses, produce un consumo de energía de 900 kWh de más sobre la luminaria fluorescente y un aumento en las emisiones de 247 kg de CO₂. A la tarifa de \$358/kWh que corresponde a industrial sin contribución monomía a nivel 1, produce un sobre costo frente a la luminaria fluorescente de \$282.434 y su relación ahorro a inversión es de -6. La rentabilidad de la inversión es de -0.5% mensual. *Por tanto es preferible la utilización de la luminaria T5 en términos de costos y de reducción de emisiones.*

Tabla 20. Comparación de luminaria fluorescente vs dos luminarias LED

DATOS DE ENTRADA	Tecnología		RESULTADOS	Actual	Alternativa
	Actual	Alternativa		Luminaria Fluorescente	LED
			Luminancia (lm)	5000	4400
			Factor S/P	1.91	1.90
			Luminancia INICIAL modificada (lm)	9,550.0	8,360.0
Producto	Luminaria Fluorescente	LED	Comparables, % de mayor luminancia inicial corregida		NO
Punto de compra	INVENTOR	INVENTOR			-12%
Marca	MULTIFUNCIONAL	OPTIMUS	Luminancia FINAL modificada (lm)	8,881.5	8,360.0
Modelo	1X54 T5		Comparables, % de mayor luminancia FINAL corregida		NO
Luminaria	\$ 146,800	\$ 200,000			-6%
Número unidades	1	1	Ahorro energía durante vida útil solución alternativa (kWh)		-900.0
Precio Unitario Luminaria	\$ 146,800	\$ 200,000	Emisiones reducidas (kgCO2/vida útil)		-247.5
			Vida útil solución alternativa (meses)		139
Tecnología	Actual Luminaria Fluorescente	Alternativa LED	Número de recambios lámpara durante vida útil solución alternativa	1	0
Potencia Luminaria (W)	62	40	Costo total para duración igual a Vida Útil de Alternativa	\$ 1,552,383	\$ 1,834,816
Numero Luminarias	1	2	Ahorro durante vida útil	\$ 0	(\$ 282,434)
Potencia total (W)	62	80	Ahorro / Inversión Alternativa	0	-6
Costo inversion (\$)	\$ 146,800	\$ 400,000	Ahorro mensual	0	(\$ 2,034)
Vida Nominal (hr)	25,000	50,000	Rentabilidad (%/mes)	0	-0.5%
Vida Útil (hr)	25,000	50,000			
Eficacia (lm/Watt)	80.6	55.0			
Sustentación promedio	93%	100%			
CRI (%)	85%	80%			
Factor S/P	1.91	1.90			
Factor luminaria	1.0	1.0			
Otros datos de entrada					
Tarifa (\$/kWh)	Ofic.Ind SC mon N1	358.7041			
Factor de uso (hr/día)		12			
Coefficiente emisiones (kgCO2/kWh)		0.275			

La figura siguiente muestra el costo de la iluminación de estos dos productos en el caso base anteriormente descrita.

Figura 23- Costos de iluminación del caso base HPS vs Inducción



Es evidente entonces la ventaja que representa la utilización de las lámparas fluorescente en este caso frente a las luminarias de LED.

1.5 CHILLERS EFICIENTES

1.5.1 Introducción

El consumo de energía que se emplea para calefacción, ventilación y refrigeración en edificios comerciales suele ser elevado. En Estados Unidos, por ejemplo, el 24 por ciento de la energía en edificios comerciales se utiliza para estos usos. De esta energía, más de la mitad se destina al enfriamiento. Dentro de los equipos empleados, los chillers son un tipo de equipo de refrigeración que produce agua fría para enfriar el aire. El empleo de sistemas de refrigeración tan eficientes como sea posible, es una componente importante de la reducción de los costos de operación de una edificación. En esta sección se abordan las oportunidades de ahorro de energía en los chillers de agua.

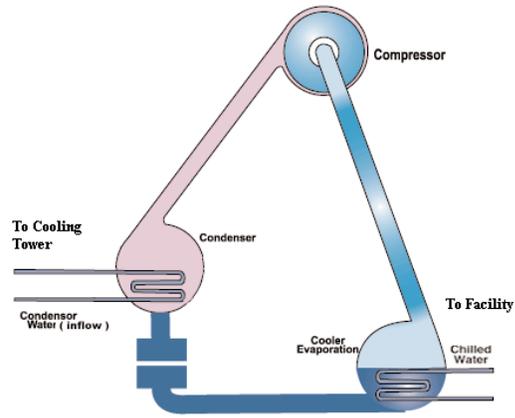
Cuando se consideran los costos de estos equipos, hay mejoras de la eficiencia que sólo se pueden justificar en el momento de la compra. Si al comprar un nuevo equipo se hace una pobre decisión, se le puede cargar al usuario con altos costos de operación durante los años siguientes. Las situaciones que se presentan con los chillers pueden ser muy variadas. Se puede tener el caso de la compra de un nuevo chiller y de equipos de control para incrementar la eficiencia energética de los chillers, o se puede tener la situación de un chiller de más de 10 años, o si chiller tiene suficiente capacidad y tiene problemas frecuentes en su operación o si se está considerando la compra de un chiller para la expansión o para tenerlo como respaldo. La siguiente subsección de ocupa de estas situaciones.

Otro tipo de situación se tiene cuando el sistema de agua helada tiene menos de 10 años de antigüedad y no se ve claramente la necesidad de actualización o reemplazo inminente, es poco probable que se pueda justificar el costo de reemplazar el chiller basado en el ahorro de eficiencia energética solamente. Esta situación se discute en la segunda sub-

sección sobre la optimización de sistemas de agua enfriada existente para evaluar las maneras de lograr que su sistema de refrigeración actual sea más eficiente.

1.5.2 Compra de Equipos y Chillers Eficientes Energéticamente

En primer lugar es conveniente entender la terminología de la eficiencia del enfriador. La Eficiencia del Chiller es generalmente expresada en términos de kW por tonelada de refrigeración (kW /tonR). Un kW es un kilovatio de entrada eléctrica. Una tonelada de refrigeración (tonR) es equivalente a 12.000 BTU de enfriamiento por hora. Los chillers más eficientes son aquellos que demandan un menor número de kW / tonR indicando que utilizan menos electricidad para entregar la misma cantidad de enfriamiento.



También se debe tener en cuenta que los chillers pueden tener un valor a carga completa (FL: Full Load) y otro valor a carga parcial integrado (IPLV: Integrated Partial Load Value). El IPLV es un ponderado promedio de mediciones de la eficiencia en diversas condiciones de carga parcial. Es una forma estandarizada de comparación de chillers en condiciones más representativas que las condiciones de trabajo. El IPLV se prefiere para situaciones con cargas variables. Sin embargo, algunos podrían poner más énfasis en el rendimiento de las instalaciones a plena carga.

La eficiencia de los nuevos chillers (IPLV) puede variar ampliamente desde un mínimo de 1,25 kW / tonR (eficiencia estándar de compresor de tornillo refrigerado por aire) hasta un máximo de 0,38 kW / tonR (compresor centrífugo enfriado por agua de alta eficiencia). En otras palabras, el costo de la energía puede ser más de 2 ½ veces mayor para el enfriador de menor eficiencia. Por cada 100 toneladas de capacidad de refrigeración, esto puede suponer un ahorro de más de \$391.000.00 en 10 años para una operación de una jornada.

Para calcular el ahorro para los chillers de mayor eficiencia, utilice la siguiente fórmula:

$$\text{\$ ahorrados anualmente} = (\text{kW / ton ahorrado}) \times (\text{número de toneladas}) \times \text{\$ / kWh ahorrado}$$

Tabla 21. Ahorro por tiempo de operación y tarifa

Carga Total Equivalente		Tarifa	\$
Jornadas	horas / año	\$ / kWh	ahorrados
Una jornada	1500	358.70	538,050
Dos jornadas	2250		807,075
Tres jornadas	3000		1,076,100

Como un ejemplo, una operación de dos turnos usando un chiller de 300 toneladas y la selección de un modelo con un IPLV de 0,55 en comparación con uno con IPLV de 0,7 ahorraría:

$$(0,7 - 0,55) \text{ kW / ton} \times 300 \text{ ton} \times \$ 807.075 / \text{año} = \$36.318.375 \text{ por año.}$$

En otras palabras, para lograr un retorno de la inversión de dos años, usted podría pagar hasta \$72.636.750 por el nuevo chiller.

Las siguientes tablas muestran las recomendaciones de rendimiento para diferentes tipos de chiller. Las columnas dan el recomendado (basado en la Norma 550/590-98 del American Refrigeration Institute) y el mejor IPLV disponible para ese tipo chiller. Los valores se basan en condiciones estándar especificadas en la norma ARI 550/590-98. Este listado es válido para chillers empaquetados (es decir, ninguno con condensadores remotos).

Tabla 22. Recomendaciones de eficiencia en chillers enfriados por aire

Recomendaciones de Eficiencia - Chillers Enfriados por Aire		
	Chiller Optimizados a Carga Parcial	
Tipo de compresor y capacidad	Recomendado IPLV (kW/ton)	Mejor disponible IPLV (kW/ton)
Scroll (30-60 tons)	0.86 o menos	0.83
Reciprocantes (30-150 tons)	0.90 o menos	0.80
Tornillo (70-120 tons)	0.98 o menos	0.83
	Chiller Optimizados a Plena Carga	
Tipo de compresor y capacidad	Recomendado Plena Carga (kW/ton)	Mejor disponible Plena Carga (kW/ton)
Scroll (30-60 tons)	1.23 o menos	1.10
Reciprocantes (30-150 tons)	1.23 o menos	1.00
Tornillo (70-120 tons)	1.23 o menos	0.94

Fuente: Chiller-fact-sheet-052005 energy saving advancements, Progress Energy

Tabla 23. Recomendaciones de eficiencia en chillers enfriados por agua

Recomendaciones de Eficiencia - Chillers Enfriados por Agua		
	Chiller Optimizados a Carga Parcial	
Tipo de compresor y capacidad	Recomendado IPLV (kW/ton)	Mejor disponible IPLV (kW/ton)
Centrifugos (150-299 tons)	0.52 o menos	0.47
Centrifugos (300-2000 tons)	0.45 o menos	0.38
Tornillo >=150 tons	0.49 o menos	0.46
	Chiller Optimizados a Plena Carga	
Tipo de compresor y capacidad	Recomendado Plena Carga (kW/ton)	Mejor disponible Plena Carga (kW/ton)
Centrifugos (150-299 tons)	0.59 o menos	0.50
Centrifugos (300-2000 tons)	0.56 o menos	0.47
Tornillo >=150 tons	0.64 o menos	0.58

Fuente: Chiller-fact-sheet-052005 energy saving advancements, Progress Energy

1.5.3 Evaluación de cambio de chillers en base a mejoramiento de la EE

Por definición, la demanda de potencia está dada por

$$DP = P(\text{ kW}) / Q(\text{ ton}),$$

en donde P es la potencia demandada por ton de refrigeración (1 ton = 12000 Btu/hr)

El consumo de energía se da como

$$CE(\text{ kWh/año}) = P(\text{ kW}) * t(\text{ horas/año})$$

y el valor anual de la factura de consumo de energía

$$FE(\text{ \$/año}) = CE(\text{ kWh/año}) * \text{Tarifa}(\text{ \$/kWh}).$$

Si por efecto de un cambio en el equipo, de la misma tecnología pero más eficiente, entonces

$$DP' = P' / Q'$$

$$CE' = P' * t'$$

$$FE' = CE' * T'$$

Si se hacen los siguientes supuestos:

- $Q = Q'$, esto es, la carga térmica permanece igual después del cambio de equipo de la misma tecnología por uno más moderno ,
 - $t = t'$, esto es, el tiempo de operación permanece igual, lo cual significa que la potencia del nuevo equipo es inferior a la del equipo antiguo
 - $T = T'$, esto es la tarifa de energía eléctrica permanece igual,
- entonces:

$$\Delta DP = DP' - DP = \left(\frac{P'}{Q'} - \frac{P}{Q} \right) = \frac{1}{Q} * (P' - P) = \frac{\Delta P}{Q}$$

$$\Delta P = \Delta DP * Q$$

$$\Delta CE = (P' - P) * t = \Delta P * t$$

$$\Delta FE = \Delta CE * T$$

De acuerdo a lo anterior, cuanto mayor es la disminución de la demanda de potencia del equipo, mayor es el aumento en la reducción del consumo de energía y en la misma proporción, la disminución de la factura de energía eléctrica.

Si se considera que el ahorro de la factura de energía ΔFE , debe durante un periodo de tiempo τ (en años) amortizar la inversión INV en el nuevo equipo de potencia P' , entonces

$$INV = \Delta FE * \tau$$

y por lo tanto

$$INV = \Delta DP * Q * t * T * \tau$$

• **Ejemplo: Chiller Enfriado por Agua**

Siguiendo la metodología anterior y a manera de ejemplo, consideremos un chiller enfriado por agua centrífugo a carga parcial de 400 ton de refrigeración que tiene una demanda actual de 0.8 kW/ton, operando 2250 h/año, a la tarifa Oficial Industrial Sin Contribución Monómica N1 de Codensa. La demanda de potencia IPLV recomendada en la tabla anterior corresponde a 0.45 kW/ton (Ver tabla siguiente). El nuevo chiller del mismo tipo y trabajando el mismo número de horas, ahorraría anualmente \$112.991.792. Este sería el monto con el que anualmente se amortizaría la inversión del nuevo chiller. Dependiendo del costo del nuevo chiller, el periodo de recuperación de la inversión sería su costo dividido por el ahorro anual. Este es uno de los criterios empleados en la toma de decisión sobre el cambio de chiller, además de consideraciones de orden técnico y operacional.

Tabla 24. Estimado de ahorros por mejora de eficiencia en chiller enfriado por agua

Tipo Chiller	Chiller Enfriados por Agua
Tipo de compresor, capacidad, carga	Centrifugos (300-2000 tonR), carga parcial ▼
Capacidad actual (ton)	400
DP Actual (kW/ton)	0.8
Tipo Tarifa	Ofic Ind SC mon N1 ▼
Empresa	Codensa
Valor tarifa (\$/kWh)	358.7041
Periodo de servicio anual	Dos jornadas ▼
Horas de servicio (horas / año)	2250.0
Nuevo Chiller	
Nueva DP recomendada (kW/ton)	0.45
Ahorros anuales	\$ 112,991,792

- **Ejemplo: Chiller Enfriado por Aire**

Siguiendo la metodología anterior y a manera de un segundo ejemplo, consideremos un chiller enfriado por aire a carga parcial de 150 ton de refrigeración que tiene una demanda actual de 1.5 kW/ton, operando 3000 h/año, a la tarifa Comercial Con Contribución Monómica N1 de Codensa. La demanda de potencia recomendada IPLV recomendada en la tabla anterior corresponde a 0.9 kW/ton (Ver Tabla 25). El nuevo chiller del mismo tipo y trabajando el mismo número de horas, ahorraría anualmente \$96.850.107. Este sería el monto con el que anualmente se amortizaría la inversión del nuevo chiller. Dependiendo del costo del nuevo chiller, el periodo de recuperación de la inversión sería su costo dividido por el ahorro anual. Este es uno de los criterios empleados en la toma de decisión sobre el cambio de chiller, además de consideraciones de orden técnico y operacional.

Tabla 25. Estimado de ahorros por mejora de eficiencia en chiller enfriado por aire

Tipo Chiller	Chiller Enfriados por Aire
Tipo de compresor, capacidad, carga	Reciprocantes (30-150 tons), carga parcial
Capacidad actual (ton)	150
DP Actual (kW/ton)	1.5
Tipo Tarifa	Ind Comer CC mon N1
Empresa	Codensa
Valor tarifa (\$/kWh)	358.7041
Periodo de servicio anual	Tres jornadas
Horas de servicio (horas / año)	3000.0
Nuevo Chiller	
Nueva DP recomendada (kW/ton)	0.9
Ahorros anuales	\$ 96,850,107

1.5.4 Recomendaciones para Compra de Chilers

- Los compradores deben decidirse entre chillers refrigerados por aire o por agua. Sistemas refrigerados por aire eliminan la necesidad de una torre de enfriamiento que reduce costos de instalación, y de operación y mantenimiento. Sin embargo, como se puede ver en las tablas anteriores, los chillers de condensación por aire son significativamente menos eficientes.
- Al seleccionar una chiller, prestar especial atención a la capacidad. Chillers de gran capacidad no sólo son más caros, sino que también pueden despilfarrar energía debido a la baja eficiencia a baja carga.
- Al sustituir los chillers, considere otras mejoras energéticas que pueden reducir la carga de refrigeración, tales como unas mejores ventanas o mejoras en la iluminación. La carga de enfriamiento más baja requiere de un chiller más pequeño que puede justificar las otras mejoras.
- Considere sistemas con múltiples chillers para ofrecer redundancia y permitir múltiples compresores. Múltiples compresores se secuencian automáticamente para mantener a los compresores operando cerca de plena carga.
- Chillers centrífugos de velocidad variable permiten que los chillers funcionen a una mayor eficiencia en carga parcial. Si puede tener varios chillers en operación, considere el uso de un enfriador centrífugo como un enfriador principal para cuidar de la carga variable y chillers convencionales como respaldo operando a plena capacidad cuando entran en operación.
- Recuerde que también hay ahorros que pueden logarse con las bombas y motores de alta eficiencia, y las torres de enfriamiento eficiente (ventiladores de dos velocidades o de velocidad variable).

1.5.5 Optimización de Sistemas de Agua Refrigerada Existentes

Si usted tiene un chiller bastante nuevo, hay una serie de medidas que se pueden hacer para reducir el costo de operación de su sistema. Las siguientes estrategias bien conocidas se pueden utilizar en muchos de los sistemas y, usados en conjunto, podrían ahorrar de 5 a 25 por ciento de su energía de refrigeración. Es conveniente consultar el manual del chiller antes de cambiar drásticamente los set-points del agua fría o del condensador. Muchas de estas funciones están integradas en las unidades de control de los chillers existentes.

1.5.6 Temperatura del Suministro de Agua de los Chillers

Durante años, los chillers fueron controlados para suministrar agua a temperatura constante en el edificio, independientemente de la carga de refrigeración. Sin embargo, los chillers modernos pueden variar la temperatura del agua fría a medida que disminuye la carga de refrigeración. Al permitir que la temperatura del agua pueda variar durante períodos de baja carga de refrigeración, se obtiene un ahorro de alrededor de uno por ciento por cada grado Fahrenheit de aumento de temperatura. En otras palabras, el aumento de temperatura del agua enfriada en un promedio de 5°F se ahorrará un 5 por ciento de la energía chiller.

Para ello, el enfriador debe poder sentir de alguna manera cuando se reduce la carga. A veces la temperatura de retorno del agua fría se utiliza como un indicador (temperaturas de retorno más altas indican que un menor número de BTU de refrigeración se están tomando fuera del bucle, es decir, reducción de carga). Los sistemas más sofisticados pueden controlar esta zona de difícil operación – aquel con la válvula de agua fría más abierta. Cuando la temperatura de esa zona comienza a subir, la temperatura del agua refrigerada se baja.

Para obtener más información sobre las estrategias de Reajuste de la Temperatura del Agua enfriada, consultar www.energybooks.com/pdf/264266.pdf

1.5.7 Punto de ajuste del control de temperatura del agua del condensador

Esto aplica para sistemas tales como los que utilizan torres de enfriamiento en donde la Temperatura del Agua del condensador se puede variar. Los sistemas de control de la torre de enfriamiento mantienen una temperatura del agua del condensador constante (generalmente en 85 ° F) mediante la variación de la velocidad de flujo de aire. A medida que la temperatura de bulbo húmedo exterior disminuye, la temperatura del agua del condensador se puede disminuir. El resultado es menos trabajo para el compresor y un ahorro de alrededor de 0,5 por ciento por cada 1° F de disminución de la Temperatura del agua en el condensador. En otras palabras, la reducción de la temperatura del agua del condensador en un promedio de 5 ° F ahorrará un 2,5 por ciento de la energía del chiller. Hay límites a lo bajo que se puede ir y entonces es conveniente consultar con el fabricante del chiller. La mayoría de los chillers pueden soportar temperaturas de 70 ° F o menos.

1.5.8 Secuenciación del chiller

Los chillers convencionales presentan una disminución en la eficiencia cuando se operan a cargas reducidas. En sistemas multi-chiller, la secuenciación de los chillers asegura que la combinación más eficiente de los chillers esté funcionando para asegurar que el sistema funciones en las condiciones de máxima eficiencia. A menudo, los sistemas de control de chillers ya tienen la capacidad para manejar esta función.

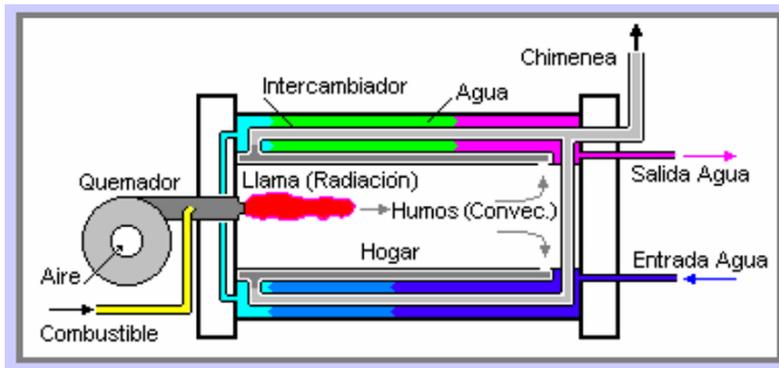
2. PROCESOS INDUSTRIALES TÉRMICOS

En esta sección se hace un breve resumen de algunos procesos industriales que por sus características son de alta demanda de energía térmica, aquí se presentan desde una óptica general a fin de tener una referencia que sirva para identificar las oportunidades de mejora para la industria nacional, por ahora se presentan los resultado de la consulta bibliográfica de las calderas, hornos ladrilleros, fundición y metalurgia, vidrio y coque.

2.1 CALDERAS

La caldera es un equipo cerrado que provee las condiciones para el calor de combustión liberado por la quema de un combustible sea transferido al agua hasta que ésta se caliente o pase a fase de vapor, lo cual se aprovecha para transferir energía térmica al proceso. En las calderas la energía de un combustible se transforma en calor que se emplea para el calentamiento de un fluido, que sirve de vector para suministrar calor, o para la generación de vapor en aplicaciones de calor o potencia, o en la generación de electricidad. En la Figura 24 se presentan los elementos generales de una caldera.

Figura 24. Elementos generales de una caldera

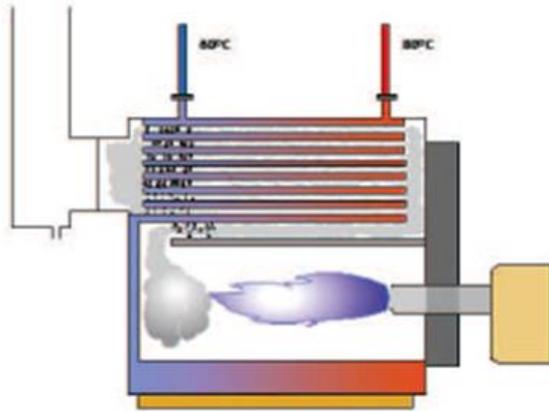


Fuente: (frd.utn.edu.ar, 2013)

Hay tres partes bien diferenciadas en la transmisión de calor en una caldera.

- La transmisión de calor fundamentalmente se realiza por la radiación de la llama al estar a muy alta temperatura,
- Otra a menor temperatura en la que cobra importancia el mecanismo de conducción-convección
- y la tercera a baja temperatura (exclusiva en calderas de condensación) donde se aprovecha el calor de condensación del vapor de agua de los humos de combustión transmitiéndose igualmente por conducción-convección.

Figura 25. Caldera estándar



Fuente: (WOLF, 2012)

2.1.1 Clasificación de calderas

Dada la versatilidad de aplicaciones de la caldera y sus múltiples variantes de operación, esto ha originado una gama de modelos que se pueden clasificar bajo diversos aspectos, a continuación se presentan los principales tipos de clasificación, a fin de tener una referencia al respecto. (eva.fing.edu.uy, 2012)

2.1.1.1 Clasificación de acuerdo a la circulación de los fluidos dentro de los tubos de la caldera.

a. Calderas pírotubulares

En estas calderas son los humos los que circulan por dentro de tubos, mientras que el agua se calienta y evapora en el exterior de ellos. Todo este sistema está dentro de un gran cilindro que envuelve el cuerpo de presión.

b. Calderas acuotubulares

Por dentro de los tubos circula el agua y la mezcla de agua y vapor. Por fuera, generalmente en flujo cruzado, los humos productos de la combustión intercambian calor.

En este tipo de calderas además el hogar (recinto donde se produce la combustión) está conformado por paredes de tubos de agua. En ellas el intercambio se hace básicamente por radiación desde la llama.

2.1.1.2 Clasificación de acuerdo a la presión de trabajo de la caldera-

a. Calderas de baja presión.

Son calderas que producen vapor a baja presión, hasta unos 4 o 5 kg/cm². Este rango de presiones es más común en las calderas de agua caliente que en las calderas que generan vapor.

b. Calderas de media presión

Producen vapor hasta aproximadamente 20 kg/cm². Generalmente vapor saturado, muy usadas en la industria en general.

c. Calderas de alta presión

Asociadas a ciclos de potencia, trabajan con presiones de 20 kg/cm² hasta presiones cercanas a la crítica.

d. Calderas supercríticas.

Trabajan con presiones superiores a la crítica: 225,56 hasta, 374,15fc. Utilizadas en grandes plantas de generación de energía eléctrica, en EEUU y en algunos países de Europa, también existen algunas en Japón.

2.1.1.3 Clasificación de acuerdo a la producción de vapor

a. Calderas pequeñas.

Producen hasta 1 o 2 toneladas de vapor saturado por hora.

b. Calderas medianas

Realizan producciones de hasta aproximadamente 20 toneladas de vapor por hora. Las calderas pequeñas y medianas casi en su totalidad son calderas pirotubulares de baja y media presión.

c. Calderas grandes

Producen desde 20 toneladas de vapor por hora, siendo normal encontrar producciones de 500 y 600 toneladas por hora. Generalmente vapor sobrecalentado, siendo calderas acuotubulares.

2.1.1.4 Clasificación de acuerdo al combustible utilizado.

a. Calderas de combustibles líquidos

Se fabrican con generadores de vapor de todo tipo y tamaño que utilizan combustibles líquidos.

Requieren de instalaciones de almacenaje y tanques de servicio, de elementos de precalentamiento del combustible y de sistemas de bombeo y transporte.

La viscosidad de estos combustibles varía desde 30 – 40 cSt (100°C) en los combustibles líquidos de baja viscosidad hasta 700 cSt (100°C) y más para combustibles de alta viscosidad, como los empleados en sistemas de generación eléctrica.

En las plantas industriales en general se usan combustibles líquidos de viscosidad del orden de 380 - 450 cSt (100°C).

Es normal tener que precalentarlos a 30 – 40°C para reducir su viscosidad y poder bombearlos hasta los quemadores.

Para una buena atomización del combustible en quemadores que no usen vapor para atomizar es necesaria una viscosidad de 25 a 30 cSt (100°C), y utilizando atomización con vapor se pueden manejar viscosidades entre 55 y 70 cSt (100°C), por lo tanto es necesario precalentar el combustible a temperaturas desde 80 a 130 °C en el quemador.

En unidades grandes es común arrancar con un combustible de baja viscosidad y luego usar uno más viscoso.

Los quemadores que emplean combustibles líquidos se instalan generalmente horizontales. Existen algunos tipos de quemadores de ángulo regulable para poder variar el intercambio por radiación en el hogar.

La turbulencia del aire que entra al quemador es importante para lograr una correcta combustión y un largo de llama apropiado, de tal manera que no dañe las paredes de refractario o las paredes de tubos de agua y al mismo tiempo asegure una combustión completa de todas las gotas de combustible.

Para esto es fundamental el dimensionamiento correcto del tamaño del hogar.

b. Calderas de combustible gaseosos

Emplean tanto gas natural como GLP, aire propanado o gas obtenido en gasificadores.

Generalmente los quemadores de gas trabajan con muy baja presión, por lo que por lo regular tienen sistemas de reducción de presión importantes.

En el caso de tener asociado un gasificador que suministre un gas con alto contenido de material particulado se emplean cámaras a fin de aumentar el tiempo de permanencia del combustible en el hogar. Es importante lograr una buena mezcla de aire-gas.

Con los combustibles gaseosos el riesgo de explosiones por acumulación de combustible no quemado es grande, lo que hace muy importante prever las medidas de seguridad adecuadas.

La posición de los quemadores de gas es similar a la de los que utilizan combustibles líquidos.

Es común utilizar quemadores duales, que permitan el uso de uno u otro combustible, dependiendo de su disponibilidad y costo. La emisividad de las llamas de estos combustibles es diferente, por lo que el intercambio por radiación resultará distinto según el combustible usado, Lo mismo ocurre con la temperatura de los humos a la salida del hogar y con las condiciones de intercambio en las zonas conectivas de la caldera. Son factores que hay que tener en cuenta, ya que modifican los resultados obtenidos en el equipo. De cualquier

manera el combustible líquido y el gas natural son de los combustibles más fácilmente intercambiables.

c. Calderas de combustibles sólidos

Los combustibles sólidos usados son muy variados: leña en todos los tamaños (rolos, astillas, chips), desechos de producción (pellets de madera, aserrín, bagazo de caña de azúcar, cáscara de arroz), carbón (en distintos grados de pulverización), etc.

Cada uno requerirá de una tecnología adecuada para poder quemarlos de la mejor manera, desde molinos para pulverizarlos finamente hasta grillas muy sofisticadas.

El diseño del hogar para estos combustibles es bastante complejo, ya que se debe considerar el ingreso de aire suficiente y su correcta mezcla con el combustible, la permanencia de las partículas en el hogar para quemarse completamente y la disposición de las cenizas entre otros factores.

En general resultan hogares de mayor volumen que los usados en caleras de combustibles líquidos y gaseosos.

Los combustibles pulverizados, finamente molidos se inyectan en el hogar mediante toberas apropiadas. Existe algún tipo de combustible que se quema en un lecho fluidizado, regulado mediante el ingreso de aire a distintas alturas del hogar. (Este sistema se emplea también en las calderas de recuperación de la industria de la celulosa).

En el caso de combustibles no pulverizados el diseño de las grillas que los sostienen durante la combustión es de fundamental importancia.

En países desarrollados se emplean calderas que queman los residuos sólidos urbanos.

2.1.1.5 Clasificación de acuerdo al tipo de circulación del agua dentro de la caldera.

Es una clasificación que tiene sentido en las calderas acuatubulares, en las pirotubulares la circulación del agua en el interior es siempre por convección natural.

a. Circulación natural.

La circulación del agua y de la mezcla agua-vapor ocurre naturalmente debido a la diferencia de densidades entre el agua más fría y la mezcla de agua- vapor (efecto sifón).

Implica entonces tener un circuito cerrado por donde circula el agua y una diferencia de altura apreciable entre las partes altas y bajas del equipo.

Los generadores chicos, los de potencia mediana y una buena parte de los grandes generadores de vapor son de circulación natural.

b. Circulación asistida.

En este caso la circulación natural en los tubos de la caldera es complementada por bombas instaladas en el circuito.

En este caso también la caldera consiste en un circuito cerrado, pero permite construcciones más compactas incluso con tubos inclinados.

Se usa en aquellos casos en que la diferencia entre las densidades del fluido frío y del caliente no es demasiado grande, típicamente para presiones superiores a los 140-160 bar.

Brindan una respuesta más rápida ante variaciones en la demanda de vapor que los de circulación natural, pero las bombas que trabajan con agua caliente y a altas presiones, son más costosas y requieren importantes mantenimientos. En general se debe instalar un sistema de respaldo para evitar la parada de toda la caldera por salida de servicio de la bomba.

c. Circulación forzada.

Este tipo de calderas tiene una concepción distinta, se trata de un circuito abierto y no cerrado.

La bomba impulsa el agua a través de una primera superficie de intercambio donde se precalienta, luego pasa a un segundo intercambiador donde se vaporiza y luego, en algunos casos, pasa a un tercer intercambiador donde se sobrecalienta.

A diferencia de las anteriores no hay una masa de agua circulando sin vaporizarse, la bomba entrega toda el agua que se vaporiza.

No hace falta resaltar la importancia de la bomba en este diseño, un paro de la bomba implica un paro de la caldera.

2.1.1.6 *Clasificación de acuerdo al intercambio de calor*

Hay que aclarar previamente que no es una clasificación estricta, se refiere al tipo de intercambio predominante que se da en las superficies de vaporización (se excluyen los intercambios en las superficies de recuperación: precalentadores y sobrecalentadores). En todas las calderas se tienen intercambios por radiación y por convección, difícilmente se encuentra uno solo de estos tipos.

En el hogar el intercambio es predominantemente por radiación desde la llama, pero hay zonas del mismo donde se puede producir intercambio por convección desde el flujo de humos (por ej. en la última parte del hogar de una caldera pirotubular). Así mismo en las restantes superficies de intercambio (bancos de convección y tubos de humos), además del intercambio convectivo podemos tener radiación desde los gases a alta temperatura.

a. Radiantes, o de radiación total.

Son aquellas calderas que solo tienen hogar, y allí prácticamente todo el calor es intercambiado por radiación.

En general se trata de calderas acuatubulares grandes, donde los tubos en donde se produce el vapor conforman las paredes del hogar. Las altas temperaturas que se presentan en la combustión hacen que exista un intercambio muy importante de calor por radiación.

Además estas calderas trabajan a presiones elevadas, con lo que el calor de vaporización necesario es relativamente bajo, y al utilizar agua de alimentación previamente calentada hasta temperaturas muy cercanas a la de saturación, se consigue que las paredes de tubos del hogar sean suficientes para transferir todo el calor de vaporización necesario.

b. Convectivos.

Típicamente son las calderas HRSG (Heath Recovery Steam Generator), sin cámara de combustión. Emplean un fluido caliente como fuente de calor, producto de algún proceso previo (hornos de fundición, hornos de vidrio, turbinas de gas, motores diésel, etc.)

c. De calentamiento indirecto.

Son calderas de fluidos térmicos en las que se calienta un fluido intermedio, típicamente un aceite, el que al circular por un intercambiador, genera el vapor de agua. El fluido es nuevamente recirculado hacia la caldera.

2.1.2 Determinación de la eficiencia de una caldera

El rendimiento energético de una caldera se establece como la relación entre la cantidad de calor que ha captado el agua (calor útil) respecto al suministrado por la fuente de energía empleada.

Existen dos formas de efectuar el balance energético para establecer este rendimiento (IDAE, 2007):

- *El método directo.*

Se logra por la medición, por un lado, del calor contenido en el agua antes y después de su entrada en la caldera y, por otro, la determinación de la energía proporcionada por el combustible, calculado a partir de la cantidad consumida multiplicada por su poder calorífico.

En la práctica para calderas en operación presenta la dificultad de la medición del caudal de agua que realmente circula por la caldera. Salvo que la misma tenga instalado un medidor de caudal, esta medición sólo puede llevarse a cabo, de forma no destructiva, con equipos de ultrasonidos, de alto costo y difícil uso por cuanto demanda aplicarse en tramos rectilíneos de tubería desnuda (desmontar el aislamiento térmico). Es más usada a nivel de laboratorio.

- *El método indirecto*

Se basa en contemplar que aquel calor que introducimos con el combustible y no escapa con los humos por el conducto de evacuación o la chimenea, ha sido absorbido por el agua. Este procedimiento se utiliza de forma práctica, pero obliga a efectuar un balance energético de la energía generada por la combustión.

Para cualquiera de estos dos procedimientos los rendimientos obtenidos son referidos al Poder Calorífico Inferior PCI del combustible, sin tomar en cuenta que en las calderas de condensación se aprovecha también parte del calor latente de los humos. Por lo que, el

rendimiento de las calderas de condensación, definido sobre PCI, puede ser superior a la unidad (o al 100%), mientras que sería siempre inferior a la unidad si fuera referido al PCS¹¹.

A continuación se presenta el procedimiento de cálculo de ambos métodos.

- **Método directo.** Determinación del rendimiento por el calor útil aportado al agua
Como ya se dijo, este procedimiento es principalmente empleado a nivel de laboratorio y exige medir el caudal de agua que circula por la caldera, y su temperatura a la entrada y salida de la misma. (IDAE, 2007)

El rendimiento está definido por la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T}{F \cdot \text{PCI}}$$

Dónde:

- n: Rendimiento
- m: Caudal de agua en la caldera (kg/s)
- Cp: Calor específico del agua (kJ/kg °C)
- ΔT= Ts - Te (°C)
- Ts: Temperatura del agua a la salida de la caldera (°C)
- Te: Temperatura del agua a la entrada de la caldera (°C)
- F: Consumo de combustible (kg/h)
- PCI: Poder calorífico inferior del combustible (kJ/kg)

- **Método indirecto.** Determinación del rendimiento por las pérdidas en caldera y en gases de combustión (IDAE, 2007)

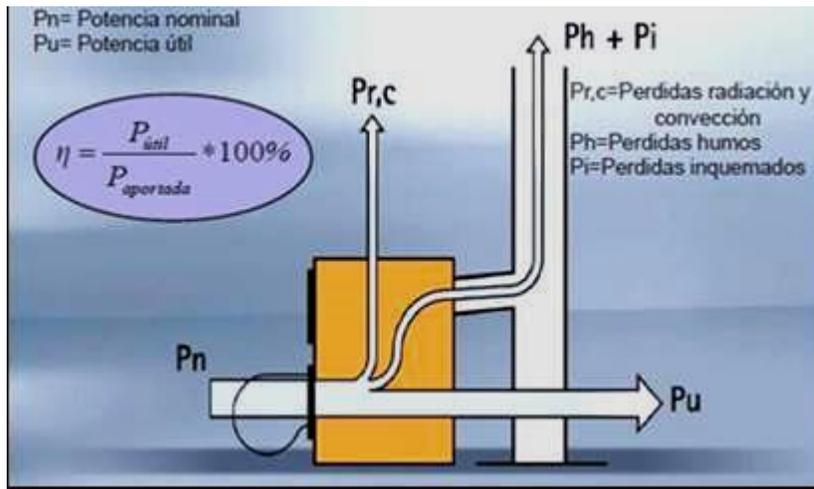
Implica establecer las diferentes pérdidas que se presentan en la caldera tales como se presentan en la figura siguiente:

¹¹ Se denomina **Poder Calorífico** a la cantidad de calor liberada en la combustión completa.

El **Poder Calorífico Inferior (Hi)** es la energía liberada en la combustión completa cuando el agua de los humos está en forma gaseosa, situación habitual en las calderas.

El **Poder Calorífico Superior (Hs)** es la energía liberada en la combustión completa cuando se ha condensado el vapor de agua de los humos, objetivo a lograr en la técnica de la condensación.

Figura 26. Pérdidas de energía en una caldera



Fuente (WOLF, 2012)

○ Pérdidas a través del cuerpo de la caldera

Las pérdidas de calor a través del cuerpo de la caldera se dan por conducción, convección y radiación.

Las pérdidas por conducción se presentan en los apoyos de la caldera. Regularmente son de poca cantidad, por lo que no se tienen en cuenta.

Las pérdidas por convección y radiación se producen a través de la envolvente de la caldera y dependen de los siguientes factores:

- La temperatura media del agua en la caldera.
- La temperatura del aire de la sala de máquinas, en cuanto que afecta a las pérdidas por convección.
- La temperatura de las instalaciones de la sala de máquinas, que afecta a las pérdidas por radiación.
- Las características del material aislante del cuerpo y la superficie del mismo (espesor y conductividad térmica).

Estas pérdidas se determinan por vía experimental. A una temperatura constante de 80 °C, en calderas estándar estas pérdidas están entre el 1,5 y el 5%, y en calderas de baja temperatura y condensación están en el rango de un 0,5 a un 2%. En los dos casos las pérdidas son inversamente proporcionales a la potencia de la caldera, es decir, el valor de las pérdidas por convección y radiación baja al elevar la potencia de la caldera.

○ Pérdidas de calor sensible en los humos

Estas pérdidas dependen básicamente de los siguientes factores:

- La diferencia de temperatura entre los humos y el aire.
- El calor específico de los humos.
- El exceso de aire empleado en la combustión,

Estas pérdidas suelen estar entre el 6 y el 10% de la potencia nominal, en caso de mantenimiento deficiente se incrementan notablemente.

El cálculo de estas pérdidas puede efectuarse con cualquiera de las siguientes ecuaciones:

$$P_h = \frac{\dot{m} \cdot c_{pm} \cdot \Delta T}{F \cdot PCI} \quad \text{o} \quad P_h = \frac{\dot{V} \cdot c_{pv} \cdot \Delta T}{F \cdot PCI}$$

Donde:

P_h : Pérdidas en humos

m : Caudal másico de los humos (kg/s)

v : Volumen másico de los humos (m³/s)

C_{pm} : Calor específico de los humos (kJ/kg °C)

C_{pv} : Calor específico de los humos (kJ/m³ °C)

$\Delta T = T_h - T_a$ (°C)

T_h : Temperatura de los humos a la salida de la caldera (°C)

T_a : Temperatura del aire ambiente de la sala de calderas (°C)

F : Consumo de combustible (kg/h)

PCI : Poder calorífico inferior del combustible (kJ/kg)

En estas fórmulas se observa la importancia de la temperatura de los humos en el valor de las pérdidas. Así la menor temperatura de salida de sus humos explica el por qué las calderas de baja temperatura y condensación mejoran entre un 2 y un 3% el rendimiento frente a las estándar.

○ Pérdidas por inquemados

En calderas con combustibles gaseosos, estas pérdidas son debidas fundamentalmente a la presencia de monóxido de carbono CO en los gases y en la práctica, si la combustión es

correcta, son muy pequeñas. Su valor suele estar muy por debajo del 0,5% de la potencia útil de la caldera.

El cálculo se puede llevar a cabo con la ecuación:

$$P_i = \frac{PC_{CO}}{PCI} \cdot CO$$

donde:

CO: es el contenido de monóxido de carbono, en %

PCco: es el poder calorífico del monóxido de carbono y

PCI el del combustible (ambos deberán estar en las mismas unidades)

En los combustibles líquidos y sólidos la producción de inquemados suele ser visible por la aparición de humos negros. Para estos combustibles se puede aplicar el método BACHARACH que permite la detección de los inquemados sólidos¹²: Si bien este procedimiento no permite cuantificar energéticamente las pérdidas por inquemados, a continuación se indica una estimación obtenida por procedimientos experimentales:

Tabla 26. Correlación del índice de BACHARACH con % de pérdidas

Índice de BACHARACH	1	2	3	4	5	6
% de pérdidas sobre el combustible	0,7	1,3	2,4	3,5	4,7	6

Fuente (IDAE, 2007)

Recopilando lo anteriormente presentado, el rendimiento energético de la caldera vendrá definido por la expresión:

$$n = 100 - (P(\text{rad+conv}) + Ph + Pi)$$

En la práctica, en el sector de la edificación se suele determinar el rendimiento de la combustión en lugar del rendimiento de la caldera, es decir, se obvia en los cálculos las pérdidas por el cuerpo de la caldera (radiación y convección) dada la dificultad de su medición y la baja incidencia respecto a los parámetros que interesa controlar y que son la

¹² la muestra de gases se hace pasar por un dispositivo donde los inquemados “manchan” un patrón cuyo nivel de ennegrecimiento comparado en una escala aporta la cantidad de inquemados contenidos en los humos.

cuantía de las distintas materias contenidas en los humos y su temperatura. De esta forma, el cálculo del rendimiento de combustión queda simplificado a la expresión:

$$n = 100 - (Ph + Pi)$$

2.1.3 Factores que afectan la eficiencia de una caldera

Ya hemos definido la eficiencia térmica de la caldera como la relación que existe entre el calor generado a la salida del vapor y el calor entregado por el combustible.

La eficiencia térmica depende de varios factores, algunos inherentes al fabricante y otros a la operación y uso, entre los que podemos mencionar (La Llave, 2009):

- Diseño del fabricante y eficiencia propuesta.
- Temperatura del agua de alimentación.
- Características de presión y temperatura del combustible.
- Temperatura de gases de escape.
- Exceso de aire en la combustión por encima del recomendado.
- Exceso de purgas.
- Acumulación del hollín e inquemados en el interior.
- Acumulación de incrustaciones por mal tratamiento de agua.
- Refractarios en mal estado.
- Mal aislamiento del equipo.

Si revisamos estos puntos en el equipo podremos establecer la eficiencia con la que estamos trabajando, en la que el monitoreo de los gases de escape es muy importante (ya que la mayor parte de pérdidas se da por la chimenea). Esta operación se puede hacer fácil y periódicamente usando un analizador de gases portátil.

2.1.4 Calderas Eficientes.

La caldera es el equipo responsable de proveer energía térmica a la industria mediante la quema de combustibles fósiles principalmente. Esta energía se produce en forma de vapor o agua caliente de acuerdo a los procesos y necesidades. Hoy en día la situación climática por el consumo de combustibles fósiles y su inminente agotamiento, ha creado la necesidad de bajar el consumo de energía y, consecuentemente, las emisiones de GEI, sin pérdida de potencia, lo que ha llevado a los fabricantes a desarrollar calderas que reducen enormemente las pérdidas, y por lo tanto aumentan el rendimiento. En el caso de las calderas, la mejora más importante en su rendimiento es el aprovechamiento del calor de condensación del agua de los humos, que permite aumentos de eficiencia de hasta un 30% en relación a los máximos alcanzables con las calderas tradicionales. (CREARA, 2009). Estos son los tipos de calderas más eficientes que existen:

2.1.4.1 Calderas de condensación

Basan su eficiencia en aprovechar el calor emitido por el humo producto de la combustión, de forma que aprovechan mucho mejor el combustible que el resto de las calderas.

Las calderas de condensación son sistemas similares a las calderas de gas tradicionales, con la diferencia que su configuración permite recuperar parcial o totalmente el calor asociado al vapor de agua contenido en los gases de combustión. La viabilidad termodinámica de este aprovechamiento viene condicionada por la temperatura de rocío del gas natural, que está por debajo de 55°C (el mismo fenómeno que el rocío de las mañanas). Aunque este proceso podría llevarse a cabo con otros combustibles, como los derivados del petróleo o el carbón, en la práctica no es posible, porque estos contienen una gran cantidad de azufre que estropearía la instalación. El hecho de que el gas sea relativamente limpio hace que se use en este tipo de sistemas (Plan de Eficiencia Energética 2006-2015, 2006).

La principal diferencia con respecto a las calderas convencionales en cuanto a configuración es que la caldera está adaptada a la precipitación del agua producto de la condensación, por lo que puede bajarse más la temperatura de salida de los gases residuales, mientras que en las calderas convencionales las temperaturas de salida se mantienen entre 150 y 200°C, y lanzan una gran cantidad de energía al medio.

Las calderas de condensación aseguran un rendimiento del 101%, e impulsan a 75°C y reanudan a 60°C (incluso sin necesidad de condensar).

Ventajas energéticas y ambientales

Esta tecnología muestra una serie de ventajas con respecto a los sistemas tradicionales, marcados por el incremento de eficiencia en el aprovechamiento del gas hasta niveles máximos¹³ del 111%, frente al 80% de las calderas estándar o el 96% de las de baja temperatura lo que implica:

- Un ahorro en el consumo de energía primaria fósil, ya que el mayor rendimiento lleva asociada una disminución del consumo de gas. Una caldera de estas características puede representar un ahorro de hasta el 40% con respecto a las calderas convencionales.
- Una reducción de las emisiones de CO₂, ya que se consume menos gas.
- Económicamente presentan una reducción de costos asociada a un menor consumo de combustible.

¹³ Tradicionalmente, el calor de evaporación no podía aprovecharse, por lo que se utilizaba el Poder Calorífico Inferior como valor de referencia para el rendimiento estacional. En las calderas de condensación, al aprovechar el calor latente, se producen rendimientos estacionales superiores al 100%, siempre respecto al P.C.I.

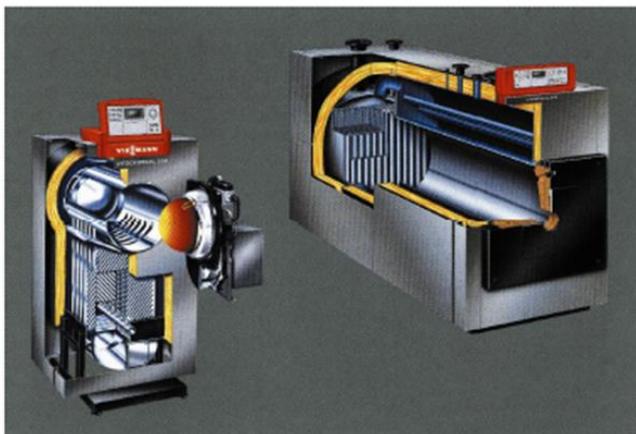
- Las calderas de condensación representan actualmente el máximo exponente en aprovechamiento energético en procesos de combustión a escala doméstica y terciaria.

Aplicaciones

La tecnología de condensación es especialmente adecuada para aquellas necesidades de calor que se den a temperaturas bajas, unas condiciones de operación que se adaptan principalmente al sector doméstico y terciario:

- Calderas de gas por el calentamiento del aire.
- Sistemas de radiadores convencionales.
- Sistemas de paredes/suelo/techo radiante.
- Mejor apoyo posible a las instalaciones de energía solar.

Figura 27. Caldera de condensación

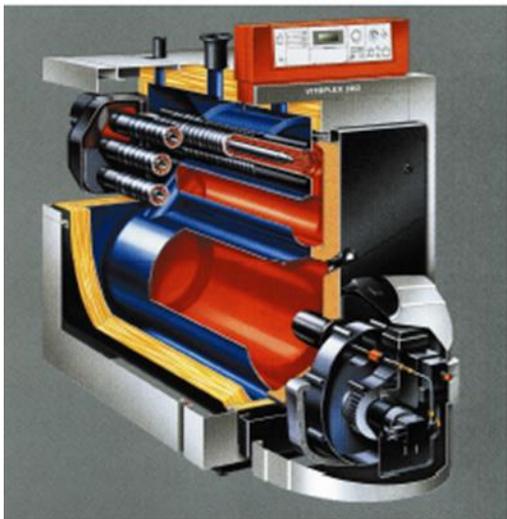


Fuente (Satellite, 1992)

2.1.4.2 Calderas de baja temperatura

Pueden funcionar constantemente con una temperatura de alimentación de 35 a 40°C y que en determinadas circunstancias pueden producir condensación (rendimiento típico hasta 95%) (Satellite, 1992). Para poder trabajar a tan bajas temperaturas del agua de retorno sin que se produzcan en su interior condensaciones ácidas, cuenta con elementos constructivos para este fin, por ejemplo el constructor alemán Viessmann emplea superficies de intercambio de pared múltiple, con cámaras de aire para la dosificación de la transmisión de calor al agua de calefacción, en acero inoxidable. Únicamente están disponibles en gasóleo. En este caso, funcionan ya que son sustancialmente sensibles a la demanda de calor y a la temperatura de la calle, autorregulándose en forma continua y adaptándose a consumos muy bajos, lo que no logran hacer las calderas convencionales.

Figura 28. Caldera de baja temperatura



Fuente (Satellite, 1992)

2.1.4.3 Calderas de biomasa

Usan combustible vegetal normalmente procedente de residuos para producir el calor. Son consideradas calderas de energía renovable. Estas calderas consumen pellets, combustible ecológico y renovable, que no contribuye al efecto invernadero. Son capaces de autoalimentarse, estando programadas para mantener una determinada temperatura o encenderse y apagarse automáticamente a una hora determinada (soliclima, 2012).

Emplear biomasa como combustible es una alternativa ecológica, ya que se usan residuos forestales, disminuyendo así el riesgo de incendio y la acumulación de desechos. También se ofrecen calderas de pellets. Con las calderas de pellets se pueden lograr ahorros energéticos de hasta un 40% respecto a las de gasóleo¹⁴.

- Reciben subvenciones¹⁵
- Elevado rendimiento (91%)
- El sistema de carga del combustible se realiza por aspiración y /o mediante un tornillo sin fin.
- Son flexibles en cuanto a la instalación, ya que brindan diferentes posibilidades, en cuanto a tamaño y ubicación de almacenaje de los pellets.
- Trabajan a altas temperaturas, sin problemas de condensaciones.
- Garantizan la máxima seguridad gracias a sus distintos dispositivos contra incendio.

¹⁴ Para el mercado de la EU

¹⁵ Pueden aplicar a beneficios ambientales por el uso de energía renovable.

- Disponen de un control monitorizado de todo el proceso a través de un menú simple y fácil de usar.
- Trabajan a una temperatura de impulsión de entre 38 y 80°C.
- Bajo mantenimiento gracias al mecanismo de auto limpieza, a un alto volumen de retirada del polvo y un amplio cajón de recogida de cenizas.
- Quema variable, de 3 a 23 kW proporcionando la cantidad correcta de calor en el tiempo adecuado.
- Una sonda lambda analiza el humo desprendido en proceso de la combustión para saber qué cantidad de oxígeno debe aportar para optimizar al máximo el proceso.

El mercado ofrece distintos tipos de calderas de pellets que se ajustan perfectamente a los requerimientos de cada cliente.

Este modelo accede a almacenar los pellets en una sala diferente a la de la caldera. En el interior del depósito, un tornillo sin fin conduce los pellets hacia unos tubos de aspiración que los transportan hacia la caldera. Esto permite distancias de hasta 20 metros entre la caldera y el depósito de almacenaje de pellets.

Los pellets se acumulan en un tanque prefabricado, que también se colocará en un habitáculo separado de la caldera. El tanque tiene un tamaño de 2x2 m aproximadamente y una capacidad que varía entre los 5 y los 11 m³.

Figura 29. Caldera de Biomasa (Pellets)



Fuente: (soliclima, 2012)

2.1.5 Criterios para la selección de una caldera

Para seleccionar una caldera tenemos que determinar primero la potencia requerida en BHP y ver si conviene poner uno o dos equipos en función de la simultaneidad de la planta.

Luego de fijar la potencia es importante ver el tipo de equipo y el combustible a utilizar. Las calderas más usadas industrialmente son las pirotubulares que a diferencia de las

acuotubulares tienen una mayor eficiencia y su mantenimiento resulta más sencillo. Su restricción va por el lado de la presión máxima (300 psig.) y potencia máxima (1500 BHP). Cuando se excede una de esas condiciones es más conveniente (desde el punto de vista económico) usar calderas acuotubulares.

En el caso de las calderas pirotubulares la eficiencia va de la mano con el diseño y el número de pasos, es decir, las calderas de tres pasos, tienen la salida de gases por el lado posterior y los de cuatro pasos por el lado delantero, estos últimos son más eficientes.

Es decir que para seleccionar una caldera se debe tener en cuenta:

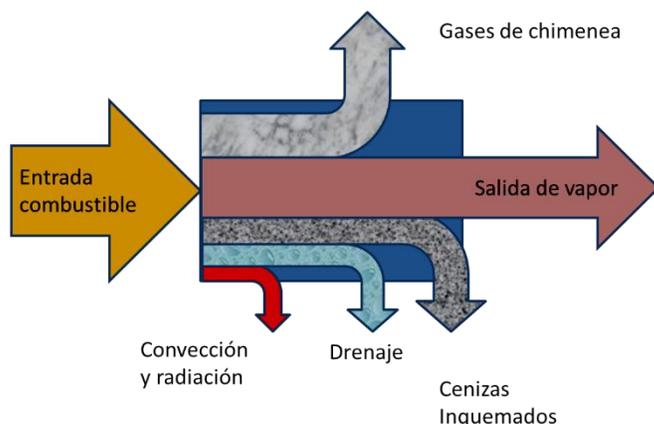
- Potencia.
- Tipo del caldera.
- Eficiencia del fabricante.
- Combustible a utilizar.
- Facilidad de mantenimiento y acceso.
- Repuestos accesibles localmente.
- Número de pases.
- Servicio técnico garantizado entre otros

Su correcta elección origina en gran forma la eficiencia de nuestro sistema, al igual que resulta crítico el óptimo uso de la energía que la caldera entrega a los diferentes usuarios de la planta, manteniendo al mínimo las pérdidas y trampas de vapor.

2.1.6 Oportunidades Para Mejorar La Eficiencia Energética De La Caldera

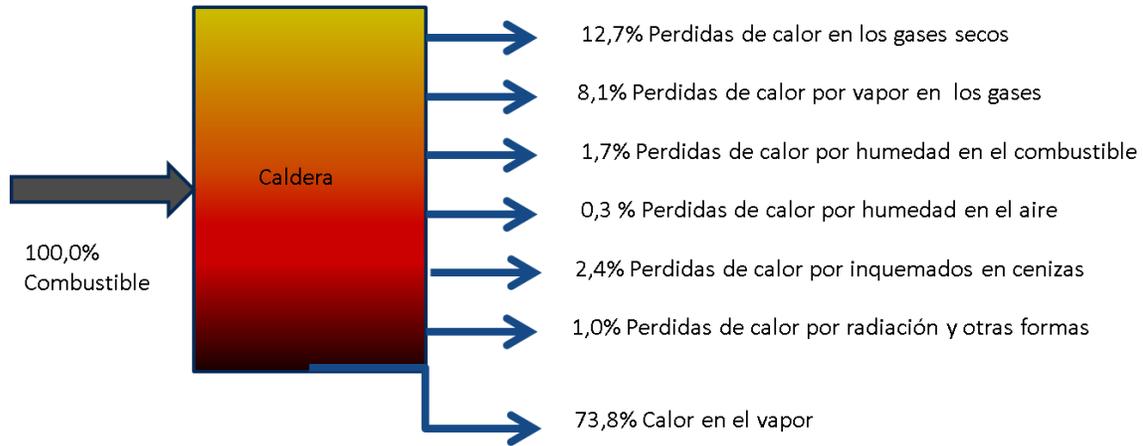
Las pérdidas de energía y por lo tanto, las oportunidades de mejorar la eficiencia energética en calderas pueden estar relacionadas con la combustión, la transferencia de calor, pérdidas evitables, el consumo de energía auxiliar alta calidad del agua y purgas. En la figura siguiente se presenta el diagrama del flujo de energía en la caldera, identificando las principales causa de pérdidas.

Figura 30. Flujo de energía en la caldera



Fuente: (RETSscreen International, 2012)

Figura 31. Distribución de calor en la operación de la caldera



Fuente: (RETScreen Internacional, 2012)

Las diversas oportunidades de eficiencia de energía en un sistema de caldera pueden estar relacionadas con:

1. Control de temperatura de la chimenea
2. Pre calentamiento del agua de alimentación con economizadores
3. Pre calentamiento del aire de combustión.
4. Minimización de la combustión incompleta
5. Control del exceso de aire.
6. Evitar pérdida de calor por radiación y convección
7. Control automático de drenaje
8. Reducción de pérdidas por incrustaciones y hollín
9. Reducción de presión de vapor de caldera
10. Control de velocidad variable para ventiladores y bombas
11. Control de carga de caldera
12. Programación adecuada de carga de caldera
13. Sustitución de caldera

Estas opciones se explican a continuación.

- *El control de temperatura de la chimenea debe ser lo más bajo posible. Sin embargo, no debe ser tan baja que vapor de agua en el tubo de escape se condense en las paredes de la chimenea. Esto es importante en los combustibles que contienen azufre significativo porque la baja temperatura puede provocar corrosión de punto de rocío de azufre. La temperatura de la chimenea superior*

a 200°C indica un gran potencial de recuperación de calor de residuos. También indica la escala del equipo de transferencia y recuperación de calor y de ahí la urgencia de hacer un temprano cerramiento para la limpieza del agua y la chimenea.

- *Pre calentamiento de agua de alimentación mediante economizadores.* Normalmente, los gases en la combustión, en una caldera moderna de 3-pasos se encuentran a temperaturas de 200 a 300°C. Por lo tanto, es posible recuperar calor de estos gases. La temperatura de salida del gas de combustión de una caldera generalmente se mantiene en un mínimo de 200°C, por lo que los óxidos de azufre en los gases de combustión no se condensan y causan corrosión en las superficies con la transferencia de calor. Cuando un combustible limpio, como gas natural, GLP o gas aceite se usa, debe hacerse la economía de recuperación de calor, así como los gases pueden tener una temperatura muy por debajo de 200 °C. el potencial de ahorro de energía depende del tipo de caldera instalada y el combustible usado. Para un antiguo modelo de caldera de concha, con una temperatura de salida del gas de combustión de 260°C, un economizador podría reducirla a 200°C, aumentando la temperatura del agua de alimentación por 15°C. El aumento de la eficiencia térmica global sería del orden de 3%. Para un modelo de caldera de concha 3-pase moderno expulsando gas natural con una temperatura de salida del gas de combustión de 140°C un condensador economizador podría reducir la temperatura de salida a 65°C aumentando la eficiencia térmica en un 5%.
- *Pre calentamiento de aire de combustión.* El pre calentamiento de aire de combustión es una alternativa para alimentar el agua de calefacción. A fin de mejorar la eficiencia térmica al 1%, la temperatura del aire de combustión debe aumentarse en 20°C. Los quemadores de gas y petróleo más empleados en una planta de caldera no están diseñados para altas temperaturas de pre calentamiento de aire. Los quemadores modernos pueden resistir mucha mayor combustión en pre calentar aire, por lo que es posible considerar dichas unidades como intercambiadores de calor de la combustión de salida como una alternativa a economizadores, cuando tanto al espacio o a una alta temperatura de retorno de agua de alimentación alto lo hacen viable.
- *Combustión incompleta.* Una combustión incompleta puede surgir de una escasez de aire o exceso de combustible o mala distribución de combustible. Es generalmente evidente en el color o en el humo y debe ser corregida inmediatamente. En el caso de petróleo y sistemas de expulsión de gas, CO o

humo (para sistemas de petróleo disparado) con exceso de aire normal o alto indica problemas en el sistema quemador. Una de las causas más frecuente de combustión incompleta es la mezcla pobre de combustible y aire en la caldera. Una llama deficiente del petróleo puede ser resultado de una defectuosa viscosidad, extremos gastados, carbonización de los extremos y deterioro de los difusores y platos giratorios.

En la combustión del carbón, el carbono no quemado puede ser una gran pérdida. Se produce como granos de carbón en la ceniza y puede representar más del 2% del calor suministrado a la caldera. La falta de combustible de tamaño uniforme podría ser una de las razones de una combustión incompleta. Con el uso de alimentadores de cadena grandes bloques de carbón podrían no quemar completamente, mientras pequeños terrones y finos pueden bloquear el paso del aire ocasionando una mala distribución de aire. En alimentadores por aspersion las condiciones de la parrilla del alimentador, la distribución del combustible, la regulación de la caja de aire y el sistema de sobrequemado puede afectar las pérdidas de carbón. El incremento de los finos en el carbón pulverizado también incrementan las pérdidas de carbono.

- *El control del exceso de aire.* El exceso de aire es necesario en todos los casos para garantizar una combustión completa, permitir las variaciones normales y garantizar las condiciones de chimenea satisfactoria. El exceso óptimo de aire para la eficiencia máxima de caldera se produce cuando se minimiza la suma de las pérdidas debidas a la combustión incompleta y pérdidas debido al calor en los gases de combustión. Este exceso varía con el diseño de horno, tipo de variables del proceso, combustible y quemador. Puede determinarse mediante la realización de pruebas con razones de combustible/ aire diferentes.

Controlar el exceso de aire a un nivel óptimo siempre da como resultado la reducción de pérdidas de gas de combustión; por cada reducción de un 1% de exceso de aire hay aproximadamente 0,6% de aumento en la eficiencia. Existen diversos métodos para controlar el exceso de aire:

- analizadores portátiles de oxígeno e indicadores de tiro pueden utilizarse para hacer lecturas periódicas que guíen al operador para ajustar manualmente el flujo de aire para un funcionamiento óptimo. El exceso de aire puede reducirse hasta en un 20%.
- El método más común es el analizador de oxígeno continuo montado en la línea del medidor de tiro, mediante el cual el operador puede ajustar el flujo de aire. Puede lograrse una reducción de 10-15% sobre el anterior sistema.

El mismo analizador de oxígeno continuo puede tener un control remoto neumático del posicionador del damper, mediante el cual las lecturas están disponibles en una sala de control lo que permite, a un operador controlar de forma remota un número de sistemas simultáneamente. El sistema más sofisticado es el control automático del damper de chimenea, cuyo costo se justifica únicamente para sistemas grandes.

En la siguiente tabla da la cantidad teórica de aire necesario para la combustión de distintos tipos de combustible.

Tabla 27. Relación teórica aire/combustible

Datos Teóricos De Combustión Para Calderas Comunes		
Combustible	Kg aire/kg de combustible	CO2% en los gases de combustión
Combustibles solidos		
Bagazo	3,3	10-12
Carbón bituminoso	10,7	10-12
Lignito	8,5	9-13
Cascarilla de arroz	4,5	14-15
Madera	5,57	11-13
Combustibles Líquidos		
Aceite pesado	13,8	9-14
Aceite Ligero	14,1	9-14

Fuente: (RETSscreen International, 2012)

- *Minimización de pérdida de calor por radiación y convección.* La superficie de la carcasa de la caldera está más caliente que los alrededores por lo que pierde calor dependiendo del área de la superficie y de la diferencia de temperatura con los alrededores.

La pérdida de calor por la escoriación de la carcasa de la caldera es normalmente una pérdida de energía fija, independientemente de la capacidad de la caldera. Con diseños modernos de caldera, esto puede representar sólo el 1,5% sobre el valor calorífico bruto en calificación completa, pero aumentará en alrededor del 6 %, si la caldera funciona a solo el 25% de su capacidad. Reparar o aumentar el aislamiento puede reducir la pérdida de calor a través de las paredes de la caldera y tuberías.

- *Control automático del drenaje.* Un drenaje continuo incontrolado es un desperdicio El control automático del drenaje puede ser instalado de tal manera

que responda a la ebullición del agua, conductividad y PH. Un drenaje del 10% en una caldera a 15 kg/cm² ocasiona una pérdida de eficiencia del 3%.

- *Reducción de pérdidas por incrustaciones y hollín.* En las calderas que queman diesel y carbón, el hollín se deposita en los tubos actuando como un aislante para la transferencia de calor. Estos depósitos se deben remover de forma regular. Una elevación de la temperatura en la chimenea puede indicar altos depósitos de hollín. Esto puede ocurrir por incrustaciones por el lado del agua. Una alta temperatura en la salida de los gases en condiciones normales de exceso de aire indica un pobre desempeño de la transferencia de calor. Esta condición puede deberse a una deposición gradual por la cara del gas o incrustaciones por la cara del agua.

Las incrustaciones por la cara del agua requieren revisar el procedimiento del tratamiento del agua y limpieza de los tubos para remover las incrustaciones. Se estima una pérdida del 1% de eficiencia cuando la temperatura de la chimenea se incrementa en 22°C.

- *Reducción de la presión de vapor de la caldera-* Este es un medio eficaz para reducir el consumo de combustible, del orden de un 1 a 2%. El vapor a baja presión genera un vapor con baja temperatura de saturación sin recuperación de calor en la chimenea, un resultado similar se obtiene con la reducción de la temperatura del flujo de gas.

El vapor se genera a presiones normalmente más altas que las requeridas de acuerdo a la temperatura necesaria por el proceso en particular. En algunos casos, el proceso no funciona todo el tiempo, y hay períodos cuando podría reducirse la presión de la caldera. Pero hay que recordar que cualquier reducción de la presión de la caldera reduce el volumen específico del vapor de la caldera reduciendo la capacidad de la misma. Si la carga de vapor supera la disminución de la capacidad de la caldera puede presentarse arrastre de agua. El controlador de energía por lo tanto, debe considerar las posibles consecuencias de la reducción de la presión cuidadosamente, antes de recomendarlo. La presión debe reducirse en etapas y en no más de un 20%.

- *Control de velocidad variable para ventiladores, sopladores y bombas.* El control de velocidad variable es un medio importante para obtener ahorro de energía. En general, el control de aire de combustión se ve afectado por la regulación de dampers montados tanto en instalaciones de tiro inducido o forzado. Los

dampers son medios de control que carecen de precisión, con características pobres de funcionamiento. En general, si la característica de carga de la caldera es variable, deberá evaluarse la posibilidad de sustituir los dampers por válvulas con servo control.

- *Control de carga de la caldera.* La máxima eficiencia de la caldera no ocurre a plena carga, sino cerca de dos tercios de la carga completa. Si la carga en la caldera disminuye aún más, la eficiencia también tiende a disminuir. Si la salida es de cero, la eficiencia de la caldera es cero, y cualquier combustible despedido se utiliza sólo para abastecer las pérdidas. Los principales factores que afectan la eficiencia de la caldera son:

En la medida que la carga cae, también lo hace el valor de la tasa de flujo de masa de los gases de combustión a través de los tubos. Esta reducción en la tasa de flujo por la misma área de transferencia de calor reduce las temperaturas de salida del gas de combustión en una pequeña cantidad, incrementado la pérdida de calor sensible.

Por debajo de la mitad de la carga, la mayoría de dispositivos de combustión necesitan mayor exceso de aire para quemar el combustible completamente. Esto aumenta la pérdida de calor sensible.

En general, la eficiencia de la caldera se reduce significativamente por debajo de 25% de la carga nominal y la operación de calderas por debajo de este nivel debe evitarse en la medida posible.

- *Programación adecuada de la carga de la caldera.* Puesto que la eficiencia óptima de la caldera ocurre al 65-85% de la carga total, es por lo general más eficiente en conjunto, operar un menor número de calderas en cargas más altas, que operar un gran número de calderas con cargas bajas.
- *Sustitución de caldera.* Los ahorros más potenciales de sustitución de una caldera dependen el cambio esperado en la eficiencia en general. Un cambio en una caldera puede ser financieramente atractivo si la caldera existente está:
 - vieja e ineficiente
 - no capaz de quemar combustibles sustitutos más barato
 - sobre o subdimensionada para los requerimientos presentes
 - no diseñada para las condiciones de carga ideal
- El estudio de factibilidad debe examinar todas las implicaciones de largo plazo, disponibilidad de combustible, y planes de crecimiento de la compañía. Se deben

considerar todos los factores financieros y de ingeniería. Puesto que las calderas tradicionalmente tienen una vida útil de más de 25 años, su reemplazo debe ser estudiado cuidadosamente.

2.2 INDUSTRIA LADRILLERA

Tradicionalmente la industria ladrillera ha utilizado el carbón como combustible para la cocción de ladrillos y tubería de gres, pero desafortunadamente la tradición no ha traído consigo el mejoramiento del proceso de combustión y, actualmente su ineficiencia energética y los niveles de impacto ambiental generados en las ladrilleras son altos. Durante la combustión se producen partículas pequeñas (carbón no quemado y cenizas flotantes) que van al ambiente junto con los gases, hecho que podemos apreciar cuando observamos las chimeneas emitiendo humo negro, estos efectos son recibidos directamente por la comunidad circunvecina, a pesar de esto, la industria ladrillera es insustituible dada su injerencia en el desarrollo del país y su alta generación de empleos directos e indirectos. Estos dos aspectos sumados a las nuevas regulaciones ambientales, hacen indispensable la implementación de programas de mitigación del impacto ambiental para este sector. Gran parte de los problemas de contaminación se disminuyen implementando hornos que tengan un buen proceso de combustión y que aprovechen el calor residual de los gases de combustión antes de ser emitidos al ambiente.

Las tecnologías limpias de combustión están orientadas a maximizar beneficios técnicos, ambientales y económicos y mitigar el impacto ambiental provocado por los mismos optimizando el uso del combustible y reduciendo al máximo la cantidad de emisiones, efluentes y residuos sólidos.

2.2.1 Proceso Productivo De Las Ladrilleras

En general el proceso productivo de ladrillos sigue una secuencia de pasos que comprenden desde la extracción de la materia prima en la mina, su preparación hasta la cocción en el horno, los cuales se diferencian de una empresa a otra por el nivel tecnológico empleado para desarrollarlas, así a continuación se presenta un resumen de este proceso.

2.2.1.1 Extracción de la Materia Prima.

En la industria ladrillera la explotación minera implementada para la arcilla es a cielo abierto. En las grandes y medianas, normalmente efectúan el proceso de explotación mediante la conformación de terrazas, en busca de que los frentes beneficiados puedan ser recuperados más adelante con material estéril, a más del aprovechamiento de la capa vegetal removida en los programas de reforestación que se tenga a bien implementar.

En el otro extremo tecnológico están los chircales en los cuales se practica la minería de ladera, haciendo uso de herramientas manuales en las secciones adyacentes a los patios de secado, removiendo el material en la base de los taludes y propiciando el derrumbe.

El manejo y transporte del material extraído se hace mediante la ayuda de cargadores o camiones, se ubica en sitios fuera de la mina en patios de acopio a cielo abierto o bajo techo, donde se inicia el proceso de maduración de la arcilla. Los equipos utilizados en el proceso de extracción son A) Retroexcavadoras, B) Buldózer, C) Cargadores, D) Volquetas y Otros. (SENA, 2003).

2.2.1.2 Preparación de la Materia Prima

La preparación del material arcilloso se inicia con una reducción de tamaño y humectación para luego ser sometido a moldeo a presión. La preparación se lleva a cabo ya sea por vía húmeda o por vía seca.

Con el fin ablandar y estabilizar química y físicamente los materiales estos permanecen macerándose en el patio de almacenamiento con humectación permanente y remoción regular de dichos materiales.

Para regular la contracción fuerte y el agrietamiento de los ladrillos durante el proceso de secado y cocción la arcilla ya macerada se mezcla con una pequeña cantidad de arena o desengrasantes, provenientes de la trituración de los desperdicios de ladrillo de la fábrica la mezcla arcillosa se tritura y muele, para llevar la pasta a un estado de homogeneidad.

En la preparación de la arcilla, para molienda en seco, se usan molinos de martillo y rulos, en las mezcladoras se humecta y homogeniza la arcilla y se efectúa también un laminado en la línea de proceso antes o después de la mezcladora.

La preparación por vía húmeda es la más usada en la industria ladrillera, en donde la arcilla se utiliza tal cual se saca del yacimiento para más adelante reducirla de tamaño y mezclarla con agua hasta obtener una pasta dúctil y homogénea. En este proceso de preparación el amasado es de suma importancia.

En el proceso por vía seca el material arcilloso se seca para luego reducirlo de tamaño, tamizarlo y mezclarlo con agua. Aquí aunque requiere de una mayor infraestructura mecánica el producto terminado es de mejor calidad que el obtenido por vía húmeda.

La industria ladrillera emplea para la preparación de arcillas tolvas alimentadoras, rompe terrones, trituradoras de mandíbula, molinos de martillos, zarandas, laminadores, mezcladoras, prensas, extrusoras, cortadoras.

Las grandes industrias ladrilleras dan una mejor preparación a las arcillas, ya que cuentan con un mayor número de máquinas y por lo general el transporte de material es automatizado o mecanizado.

En grandes y medianas industrias se usan sistemas automatizados y mecanizados para el transporte interno. (Motos, vagonetas y montacargas). En las industrias pequeñas o chircales de baja producción el transporte interno es manual.

Figura 32. Preparación y moldeo de arcilla



2.2.1.3 Moldeo

El moldeo se realiza por lo regular por extrusión, proceso que consiste en moldear en forma plástica a presión (con o sin vacío) a través de una boquilla determinada. El equipo usado presenta variaciones en la boquilla según el producto deseado.

Los ladrillos rústicos son moldeados en una extrusora sin vacío (galletera), la cual recibe el material proveniente de un desintegrador de rodillos acanalado.

Los tubos de gres se elaboran empleando extrusoras verticales, en donde se varía las boquillas para la obtención de tubos de diferente diámetro.

Figura 33. Moldeo de arcilla



El proceso de moldeo se puede desarrollar por dos métodos:

- *Método De Barro Plástico:* En este método las arcillas se mezclan con una cantidad de agua que oscila entre el 15 y el 20% y luego se pasan por una extrusora o “galletera”. La extrusora está compuesta por un cilindro horizontal dentro del cual gira un sinfín que impulsa la pasta a través de la boquilla.

Las máquinas modernas tienen una cámara de vacío que puede aumentar la plasticidad y disminuir la porosidad de las arcillas factores que mejoran la textura y resistencia del ladrillo. Del mismo modo contribuyen a rebajar el grado de humedad, accediendo a que el proceso de cocción sea más fácil.

- *Método De Moldeo En Seco:* En este proceso las arcillas se trituran finamente se llevan a un secado previo para asegurar un contenido bajo de humedad entre 4% y un 7% y luego se prensan. El prensado se realiza en tres fases: en la primera se evacúa el aire contenido en las partículas de arcilla, luego se aglomeran y finalmente se compactan.
La presión requerida para lograr un buen producto es de 200 a 300 Kg/Cm², lo cual da como resultado caras lisas regulares y uniformidad geométrica.

En ambos métodos de moldeo los productos ya moldeados por la extrusora van directamente a una cortadora de hilo de acero, la cual separa las unidades teniendo en cuenta una serie de medidas normalizadas para cada uno de los diferentes productos fabricados.

2.2.1.4 Secado.

El secado tiene por objetivo la reducción del contenido de humedad de las piezas antes de su cocción.

El secado puede ser natural o artificial de acuerdo al volumen de producción esperado. Puede decirse que la producción de una industria ladrillera depende del secado, ya que la capacidad de extracción y producción del horno generalmente son altas.

En el secado natural los ladrillos son secados por acción del viento se dejan en grandes áreas, bajo techo o al aire libre, de modo que el tiempo de secado depende de condiciones atmosféricas como velocidad del aire, temperatura y humedad relativa. Este secado es usado en las industrias medianas, pequeñas y chircales, para plantas altamente tecnificadas (hornos continuos) no permite un buen ritmo de producción. Es por esto que las grandes industrias prefieren sistemas de secado artificial.

Se puede decir que en el secado natural prácticamente no hay gastos de operación, pero se requiere extensas áreas debidamente adecuadas.

Las circunstancias anteriores generan varias consecuencias: movilización excesiva de productos semielaborados para conservar el ritmo de producción con los subsecuentes problemas de manejo, deterioro y pérdidas en los productos que esto ocasiona, mayores inventarios de productos en proceso para garantizar programas de producción ya que el secado demora más o menos 15 días dependiendo de las condiciones atmosféricas como velocidad del aire, temperatura y humedad relativa.

El secado artificial requiere de someter el ladrillo a la circulación del aire caliente, se establece entonces un flujo de calor hasta el interior del mismo, obligando a que la humedad salga del sólido. El aire seco en contacto con el ladrillo húmedo transfiere calor a la superficie, evaporando su humedad libre. Si se mantienen constantes la temperatura y la velocidad del aire, el agua se elimina a velocidad constante, hasta que el sólido alcanza su humedad crítica, momento en el cual aparecen las primeras manchas secas. Si el secado es brusco un anormal gradiente de eliminación de humedad, va acompañado de agrietamiento, deformaciones y contracción del material.

Los secaderos artificiales pueden clasificarse en intermitentes o continuos. En los primeros el material presecado en condiciones ambientales es introducido en una de las cámaras contiguas del secadero las cuales deben tener controladores de humedad y temperatura. Las cámaras son de diferentes dimensiones y en ellas se puede utilizar los gases de chimenea de los hornos o los gases de combustión de un horno contiguo.

Figura 34. Secador artificial de arcilla moldeada



El secadero continuo o tipo túnel consiste en una galería de 60 a 80 metros, en la que por uno de sus extremos penetra el aire caliente en contracorriente al desplazamiento del material, éste se transporta a través del túnel en vagonetas o estanterías. La temperatura varía del extremo frío al caliente de 30 a 120°C la desecación dura de 20 a 24 horas. Habitualmente este secadero es empleado cuando se cuenta con un horno túnel en el proceso.

2.2.1.5 Cocción

El proceso productivo de la elaboración del ladrillo consiste en la transformación de un material arcilloso en otro con características vítreas, mediante al calentamiento a altas temperaturas, realizado en un horno que puede operar en forma intermitente o continua. El calor requerido por el proceso se genera mediante la quema de un combustible, comúnmente carbón, por su abundancia y economía.

Las fases del proceso en la cocción se resumen a continuación:

- Presecado por oreo a la temperatura ambiente
- Secado hasta 200°C, donde se elimina el agua residual.
- Entre 200° y 400°C se oxida el material orgánico.
- Entre 450° y 650°C se modifica la estructura del material arcilloso, produciéndose contracción y un endurecimiento irreversible
- A 573°C ocurre la transformación alotrópica del cuarzo produciéndose una dilatación reversible.
- Entre 680° y 800°C tiene lugar la descarbonatación de arcillas calcáreas (liberación del CO₂)
- Por encima de los 800°C se inicia la vitrificación. La temperatura máxima requerida depende del tipo del material utilizado y es del orden de 1200°C.

Los materiales que son sometidos a cocción pasan durante este proceso por complejas reacciones regidas por su composición química y mineralógica. El agua absorbida se pierde a 120°C, entre 200 y 300°C el agua combinada, la arcilla se descompone entre 600 y 700°C y entre 800 y 1000°C ocurre la cristalización de nuevos compuestos y se realiza propiamente la cocción. Durante el proceso de cocción la transferencia de calor por convección entre los gases calientes de combustión y la carga es el dominante, no obstante en la zona de alta temperatura también se presenta transferencia por radiación.

El proceso comprende tres fases: caldeo, cocción y enfriamiento. En la primera se elimina paulatinamente el agua higroscópica, ésta es removida por aire continuamente renovado y aumentando constantemente la temperatura, el caldeo se considera finalizado cuando la masa alcanza los 100°C.

En la cocción se completan las reacciones químicas, los ladrillos sufren una ligera contracción y adquieren una estructura característica que da fuerza al producto terminado. La temperatura de cocción oscila entre 1000 y 1100° C.

En la etapa de enfriamiento la temperatura debe descender desde la de cocción hasta la normal, esto debe realizarse una manera paulatina en la zona de 500 a 600°C, ya que un descenso brusco en la temperatura puede provocar contracciones o fisuras en los ladrillos.

El enfriamiento de las piezas está dado por el tamaño de las mismas, cuanto mayor es éste mayor será la lentitud de elevación de la temperatura y el posterior enfriamiento del material. Los productos cuyo enfriamiento se ha efectuado lentamente, son tenaces y muy resistentes a las acciones mecánicas por el contrario un enfriamiento rápido los hace frágiles, hasta el punto de ocurrir rupturas espontáneas sin necesidad de agentes externos que provoquen ello.

Después de la cocción los materiales toman una coloración variable dependiendo de los componentes de la arcilla, en especial de los óxidos férricos del tipo de atmósfera utilizada. Altos contenidos de óxido férricos favorecen la obtención de productos rojizos de alta demanda en el mercado nacional.

2.2.2 Tipos de Hornos

Las instalaciones para cocer los ladrillos son muy diversas: desde instalaciones tan sencillas que apenas merecen el nombre de hornos hasta instalaciones sumamente complejas cuyo costo puede ascender a cientos de miles de dólares. Al comienzo de la escala en el nivel tecnológico más bajo, se encuentra el simple horno "Árabe". En el otro extremo se encuentra el moderno horno de túnel.

Tabla 28. Tipo de Hornos para elaboración de ladrillo

TIPO DE HORNO
FUEGO DORMIDO
ARABE
BAUL
COLMENA
HOFFMAN
TUNEL
RODILLOS
SEMICONTINUO
ZIGZAG
VAGON

Los hornos Hoffman, túnel y de rodillos se consideran como hornos tecnificados por poseer alta capacidad de producción y niveles de contaminación menores, con relación a los demás tipos de hornos, además tienen mejor eficiencia térmica porque realizan recuperación de calor.

2.2.2.1 Horno de Fuego Dormido

Es el horno más contaminante, es un horno artesanal construido en forma circular, generando una bóveda circular. Posee una puerta lateral por donde se carga el material. En estos hornos se coloca una capa de carbón y posteriormente una de ladrillos, hasta que se alcanza el tope del horno. La cocción dura treinta (30) días y la producción de ladrillos es de quince (15) a veinte mil (20.000) ladrillos hornada. El consumo de carbón es de quince (15) a veinte (20) toneladas por hornada. Son hornos intermitentes, caracterizados por su baja

producción y alta contaminación. La quema no es homogénea, el material producido es de baja calidad, algunos ladrillos quedan requemados, mientras otros pueden quedar crudos.

2.2.2.2 Horno Árabe

En orden jerárquico en cuanto a contaminación, este horno ocupa el segundo lugar después del fuego dormido. Es un horno de forma rectangular, que posee 8 hornillas en las zonas laterales e inferiores para el suministro de carbón. No tiene techo ni chimenea. Son hornos de rápida cocción (7 días aproximadamente), y alta contaminación. Consume entre 8 y 10 toneladas de carbón por hornada.

2.2.2.3 Horno De Llama Invertida (Hornos Colmena)

Son hornos cerrados, intermitentes, está construido en ladrillo con paredes de un metro de espesor aproximadamente para darle estructura y evitar las pérdidas de calor al ambiente.

En la figura siguiente se muestra el horno que consta de unas puertas distribuidas en contorno (generalmente 4) por donde se carga y descarga el horno las cuales se cierran con ladrillo superpuesto y arcilla una vez el horno está cargado. Las hornillas pueden ser en número de 4 a 10 dependiendo del tamaño del horno, por donde se alimenta el combustible; las cuales desembocan en unas bolsas que dirigen los gases de la combustión hacia la parte superior del horno.

La parte superior del horno, la cúpula tiene forma semiesférica de 30 cm de espesor, allí se encuentran unos orificios denominados grameras uno de diámetro mayor (35 cm) en el centro de la cúpula y cuatro de diámetro menor equidistantes del orificio del centro. Las grameras tienen por objeto permitir al inicio de la cocción la salida de la humedad que queda en el material cargado.

El piso del horno está construido con muros de ladrillo 90 cm de profundidad y 30 cm de ancho separados 25 cm entre sí. Los muros se construyen con ladrillo de 12 cm de espesor intercalados de tal manera que quede un 40% de espacio vacío que permita el paso de los gases de combustión. Sobre los muros se forma el piso colocando ladrillos en forma transversal más grandes (37x12x12 cm) separados entre sí de tal manera que quede un espacio del 30% para la circulación de los gases.

Los gases de la combustión ascienden por las bolsas desde la hornilla hacia la cúpula del horno y luego descienden hacia el carcomo entregando calor al material para posteriormente salir al ambiente por la chimenea

La alimentación del carbón puede realizarse por una parillas (3-4) colocadas en la pared del horno mediante stoker. Consume un promedio de 15 a 30 toneladas por hornada, dependiendo de la capacidad del horno.

Figura 35. Horno de Llama Invertida (Colmena)



2.2.2.4 Horno Hoffman

Es un horno continuo en el cual el fuego se mueve a lo largo de las cámaras de combustión con tiro forzado. La forma del horno Hoffman ha cambiado desde la forma totalmente redonda hasta la forma semirectangular o completamente rectangular.

El horno se alimenta mediante carbojets o dosificadores mecánicos por la parte superior con carbón pulverizado, la granulometría oscila entre malla 30 y malla 100. El aire primario necesario para la combustión se suministra con el carbón pulverizado y el aire secundario, se suministra precalentado proveniente de la zona de enfriamiento de las cámaras de combustión ya quemadas. El tiraje del horno se maneja mediante válvulas o reguladores de tiro (figura 13) y los gases de combustión luego de precalentar las cámaras subsiguientes al frente de combustión, se evacuan por la chimenea.

El control del avance de la reacción se hace mediante termocuplas tipo k, ubicadas en las cámaras de combustión sobre las cuales se está alimentando el carbón pulverizado y la

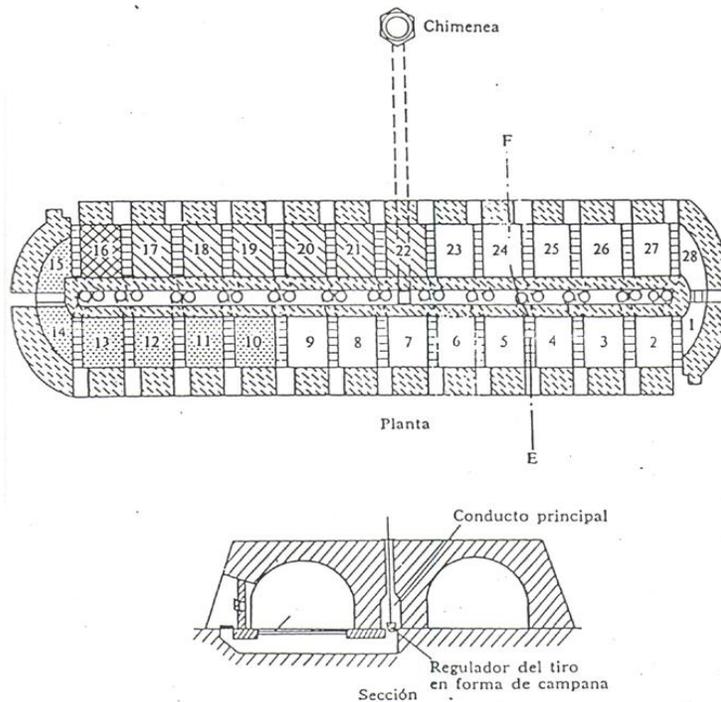
temperatura final de cocción de la arcilla oscila entre 900 y 1200 °C, dependiendo del tipo de arcilla que se esté quemando. Cuando no se dispone de controles para la temperatura, el control se hace en forma visual, dependiendo del color observado en la primera cámara del frente de combustión, éste mecanismo de control hace que la calidad del producto final no sea constante, pues, es subjetivo.

Consisten en dos galerías paralelas, formado por compartimientos contiguos, cuyos extremos se unen por un pasafuegos. Son hornos continuos de alta producción, donde no se pueden producir materiales vitrificados. En estos hornos el fuego se mueve en dirección opuesta a las manecillas del reloj, este sistema permite lograr una alta eficiencia térmica y de producción, puesto que el calor alcanzado en la cámara de combustión se usa en el precalentamiento de las cámaras precedentes. El ciclo de quema se realiza en una semana.

Cada galería está formada por varias cámaras, cada una de ellas con su respectiva puerta, para el cargue y descargue del horno y un canal de salida que va al colector principal que conduce a la chimenea, cada cámara comunica con el colector.

La alimentación del combustible se hace en la parte superior del horno, mediante alimentación manual o con la ayuda de Carbojet (alimentación neumática), la cual debe hacerse en forma dispersa, evitando chorros que provoquen combustión incompleta. Consume cerca de 25 a 30 toneladas de carbón por vuelta del horno o por ciclo de quema.

Figura 36. Horno Hoffman



2.2.2.5 Hornos Túnel

Los hornos túnel y de rodillos son considerados como hornos tecnificados ya que tienen alta capacidad de producción y niveles de contaminación menores, con relación a los demás tipos de hornos, además presentan mejor eficiencia térmica porque realizan recuperación de calor. Aunque el porcentaje de participación de estos hornos es bajo, se destaca su uso en la industria ladrillera grande, por su alto grado de tecnificación en la inyección del combustible y en el control de temperaturas.

El horno túnel es un ducto recto rectangular, conformado por paredes laterales y un techo, en el piso tiene unos rieles por los que se desplaza la carga en las vagonetas, siendo así un horno continuo con carga móvil y fuente de calentamiento fija, definiendo así zonas específicas del horno para precalentamiento, cocción y enfriamiento. El ladrillo que se va a quemar se desplaza lentamente en la vagoneta, pasando por todas las zonas del horno experimentando un perfil de calentamiento y enfriamiento acorde al proceso.

- **Precalentamiento:** en esta zona existe una corriente de aire caliente procedente de la zona de cocción que circula en sentido contrario al material. Normalmente se utiliza como fuente térmica el calor recuperado del horno y se pretende que el material pierda su contenido en agua (tanto la absorbida superficialmente como la estructural) aumentando la temperatura de manera progresiva.
- **Cocción:** los quemadores de combustible se ocupan de conseguir la curva de cocción óptima en la parte central del horno.
- **Enfriamiento:** el material se somete a enfriamiento progresivo, con el objetivo de evitar grietas en las piezas por un contraste brusco de la temperatura. (U. Atlántico, 2001)

Figura 37. Esquema general de un Horno Túnel Ladrillero

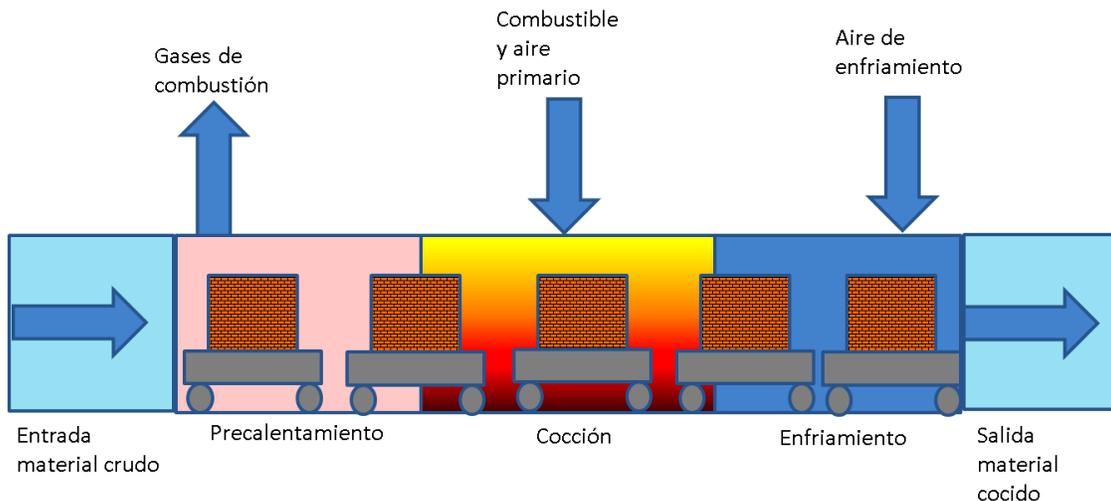


Figura 38. Quemadores de gas y carbón en horno tunel (Izq) -Descarga (Der)



2.2.3 Eficiencia Térmica de los Hornos.

El consumo de energía es elevado debido a la gran cantidad de maquinaria involucrada en el proceso, en este factor influye el grado de mecanización que tenga la instalación analizada ya que, existen muchos subprocesos que en muchas empresas se realizan sin mecanización, sino mediante operarios que se encargan de llevarlos a cabo. Hay que destacar la gran influencia de los costos energéticos en el precio final del producto, oscilando entre el 25 y el 40% según el tipo de producto y de tecnología.

El consumo útil se mide por el número de calorías que requieren los ladrillos. El consumo de calor por tonelada producida será tanto menor, cuanto mayor sea la producción del horno, hasta alcanzar un consumo óptimo.

Como medida de la eficiencia térmica de las diferentes industrias ladrilleras se tiene que las industrias grandes con hornos continuos requieren del orden de 505.245.Kcal/ton de producto terminado y los chircales discontinuos requieren 1.771.990.Kcal/ton de producto terminado. Es decir que las industrias grandes son más eficientes térmicamente que los chircales. Debido a que en los primeros aprovechan el calor generado en la etapa de enfriamiento para el caldeo y precalentamiento de la pieza, mientras los hornos intermitentes deben seguir toda la curva de calentamiento y enfriamiento del horno en cada operación. Es de resaltar la baja eficiencia de combustión de los hornos árabe y de fuego dormido.

El carbón es el combustible más utilizado en la industria ladrillera, tiene la ventaja de que los gastos de instalación son mínimos y la combustión es barata. Este como la mayoría de combustibles genera contaminación cuando es mal utilizado, sin embargo cuando el carbón se trabaja controlando parámetros como la granulometría con equipos dosificadores de transporte neumático mecánico (carbojet o stokers) y con nuevos diseños de hornos, los niveles de contaminación emanados por sus chimeneas pueden ser disminuidos substancialmente

La industria ladrillera en los últimos 20 años ha sufrido grandes cambios en respuesta a las bonanzas de la construcción y recesiones del mismo sector, esto los ha llevado a tecnificarse para responder a las bonanzas pero en épocas de crisis termina operando a un 50% de su capacidad instalada. Esta tecnificación se basó en lo siguiente:

- Implementación de máquinas de extrusión de mayor capacidad y eficiencia.
- Adopción de secaderos artificiales, que presentan mayores niveles producción y capacidad de recuperación de calor proveniente del horno.
- Instalación de hornos más eficientes (intermitentes, Hoffmann y Túnel), que consumen menos energéticos y tienen mayor capacidad de producción.

Como resultado de estas acciones la eficiencia energética en los procesos de cocción mejoró hasta en un 30%. No obstante, opciones de mejora en la eficiencia energética aún son posibles, a través de cambios tecnológicos y/o de sustitución de combustibles.

En la tabla siguiente se presenta el consumo promedio de energía térmica en la industria ladrillera para los principales tipos de horno, y en la figura xx el consumo de energía térmica en la industria ladrillera nacional, allí se puede apreciar que en general los promedios nacionales no están lejos de los internacionales.

Tabla 29. Consumo promedio de energía en la industria ladrillera según el tipo de horno (mj/ton)

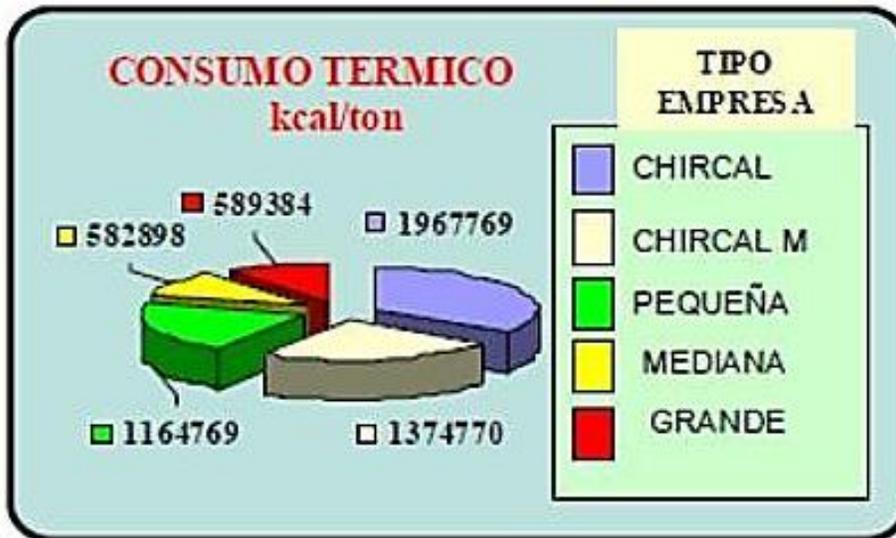
Tipo de horno	Consumo Nacional	Rango Internacional
Túnel	1.520	1.400 -1.600
Hoffman	1.5371	1.800 – 2.000
Intermitente	1.867	2.000 – 3.000
Periódicos	4.165	3.600 – 4.500

Fuente:(U. Atlantico, 2001)

Puede observarse que el consumo específico nacional de energía térmica es similar y en algunos casos inferior al reportado internacionalmente y que los hornos más ineficientes energéticamente son los hornos tipo periódicos (que incluyen hornos tipo Llama dormida, tipo Colmena y tipo Pampa).

Aunque el consumo específico de energía de los hornos periódicos se encuentra dentro del rango internacional, tales hornos no son aconsejables desde el punto de vista energético, pues su consumo equivale a seis veces el consumo de un horno Túnel, que tiene el menor consumo específico. EL consumo ideal esta por el orden de las 550kcal/kg, bastante más bajo que los actuales, lo que da idea del potencial de reducción de consumo de energía en este proceso. (Gomez, 2010)

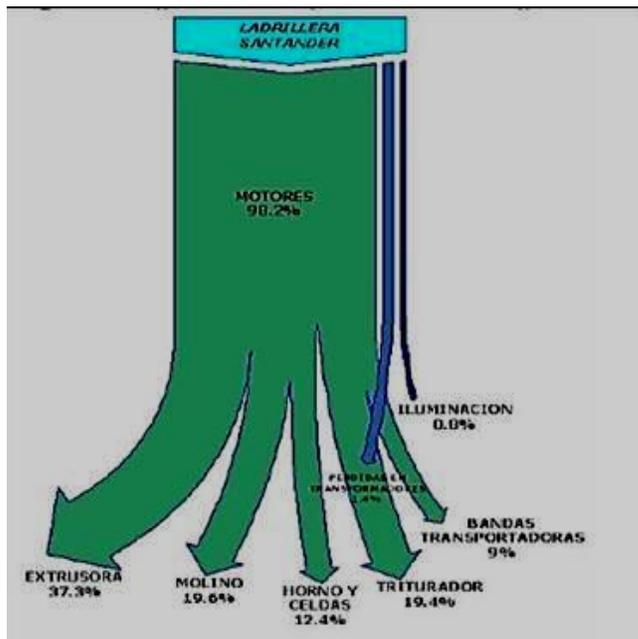
Figura 39. Consumo Térmico de la Industria Ladrillera Nacional



Fuente: Anfalit Estudio sector arcillas 1999

El consumo específico de energía eléctrica se refiere al consumo en el funcionamiento de motores, ventiladores, maquinaria e iluminación. La figura 40 y la tabla 30 muestran la distribución de consumo de energía eléctrica en la Ladrillera Santander de Soacha de acuerdo al estudio adelantado por la Universidad de la Salle (Leyva, 2008).

Figura 40. Diagrama Sankey Distribución de energía eléctrica en una ladrillera



Fuente: (Leyva, 2008)

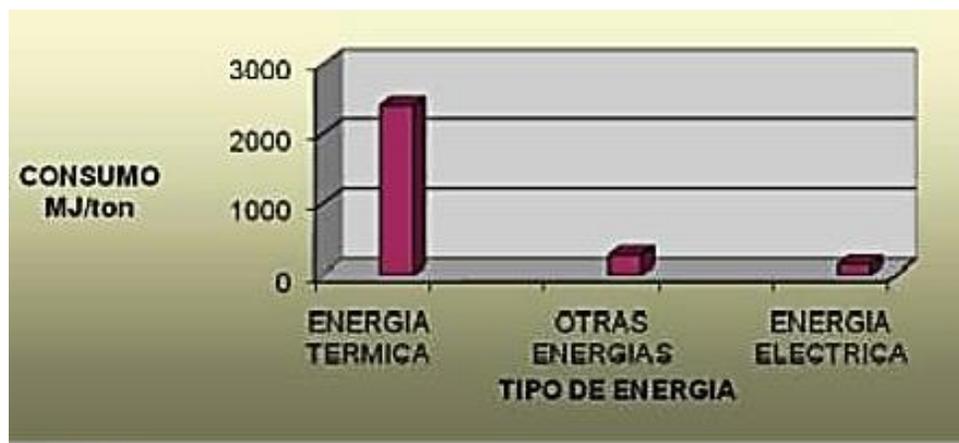
Tabla 30. Distribución del consumo de energía eléctrica en la industria ladrillera

TIPO DE CONSUMO	LÍNEA DE CONSUMO	CONSUMO kWh -MES	ENERGÍA ELÉCTRICA %	PARTICIPACIÓN %
MOTORES	EXTRUSORA	35829,39	37,29	97,65
	MOLINO	18827,43	19,60	
	HORNO Y CELDAS	11930,01	12,42	
	TRITURADOR	18616,25	19,38	
	BANDA TRANSPORTADORA	8619,10	8,97	
ILUMINACIÓN	LUMINARIAS INCANDESCENTES (un)X(w)	780,00	0,81	0,81
	LUMINARIAS FLUORESCENTES (un)X(w)			
TRANSFORMADORES	TRANSFORMADOR DE 15 KVA	119,00	0,12	1,54
	TRANSFORMADOR DE 300 KVA	1356,00	1,41	

Fuente: (Leyva, 2008)

Finalmente la figura 41 resume el consumo promedio general de energía incluyendo térmica, eléctrica y otras en una industria ladrillera.

Figura 41. Consumo específico promedio de energía en la industria ladrillera nacional



Fuente: (Leyva, 2008)

2.2.4 Propuestas de mejoramiento.

Como ya se ha planteado la producción de ladrillo es altamente demandante de energía térmica la cual proviene generalmente de la combustión de carbón. Actualmente el principal motor de desarrollo es la normatividad ambiental pero esto tiene gran parte de la solución en el mejoramiento de la eficiencia energética que conduce a una reducción del consumo de combustible reduciendo las emisiones por unidad producida y acerca la producción a estándares de calidad internacionales y reduce los costos de producción, los cuales están relacionados directamente con el tipo de horno y combustible empleado, el costo del combustible pesa en la estructura de costos, en este caso aun tratándose de carbón que es el combustible más abundante y económico, es un factor que motiva los desarrollos de la industria en busca de su economía.

A continuación se describen algunas propuestas de mejoramiento energético de los principales hornos ladrilleros.

- *Horno de tiro invertido*

Las principales causas de ineficiencia energética de este tipo de hornos radican en la quema de carbón en trozos grandes y deficiencias en el flujo de gases de combustión por tiraje insuficiente o contraflujos ocasionados por falta de área de circulación en la cámara del piso del horno. Como alternativas para mejorar estos aspectos se tienen (Mantilla, 2011)

- *Implementar quemadores de carbón pulverizado para la quema de carbón.*

Este tipo de hornos normalmente operan con alimentación de carbón de forma manual a la parrilla o mediante Stoker, en ambos casos se maneja carbón en tamaños superiores a 2" y hasta 4", lo que dificulta una buena combustión. De acuerdo a los principios básicos de la combustión la implementación de carbón pulverizado aumenta el área superficial y por tanto aumenta la eficiencia de la combustión.

Ventajas.

- Aumento de la eficiencia del proceso de combustión
- Disminución del consumo de carbón
- Disminución del flujo másico de gases de combustión
- Disminución del costo de producción al disminuir el consumo de combustible
- Disminución de emisiones de material particulado

- Disminución de la temperatura de salida de la chimenea como consecuencia de disminuir el flujo de gases de combustión.
- *Aumentar el área de flujo de los gases de combustión en la cámara del piso falso.* De esta forma es posible mejorar el tiro para disminuir las emisiones de contaminantes y pérdida de calor por las hornillas de alimentación del horno.
- *Implementar un sistema de tiraje artificial.*
- *Mejorar las condiciones de almacenamiento del carbón.*
 - El suelo debe estar nivelado, firme, sin grietas y drenado.
 - No apilar carbón húmedo con seco
 - Los carbones de distintas procedencias no se deben mezclar
 - Se deben manejar pilas de poca profundidad con salida de gases
 - Para el carbón pulverizado se debe controlar la temperatura de la pila.
- *Evaluar el Plan de manejo Ambiental.* En lo referente a emisiones se deben revisar los objetivos de la organización y planes de cumplimiento y programación de estudios de seguimiento control.

Para estudiar la eficiencia energética del sector cerámico es necesario plantear las diversas definiciones disponibles, dentro de las cuales podemos encontrar (Díaz, 2014):

- Capacidad para producir mayores resultados con menor cantidad de recursos.
- Capacidad de alcanzar mayores beneficios finales con menos recursos y con el menor impacto sobre el medio ambiente.
- Reducción del consumo de energía manteniendo los mismos servicios energéticos, sin disminuir nuestro confort y calidad de vida, protegiendo el medio ambiente, asegurando el abastecimiento y fomentando un comportamiento sostenible en su uso.

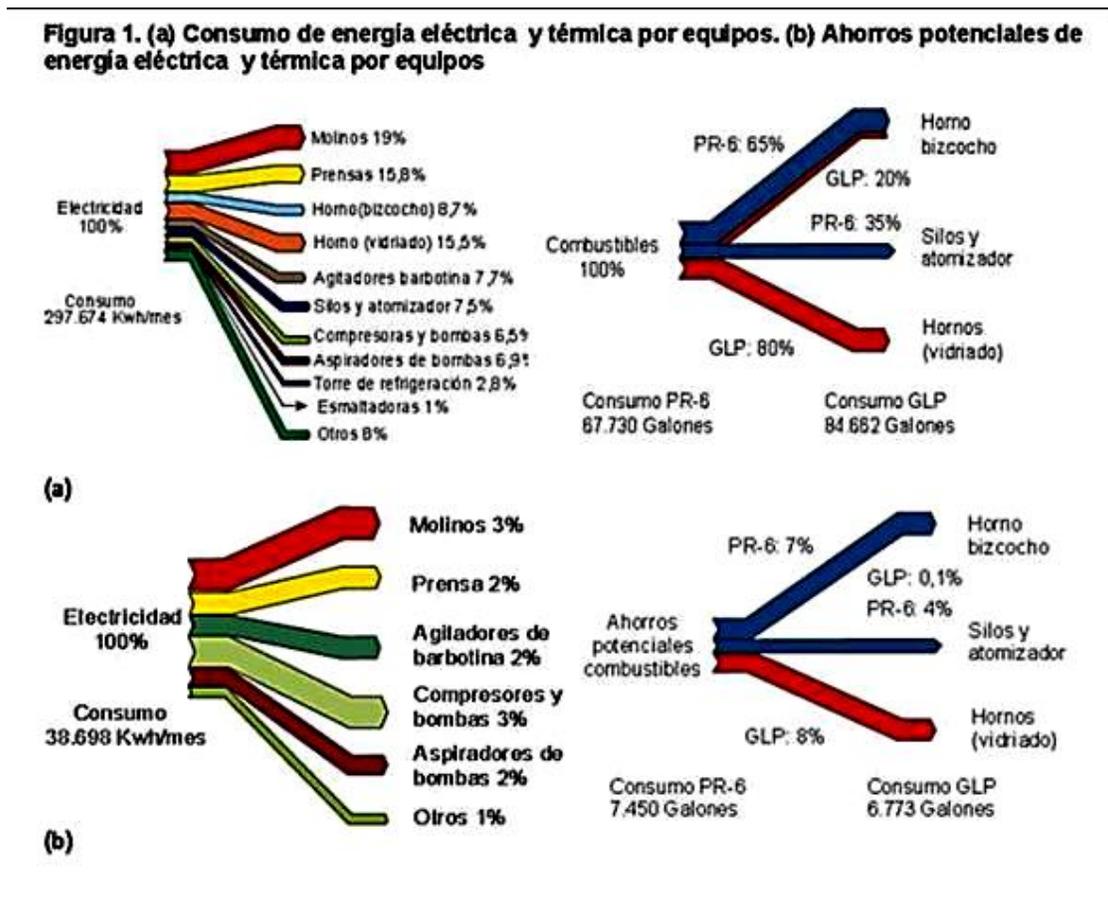
Analizando el proceso productivo cerámico se tiene que el elevado consumo de energía, depende de la maquinaria involucrada en el proceso y del grado de mecanización que tenga la instalación analizada, aunque en las operaciones de preparación de las materias primas y moldeo; el consumo energético tiene incidencia sobre el consumo específico de energía, es en el secado y la cocción donde está el mayor peso entre el (25 y 40)% según el tipo de producto y de tecnología, lo cual se ve reflejado en el precio final del producto (Díaz, 2014),

Otro factor a tomar en cuenta para ser eficiente, es el combustible que se utilice para llevar a cabo los procesos térmicos, ya que cada combustible tiene sus características y/o propiedades específicas, por lo cual, tendrán diferentes comportamientos energéticos durante la combustión. De allí que el análisis y selección de estos se convierte en otro

aspecto a trabajar, si se pretende mejorar los procesos, para ello se deben tener en cuenta las ventajas y desventajas de cada combustible, para este caso de estudio se maneja en su totalidad el carbón –cuyas ventajas son: Precio medio y disponibilidad en la zona, como desventajas se tienen: producción de emisiones al aire significativas durante la combustión y complejidad de manipulación en la precombustión.

Otro aspecto importante a determinar es el consumo energético de cada uno de los equipos que hacen parte del proceso de fabricación del sector cerámico, para ello se toman como ejemplo las distribuciones de consumo de la figura 42, en donde se presenta una relación de los equipos utilizados típicamente en la industria, distribuidos porcentualmente de acuerdo al consumo total de energía eléctrica y de energía térmica, así como las oportunidades de ahorro de energía o, mejora de la eficiencia de los mismos.

Figura 42 (a) Consumo de energía eléctrica y térmica por equipos. (b) Ahorros potenciales de energía eléctrica y térmica por equipos.



Fuente: (Díaz, 2014)

De acuerdo con la figura 42 (a) se puede inferir que los ahorros potenciales de energía eléctrica para una empresa cerámica común, serían de un 13% en promedio para energía eléctrica, del 11% en energía térmica para el petróleo y, de un 8% para el GLP, comparados con los valores iniciales de consumo (Figura 42(b)).

2.2.5 Evaluación de la eficiencia energética.

La eficiencia energética de un horno, toma en cuenta el porcentaje aprovechado del total de la energía suministrada al sistema y la cantidad de energía que se desperdicia, determinando las pérdidas económicas asociadas al proceso de cocción. Desde el punto de vista energético se tiene:

$$Q_s = Q_U + P$$

Donde:

Q_s: Energía suministrada al sistema.

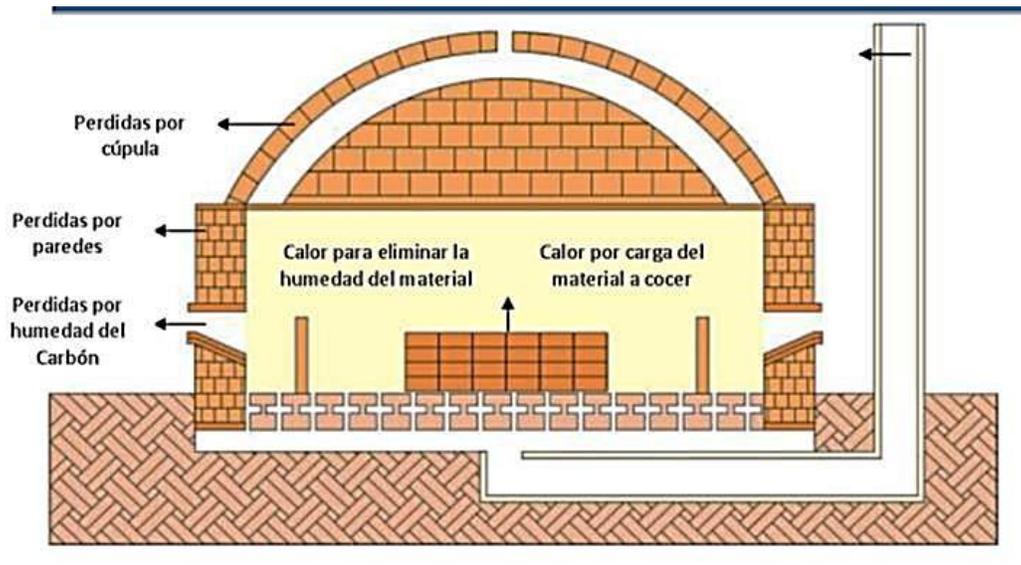
Q_U: Energía útil o aprovechada.

P: Pérdidas totales

El concepto de eficiencia (η) de un horno puede establecerse mediante la relación entre la energía útil y la energía suministrada al sistema mediante la adición de determinado combustible como el carbón, en el caso de los hornos intermitentes como el colmena.

$$\eta = \frac{Q_U * 100\%}{Q_s}$$

Figura 43. Flujos de energía en un horno de llama invertida (Colmena)



Fuente. (Leyva, 2008)

Tabla 31. Distribución energética general promedio del horno de llama invertida (Colmena)

Descripción	Valor (KJ)	Porcentaje %
Calor por intangible	180.439.949,6	30,21
Perdidas de calor (P)	333.583.951,8	55,85
Energía útil (Q_u)	83.201.870,15	13,93
Energía total o suministrada (Q_s)	597.285.500	100

Fuente: (Leyva, 2008)

2.3 SIDERURGIA Y METALURGIA

2.3.1 Descripción de proceso.

2.3.1.1 Siderurgia

Se denomina **siderurgia** a la técnica del tratamiento del mineral de hierro para obtener diferentes tipos del mismo o de sus aleaciones. El proceso de transformación del mineral de hierro comienza desde el mismo momento de su extracción en las minas. El hierro es hallado en su forma natural en forma de óxidos, hidróxidos, carbonatos, silicatos y sulfuros. Los más utilizados por la siderurgia son los óxidos hidróxidos y carbonatos. (Asometal, 2011)

La cadena de la siderurgia comprende principalmente la obtención del acero, la fabricación de artículos de acería laminados en caliente como las barras, varillas, láminas y alambros (usados en obras de infraestructura), planos revestidos (utilizados para la fabricación de cubiertas y envases), artículos laminados en frío (usados en la metalmecánica para la fabricación de electrodomésticos) y tubería con costura. Dentro de las características de la industria siderúrgica se pueden destacar la presencia de altos costos fijos y por ende altas economías de escala, alto capital, demanda de personal altamente calificado y un impacto ambiental muy importante del proceso productivo.

El acero y su producción. El Acero es una aleación o combinación de hierro y carbono en proporciones que oscilan entre 0,03% y 2% de carbono. Con el fin de mejorar algunas de sus propiedades, puede incluso contener otros elementos. Una de sus características es admitir el temple, lo que aumenta su dureza y su flexibilidad (sic.gov.co, 2008)

El acero se califica como una aleación ferrosa ya que más del 98% es hierro altamente refinado. Por este motivo, su fabricación comienza con la reducción de hierro, proceso que se conoce como “producción de arrabio” para el cual se transforma posteriormente en acero de diferentes calidades y presentaciones, dependiendo del uso final.

Las siderúrgicas cuyo proceso de producción parte del mineral de hierro, coque y caliza sin utilizar material reciclado son llamadas “Siderúrgicas Integradas”. También existen las “Siderúrgicas Semi-integradas” en las que la materia prima es la chatarra de acero (productos de acero cuya vida útil ha finalizado).

Puesto que en el mundo no son muchas las empresas dedicadas a la explotación del mineral de hierro, existen algunas en las que la materia prima es la “chatarra ferrosa”. La chatarra ferrosa no es otra cosa que productos de acero sin utilidad razón por la que, la Siderúrgica Semi-integrada es como una “industria recicladora” que favorece, el mejoramiento del medio ambiente.

Los planchones, lingotes, tochos y palanquillas son obtenidos a partir de acero líquido. Posteriormente estos productos son sometidos a procesos de laminación en caliente para lograr el producto terminado. Las empresas dedicadas a este proceso se denominan “laminadores”. Estos productos terminados se clasifican en:

- Productos largos: presentados en forma de rollos y varillas. Para obtener este producto, se usan los lingotes, tochos y palanquillas.
- Productos planos: se presentan en forma de rollos de láminas y láminas planas de diferentes dimensiones. Para su obtención se usan los planchones.

La laminación en caliente y/o en frío existe de acuerdo a la finalidad de los productos terminados. Las industrias “transformadoras” de productos terminados se dividen según la utilidad de los mismos, es decir, productos para Construcción Civil y la Industria Metalmecánica. Tanto los productos terminados como los transformados, proveen

básicamente los mercados de la Construcción Civil y la Industria. Basta con observar alrededor para comprender que casi todo está hecho o tiene al menos un componente de ACERO.

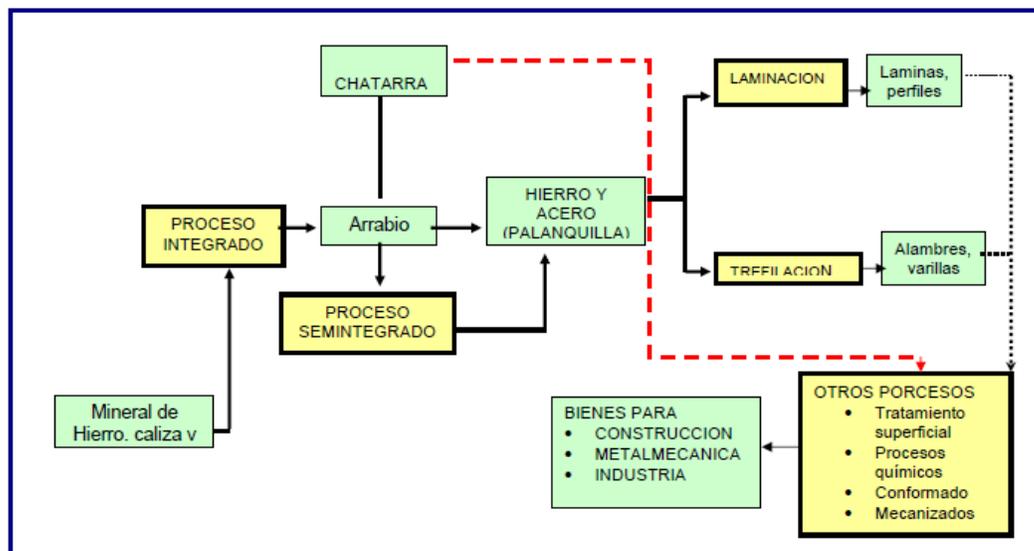
Proceso Siderúrgico Para lograr una mejor comprensión del proceso de fabricación del acero, las figuras 44 y 45 muestran su cadena productiva.

Figura 44. Esquema productivo en el proceso siderúrgico.



Fuente: (METAFUSION, 2013)

Figura 45. Etapas del Proceso Productivo.



Fuente: (Almanza, 2008)

El proceso siderúrgico consta de las siguientes etapas:

- Producción de materias primas. Se entiende como la explotación minera de hierro, carbón y caliza.
- Fabricación Primaria. El carbón es sometido al proceso de calentamiento sin aire llamado coquización, mediante el cual se obtiene el coque con una estructura celular dura, compuesta por carbono fijo y cenizas del carbón.
- Sinterización. Los materiales finos generados se aglomeran para formar el sinter y finalmente poder ser cargados al alto horno.
- Alto Horno. El sinter, coque, caliza, mineral de hierro y aire precalentado se cargan al Alto Horno, y de esta manera se obtiene hierro líquido llamado arrabio y escoria. La escoria se vende para la fabricación del cemento.
- Calcinación. La caliza que por acción del calor es convertida en cal se criba para adecuar su granulometría a las necesidades de la sinterización.

- Producción de Acero. Como se mencionó anteriormente, en los altos hornos, se realiza la reducción del mineral para obtener arrabio, se cargan por capas los minerales de hierro, la caliza y el coque. El aire precalentado a 1.000°C, aproximadamente, permite la combustión del coque, generando altas temperaturas y gases reductores que actúan sobre el mineral y la caliza, convirtiéndolos en arrabio, hierro líquido y en escoria, respectivamente. Seguidamente se realiza la reducción de Arrabio para transformarlo en acero. El arrabio que sale de los altos hornos se carga conjuntamente con chatarra de acero al convertidor y se inyecta aire que oxidan el carbono, silicio y fósforo del arrabio. Una vez finalizada la inyección de oxígeno se analiza su composición y se mide su temperatura, añadiendo las ferroaleaciones que imparten las cualidades principales a los diferentes tipos de aceros. El acero líquido se envía a un proceso de metalurgia secundaria.

- Laminación Acero. El acero líquido es llevado a un molde en permanente movimiento que es enfriado por agua y en el cual empieza el proceso de solidificación del acero. Una vez sale, es cortado según los largos requeridos. Existen diferentes equipos para la laminación del acero, dependiendo del uso final. Los laminadores de barras (que se encarga de la producción de artículos usados como materiales de construcción y en la manufactura de alambres, clavos, tornillos, bolas para molinos), los laminadores de planos en Caliente (con productos que van al mercado en forma de rollos o planchas) y los laminadores de planos en frío (productos para la industria metalmeccánica y de conservación).

2.3.2 Metalurgia

La metalurgia es la ciencia y tecnología de los metales, que incluye su extracción a partir de los minerales metálicos, su preparación y el estudio de las relaciones entre sus estructuras y propiedades y la producción de aleaciones (Yahoo Respuestas, 2009). Procesos metalúrgicos. Los procesos metalúrgicos abarcan las siguientes fases (figura siguiente):

Figura 46. Fases del proceso metalúrgico.



Fuente: (Tecnología de los Materiales, 2008)

- Obtención del metal a partir del mineral que lo contiene en estado natural. Esta etapa comprende la separación de la mayor parte de la ganga o material de desecho que acompaña al mineral, seguida de la preparación química del mineral mediante la tostación o la calcinación, la reducción o proceso en la que el metal combinado pasa a elemento simple a través de la eliminación de las impurezas que quedan en el metal y elaboración de aleaciones y finalmente se aplican otros tratamientos del metal para facilitar su uso.
- Tanto para la concentración como para el refinado se emplean tres tipos de procesos: mecánicos, químicos y eléctricos. En la mayoría de los casos se usa una combinación de los tres.

- La concentración se realiza por procedimientos mecánicos como:
 - El sistema de separación por gravedad que *se basa en la diferencia de densidad entre los metales nativos y compuestos metálicos y demás materiales con los que están mezclados en la roca. Cuando se tritura el mineral o el concentrado de mineral y se suspende en agua o en un chorro de aire, las partículas de metal o del compuesto metálico, más pesadas, caen al fondo de la cámara de procesado y el agua o el aire se llevan la ganga (material residual), más ligera.* (Scribd, 2013)
 - La Flotación que *es un proceso de gravedad modificado en el que el mineral metálico finamente triturado se mezcla con un líquido. El metal o compuesto metálico suele flotar, mientras que la ganga se va al fondo. En algunas ocasiones se da en forma opuesta. En la mayoría de los procesos de flotación modernos se emplean aceites u otros agentes tensoactivos como ayuda para que metal o a la ganga floten. Esto permite que sustancias de cierto peso floten en agua.* (Red del conocimiento, 2011)
 - La concentración electrostática que *emplea un campo eléctrico para separar compuestos de propiedades eléctricas diferentes, aprovechando la atracción entre cargas opuestas y la repulsión entre cargas iguales.* (Red del conocimiento, 2011)
 - La concentración química. Este método se constituye desde el punto de vista económico como uno de los más importantes. Es el segundo más utilizado después de la concentración mecánica. Aquí, *el mineral metálico, o el concentrado de un proceso de separación mecánica, se calientan a elevadas temperaturas junto con un agente reductor y un agente fundente. El agente reductor se combina con el oxígeno del óxido metálico dejando el metal puro, mientras que el fundente se combina con la ganga para formar una escoria líquida a la temperatura de fundición, por lo que puede retirarse de la superficie del metal.* Este proceso ilustra lo que sucede en la producción de hierro en los altos hornos y la extracción de cobre, níquel, plomo, entre otros de sus minerales. (Red del conocimiento, 2011)
 - La Amalgamación se define como *un proceso metalúrgico que emplea mercurio para disolver plata u oro formando una amalgama.* El proceso de obtención de oro o plata con cianuro se ha visto reemplazado por la amalgamación. (IES Valle de Aller, 2011)
 - La Sinterización explicada en la siderurgia, comprende la aglomeración de partículas finas de mineral. Paralelo a esto, existe la nodulación en donde las

partículas se humedecen, se nodulan en presencia de caliza y finalmente se cuecen. (IES VALle de Aller, 2011)

2.3.3 Descripción industria en Colombia.

El sector metalmecánico y siderúrgico comprende las industrias básicas de hierro y acero como la siderúrgicas y de metales no ferrosos como la metalurgia. La primera comprende todos los productos de hierro y acero como varillas, chapas de hierro, ángulos y perfiles, entre otras; la segunda se refiere básicamente a la recuperación y fundición de metales como zinc, aluminio, soldadura de estaño, plomo, perfiles de bronce, barras y latón.

En Colombia, la producción de acero y hierro data del siglo XIX. La cadena siderúrgica Colombiana consta de siderúrgicas integradas y semiintegradas, transformadoras, comercializadoras, trefiladoras y ferreterías. La siderúrgica Paz del Río localizada en Belencito, Boyacá inicia su producción en 1943 por la accesibilidad a las materias primas. Esta compañía se constituye como la más grande del país. Según cifras del DANE y Banco de la Republica del 2010, la producción de esta compañía corresponde al 45% de la producción Colombiana.

En Colombia solo Acerías Paz del Río posee una siderúrgica Integrada, comenzando su funcionamiento en 1954 en el municipio de Belencito, Boyacá. Además de ser la más grande del país, es la única siderurgia integrada que funde mineral de hierro en el proceso de fabricación de acero.

Empresas como Diaco, Acasa, Aceros Sogamoso y Sidoc son siderúrgicas semiintegradas que producen acero a partir de la chatarra.

2.3.4 Clasificación de los hornos.

Dentro de los factores que determinan a los hornos para fundición, se encuentran la necesidad de rapidez en la fundición de la aleación lo más rápido posible, el incremento de la temperatura de vaciado requerido, conservación de la pureza de la carga, precisión de la composición, producción y costo de operación del horno.

En este campo se pueden encontrar los hornos por fusión, hornos industriales y hornos eléctricos dentro del cual se encuentra el horno de arco eléctrico que es ampliamente usado en el proceso de fabricación del acero. Dentro de la primera denominación, están principalmente los hornos de fusión por plasma y para la fusión de materiales (ver tabla 32). En el segundo grupo se puede encontrar una gran variedad de ellos, los cuales se muestran en la tabla 33 (Instituto Tecnológico Sonora, 2009)

Tabla 32. Descripción de los Hornos por fusión

hornos de fusión por plasma	hornos para la fusión de materiales
	Proceso de reducción directa
	Proceso de reducción directa HYL
	Proceso de reducción directa FIOR. Proceso de reducción directa MIDREX

Tabla 33. Descripción de los Hornos industriales

Según la fuente de calor				
Hidrocarburos			Eléctricos	
Contacto entre combustible, material y productos de la combustión	Contacto entre materiales y productos de la combustión, pero no con los combustibles	Sin contacto entre combustibles, materiales y productos de la combustión	Inducción	Arco eléctrico
Alto horno Horno de cubilote Convertidor Bessemer Convertidor Tomas	Horno Dopol Horno de reverbero Horno Siemens Martin Horno de Mufla	Horno de crisol Horno de crisol basculante	Alta frecuencia (50 KHz) Baja frecuencia (50-60 Hz)	Arco directo Arco indirecto

2.3.4.1 Hornos eléctricos.

Producen temperaturas muy altas y son los más adecuados para los procesos de desulfuración y desfosforación de la fundición y para la obtención de aceros especiales. El metal que se elabora en estos hornos, se halla libre de elementos diferentes a los deseados ya que no usan combustibles (líquido, sólido o gaseoso) ni tampoco aire. Este tipo de hornos se clasifican en hornos a Resistencia, de Arco y de Inducción

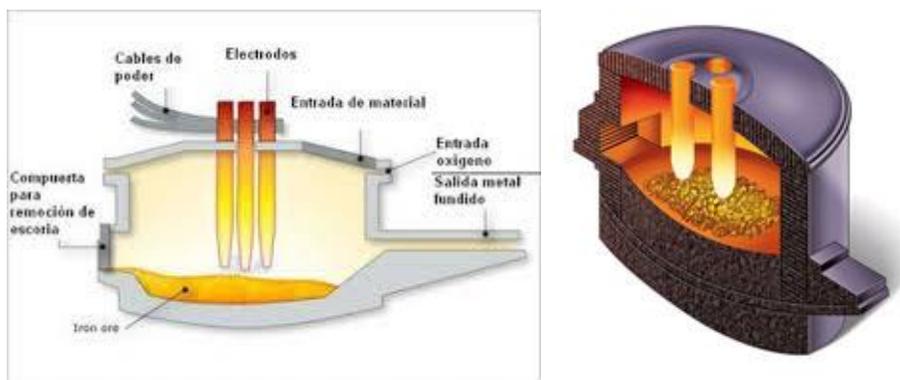
- Hornos eléctricos a resistencia. También llamados Muflas. Son hornos que alcanzan temperaturas de 1.000°C y se utilizan en los laboratorios y para tratamientos térmicos.

- Hornos eléctricos a Inducción de baja frecuencia. Se basan en el principio de inducción electro magnética, es decir en el principio de las corrientes inducidas por variación de campo magnético, la frecuencia es de 50 a 60 Hz. El primer circuito se alimenta con corriente alterna que produce un campo magnético variable que seguidamente atraviesa el circuito secundario y genera una corriente de igual frecuencia.

2.3.4.2 Horno de arco eléctrico.

Llamado también EAF (por sus siglas en inglés). Consiste en una caldera de acero que tiene una tapa gigante resistente al calor, ya que se encuentra forrada con material refractario de cerámica; esta tapa contiene los tres electrodos de grafito que son los responsables de crear el arco eléctrico que funde la chatarra y produce acero nuevo. Al iniciar la operación, la tapa del horno se levanta para introducir la carga de chatarra, luego se bajan los electrodos y el horno se alimenta con energía. La electricidad que se extiende a través de los electrodos, genera el calor necesario para fundir la chatarra. Generalmente, las siderúrgicas agregan carbón pulverizado al proceso para obtener más calor y oxígeno para complementar el calor eléctrico. El calor producido por el carbón y el oxígeno representan un tercio del calor total generado en los hornos de arco eléctrico (Almanza, 2008). El horno de arco eléctrico se puede observar en la figura 47.

Figura 47. Horno de arco eléctrico.



Fuente: (Aguilar, 2010)

- Ventajas y desventajas del horno de arco eléctrico.
 - Ventajas
 - No produce contaminación significativa.
 - Es económico en la fabricación de acero en lotes pequeños.
 - Se pueden elaborar lotes de acero tan pequeños como 1 tonelada.
 - Permite hacer un control preciso de la temperatura interna y la atmósfera.

- Desventajas
 - Acceso a la electricidad excesiva.
 - Necesidad de vías terrestres o férreas para el suministro de chatarra de metal.

Existen otros tipos de hornos que al igual que los hornos eléctricos son ampliamente usados en el proceso de fabricación del acero llamados hornos de oxígeno básico por su utilización de oxígeno puro.

2.3.4.3 Horno de oxígeno básico.

Llamado también BOF (por sus siglas en inglés). Este tipo de hornos producen acero a partir de la fundición en bruto de mineral de hierro junto con un 25% máximo de chatarra de acero. El funcionamiento de este horno se lleva a cabo mediante la inyección de oxígeno a alta presión en el hierro fundido, que permite la quema del exceso de carbono y otras impurezas combustibles. Las escorias que se encuentran en la parte superior de la masa fundida se eliminan a través de los compuestos fundentes añadidos. En el BOF, el calor generado por el hierro fundido, la quema del exceso de carbono y otras impurezas en presencia de oxígeno representa la energía necesaria para transformar el hierro en acero. Ver figura 48.

Figura 48. Horno de oxígeno básico



Fuente: (Aguilar, 2010)

- Ventajas y desventajas del horno de oxígeno básico.
 - Ventajas
 - Rentabilidad, puesto que este tipo de hornos no quema combustible.
 - Con un funcionamiento eficiente, se pueden producir lotes promedios de 250 toneladas.
 - Desventajas

- Gran cantidad de emisiones de gases contaminantes y polvo que requieren de tratamiento costosos.
- Para el tratamiento de los contaminantes antes de ser liberados a la atmósfera se requiere de equipos como depuradores de aire, precipitadores electrostáticos y filtros.

2.3.4.4 Hornos de OBS vs Eléctrico.

Las fábricas modernas de acero consisten por un lado, en hornos de arco eléctrico con los cuales se producen aleaciones de acero a partir de la chatarra y pequeñas cantidades de acero al carbono especiales; por otro lado, se encuentran los hornos básicos de oxígeno para producir grandes cantidades de acero al carbono estándar de hierro. Estos tipos de hornos, para encender una carga de materia prima en un lote de acero, toman una hora aproximadamente.

Para fundir el hierro a partir de su mineral, se requiere la creación separada de hierro fundido por la quema del coque en un alto horno.

2.3.5 Impacto de innovaciones en el sector.

Impacto de las recientes innovaciones en los hornos eléctricos de arco.

Los hornos eléctricos de arco se han convertido en los principales equipos del proceso de aceración en el mundo. Se han hecho nuevos desarrollos, tecnología e innovaciones en este tipo de hornos desde las mismas acerías.

De acuerdo al consumo de metálicos y pronósticos del proceso de fabricación del acero, la Agencia Internacional de Energía elaboró pronósticos que permiten concluir para el año 2050 una participación del 50% de las acerías eléctricas. Estas predicciones están basadas en el aumento de la temperatura media global. Dichos aumentos serían de 6°C, es una muestra de las tendencias actuales; el de 4°C toma los compromisos asumidos hasta el momento por los países en cuanto a limitar las emisiones y mejorar la eficiencia energética y el de 2°C dado en un escenario muy restrictivo de las emisiones de CO₂. En la tabla 34 se presentan los escenarios mencionados anteriormente.

Tabla 34. Estimación de incrementos de temperatura global en condiciones de baja y alta demanda de acero y su influencia sobre la ruta de proceso y consumo de metálicos para el año 2050.

		Año 2010	Año 2050: baja demanda			Año 2050: alta demanda		
			6°C	4°C	2°C	6°C	4°C	2°C
Ruta de proceso	HEA (%)	28,5	50,2	51,6	50,6	50,4	51,7	51,0
	BOF (%)	71,5	49,8	48,4	49,4	49,6	48,3	49,0
Metálicos	Arrabio (%)	68,6	45,6	44,3	40,8	45,5	44,2	37,9
	DRi a gas (%)	3,5	7,0	7,0	9,5	7,0	7,0	9,7
	DRi a carbón (%)	1,3	4,8	4,8	0,0	4,7	4,7	0,0
	Fusión reductora (%)	0,0	0,5	0,5	4,8	0,4	0,4	7,4
	Chatarra (%)	26,6	42,1	43,4	44,8	42,4	43,7	45,0

Fuente: (Madias, 2011)

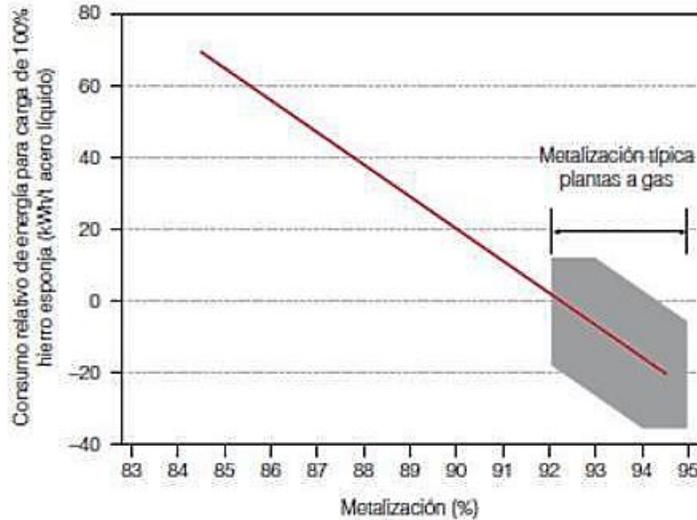
Lo anterior sugiere un desarrollo tecnológico en los hornos eléctricos que permita aumentar la eficiencia energética, la productividad, impacto ambiental y costo operativo.

Los avances realizados en este campo se resumen a continuación. Se estudian por separado, los avances en la carga metálica, el diseño del horno (se incluye la evolución en tamaño), la recuperación de energía, el aumento de la automatización y el uso de robots, el precalentamiento de chatarra y la carga caliente de hierro esponja, e uso de inyectores, la evolución en el uso de corriente continua, y los aspectos ambientales.

- Carga metálica: preparación y aporte de energía.
 - Chatarra. Este elemento juega un papel importante en los consumos específicos de energía, electrodos, cal, rendimientos metálicos y refractarios. El análisis químico (base de fluorescencia de rayos X ó por activación de neutrones gamma) se ha utilizado para disminuir la presencia de agentes contaminantes y metales no ferrosos en la chatarra. Por rayos X se analiza cada fragmento de chatarra y establece si esta pieza debe ser separada. El segundo método estudia el conjunto del material que pasa y permite tener una conocimiento de la influencia sobre la composición química de los distintos tipos de chatarra que ingresan al equipo fragmentador. Cabe aclarar que el mejor método para disminuir contaminantes y metales no ferrosos es el de desmantelar totalmente los automóviles, eliminando el problema de los residuos.
 - La producción de hierro esponja, (que para el año 2012 era de 73 Mt) . Aunque la fusión del hierro esponja consume más energía eléctrica que la de la chatarra, debido a la presencia de la ganga o material de desecho en el mineral original y un porcentaje alto de metalización como la muestra la figura 6, es

de destacar que debido a su uso, se han realizado cambios tecnológicos tales como:

Figura 49. Influencia de la metalización de hierro esponja sobre el consumo específico de energía eléctrica para una carga del 100% de hierro esponja.

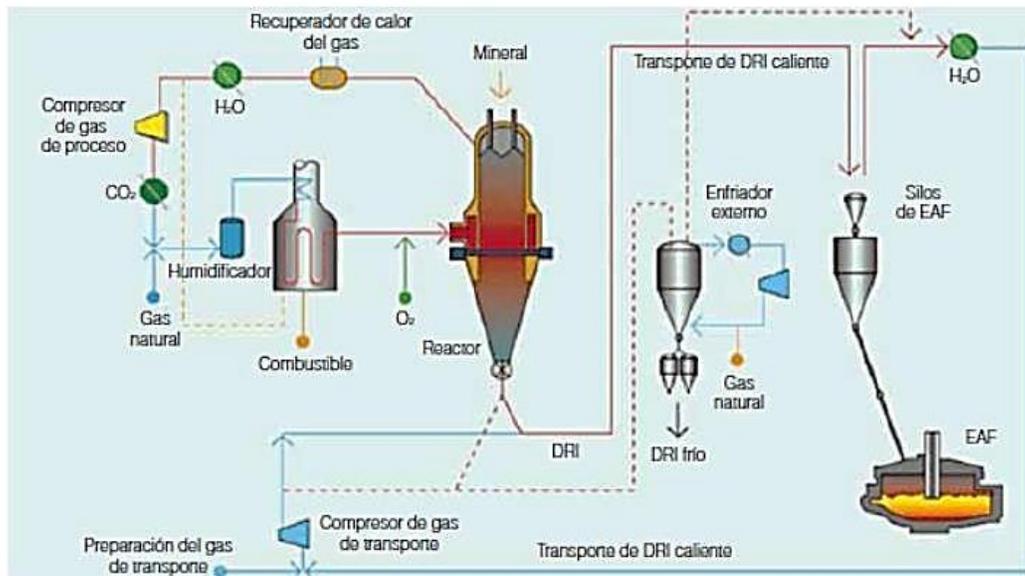


Fuente:(Madias, 2011)

- Reformación del gas natural en el horno de cuba, que permite disminuir el costo de inversión en una planta de esta naturaleza, introducción de mini plantas de reducción directa, que eliminan el reformador y resultan en una mayor factibilidad económica, uso de diversos tipos de gases (gas de unidades Corex, gas de carbón, eventualmente gas de coquería); y reconsideración de la opción de carga caliente del DRI en el horno eléctrico. Es significativo que la reducción directa, presenta una desventaja y es el bajo contenido de carbono (0,1-0,2 %).

En la figura 50 se puede ver el esquema de un horno eléctrico alimentado mediante carga caliente de hierro esponja.

Figura 50. Esquema de un horno eléctrico alimentado mediante carga caliente de hierro esponja por transporte neumático.



Fuente: (Madias, 2011)

- Seguidamente, se encuentra el uso del arrabio sólido, usado ampliamente en Brasil, que se calcula genera un ahorro de energía eléctrica del orden de 1 a 3 kWh/t acero crudo, por cada 1% de arrabio adicionado en la carga.
- Por otro lado se encuentra el arrabio líquido que estima un ahorro de energía eléctrica en unos 3 a 5 kWh/t por cada 1% de arrabio líquido adicionado, siempre que la proporción utilizada sea superior al 20%.
- Precalentamiento de la chatarra: Hasta el momento, la carga de chatarra es a temperatura ambiente, sin embargo existen intereses por iniciar el proceso de fabricación de acero con precalentamiento de la chatarra (con el calor de los gases de escape en contracorriente) y precalentamiento de cubas. Investigaciones indican que la recuperación de energía está entre 30 y 50 KWh/t.
- En la actualidad, se ha difundido mucho el concepto de “hornos de precalentamiento” uno de ellos se conoce como «Consteel evolution» y se caracteriza por el uso de quemadores en el túnel de precalentamiento de la chatarra e inyectores para poscombustión en el horno. En el nuevo sistema, el túnel de precalentamiento estaría dividido en dos secciones. La primera tendrá

quemadores de alta eficiencia montados cerca de la carga que pasa por debajo y estará puesta aguas arriba de la succión de gas.

- El otro concepto se conoce como de «Simetal EAF Quantum». Es una extensión de la idea básica del «shaft furnace», en la que se opta por la carga de la cuba mediante un carro elevador y un canalón, eliminando cestas y grúa. Este concepto difiere con la anterior generación de hornos con cuba en los siguientes aspectos:
 - Mejor estanqueidad, con menor ingreso de aire, debido a que la estructura de la cuba es fija y la carcasa inferior es móvil;
 - Diseño trapezoidal de la cuba, para una mejor distribución de la chatarra y un precalentado eficiente, particularmente cuando la chatarra es de baja densidad;
 - Mejor caída de la chatarra en la carcasa, mediante el nuevo diseño del sistema de retención;
 - Mayor pie líquido, para favorecer la transferencia de calor y la velocidad de fusión; y
 - Fusión libre de *flickers* gracias a la nueva configuración de cuba y electrodos.
- La carga única, para disminuir la inversión y aumentar la productividad. Debido a que con el aumento del tamaño de los hornos, han crecido el número de cestas necesarias para completar la carga, esto se traduce en una pérdida de productividad, (tiempo para el ascenso de los electrodos, el giro de la bóveda, la descarga de la cesta, nuevamente el giro de la bóveda y el descenso de los electrodos). Y se ha encontrado además que correcta preparación de la chatarra ayuda a incrementar su densidad aparente y disminuir el número de cestas necesarias. Se han diseñado hornos que permiten una sola carga.

Aunque el horno va a tener dimensiones muy grandes, el costo de fundiciones, estructura metálica, equipos auxiliares y equipamiento aguas abajo en toda la acería va a ser menor. Las cucharas, las grúas, el horno de cuchara van a ser de menor tamaño, así como la torreta de la máquina de colada continua, el *tundish* y el carro porta *tundish*, entre otros elementos.

- En plantas existentes, el paso a una carga única está directamente relacionado con la necesidad de aumentar la producción. Es el caso de SMI Butler, con horno de carcasas gemelas (*twin hell*), donde se requería pasar de 2,7 a 3 Mt/año. En esta planta al modificarse la primera carcasa se verificó un aumento en la rotura

de electrodos (una por día), debido a la mayor altura de la columna. Para mejorar esta situación se hicieron modificaciones en la programación de quemadores, la aplicación de potencia y la configuración de la carga de chatarra. Se hizo necesario aumentar el diámetro del círculo de electrodos y cambiar el diseño de la unión entre electrodos para reforzarla.

Es necesario mencionar que algunos hornos no convencionales, como los llamados *shaft furnace*, cuando operan con el 100% de chatarra también son de carga única.

- Inyectores: En cuanto a esto los avances han sido muy significativos. La introducción de carbono, inyectores de oxígeno y gas natural mediante las paredes del horno posibilitan la eliminación de la introducción de lanzas por la puerta de trabajo. Esto se traduce en una práctica a puerta cerrada, con un ingreso inferior de aire y menos pérdidas por radiación. La automatización permite disminuir la necesidad de personal en la plataforma. Se puede aportar la energía química necesaria para acelerar la fusión aumentando la productividad; obtener una escoria espumosa más estable y lograr cierto grado de recuperación de energía mediante poscombustión de los gases en la atmósfera del horno.

La incorporación de inyectores de cal procura bajar el consumo global de cal, tener pérdidas menores de finos de cal hacia el sistema de evacuación de humos, control de la escoria durante el proceso, disminuir la presencia de finos y polvos dentro del equipo de la acería y sus consecuencias en cuanto a salud ocupacional.

En la implementación de los inyectores de cal, se requirió mejoras en el diseño del *dispenser*, para que tengan mayor proximidad a la escoria, así mismo, la implementación de una franja granulométrica de cal apropiada para tener consistencia en la inyección y una disolución más rápida.

El sistema de inyección también ha mejorado en cuanto el control independiente de cada inyector, la posibilidad de utilizar orificios de diferentes diámetros y el uso de filtros de humedad en el circuito de aire comprimido.

- Automatización, control de proceso y robots. Además de lo ya mencionado en cuanto al control automático de preparación de las cestas, hasta la operación del

sangrado, vale la pena mencionar los sistemas digitales que permiten la regulación de los electrodos, robotización de procedimiento tales como toma de muestras, medición de oxígeno disuelto, temperatura del acero, armado de electrodos en el horno, reparación del material refractario, entre otros.

- Control en línea de escoria espumosa. Se evalúa la escoria espumosa mediante sistemas de medición del ruido, variables eléctricas y vibraciones de la carcasa del horno. Lo anterior se ha utilizado para la toma de decisiones en el proceso y para la regulación de adición de carbono.
- Control dinámico del proceso mediante el análisis de los gases de salida. Se han desarrollado diferentes tecnologías para el análisis en línea de los gases de salida del horno. Una gran cantidad de hornos tienen instalado estos sistemas, que suministran información al operador y al ingeniero de procesos para la toma de decisiones e interpretar distintas situaciones, tales como bajar el consumo de gas natural o incrementar el oxígeno para mejorar el balance energético en los períodos en que hay alto porcentaje de CO y H₂, ya que se pierde energía en el gas de escape. En algunos casos se pueden detectar perforaciones de paneles, predecir temperatura y carbono finales de manera equivalente al control dinámico que se realiza en los convertidores al oxígeno y para otros fines de control de procesos
- La predicción de carbono ha mostrado resultados verídicos en distintas plantas, especialmente para los tenores de carbono bajos. Pero se está trabajando con estos algoritmos para mejorar la estadística de predicción. El modelo de predicción de temperatura también muestra resultados precisos. Existe una relación clara entre el «progreso de la fusión» y la temperatura del baño que se mide. Para mejorar esta predicción, se está trabajando en la mejora de los sensores de temperatura y caudal del gas de salida.

2.3.6 Impacto de recuperación energética.

Para ese concepto, se tienen los avances más relevantes en la recuperación energética.

Recuperación de energía. Debido a que los avances en cuanto a la disminución del consumo de energía de los hornos son cada vez más pequeños, se centra el interés en la recuperación de energía de los gases para la producción de agua caliente o vapor y eventualmente energía eléctrica. Esta tecnología se ha implantado en los convertidores de oxígeno, y en la acería eléctrica, que presenta muy bajo consumo de vapor o definitivamente no lo tiene. Aunque esto no tiene mayor aplicación, en países Europeos el

comercio en créditos de carbono y el alto costo de la energía eléctrica justifican la inversión. (Madias, 2011)

- Acero Latinoamericano, propone el sistema de enfriamiento evaporativo, que consiste en retirar el calor de los gases en el ducto de salida. La siderurgia lo ha usado ampliamente para los convertidores de oxígeno y los hornos de precalentamiento de planchones de viga galopante. También se estudian calderas de calor residual y acumuladores tipo Ruth. Para la generación de electricidad, se propone utilizar el ciclo de Rankine o sobrecalentar el vapor mediante quemadores de gas natural para usarlo en turbinas.
- En John Deere en Estados Unidos y en la planta de Georgsmarienhütte en Alemania se han desarrollado experiencias previas de recuperación de calor en horno de arco en una fundición. En esta planta el sistema de enfriamiento evaporativo en la extracción de humos de un convertidor, se cambió este último por un horno eléctrico de arco.
- En 2012 la acería alemana llamada Elbe Stahlwerke Feralpi realizó la implantación de un sistema de recuperación de energía. La energía recuperada se transforma en vapor, que se venderá a una empresa de energía local y a una turbina de ciclo orgánico de Rankine para la generación de energía eléctrica de 2,5 MW [32].
- Hyundai Steel en su planta de Incheon, Corea, integró la recuperación de energía en cuatro hornos eléctricos, para la producción de vapor para la venta.
- A comienzos del 2012, se publicó la instalación de un horno del tipo CONARC (de cubas gemelas) con recuperación de calor en China. *En este caso el gas se dirige a dos calderas de calor residual que permiten enfriar el gas y usan una gran proporción de la energía térmica recuperada para la generación de vapor que se utilizará en un desgasificador. Se podrán generar hasta 60 t de vapor.*

2.3.7 Consumos específicos de energía de cada tipo de horno.

A lo largo de las innovaciones y propuestas, el mejoramiento de las condiciones de productividad y reducción del consumo de combustible se han buscado a través de:

- a. Realización de la combustión en un volumen muy reducido.
- b. Uso de viento precalentado o de aire enriquecido en oxígeno.
- c. Uso de un combustible de calidad.
- d. Reducción de pérdidas térmicas hacia el exterior por aumento de la sección y capacidad del horno.

Para producir acero en el horno de arco eléctrico (EAF) es necesaria aportar una determinada cantidad de energía, la que depende del tipo de carga metálica, del tipo de

producto, de la temperatura final, del tipo y cantidad de escoria, así como de otros factores. Una operación inadecuada del EAF, con elevados tiempos de paradas, frecuentes aperturas de la bóveda, etc., aumenta el consumo de energía por tonelada, lo que implica un incremento en los costos de producción.
http://aeipro.com/files/congresos/2009badajoz/ciip09_1583_1590.2681.pdf

A continuación en la tabla 35, se presentan los consumos específicos de energías para los principales hornos utilizados en las acerías.

Tabla 35. Consumos energéticos de los hornos de acerías.

Tipo de horno	Consumo de energía
Arco eléctrico	Consumo de energía para carga sólida: 700 a 900 Kw./h por Tn de acero. Consumo de energía para carga líquida: 300 a 450 Kw./h por Tn de acero.
Hornos de fusión	745 Kw/h por Tn de acero

Fuente: (Gomez V. , 2009)

2.4 LA INDUSTRIA DEL VIDRIO

El vidrio es un producto artificial a partir de materias primas que aportan ciertos óxidos, como pueden ser SiO₂, CaO, Na₂O, etc., en una producción determinada. El paso de las materias primas al vidrio se hace a través de reacciones químicas, obteniéndose la masa vítrea a alta temperatura.

El sector del vidrio es bien diverso, tanto por los productos que fabrica como por las técnicas de producción que emplea. Los productos pueden ser desde copas de cristal de plomo artísticamente hechas a mano hasta vidrio flotado en grandes cantidades para los sectores de construcción y automoción. Las técnicas de fabricación varían desde los pequeños hornos eléctricos que se usan en el subsector de fibra cerámica hasta los hornos regenerativos de caldeo cruzado que empleados en el subsector de vidrio plano, que producen hasta 700 toneladas diarias.

Los insumos del proceso pueden dividirse en cuatro categorías principales: materias primas (materiales que forman parte del producto), energía (combustibles y electricidad), agua y materiales auxiliares (agentes de proceso, materiales de limpieza, productos químicos de tratamiento de aguas, etc.). Las materias primas que se usan en esta industria son en gran medida compuestos inorgánicos sólidos, ya sean minerales naturales o

productos artificiales, y pueden ser materiales muy gruesos o polvo fino. También se utilizan muchos líquidos y gases, ya sea como materiales auxiliares o como combustibles.

Aunque el sector produce particularmente artículos básicos, se han ideado innumerables maneras de añadir valor a los productos de gran volumen para evitar que pierda competitividad. Vende más del 80% de su producción a otros sectores y, en términos globales, depende en gran medida de la construcción, bebidas y alimentación. Sin embargo, algunos de los subsectores de menor volumen producen artículos técnicos o de consumo de gran valor.

La fabricación de vidrio y de productos de vidrio consta de cuatro etapas: Mezclado de materias primas y vidrio reciclado, fundición, moldeo y por ultimo un tratamiento de alivio de tensiones. La materia prima usada consiste en: arena silíceo, ceniza de soda, caliza, feldespato y bórax.

En este proceso se produce vidrio plano, vidrio para envases y objetos de vidrio prensado y/o soplado.

Tabla 36. Tipos de Vidrio y sus Características

Tipo de vidrio	Nombre	Características
Comerciales	Soda-Cal	Este tipo de vidrio es el más utilizado, pues sus propiedades lo hacen adecuado para su uso con luz visible. Los recipientes hechos de vidrios de soda - cal son virtualmente inertes, no contaminado la materia que contienen ni su sabor. Son poco resistentes al choque térmico.
	Plomo	Utiliza óxido de plomo en lugar de óxidos de calcio, y óxido de potasio en lugar del óxido de sodio, y se conoce comúnmente como cristal al plomo. Los vidrios al plomo tienen un alto índice de refracción y una superficie relativamente blanda, lo cual permite una fácil decoración por esmerilado, corte o tallado.
	Borosilicato	Están compuestos principalmente de sílice (70-80%) y óxido bórico (7-13%) con pequeñas cantidades de álcalis (óxidos de sodio y potasio) y óxido de aluminio. Su principal característica es una buena resistencia a los choques térmicos.
Especiales	Sílice vítreo.	Son vidrios hechos casi exclusivamente de sílice. Son necesarias temperaturas de fusión sobre 1.500°C.
	Vidrios de aluminosilicato.	Contienen cerca de un 20% de óxido de aluminio (Al ₂ O ₃), además de óxido de calcio, óxido de magnesio y óxido de boro en cantidades relativamente pequeñas.
	Vidrios de sílice álcali - bario.	Contiene una cantidad mínima de óxidos de plomo, bario o estroncio.
	Vidrios de borato.	Contienen pequeñas cantidades o nada de sílice. Son usados para soldar vidrios, metales o cerámicas, a relativamente, bajas temperaturas.
	Vidrios de fosfato.	Consisten principalmente en mezclas de pentóxido de vanadio (V ₂ O ₅) y pentóxido de fósforo (P ₂ O ₅).

Fuente: British Glass manufactures Confederation (BGM) 1999 -(Comisión Nacional de Medio Ambiente -Región Metropolitana, 1999)

2.4.1 Proceso de formado.

En general los procesos de formado más comunes, son los usados en la fabricación de los siguientes tipos de productos:

- Envases.
- Vidrios planos.
- Ampolletas.

2.4.1.1 Fabricación de envases.

a. Soplado por boca.

En la operación de soplado por boca, una varilla de hierro hueca o “caña” es sumergida en un crisol que contiene el vidrio fundido, para recoger una porción en la punta por rotación de la caña. El vidrio tomado, es enfriado a cerca de 1000°C y rotado contra una pieza de hierro para hacer una preforma. La preforma es entonces manipulada para permitir su estiramiento, nuevamente calentada y soplada para que tome una forma semejante a la del artículo que se quiere formar, siendo luego colocada en el interior de un molde de hierro o madera y soplada para darle su forma final.

b. Fabricación semi-automática de botellas.

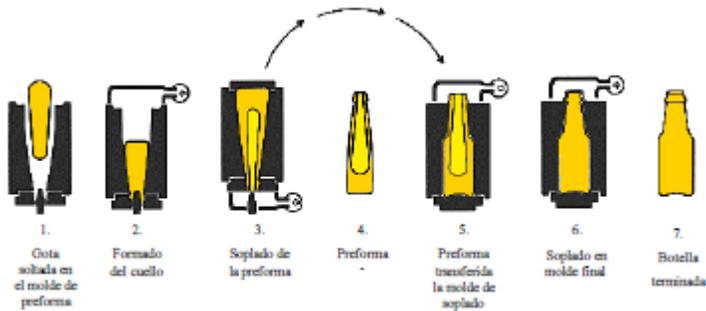
Al igual que en el soplado a boca, la operación se inicia tomando una porción de vidrio en una varilla, la cual se hace fluir en un molde de preformado hasta que ha entrado una cantidad suficiente, momento en que el vidrio es cortado con unas tijeras.

En el fondo del molde de preforma hay un vástago cuya función es hacer una abertura en la pieza, por la que es soplado el aire que dará forma al producto. Una bocanada de aire a presión impulsa el vidrio hacia arriba contra las paredes del molde de preforma y una placa ubicada en la parte superior, hasta formar una preforma, siendo ésta una botella de paredes gruesas y forma vagamente semejante al producto final. La preforma es entonces removida y transferida al molde final, donde nuevamente es soplada hasta adquirir su forma final. El molde es entonces abierto, y la botella removida y colocada en el túnel de recocido.

c. Producción automática de envases.

El principio de la producción automática es exactamente el mismo que el descrito anteriormente. Dejándose caer el vidrio en el molde como una gota (ver Figura 51).

Figura 51. Formado Automático de Botellas.



Fuente: British Glass Manufacturers Confederation (BGMC), 1999.

Fuente: British Glass manufactures Confederation (BGMC) 1999- (Comision Nacional de Medio Ambiente -Región Metropolitana, 1999)

d. Vidrio prensado

Un vástago es usado para dar forma a la superficie interior del artículo, al empujar el vidrio contra el molde exterior. El prensado puede ser hecho tanto por un operador, como en forma completamente automática.

2.4.1.2 Fabricación de vidrio plano.

a. Procesos de flotación.

El vidrio es mantenido en una atmósfera químicamente controlada a una temperatura bastante alta (1000 °C) y por un tiempo lo suficientemente largo para que el vidrio fundido quede libre de irregularidades y su superficie plana y paralela. En esta condición, el vidrio es vertido sobre una superficie de estaño fundido, que al ser plana permite obtener un producto de iguales características. La lámina es enfriada mientras está a lo largo del estaño fundido, hasta que la superficie alcanza la consistencia requerida para ser transportada sobre una cinta sin que el vidrio quede marcado (aproximadamente 600°C). La lámina pasa luego a través de un horno túnel de recocido, en tanto es llevada a su almacenaje, donde computadoras determinarán el corte de la lámina de acuerdo a la exigencia del cliente.

b. Proceso de rodillo.

Consiste básicamente en pasar un flujo continuo de vidrio fundido a través de rodillos enfriados por agua.

2.4.1.3 Fabricación de ampollitas.

En la fabricación de ampollitas, un flujo de vidrio fundido fluye desde el horno hacia abajo entre dos rodillos enfriados por agua y sobre la máquina para formado de preformas. Una vez que abandona los rodillos, la pieza es llevada a una plancha con una serie de orificios, formando una fila continua de piezas con agujeros. A medida que las preformas

son transportadas, una cadena continua de sopladores inyecta aire en las piezas a través del agujero, transformando la ampolla en ampolletas dentro de un molde giratorio, que se abre y cierra alrededor de ellas. Mientras se desplaza sobre la cinta, la ampolleta ya formada abandona el molde, siendo enfriada por un flujo de aire (enfriadores jets) donde es removida de la cinta para caer en el cucharón de una mesa giratoria. Este la deposita en una cinta transportadora, que las lleva a través del horno túnel de recocido y posteriormente a los enfriadores de aire, para luego ser inspeccionadas y empacadas. Las partes no utilizadas de la preformas pasan directamente al sistema de reciclado para ser nuevamente fundidas.

2.4.2 Procesos utilizados

La mayoría de los procesos y técnicas de fabricación que suelen emplearse en el sector del vidrio se clasifican en cinco fases básicas: manipulación de los materiales, fundición, conformación, procesos finales y embalaje.

Por su diversidad, la industria del vidrio utiliza una amplia gama de materias primas. Las técnicas de manipulación de materiales son comunes a muchas industrias. El mayor problema es el control del polvo generado por la manipulación de materiales finos. Las principales materias primas empleadas para la fundición son materiales para el soplado de vidrio (por ejemplo, arena de sílice o desperdicios de vidrio), materiales intermedios o modificadores (por ejemplo, ceniza de sosa, caliza o feldespato) y agentes colorantes o decolorantes (por ejemplo, cromita férrica u óxido de hierro).

La fundición (la mezcla de materias primas a alta temperatura para obtener vidrio fundido) es el paso más importante del proceso productivo. Trata de una compleja combinación de reacciones químicas y procesos físicos, y puede dividirse en varias fases:

- caldeo;
- fusión primaria;
- afino
- homogenización
- acondicionamiento.

A continuación se muestran las principales técnicas de fundición.

Los **hornos regenerativos** usan sistemas regenerativos de recuperación del calor. Los quemadores generalmente se colocan en las lumbreras de gases de escape o aire de combustión o debajo de ellas. El calor de los gases de escape se usa para precalentar el aire antes de la combustión, haciendo pasar los gases por una cámara revestida de material refractario, que absorbe el calor.

El horno sólo calienta por un lado cada vez. A los veinte minutos, se cambia de lado y se hace pasar el aire de combustión por la cámara previamente calentada con los gases de escape. La temperatura de precalentamiento puede alcanzar hasta 1.400°C, con lo cual se

logra una eficiencia térmica muy elevada. En el horno regenerativo de caldeo cruzado, los quemadores y lumbreras de combustión se sitúan a ambos lados del horno y las cámaras de regeneración a uno u otro lado. El horno regenerativo de caldeo directo se basa en los mismos principios de funcionamiento, pero las dos cámaras de regeneración se ubican en un extremo del horno.

En los **hornos recuperativos** el calor se recupera a través de intercambiadores (llamados recuperadores) y el aire de combustión está sujeto a un precalentamiento permanente por medio de los gases de escape. Con los recuperadores metálicos, la temperatura de precalentamiento del aire se limita a 800°C. La capacidad de fusión específica (por unidad de superficie) de los hornos recuperativos es un 30% inferior a la de un horno regenerativo. Los quemadores están situados a ambos lados del horno, en dirección transversal al flujo de vidrio, y caldean regularmente por ambos lados. Este tipo de horno se utiliza principalmente cuando se necesita que la explotación sea muy flexible con una inversión inicial mínima, en especial si el proceso trabaja a una escala demasiado reducida para que el uso de regeneradores sea económicamente viable. Es más adecuado para las instalaciones de pequeña capacidad, aunque no es raro hallar hornos de mayor capacidad (hasta 40 toneladas diarias).

La **oxicombustión** implica la sustitución del aire de combustión por oxígeno (con una pureza superior al 90%). Al eliminar la mayor parte del nitrógeno de la atmósfera de combustión se reduce el volumen de los gases de escape en dos terceras partes. Por lo tanto, es posible ahorrar energía porque no es necesario calentar el nitrógeno atmosférico a la temperatura de la llama.

También se evita en gran medida la formación de NOx térmicos. En general, los hornos de oxicombustión tienen el mismo diseño que los hornos recuperativos, con varios quemadores laterales y una sola lumbrera de escape de gases. No obstante, los hornos diseñados para este tipo de combustión no emplean sistemas de recuperación de calor para precalentar el oxígeno suministrado a los quemadores.

Los **hornos eléctricos** disponen de una cámara con revestimiento refractario sustentada por un armazón de acero, con electrodos insertados en el lateral, en la parte superior o, lo que es más habitual, en el fondo del horno. La energía de fusión se obtiene por calentamiento resistivo, con el paso de la corriente por el vidrio fundido. Esta técnica se aplica normalmente en los hornos pequeños, en particular para fabricar vidrios especiales. La viabilidad económica de estos hornos tiene un límite máximo de capacidad, que depende del costo de la electricidad en comparación con los combustibles fósiles. Sustituyendo estos últimos, se evita la formación de productos de la combustión.

La **fusión combinada por medio de combustibles fósiles y electricidad** puede adoptar dos formas: caldeo principal con combustible fósil y sobrealimentación eléctrica; o caldeo básicamente eléctrico apoyado por combustible fósil. La sobrealimentación eléctrica es una forma de aumentar el calor en el horno haciendo pasar una corriente eléctrica por los

electrodos situados en el fondo del tanque. Una técnica menos común es utilizar gas o petróleo como combustible de apoyo en un horno calentado principalmente con electricidad.

Los **hornos discontinuos** son usados cuando se necesita producir vidrio en menores cantidades, especialmente si se cambia la fórmula periódicamente. En estos casos, se utilizan hornos de crisoles o tanques diarios para fundir lotes concretos de materias primas. Básicamente, un horno de crisoles consta de una sección inferior para precalentar el aire de combustión y una sección superior que contiene los crisoles y actúa como cámara de fusión. Los tanques diarios son de mayor capacidad, del orden de 10 toneladas diarias. Estructuralmente, se parecen mucho al cuadrángulo de un horno convencional, pero se llenan con una sola carga diaria.

Los **hornos de diseño especial** tienen por objeto mejorar la eficiencia del proceso y atenuar sus efectos en el medio ambiente. Los más conocidos son los hornos LoNOx y el Flex Melter. El subsector de **vidrio para envases** es muy diverso y en él se utilizan casi todas las técnicas de fundición descritas. El proceso de conformación se realiza en dos fases: la conformación inicial de la pieza en tosco por prensado con un émbolo percutor o por soplado con aire comprimido; y el moldeo final por soplado para obtener la forma hueca terminada. En consecuencia, estos dos procesos se denominan “prensado-soplado” y “soplado-soplado”, respectivamente. Para fabricar los envases se emplean casi que exclusivamente máquinas de secciones individuales.

El **vidrio plano** se fabrica por lo general con hornos regenerativos de caldeo cruzado. El proceso de flotación consiste en verter el vidrio fundido en un baño de estaño para formar una cinta con las superficies superior e inferior, que se mantienen paralelas por el efecto de la gravedad y de la tensión superficial. Del baño de flotación, la cinta de vidrio pasa al túnel de recocido, donde se enfría gradualmente para reducir los esfuerzos residuales. También pueden aplicarse revestimientos en línea para mejorar las prestaciones del producto (por ejemplo, vidriados de baja emisividad).

Para fabricar **fibra de vidrio de filamento continuo**, se usan hornos recuperativos u hornos de oxcombustión. El vidrio circula desde el horno hasta el canal de distribución, donde pasa por unos casquillos de trefilado situados en su base para formar filamentos continuos. Estos se estiran y pasan juntos sobre un rodillo o cinta donde reciben un revestimiento acuoso individual. Con los filamentos revestidos se forman haces (torones) para su tratamiento posterior.

El subsector de **vidrio doméstico** abarca una gama muy diversa de productos y procesos, desde la fabricación manual de cristal de plomo hasta los procesos mecanizados de producción en serie que se utilizan para fabricar vajillas en grandes cantidades. En este subsector se emplean casi todas las técnicas de fundición anteriormente descritas, desde los hornos de crisoles hasta los grandes hornos regenerativos. Los procesos de conformación pueden ser manuales, automáticos o semiautomáticos y los productos

obtenidos pueden someterse a operaciones de acabado en frío (por ejemplo, el cristal de plomo suele cortarse y pulimentarse).

El subsector de **vidrios especiales** también comprende una gran variedad de productos, según su composición, método de fabricación y aplicación. Los procesos de fundición más comunes son los hornos recuperativos, hornos de oxigás, hornos regenerativos, hornos eléctricos y tanques diarios. Dada la diversidad de productos, se emplean muchas técnicas de conformación. Algunas de las principales son las de prensado-soplado, laminación, prensado de cintas, extrusión de tubos, trefilado y disolución (vidrio soluble).

Los hornos de **lana de vidrio** suelen ser hornos eléctricos, hornos recuperativos a gas u hornos de oxicombustión. El vidrio fundido fluye a lo largo de un canal de distribución y pasa a través de unos casquillos de un solo orificio hasta unas hilanderas rotativas centrífugas. Las fibras se forman por centrifugado con atenuación de los gases inflamados. A continuación se pulveriza una solución acuosa de resina fenólica sobre las fibras. La fibra revestida pasa por aspiración a un transportador móvil que la lleva a un horno de secado y curado.

La **lana de roca** habitualmente se fabrica en hornos de cubilote alimentados con coque. El material fundido se recoge en el fondo del horno y fluye a través de una artesa corta hasta la máquina hiladora. Se usa aire para atenuar las fibras y dirigir las a las cintas de recepción. Por medio de una serie de toberas, se pulveriza una solución acuosa de resina fenólica sobre las fibras. El resto del proceso es básicamente igual que el de fabricación de lana de vidrio.

La **fibra cerámica** se produce exclusivamente en hornos eléctricos. Para convertir el material fundido en fibra se utilizan norias de gran velocidad o chorros de aire de alta presión, luego las fibras pasan a una cinta de recepción. En esta fase, el material puede embalsarse o transformarse primero en una manta para después embalsarse como producto o afieltrarse. También puede pasar a algunos procesos finales.

En la producción de **fritas** se usan hornos continuos y discontinuos. Es normal fabricar una gran variedad de fórmulas en pequeños lotes. Los hornos suelen caldearse con petróleo o gas natural, muchas fábricas utilizan la oxicombustión. Los hornos continuos pueden ser de caldeo cruzado o de caldeo directo, con un solo quemador. Los hornos discontinuos son recipientes refractarios cuadrados o cilíndricos, montados con un determinado grado de rotación. El material fundido puede templarse directamente en un baño de agua o hacerse pasar entre rodillos enfriados con agua para obtener copos de producto.

2.4.3 Demanda de Energía en la industria del vidrio

La fabricación de vidrio es una actividad que consume mucha energía y la elección de la fuente de energía, de la técnica de caldeo y del método de recuperación de calor tiene una influencia decisiva en el diseño del horno y en el rendimiento económico del proceso. La cantidad de energía empleada en la obtención de vidrio depende de muchos factores, como

son materias primas utilizadas, el tipo de vidrio, la clase de producto, los equipos empleados, el modo de operación de éstos (funcionamiento continuo o discontinuo), etc. Las tres fuentes de energía más importantes en la fabricación de vidrio son el gas natural, el fuel-oil y la electricidad. En cualquier caso, el consumo energético es importante; ello debido, a los siguientes factores:

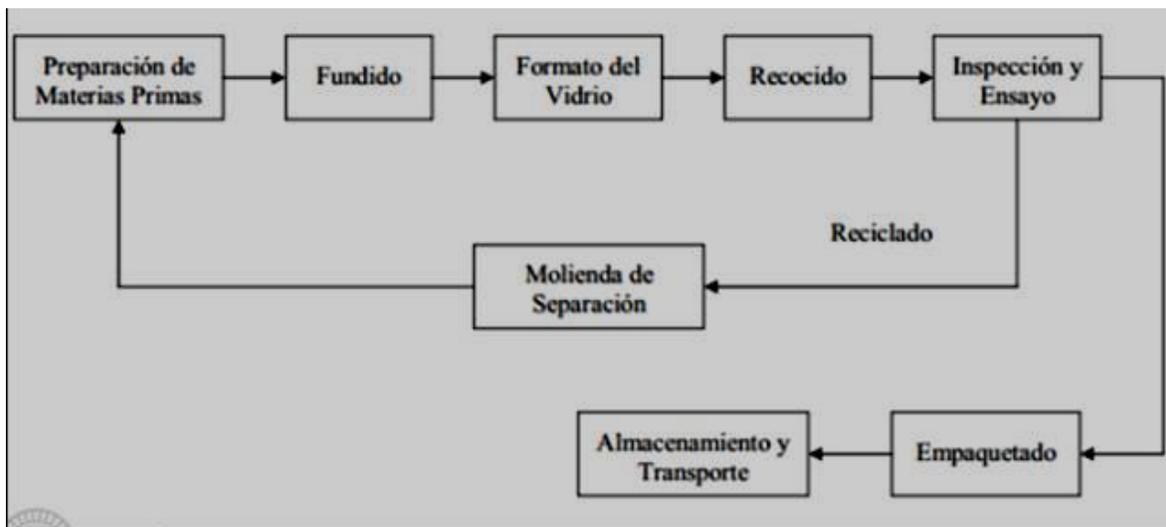
- Temperatura de fusión-afinado elevada (1.500°C – 1.600°C), lo que supone unas necesidades de energía teórica realmente importantes.
- Bajos rendimientos de los hornos de fusión convencionales. Debe tenerse en cuenta que, en la actualidad, se consiguen valores máximos del rendimiento global del horno-equipo de recuperación de calor, próximos al 50% para ciertos hornos con regeneradores y llamas en bucle. Los valores normales se sitúan entre un 25 y un 40%. Sin embargo, en algunos hornos pequeños de crisol, este valor es inferior al 5%.
Estos rendimientos han sido superados ampliamente por los hornos eléctricos, cuya eficiencia energética se sitúa entre un 60 y un 85%, pero que por motivos de costo de la energía eléctrica su uso es muy limitado.
- Enfriamiento controlado. No sólo no se aprovecha el calor del vidrio fundido, sino que además debe aportarse energía para controlar dicho enfriamiento.
- Otros factores específicos de cada proceso en particular.

En definitiva, las pérdidas de calor inherentes a los procesos de fabricación actualmente empleados, hacen que todavía se esté muy lejos del consumo teórico, esto abre un margen de esperanza a las posibilidades de investigación de nuevas, tecnologías.

En general, la energía requerida para fundir el vidrio representa más del 75% del consumo total del proceso de fabricación. El costo de la energía de fundición está entre los de mayor cuantía en la explotación de las fábricas de vidrio razón por la que se incentiva a los operarios a reducir el consumo de energía.

En la operación de dosificación y mezcla básica se utiliza básicamente energía eléctrica para accionamiento mecánico. En ciertos casos, se usa además un combustible con el objeto de secar la arena.

Figura 52. Proceso de fusión, afinado, homogenización y acondicionamiento.



Fuente: (Comisión Nacional de Medio Ambiente -Región Metropolitana, 1999)

2.4.3.1 Conformado

El comportamiento viscoso-plástico de los vidrios a alta temperatura facilita su moldeado en un amplio intervalo térmico, empleando para ello diferentes procedimientos en función del tipo de vidrio fabricado: colado, soplado, prensado, estirado, flotado, laminado, centrifugado y fibrado.

Procesos secundarios y de acabado.

- Requemado
- Recocido
- Templado
- Pintado
- Decorado.

Comúnmente, la energía necesaria para la fusión del vidrio supone más del 75% del total de energía consumida en el proceso de fabricación, por lo que la elección de técnicas que puedan reducir el consumo energético es de vital importancia.

La fabricación de cualquier producto de vidrio es esencialmente un proceso energético y, por tanto, la elección de la fuente de energía y calor y de los sistemas de recuperación son los aspectos que rigen el rendimiento económico del proceso, la eficiencia energética de la fusión y las afecciones medioambientales que se pueden generar.

El costo de la energía es uno de los factores más importantes a la hora de considerar los costos de inversión y de operación para las diferentes instalaciones. Se debe tener en

cuenta que el consumo energético representa entre el 20 y el 30% del costo total del producto final.

Tabla 37. Consumo de energía en el proceso del vidrio

	ETAPAS	% CONSUMO DE ENERGÍA
Combustibles (Energía No Eléctrica) (100%) ^a	Hornos de Fusión	75-85
	Canales y feeders	6-7,5
	Arcas de Recocido y Decorados	2-4
	Cadenas de Temple	2,5
	Calderas y Calefacción	1,0
	Transporte	0,4
	Hornos de Retracción	0,3
Consumo Energía Eléctrica (100%) ^b	Transformaciones Mecánicas	80 ^c
	Electrotermia	20 ^d

Fuente: (Comision Nacional de Medio Ambiente -Región Metropolitana, 1999)

En la industria del vidrio pueden alcanzarse mejoras significativas en el nivel de eficiencia de energía, por medio de control de combustión, aislamiento de pared del horno, recuperación del calor residual, balance de calor, calentamiento eléctrico del antehogar (forehearth), usando un gran número de vidrio de reciclado (cullet) y por una técnica discontinua de baja temperatura de fusión. Este manual cubre los procesos de producción en la industria del vidrio, características del consumo de energía en los procesos de producción de vidrio, promoción sobre la tecnología de conservación de energía: hornos de fundición (smelting furnaces), túnel de recocido (lehr), balance de calor en el horno de fundición y el túnel de recocido, entre otros –

A continuación se enumeran las principales técnicas aplicables para reducir el consumo de energía.

- Técnica de fundición y diseño del horno (por ejemplo, regeneradores, recuperadores,
- Fundición eléctrica, oxicomustión y sobrealimentación eléctrica).
- Control de la combustión y elección del combustible (por ejemplo, quemadores bajos en
- Emisiones de NOx, combustión estequiométrica, caldeo con petróleo o gas).
- Uso de desperdicios de vidrio.
- Calderas de recuperación.
- Precalentamiento de los desperdicios de vidrio o de la carga.

2.4.4 Niveles de emisión y consumo

La producción del proceso puede dividirse en cinco categorías principales: producto, emisiones atmosféricas, residuos líquidos, residuos sólidos y energía. el proceso de fabricación consume mucha energía, por lo que, los combustibles pueden ser uno de sus insumos más importantes.

Los mayores problemas medioambientales asociados al sector del vidrio son las emisiones atmosféricas y el consumo de energía. La fabricación de vidrio es un proceso que requiere altas temperaturas y que consume mucha energía, llevando aparejadas las consiguientes emisiones de productos de la combustión y la oxidación térmica del nitrógeno atmosférico, es decir, dióxido de azufre, dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno. Las emisiones de los hornos también contienen polvo y concentraciones menores de metales.

2.4.4.1 Técnicas a considerar en la determinación de las MTD

Muchos de los subsectores que integran la industria del vidrio emplean grandes hornos continuos que duran hasta doce años. Estos hornos requieren de una importante inversión inicial que debe renovarse cada cierto tiempo. La forma más económica de aplicar cambios radicales en la tecnología de fusión es hacerlos coincidir con las reformas periódicas del horno y lo mismo cabe decir de las complejas técnicas secundarias de reducción de emisiones. Sin embargo, también es posible incorporar muchas mejoras, incluidas las técnicas secundarias, durante la campaña de trabajo.

A continuación se describen brevemente las técnicas más usadas para controlar cada una de las sustancias que emiten los procesos de fundición y algunos de los procesos finales. Se concentra sobre todo en las emisiones atmosféricas, ya que normalmente son las más importantes generadas en los procesos de fabricación de vidrio. (Comision Nacional de Medio Ambiente -Región Metropolitana, 1999).

El estudio incluye técnicas de abatimiento, específicamente la Reducción Catalítica Selectiva, conocida por sus siglas en ingles SCR (Selective Catalytic Reduction) y Reducción Catalítica No Selectiva, conocida por sus siglas en ingles SNCR (Selective Noncatalytic Reduction). Estas técnicas consisten en tratar los gases que contienen NOx con amoniaco, para obtener nitrógeno y agua. Se hace una comparación de las siguientes tecnologías básicas:

- Modificación de la combustión.
 - Oxi-combustión
 - Quemadores de bajo NOx
- Modificaciones del proceso.
 - Calentamiento de reciclado.
 - Hornos eléctricos.

- Modificaciones a la poscombustión.
 - Reducción selectiva catalítica (SCR).
 - Reducción selectiva no catalítica (SNCR).

En la tabla 38, se muestra la reducción de emisiones asociada a la aplicación de cada una de las tecnologías antes mencionadas, comparadas con emisiones sin control.

Tabla 38. Reducción de misiones para varias tecnologías en la industria del vidrio

Tecnología	Reducción de NO (%)
Modificación de la combustión	
Quemadores de bajo NOx	40
Oxi-combustión	85
Modificación del proceso	
Modificación del horno	75
Pre calentamiento de reciclado	25
Horno eléctrico	10
Modificaciones a la post combustión.	
SCR	75
SNCR	40

Fuente: EPA 1994.

Fuente: (Comision Nacional de Medio Ambiente -Región Metropolitana, 1999)

Algunas de las conclusiones del estudio citado son:

- La oxi-combustión, parece ser la tecnología más efectiva, alcanzando reducciones del 85%.
- Las reducciones de NOx por pre calentamiento de reciclado variaron ampliamente en los datos de origen.
- Los quemadores de bajo NOx muestran ser relativamente efectivos y simples de instalar.
- Se reportaron notables disminuciones de NOx por la utilización de SCR.

2.4.4.2 Impacto energético

Modificaciones a la combustión.

Datos indican que las operaciones con bajo exceso de aire y cambios en la relación de contacto entre aire y combustible, no afectan significativamente la eficiencia en el uso de la energía en el horno.

Las tecnologías de oxi-combustión, demostraron tener un bajo consumo de energía (MW/Ton de vidrio fabricado), siendo así una de las principales razones para su uso.

Se observan ahorros de energía de un 15% en un horno regenerativo de 70 ton/día de capacidad operando a 58 ton/día. Además utilizando casi la misma cantidad de combustible, la producción del vidrio aumenta de 62.7 ton/día a 75.8 (un 21 %). Esto corresponde a un ahorro de energía de entre un 30 y un 40%.

2.4.4.3 Modificación del proceso.

El precalentamiento del reciclado, está diseñado para recobrar calor de los gases de escape y por consiguiente, reducir el consumo de energía en el proceso de fundido del vidrio.

Algunos métodos presentan un ahorro de entre un 8 y un 12% de la energía total.

Los hornos eléctricos, simplemente substituyen por energía eléctrica la energía del combustible empleado en la fusión. Si se considera la eficiencia de producir electricidad a partir del combustible y luego liberarla en la masa fundida, entonces el horno eléctrico es inherentemente menos eficiente.

Modificaciones a la poscombustión.

Existen algunas caídas de presión a través del SCR que requirieron de energía adicional proveniente de un ventilador, la cual depende del tamaño de la planta, se muestra en la tabla 39.

Tabla 39. Consumo de energía del ventilador SCR

Tamaño de la planta [Ton/día]	Energía de Ventilador [kW]
50	6.6
250	33.2
750	99.2

Fuente: EPA 1994.

Fuente: (Comision Nacional de Medio Ambiente -Región Metropolitana, 1999)

Finalmente como principal recomendación se tiene el reciclaje, ya que el vidrio es un material totalmente reciclable y no hay límite en la cantidad de veces que puede ser procesado. Al reciclarlo no se pierden propiedades y si se ahorra una cantidad de energía de alrededor del 30% con respecto al vidrio nuevo.

2.5 INDUSTRIA DE PRODUCCIÓN DE COQUE

La mayor parte de la producción de carbón metalúrgico, que se queda como consumo interno, se emplea para la producción de coque, que en gran parte se destina para exportación y una pequeña parte es para el consumo interno en la industria, principalmente la siderúrgica.

La producción de coque en el primer trimestre de 2013 fue de 500.500,56 toneladas, con un decrecimiento de 9,32%, frente a 551.9306 toneladas del mismo período de 2012, pero con un incremento de 6,98% frente al cuarto trimestre de 2012, cuando la producción llegó a 467.846,19 toneladas. (Ministerio de Minas y Energía, 2014)

En 2011 la producción metalúrgica fue de 4,42 millones de toneladas de los cuales 1,16 Mt (33,06%) se exportó, 2,96 Mt (58,14%) se destinaron a la producción de coque de exportación, y 0,45 Mt (8,80% en consumo interno). (Ministerio de Minas y Energía, 2014)

2.5.1 Hornos de alto horno – de recuperación de subproductos.

También conocidos como hornos verticales utilizados principalmente en el proceso de obtención del coque obtenido de la carbonización de carbón a altas temperaturas (1100°C). Consisten de una cámara angosta, por lo general es de unos 11 a 12 m de longitud, 4 a 6 m de alto y con 0.4 a 0.6 m de ancho en un extremo y de 0.35 a 0.4 m en el otro. La capacidad de los hornos puede ser de 15 a 25 toneladas de carbón.

La construcción de batería de hornos consiste de ladrillo refractario, su estructura básicamente de albañilería importante y costosa en material de alta Sílice, Silimanita y Silico-aluminoso, lo mismo que de ladrillos aislantes. puede consistir entre 10-100 hornos y cuenta con cámaras de calentamiento entre los hornos Resiste elevadas tensiones sometidas durante su empleo, y que se mantiene hermética aún después de la gran expansión causada por el calentamiento

El horno opera de modo intermitente: cada horno se carga y se deshorna en un intervalo de tiempo que va de las 17 a las 36 horas, dependiendo de la marcha general de la Batería y de la cantidad de coque a producir, de modo que la operación de toda la Batería produce continuamente gas con una composición en promedio estable.

La carga de carbón finamente molida se introduce desde una máquina cargadora, a través de los agujeros de cargue situados en el techo, (en general 4), al horno en donde las paredes se hallan a 1100 °C aproximadamente. La superficie del carbón en el horno se nivela y después se cierran los agujeros de carga. La carga se deja en el horno hasta que esté completamente coquizada, generalmente cuando cesa la evolución de la materia volátil. La temperatura promedio en el centro de la carga, al finalizar el periodo de calentamiento es por lo general, de unos 980 °C, y la temperatura promedio de la cámara es alrededor de 1250 °C, las temperaturas varían según las condiciones de operación, el tiempo de coquización, la anchura del horno, el tipo de carbón, el contenido de humedad y la fineza.

Al terminar el tiempo de coquizado se abren las puertas situadas a los extremos del horno, y toda la masa, al rojo vivo es empujada por un pusher (máquina empujadora), de un extremo al otro en menos de 1 minuto.

Figura 53. Hornos de Alto Horno con recuperación de sub productos



El coque se vacía en un carro de apagado, que contiene la carga de un horno, el cual se traslada a la estación de pagado. Luego el coque es estabilizado y tamizado a un tamaño adecuado antes de ser enviado al Alto Horno.

El gas de la coquización, junto con las partículas líquidas arrastradas, sube a través de un cuello de ganso de hierro fundido situado en el techo de la Batería hasta una tubería horizontal recolectora principal, que está conectada con todos los hornos.

El gas es llevado a una torre de condensación llamada el condensador primario, en el que se efectúa la condensación y separación del Alquitrán y del Licor Amoniacal pobre, por diferencia de densidad. El licor amoniacal se bombea de regreso hacia las tuberías para ayudar en la condensación del gas; el resto va a las columnas de destilación de amoníaco.

Además en procesos subsecuentes del gas se retira el alquitrán, de donde se obtienen subproductos ligeros (BTX) y pesados (creosotas y breas).

Los hornos tipo Koppers-Becker son los más frecuentemente usados; todos estos hornos son de tipo regenerativo y tienen regeneradores de calor individuales, por lo general a lado y lado, y debajo del horno. El gas rico se quema en las cámaras del horno para generar el calor necesario en el proceso de coquización.

EFICIENCIA HORNOS DE RECUPERACIÓN : 62%

2.5.2 Hornos de no-recuperación (NRO)

Las plantas de no-recuperación de subproductos utilizan los gases y alquitranes para la generación del calor necesario en el proceso de coquización, mediante la combustión en las cámaras y en las soleras.

Recientemente el exceso de calor de los gases se está utilizando para generar vapor en procesos de co-generación de energía eléctrica.

Para efectos de la presente discusión los hornos de no-recuperación de subproductos se dividen en: Hornos Pampa, Hornos de Colmena, Hornos de Solera sin o con recuperación de calor.

2.5.3 Tipos de Hornos de no recuperación

1. Hornos de pampa
2. Hornos de Colmena
3. Hornos de Solera

2.5.3.1 Hornos de pampa

El proceso consiste en la carbonización del carbón en un hueco rectangular que se llena parcialmente de carbón y se tapa con tierra, se dejan entradas de aire que permite la combustión de parte de carbón de una manera similar a como se obtiene el carbón vegetal. El calor generado por la quema parcial sirve para la carbonización del resto de carbón. El proceso puede durar hasta 18 días.

2.5.3.2 Hornos de colmena

Los hornos de colmena se llaman así por su construcción en forma semiesférica y, a que luego se tapan con tierra, dando un parecido a las colmenas construidas por insectos como las abejas. En Colombia, las baterías de hornos de colmena son muy comunes y están localizadas en las zonas carboníferas de Cundinamarca, Boyacá y Norte de Santander. En los Estados Unidos el último horno de Colmena se operó hasta 1960, cuando por su baja calidad del coque ofrecido y los problemas ambientales hubo que cerrar su producción. Sin embargo, aún operan hornos de Colmena en China y otros países de bajo desarrollo tecnológico. En la China, por los continuos reclamos sobre la calidad del coque y también por razones ambientales existe un programa de cierre definitivo de este tipo de hornos.

El calor producido por la combustión de los gases de la carbonización calienta las paredes del horno, el cual por radiación calienta a su vez la masa de carbón realizando la carbonización a temperaturas cercanas a 1100°C, y generando el residuo carbonoso llamado coque. Parte del carbón se quema para sostener el calor y la temperatura de las paredes del horno. El rendimiento de estos hornos oscila entre 56 y 58%, en un tiempo de residencia de 48 a 72 horas. Una de las mayores limitaciones de estos hornos lo constituye su baja capacidad, alrededor de 3 toneladas de coque y desde el punto de vista ambiental

el tener que descargar a la atmósfera gases y productos de combustión y pirolisis altamente contaminantes, tal como se puede apreciar en la Figura 54

Figura 54. Hornos de Coquización tipo Colmena del Altiplano Cundi-Boyacense



La principal ventaja de los hornos de Colmena es su bajo costo tanto en materiales como en operación; pero el problema ambiental y la poca uniformidad de calidad del producto obtenido, dificultan el uso del coque en tareas donde la calidad es importante como en la siderurgia. No obstante, en pequeñas fundiciones, secado de granos y como agente de calentamiento, este coque tiene un mercado por su bajo precio.

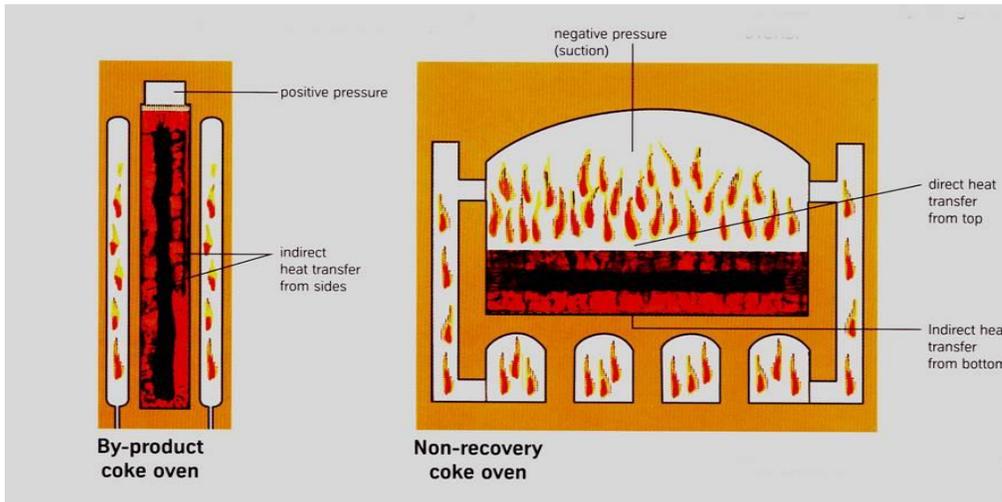
Desventaja: Los problemas ambientales en la producción del coque, en hornos de colmena y aún en los hornos verticales, han obligado a algunas acerías a cerrar producción y aumentar la inyección de combustibles como gas, fuel oil o carbón en polvo en el alto horno, incrementándose el mercado internacional de coque

2.5.3.3 Hornos de solera

En los hornos de solera los gases de combustión ricos en hidrocarburos se queman parcialmente en la cámara de coquización y el resto se dirige por medio de bajantes a las soleras en la parte inferior del horno, donde se le suministra aire en exceso y se termina de quemar, permitiendo que el sistema de carbonización de la cama de carbón se realice en los dos sentidos: en la parte superior la carbonización se realiza por el calor de radiación generado por las paredes del domo y las paredes laterales del horno, mientras que en la parte inferior la carbonización se realiza por el calor de conducción generado por la quema de los gases en la solera.

De esta forma la carbonización se realiza en ambos sentidos: de arriba hacia abajo, desde la cúpula del horno hacia el piso y del piso hacia arriba, hasta que se iguale la temperatura de toda la masa de coque (Ver figura 42). En estos hornos, la calidad del coque es uniforme y el tiempo de coquización se reduce prácticamente a la mitad de la de un horno de Colmena. Otro factor importante es la no combustión de carbón, por lo que los rendimientos, alrededor del 70%, son más altos a los obtenidos con hornos de colmena. En los hornos nacionales el rendimiento está cerca al 62%.

Figura 55. Principios de transferencia de calor en hornos verticales y hornos de solera



Las recientes regulaciones ambientales, en las cuales se considera que los productos de coquización provenientes de los hornos de recuperación son tóxicos, de alto riesgo y cancerogénicos, han obligado a buscar nuevos procesos de coquización, de los cuales los de mayor éxito son los llamados hornos de no-recuperación, que en esencia son los mismos hornos de solera, donde se ha logrado un mejor aprovechamiento de calor en las soleras y la recuperación del calor de los gases de combustión. Dentro de las principales ventajas de esta nueva tecnología se presenta el de no tener desechos de alto riesgo lo cual hace que estos hornos cumplan con las regulaciones ambientales y aun las que se proyectan para el año 2003.

2.5.4 Eficiencia energética:

Requieren de una carga térmica global de **70.5 Gcal**, con pérdidas de **5.7 Gcal** presentando una eficiencia de 92%.

Al respecto se debe anotar que existe una cantidad apreciable de energía aprovechable (**9.0 Gcal**), equivalentes a casi el 13%, que de no utilizarse útilmente disminuirán la productividad térmica de los hornos, dando una eficiencia térmica del **79%**.

Si del calor aprovechable en los humos, se utilizara el 80 % como energía útil, la eficiencia energética en términos de energía útil será del 78.4 %.

Si el calor aprovechable se utilizara en la generación eléctrica, con una eficiencia estimada del 30%, se producirían alrededor de 6.9 MW

A continuación se presenta en la tabla 37, los principales hornos modernos del tipo NRO existentes.

2.5.5 Comparación de las tecnologías de producción de coque

Con las nuevas tecnologías de NRO, el resultado final es una calidad de coque superior para la producción de aceros, aire y agua más limpios, y una fuente de calor económica para la producción de energía. En la tabla 37 se hace un resumen de los avances y principales tecnologías de los hornos NRO.

Tabla 40. Comparación de las tecnologías de obtención de coque. (Colombia)

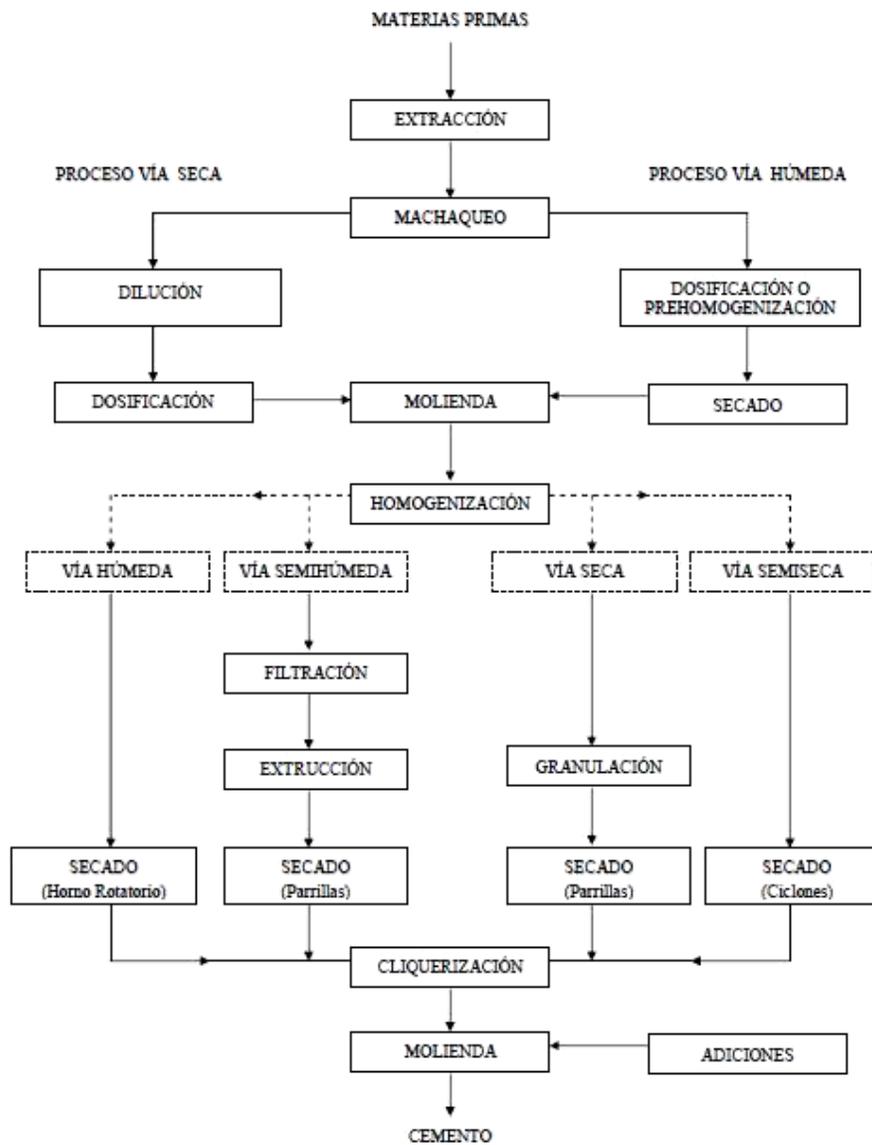
	Vertical	Solera	Colmena
CARBÓN	Existente	Existente	Existente
Calidad de Carbón	75 %	72 %	58 %
Rendimiento	Buena	Buena	Regular
Calidad de coque	Complejo	Simple	Simple
Complejidad del proceso	Unidad	50% más	100 % más
Terreno			
MEDIO AMBIENTE			
Carbonización	Material particulado, gases, alquitranes Lavado, NH ₃ , H ₂ S, etc.	Menor emisión	Material Partic. Gases, alquitranes
Tratamiento de gases	Problemas	Solo azufre	No se hace
Tratamiento de alquitranes	Problema (Breas, etc.)	No existen	No existen
Tratamiento de desechos	NH ₃ , Nafta, cianuros, fenol, S	Yeso, utilizable en la agricultura	No se hace
HORNOS			
Tamaño típico de horno	6.7 x 0.47 x 16.52	3 x 4.5 x 15.2	
Coque por horno (t)	23	7	2.5
Tiempo de coquización (h)	20	24	48 – 72
Nº de Hornos por batería (típico)		48	133
ECONÓMICO			
Carbón para: 120.000 t de coque	160.000 t	168.000 t	206.897 t
Ahorro de carbón con respecto a colmena.		40.230 t	
Ahorro a un precio de 40000 \$/t con respecto a colmena - Carbón puesto en planta. (\$/año)		\$ 1.609.200.000	

2.6 INDUSTRIA DEL CEMENTO

2.6.1 Proceso de producción del cemento.

El cemento es un polvo fino que se obtiene al poner en temperaturas muy altas una mezcla de piedra caliza, arcilla y otras sustancias. Es un material que reacciona con el agua y que actúa como aglutinante, presenta propiedades de adherencia y cohesión, produciendo compuestos que son muy resistentes (ArgosColombia, 2014). En la figura 56 se detalla el proceso productivo del cemento por varias vías.

Figura 56. Diagrama de Bloques del Proceso Productivo del cemento.



Fuente (Colciencias, 2006)

2.6.2 Proceso Productivo.

El cemento se produce por varias vías que se detallan a continuación:

- Proceso Vía Húmeda. La pasta que se alimenta al horno tiene una humedad comprendida entre el 30 y 40%. Se necesita una zona adicional para realizar la deshidratación. Dentro de sus ventajas cabe mencionar que la dosificación al horno se hace más uniforme que en los procesos de vía seca, las pérdidas de polvos son pequeñas, no se necesita un consumo adicional de calor en la molienda del crudo, entre otras.
- Proceso Vía Semihúmeda. La pasta puede llegar a tener hasta un 20% de humedad y antes de ser alimentada es secada en una parrilla. Dentro de las ventajas que presenta este proceso está que los gases que salen de la parrilla lo hacen a baja temperatura, no se necesita calor en la molienda del crudo y no hay problema con los crudos que tienen alto porcentaje de álcalis.
- Proceso Vía Semiseca. El contenido de agua es de 10-15%. Dentro de las ventajas que se presentan pueden nombrar que admite materias primas con alto contenido de álcalis, la estabilidad del proceso es buena, no es necesario el uso de hornos largos, debido a que los nódulos se descarbonatan de forma parcial en la parrilla.
- Proceso Vía Seca. La humedad de la alimentación al sistema de precalentamiento debe ser menor al 1%. La ventaja que este sistema presenta radica en que se pueden usar los gases de escape del horno para el secado del crudo y los sistemas de calentamiento son muy variados.

Los consumos energéticos para el proceso productivo por las diferentes vías se reportan en la tabla siguiente.

Tabla 41. Consumos específicos en los diferentes Procesos Productivos.

TIPO DE PROCESO	CONSUMO ESPECÍFICO (kcal/Kg de Clínquer)
Vía Húmeda	1250 - 1400
Vía Semihúmeda	1100
Vía Semiseca	920
Vía Seca	800

Fuente (Colciencias, 2006)

2.6.3 Tecnologías de producción

En las tecnologías de producción de cemento en la actualidad se usan:

- Calcio en forma de óxido de calcio (CaO).
- Silicio en forma de óxido de silicio (SiO₂).
- Aluminio en forma de óxido de aluminio (Al₂O₃).
- Hierro en forma de óxido de hierro (Fe₂O₃).

Las proporciones de estos elementos se logran obtener con distintos tipos de caliza y arcillas, aunque la mayoría de las veces se encuentran en forma pura natural. A veces se añade también arenas con alto contenido de sílice tierras con alto contenido de hierro.

2.6.4 Balances de materia y energía del proceso de producción de cemento.

Para producir una tonelada de cemento por vía seca, se pueden encontrar las siguientes entradas y salidas. Los datos presentados en la tabla 42, son calculados por el Grupo de Investigación del Convenio UIS-IDEAM, a partir de información bibliográfica y recolectada en campo (TecnologíasLimpias).

Tabla 42. Balance de materia de 1 tonelada de cemento por vía seca.

ENTRADAS MÁNICAS AL PROCESO	SALIDAS MÁNICAS DEL PROCESO
Caliza = 1.4112 Ton	Cemento = 1.040198 Ton
Arcilla = 0.1848 Ton	Vapor de agua = 0.172815 Ton
Min de Hierro = 0.084 Ton	Polvo = 0.130671 Ton
Carbón = 0.2 Ton	CO ₂ = 1.005756 Ton
Aire = 1.861378 Ton	N ₂ = 1.40625 Ton
Yeso = 0.06 Ton	O ₂ = 0.03856 Ton
	SO ₂ = 0.0068 Ton

Fuente: (TecnologíasLimpias)

Para la el proceso productivo de una tonelada de cemento por vía húmeda, se tienen las entradas y salidas reportadas en la tabla 43:

Tabla 43. Balance de materia de 1 tonelada de cemento por vía húmeda.

ENTRADAS MÁNICAS AL PROCESO	SALIDAS MÁNICAS DEL PROCESO
Caliza = 1.46723 Ton	Cemento = 1.2947 Ton
Arcilla = 0.2093 Ton	Polvo = 0.084 Ton
Min de Hierro = 0.06978 Ton	Vapor de agua = 1.2558 Ton
Gas natural = 0.1787 Ton	CO ₂ = 1.0937 Ton
Aire = 3.212 Ton	N ₂ = 2.4267 Ton
Agua = 0.74748 Ton	O ₂ = 0.0351 Ton
Yeso = 0.06 Ton	

ENTRADAS MÁSCAS AL PROCESO	SALIDAS MÁSCAS DEL PROCESO
Puzolana = 0.0242 Ton	
Agregado 1 = 0.195 Ton	
Agregado 2 = 0.0263 Ton	

Fuente: (TecnologíasLimpias)

2.6.5 Consumo Energético.

- En la molienda. Aproximadamente el 85 % del total de la energía gastada en la producción de cemento, está relacionada directamente con clinkerización y la molienda de las materias primas y del cemento; Se calcula que la molienda consume casi 75 (existen autores que hablan de más de 96% de energía consumida en estos 2 procesos). La energía que el molino requiere para la clinkerización está entre el 2% y el 20%; el resto se atribuye al rozamiento de las partículas entre sí, ruido, rozamiento de las partículas con las paredes del molino, calor, vibración, rendimientos del motor y del molino y elevación del material en el molino (TecnologíasLimpias).
- Clinkerización. La energía necesaria por tonelada de material subdividido, es fundamentalmente más baja en la molienda grosera que en la molienda fina.
- En separadores por aire. El consumo energético de los separadores por aire depende de las características del caudal circulante, del material tratado y también de los finos finales deseados. Se han encontrado valores que abarcan desde 2 a 6 kwh/t de producto fino. Esta información también incluyen los separadores que reciben el aire de operación desde el exterior.
- En hornos. El consumo energético eléctrico consumido por los hornos largos para vía húmeda es de 14-22 kwh/t, limitada al tramo comprendido desde la extracción de la pasta del silo de alimentación, hasta la salida del Clinker del enfriador de parrilla. Todos los hornos largos usados en la producción de cemento por vía húmeda tienen intercambiadores de calor interno, para apresurar el secado de la pasta.

La muestra el balance térmico de un horno largo por vía seca provisto con intercambiador de calor por suspensión de un tramo y con enfriador de satélites se encuentra en la tabla 44.

Tabla 44. Balance térmico de un horno largo vía seca con intercambiador de calor y con enfriador de satélites.

	kcal/ kg Clinker
Cocción del Clinker	420
Evaporación de agua	4
Pérdidas con los gases residuales	223
Calor residual con el Clinker	22
Aire residual del enfriador	0
Tubo del horno	104
Intercambiador	10
Enfriador	66
Resto (no determinado)	48

Fuente: (Tecnologías Limpias)

Los gases residuales presentan temperaturas de hasta 370°C y el consumo específico de calor, 897 kcal /kg de Clinker.

En enfriadores. El enfriador planetario eleva el consumo de energía del horno y del exhaustor.

El requerimiento energético adicional del horno se halla con la fórmula.

- $K = 0.03 * L$
- Dónde:
- k= consumo específico, en kwh/t de Clinker.
- L= Longitud de los tubos del enfriador planetario.

La tabla siguiente muestra las propiedades y balances térmicos de enfriadores planetarios. En esta tabla se resaltan las pérdidas de calor por las paredes, que se encuentran entre el 26-27 % de las cantidades de calor entradas en el enfriador.

Tabla 45. Características y balance térmico de enfriadores planetarios.

		HORNOS LARGOS VÍA SECA	HORNOS CON INTERCAMBIADOR
Caudal del horno	t/24h	1100	2200
Consumo específico de Calor	kcal/kg	870	750
Número de tubos enfriados		11	11
Diámetro * Longitud	m	1.65*12	1.80*18
Temperaturas			
Entrada de Clinker	°C	1200	1250
Salida de Clinker	°C	139	135
Entradas de Calor			
Clinker	kcal/kg	291	307
Cesiones de calor			
Aire secundario	kcal/kg	189	205
Calor residual en el clinker	kcal/kg	23	22
Pérdidas de calor por la "piel"	kcal/kg	79	80
Pérdidas totales de calor	kcal/kg	102	102
Rendimiento	%	65	67

Fuente: (TecnologíasLimpias)

La tabla siguiente se expone las propiedades y el balance térmico de un enfriador Fuller de parrilla del tamaño 825/1050; el horno dispone de intercambiador de ciclones. El caudal del horno rotatorio es de 1934 t/24h.

Tabla 46. Características y balance térmico de un enfriador de parrilla Fuller.

1	Temperaturas	Unidad	Cuantía
	Clinker a la entrada	°C	1460
	Clinker a la salida	°C	83
	Aire de enfriamiento	°C	22
	Aire secundario	°C	920
	Aire residual	°C	158
	Aire de tramo medio	°C	374
2	Exceso de aire		1.056
3. Cantidades de aire referidas al Clinker			
	Aire primario	Nm ³ /kg	0.034
	Aire de enfriamiento	Nm ³ /kg	2.312
	Aire secundario	Nm ³ /kg	0.842
	Aire residual	Nm ³ /kg	0.889
	Aire de tramo medio	Nm ³ /kg	0.581
4 Cantidades de calor referidas al clinker			
	Consumo de calor en el horno	kcal/kg	750
Balance térmico del enfriador referido a 20°C			
Entradas			
	Clinker	kcal/kg	383
	Aire de enfriamiento	kcal/kg	1
	Total	kcal/kg	384
Salidas			
	Aire secundario	kcal/kg	257
	Aire residual	kcal/kg	40
	Aire residual del ramo medio	kcal/kg	71
	Calor residual en el clinker	kcal/kg	12
	Pérdidas de calor por la "piel"	kcal/kg	4
	Total perdidas de calor	kcal/kg	127
5	Rendimiento del enfriador		67.1
	Con utilización de aire de tramo medio		85.6

Fuente: (TecnologíasLimpias)

2.6.5.1 Balances de energía eléctrica consumida en el proceso de producción de cemento.

La tabla 47 reporta los gastos de energía eléctrica en la producción de 1 tonelada de cemento por proceso vía seca.

Tabla 47. Consumo de Energía por Tonelada de Cemento, utilizando como combustible carbón. (Proceso vía Seca Planta Típica).

PROCESO	ENERGÍA
	(KWH)
Trituración	3.5
Molienda Arcilla	0.98032
Molienda de Carbón	9.426
Molienda de Crudo	92.71
Clinker Gris	81.97
Molienda de cemento Gris	59.15
Empaque Cemento Gris	1.13
TOTAL	247.886

Fuente (Colciencias, 2006)

La siguiente tabla reporta el consumo de energía por tonelada de cemento usando gas natural en proceso vía húmeda.

Tabla 48. Consumo de Energía por Tonelada de Cemento, utilizando como combustible Gas Natural. (Proceso Vía Húmeda, Planta Típica)

PROCESO	ENERGÍA (KWH)
Trituración	64.558
Bombeo de Pasta	194.915
Sedimentación de Pasta	0.332
Molienda de Pasta	299.052
Clinkerización	1.121.445
Molienda de Cemento	54.37
Empaque	14.889
TOTAL	2.066.455

Fuente (Colciencias, 2006)

2.6.6 Medidas o cambios tecnológicos para el aumento de eficiencia energética en el proceso de producción cemento.

Los estudios para el mejoramiento de la eficiencia energética en la industria del cemento van enfocados generalmente en la implementación de un modelo de gestión de ahorro de energía. Las investigaciones se centran en los dos procesos principales de la fabricación del cemento como son la clinkerización y la molienda del cemento, procesos que consumen el 96,35% de la energía (Gilvonio Alegría, 2005).

En su informe “Mejoramiento de la eficiencia energética en la industria del cemento por proceso húmedo a través de la implementación del sistema de gestión integral de la energía” (Castrillon, 2013) expone una metodología para implementar el sistema de gestión integral de energía en la industria del cemento donde se logró una reducción de consumo y sostenibilidad de la energía en los procesos. En este estudio específico se logró una disminución de emisión de 3,33 kg de CO₂/t, lo que se traduce en una disminución del 4,6 % en el consumo de energía eléctrica. La tabla 49 resume del consumo promedio de energía eléctrica por producción total en la planta de cemento para los siete Centro de Costos de Energía propuestos.

Tabla 49. Requerimientos de energía eléctrica para los Centros de Costos de Energía definidos en la planta.

Centro de Costo de Energía		CONSUMO ELICTRICIDAD [kWh/t cemento]
Molienda de Cemento		46
Clinkerización enfriamiento	+	35
Molienda Primaria		17
Molienda Secundaria		5
Homogenización transporte	y	5
Trituración		1
Empaque y Despacho		1
Otros		4
TOTAL		114

Fuente (Castrillon, 2013)

En el estudio mencionado, se detectaron las variables que influyen de manera significativa los consumos energéticos en el proceso de producción del cemento para este caso específico. Se usaron herramientas estadísticas y tomando como base el estudio de la relación existente entre las variables energía y producción para identificar las variables más

importantes, el resultado fueron 7 de ellas, en los puntos de clinkerización, molienda primaria y de cemento. La tabla siguiente resume mejor los resultados obtenidos.

Tabla 50. Variables de control y potenciales de ahorro.

CENTRO DE COSTO DE ENERGÍA	VARIABLE IDENTIFICADA	POTENCIAL DE AHORRO IDENTIFICADO [kWh/t cemento]
Clinkerización	Exceso de aire en la cámara de los enfriadores.	0,42
	Altura de la cámara de <i>clinker</i> en los enfriadores.	
	Desencostramientos y enfriamientos súbitos en el horno.	0,40
Molienda de Cemento	Flujo de retorno en los molinos de bolas.	0,36
	Cambio de producto (tiempos de preparación de cementos especiales).	depende del tipo de cemento por producir.
	Tiempos muertos de funcionamiento de equipos auxiliares.	----
Molienda Primaria	Selección adecuada de bombas para la operación de los molinos.	0,25

Fuente (Castrillon, 2013)

2.6.7 Eficiencia energética en la industria cementera colombiana

En el informe (Argos, 2013) se expone que en Colombia, la Planta Toluviejo estableció su *Sistema de Gestión Integral de Energía*, y de esta manera logró un ahorro de 1,883.671KWh en 2013. El sistema se aplicó en otras plantas colombianas.

En las plantas de Rioclaro y Sogamoso, se llevó a cabo el proyecto de *recuperación de calor en autogeneración*, por el cual se redujo el consumo de carbón por kilovatio hora generado en un 6.4% y 9.4% respectivamente.

En el 2013 en dos plantas cementeras de Colombia, se implementaron lámparas de inducción electromagnética. En la primera, dichas lámparas permitieron un ahorro de 9.2%

en el consumo de energía y 25.5% en su costo; en la segunda, los ahorros fueron de 11% y 7.3%, respectivamente, con relación al año anterior.

En el documento titulado: “Ahorro de energía en la industria del cemento” publicado por (Colciencias, 2006), se proponen varias medidas para el ahorro de energía en la industria cementera, las cuales se detallan a continuación.

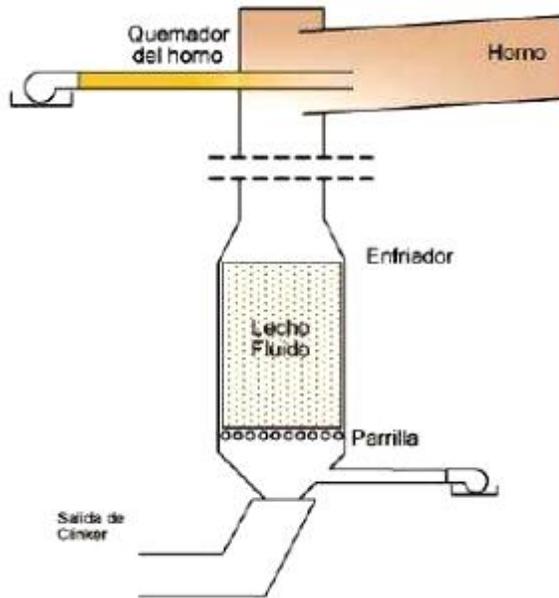
Ahorro de energía en las operaciones básicas

En esta parte se exponen las operaciones básicas en la producción del cemento que directa e indirectamente ayudan al ahorro energético del proceso.

- Extracción y preparación de las materias primas. Si se homogeniza la materia prima al ser extraída, aunque el costo energético se incrementa, al mismo tiempo se disminuye en la etapa de molienda debido a que el horno trabaja de forma más homogénea y de manera eficiente.
- Secado y molienda del crudo. Este secado se puede realizar con los gases que salen de los distintos hornos. Con estos gases se puede llegar hasta un 8% de humedad en el crudo.
- Fabricación del Clinker. Para esta etapa se describen a continuación posibles mejoras en cada uno de los equipos que componen al clinker.
 - Mejoras en el precalentamiento de la carga. En procesos de vía húmeda, como medio para aumentar la transferencia de calor, se implementan cadenas en los hornos. La calidad de estas cadenas debe ser alta para evitar que se fundan. En procesos vía semiseca y semihúmeda, se establecerán infraestructuras para doble circulación de gases. Por la vía seca, se puede mejorar el diseño de los ciclones y conductos para incrementar la eficiencia térmica, adicionar a continuación de los ciclones intercambiadores de calor con mayor número de etapas en los que el crudo pasa de manera ascendente.
- Mejoras en el horno. La temperatura de clinkerización puede disminuirse con el uso de sustancias fundentes y mineralizantes, al igual que una mezcla fina y homogénea.
- Mejora en el aislamiento. Mejorar el aislamiento térmico del horno y principales equipos calientes para así evitar las pérdidas por radiación.
- Mejoras en el control del horno. Se busca la predicción online de cal libre, control de proceso adaptable basado en redes y procesamiento de imagen digital. De esta forma se puede conseguir un control instantáneo del funcionamiento del control del horno y posteriormente una mejora en la eficiencia energética del mismo.
- Mejoras en el enfriamiento del Clinker. Instalar enfriadores de parrilla que resultan ser eficientes y realizan el enfriamiento paulatinamente que favorece el crecimiento de los minerales del Clinker. Con este tipo de enfriadores se obtienen

ahorros energéticos de hasta 50 kcal/kg de Clinker en comparación con un enfriador satélite. Otra opción, es utilizar un lecho fluido (ver figura 57) que aprovecha el aire como aire secundario. Este tipo de enfriadores tienen un rendimiento por encima del 90 %.

Figura 57. Enfriador de cuba vertical.



- Mejoras en la molienda y acabado del cemento. Aditivos como ácido acético y etilenglicol se pueden utilizar para conseguir cementos muy finos con un consumo de energía muy reducido.

Ahorro de energía en la combustión

Se trata de mejorar el rendimiento en la combustión mediante la regulación de la cantidad de aire primario en el quemador del horno (de 10 – 12% sobre el total de aire), control de llama (mejoramiento de la viscosidad se traduce en mejor forma, luminosidad y poder radiante de la llama), aprovechamiento del aire caliente en los quemadores secundarios y utilización de cenizas volantes con alto contenido de inquemados.

Otros posibles ahorros.

Existen otros puntos donde se pueden realizar ahorros de energía, para ello se realiza control continuo del consumo específico de combustible (de esta manera se conoce si hay exceso de aire o mayor gasto de combustible), la descarbonatación se hace por fuera del

horno (de esta manera se disminuyen las necesidades caloríficas), se debe hacer aprovechamiento de los calores residuales, se puede instalar un separador de alta eficiencia (con esto se ahorra hasta un 16% de energía consumida actualmente y mejora el rendimiento de la separación en un 25%), se utiliza la tecnología del ciclo orgánico de Rankine para producción de electricidad (este ciclo usa los calores residuales de la torre de ciclones y el horno); este último tiene que evaluarse muy bien, ya que su instalación tiene un costo elevado y los retornos acarrear largos períodos de tiempo.

2.6.8 Aspectos ambientales

El 10% de las emisiones mundiales de CO₂ son causadas por la industria del cemento. La cocción de clínker es la parte más incidente que se relaciona con los principales problemas del medio ambiente derivados de la fabricación de cemento: el consumo energético y las emisiones a la atmosfera (Colciencias, 2006).

Los principales agentes contaminantes que se emiten al ambiente es el dióxido de azufre (SO₂), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y el polvo. Las técnicas para la reducción de polvo llevan implementándose de 50 años, la reducción de NO_x es una situación casi nueva en la industria del cemento y la reducción del SO₂ es un problema propio de cada planta.

Entre las medidas primarias generales se tiene el uso de actuales sistemas de alimentación gravimétrica de combustible sólido, la optimización del control de procesos, el mejoramiento de las conexiones de refrigeración y como ya se mencionó, la aplicación de sistemas de gestión energética. Estas medidas además de mejorar los costos de producción, ahorrar energía, permiten también la reducción de las emisiones atmosféricas (Colciencias, 2006).

Los procedimientos más optimizados para reducir las emisiones de NO_x son una combinación de medidas primarias generales, sistemas de combustión escalonada, medidas primarias específicas para controlar este tipo de emisiones, y técnicas de reducción selectiva no catalítica.

Los mejores métodos actuales para disminuir las emisiones de SO₂ combinan la adición de absorbentes con medidas primarias generales para conseguir niveles iniciales no mayores a 1.200 mg de SO₂/m³ y con depuradores de proceso húmedo o seco para obtener niveles iniciales superiores a éste. Tal como lo menciona el trabajo realizado por Colciencias y UPME: *los niveles de emisión asociados a la aplicación de estas técnicas se sitúan entre 200 y 400 mg de SO₂/m³ (Los niveles de emisión se expresan en promedios diarios y en condiciones estándar de 273 K, 101,3 kPa, 10% de oxígeno y gas seco)* (Colciencias, 2006). La cantidad de azufre contenida en las materias primas utilizadas en los hornos, determinan principalmente las emisiones de SO₂ generadas en las industrias cementeras. Por este motivo, es de esperarse que si las materias primas contienen muy baja o ninguna cantidad de azufre, los niveles de SO₂ serán muy bajos comparados con el nivel máximo permisible y

no habrá necesidad de utilizar técnicas de reducción. Teniendo en cuenta lo anterior, sería ideal que las materias primas contuvieran una muy baja cantidad del elemento azufre.

Otro problema muy común en la industria cementera es la producción de polvo. Este puede producir una polución muy alta en el aire, aguas subterráneas y superficiales.

2.7 HORNOS DE CURADO

Cuando se aplica una pintura se debe esperar un lapso de tiempo para que esta pase de estado líquido a estado sólido, lo que se conoce como tiempo de secado.

En numerosas ocasiones se habla indistintamente de secado, curado y endurecimiento de la pintura, sin embargo es importante aclarar cada uno de estos conceptos; (frlp.utm, 2009)

- Secado – Es el proceso de evaporación de todos los solventes y diluyentes añadidos a la pintura con objeto de hacerla líquida o de reducir su viscosidad.
- Endurecimiento – Corresponde al proceso por el cual la resina principal de la pintura se crea y a su vez se endurece con todos los demás pigmentos y aditivos que la componen, creando un recubrimiento sólido y adherente.
- Curado – Corresponde al proceso que engloba tanto el secado como el endurecimiento de una pintura.

Curado = Secado + Endurecimiento.

Las pinturas existentes en el mercado para su clasificación se identifican por su mecanismo de curado, de tal forma que tenemos:

- Pinturas de curado físico
- Pinturas de curado químico

Las pinturas de curado físico son aquellas donde la resina principal se encuentra ya formada; para curar la pintura sólo se necesita evaporar los disolventes introducidos en la propia pintura.

Las pinturas de curado químico son aquellas donde la resina principal (polímero) se crea a través de reacciones químicas (polireacciones) entre diversos compuestos, en este tipo de curado es necesario tanto el secado como el endurecimiento.

Son ejemplos de pinturas de curado físico las lacas de nitrocelulosa, lacas acrílicas, pinturas de clorocaucho y pinturas vinílicas. Son ejemplos de pintura de curado químico las pinturas de poliuretano, epoxi, fenólicas y polisiloxanos.

La pintura electrostática en polvo es una alternativa para acabados, que brinda características superiores con respecto a la pintura líquida, como la resistencia mecánica y a la oxidación. Para usar este tipo de pintura es necesario contar con un horno de curado para completar el proceso químico de la misma.

Existen varios tipos de hornos de curado con especificaciones técnicas y formas de calentamiento diferentes, como son las resistencias eléctricas, los quemadores de gas y los paneles infrarrojos catalíticos.

Los hornos de curado de convección forzada son hornos relativamente ineficientes en la transferencia de calor que se da desde el emisor, pueden ser resistencias o quemadores, y la pieza que tiene aplicada la pintura electrostática.

En cambio los hornos de curado infrarrojos tienen una alta eficiencia de transferencia de calor, ya que las ondas térmicas viajan a la velocidad de la luz, y atacan directamente la pintura, sin necesidad de calentar el material en el que está fabricada la pieza.

En el proceso particular de pintura electrostática, hay varios factores que influyen para una mejora en la productividad; como son:

- Cabina de pintura.
- Horno de curado.
- Sistema de tracción.

De los factores descritos, el más crítico es el horno de curado, pues da el acabado final a la pintura, además de ser el proceso más largo en tiempo, en espacio dentro de este sistema y en costos de operación.

Figura 58. Horno de curado de pintura



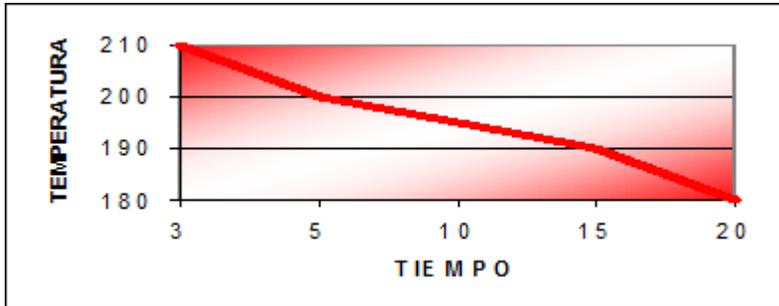
www.acatec.net/hornos-de-secado-estatico

2.7.1 Proceso de curado en la pintura electrostática

El curado de la pintura electrostática consta básicamente en activar la reacción química del sistema de resinas por medio de calor. El balanceo del sistema de sustratos y el tiempo en que la temperatura de este sustrato permanece en la especificación requerida determina la perfecta nivelación y la performance especificada para los ensayos Físicos y Químicos. (Escobar, 2009)

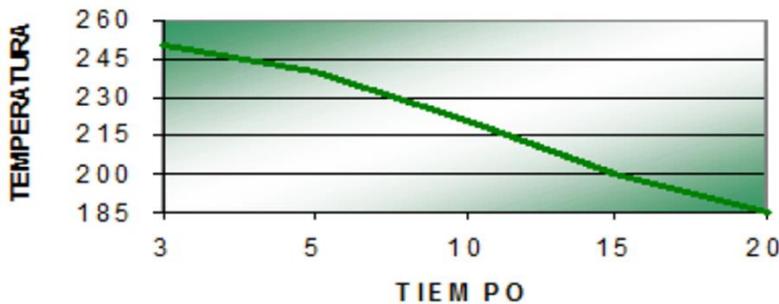
El esquema de curado hace referencia a las condiciones de horneado de la pieza pintada con pintura en polvo, esto es, temperatura y tiempo. Ambos parámetros son necesarios a la hora de considerar la implementación de un horno o la reforma de uno existente. Si se quiere obtener un pintado de las piezas satisfactorio es fundamental respetar las condiciones de cura dadas por el fabricante de la pintura. A continuación se presentan curvas generales de curado para los principales tipos de pinturas electrostáticas.

Figura 59. Curva de curado Epoxi



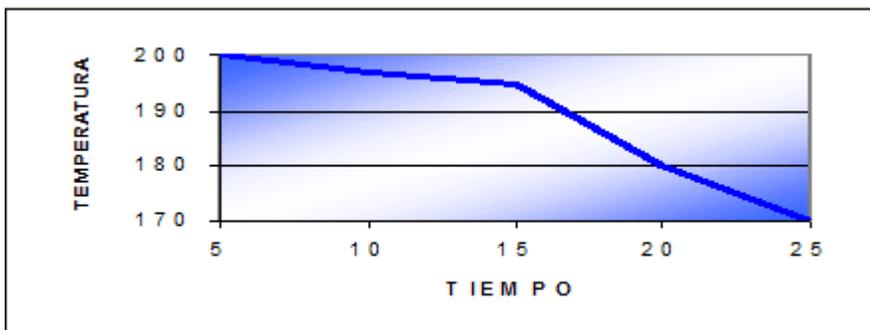
Fuente: (Armun, 2005)

Figura 60. Curva de curado poliéster-Tgic



Fuente: (Armun, 2005)

Figura 61 Curva de curado epoxi/poliéster



Fuente: (Armun, 2005)

Para el correcto curado de estas pinturas es muy importante mantenerse en los rangos de tiempo y temperatura establecidos puesto que un sobre curado de las mismas puede

traer consecuencias como cambio de color, disminución de brillo, manchado y disminución en las propiedades mecánicas. (Arnum@2007).

2.7.2 Hornos de curado

Como ya se expresó, existe una clasificación principal de estos hornos de acuerdo al tipo de operación:

- **Convección:** Estos hornos alcanzan la temperatura de curado calentando el aire dentro del recinto donde se colocan las piezas. Para esto, utilizan quemadores de gas o resistencias eléctricas, y sistemas de recirculación de aire para generar la convección forzada. Pueden operar en forma estática (trabajo por tandas o lotes) o en forma continua (línea continua de producción).
- **Radiación:** Estos hornos usan la radiación infrarroja para lograr la temperatura requerida. La presencia de calor radiante es prácticamente imperceptible y el secreto de su funcionamiento reside en la absorción de la radiación por los objetos.
- Los hornos infrarrojos eléctricos son, por lo general, continuos debido a que las piezas deben estar en contacto directo con la radiación (situación que no es posible en los hornos por tandas convencionales).

2.7.3 Hornos de curado por resistencia eléctrica y convección forzada.

Los hornos eléctricos son también conocidos como hornos electro-térmicos, de los cuales, el tipo más sencillo y de mas aplicación en la industria es el horno de resistencia, en el que se genera calor haciendo pasar una corriente eléctrica por un elemento resistivo que rodea el horno. En los hornos que se calientan desde el exterior, el elemento calefactor puede adoptar la forma de una bobina de alambre enrollada alrededor de un tubo de material refractario o puede consistir en un tubo de metal u otro material resistivo, como el carborundo. Los hornos de resistencia son especialmente útiles en aplicaciones cuya temperatura requiera controlarse de forma precisa.

Existen diferentes tipos de resistencias para diferentes aplicaciones, en donde su ubicación dentro del horno también cumple un papel fundamental en el desempeño del mismo. Las resistencias más comunes utilizadas en los hornos de curado por resistencia eléctrica son:

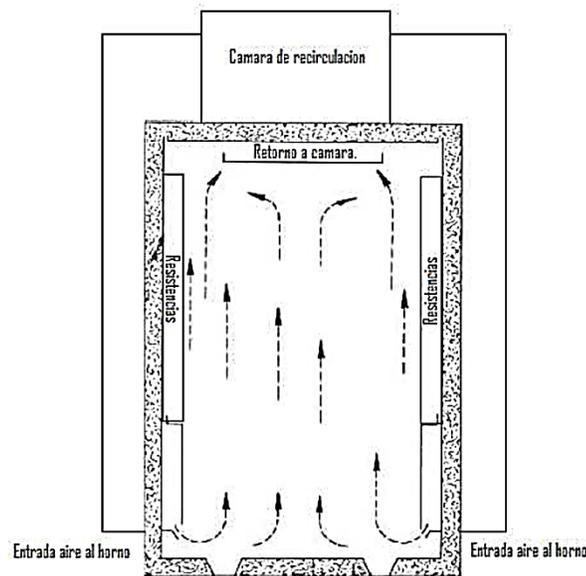
- Resistencia con aletas aluminizadas: Temperatura Max de funcionamiento: 250°
- Resistencia con aletas helicoidales en acero inox: Admite una temperatura máxima del aire a 400° con convección forzada. Son muy utilizadas para hornos de curado y para calentamiento de gases corrosivos.
- Resistencia blindada tipo doble M: Elementos especialmente estudiados para el calentamiento de aire a una temperatura máxima de 400° con convección forzada mínima de 3m/s. Son muy usadas para hornos industriales y baterías.

Además de la resistencia eléctrica encargada de suministrar la energía calorífica al interior del horno, se necesita aire circundante, el cual se encarga de homogenizar la temperatura dentro del horno, y a su vez, optimiza la convección entre el aire que circula por la resistencia y la convección que se genera entre el mismo aire circundante y la pieza a la cual le ha sido aplicada la pintura electrostática. Este principio de funcionamiento se basa en la teoría de transferencia de calor por convección forzada.

La cámara de recirculación se encarga de inducir el aire al interior del horno por medio de ductos laterales, el cual se calienta gracias a las resistencias eléctricas ubicadas en los laterales del mismo. Al calentarse el aire y disminuir su densidad, tiende a subir, además de esto, el vacío generado dentro de la cámara por el aire que está saliendo de la misma y que se induce al interior del horno genera un efecto de vacío que ayuda a succionar el aire en la parte de arriba entrando nuevamente a la cámara de recirculación, y así sucesivamente se repite el ciclo para mantener el aire en constante movimiento y optimizar el proceso de transferencia de calor a las piezas por el método de convección forzada anteriormente descrito.

La eficiencia de estos hornos para transferir el calor generado por las resistencias eléctricas depende básicamente del movimiento del fluido que genera este sistema, por esto es importante tener claro el caudal y la velocidad del aire que se debe circular dentro del mismo, y también la distancia entre la inducción del aire a las resistencias eléctricas y a las piezas que se quieren curar.

Figura 62. Circulación de aire en Horno de curado eléctrico



Fuente: (Escobar, 2009)

Tabla 51. Especificaciones técnicas del horno de curado eléctrico

	Horno Eléctrico bache
Dimensiones (HxDxW) (mm)	2591 x 4953 x 3150
Ancho Máximo Pieza (mm)	950
Alto Máximo Pieza (mm)	2450
Temperatura Máximo(°C)	260
Sistema de Apagado	Manual
Sistema de Encendido	Manual
Control de Temperatura	Análogo
Tipo de Alarma	Luz, Sonido
Potencia (Kw)	157,64
Consumo de Gas (Kw/h)	N.A
Consumo de Energía(Kw/h)	157,64
Tiempo de Curado (min)	6
Piezas x Minuto	0,4

Fuente: (Escobar, 2009)

2.7.4 Hornos a gas por convección forzada

La operación de los hornos a gas por convección forzada son muy similares a los de resistencia eléctrica por convección forzada, la diferencia es la fuente de la energía calorífica que se va a transferir a las piezas que se desean curar. Para los hornos a gas el elemento que nos entregara esta energía calorífica es el quemador.

Los quemadores se encargan de generar la combustión entre el gas y el oxígeno en su interior, ocasionando a su vez una llama, la cual posteriormente calentara el aire que se inducirá al horno.

Las variables a tener en cuenta para conseguir la temperatura deseada para las diferentes aplicaciones son:

- Potencia térmica (kW)
- Consumo de gas (m³/h)
- Potencia eléctrica del motor (kW)
- Alimentación eléctrica (V)
- Dimensiones y peso.

Además de estas variables también se tienen que garantizar unas condiciones especiales para el buen funcionamiento de estos equipos como lo son:

- Una perfecta estabilidad de la mezcla aire-gas.
- Un nivel de CO₂ elevado y constante en todo el campo de carga del quemador.
- El control preciso del exceso de aire, fundamental para un funcionamiento óptimo de los generadores de condensación.
- Eliminar las variaciones positivas y negativas de la presión del gas.
- Eliminar las variaciones del caudal de aire debidas a las fluctuaciones de la tensión de la red eléctrica y al cambio de presión atmosférica.
- Preservar la carga en función de las variaciones de la presión del hogar, sobre todo durante los periodos de encendido.

Además de los quemadores a gas encargados de suministrar la energía calorífica al interior del horno, se necesita aire circundante al igual que con los hornos por resistencia eléctrica utilizando los mismos principios de transferencia de calor.

Este a su vez, será el encargado de homogenizar la temperatura dentro del horno, y así, potenciar la convección que exista entre el aire caliente que baja de la cámara de combustión por los ductos hacia la pieza.

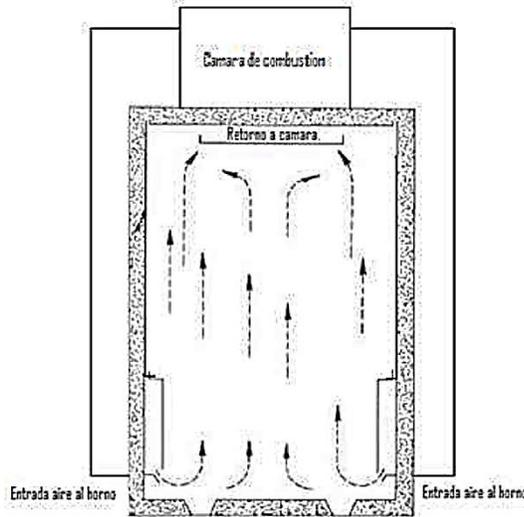
Para que se dé la convección forzada es necesario que los hornos posean moto-ventiladores en el sistema, dispuestos de manera similar al de los hornos por resistencia eléctrica, con la diferencia de que en las cámaras de circulación es donde están ubicados los quemadores, y no en el interior del horno; esto con el fin de evitar que la llama del quemador golpee directamente la piezas que se desea curar. Es por esto que para este tipo de hornos las cámaras de re-circulación también son conocidas como cámaras de combustión. El movimiento del aire es igual al de los hornos de resistencia eléctrica para generar la convección forzada,

La cámara de combustión es la encargada por medio de los moto-ventiladores a través de los ductos laterales de inducir el aire al interior del horno, el cual viene caliente desde la cámara por el efecto de los quemadores en la misma. Al ingresar el aire caliente y disminuir su densidad, tiende a subir, además de esto el vacío generado dentro de la cámara por el aire que está saliendo de la misma y que se induce al interior del horno genera un efecto de vacío que ayuda a succionar el aire en la parte de arriba entrando nuevamente a la cámara de combustión. Y así sucesivamente se repite el ciclo para mantener el aire en constante movimiento y optimizar el proceso de transferencia de calor a las piezas por el método de convección forzada anteriormente descrito.

El aire que entra nuevamente a la cámara de combustión ya ha perdido parte de su energía calorífica, por lo que los quemadores a su ingreso recalientan nuevamente este aire para volver a realizar el ciclo.

La eficiencia que tienen estos hornos para transferir el calor generado por los quemadores a gas depende netamente del movimiento del fluido que genera este sistema. Por esto es de alta importancia tener claro el caudal y la velocidad del aire que se debe circular dentro del mismo, y también la distancia entre la inducción del aire y las piezas que se quieren curar.

Figura 63. Circulación de aire en horno de Curado a Gas



Fuente: (Escobar, 2009)

Tabla 52. Especificaciones técnicas horno de curado a Gas

	Horno A Gas bache
Dimensiones (HxDxW) (mm)	2591 x 4935 x 3912
Ancho Máximo Pieza (mm)	1100
Alto Máximo Pieza (mm)	2450
Temperatura Máximo(°C)	320
Sistema de Apagado	Manual
Sistema de Encendido	Manual
Control de Temperatura	Análogo
Tipo de Alarma	Luz, Sonido
Potencia (Kw)	350
Consumo de Gas (Kw/h)	352
Consumo de Energía(Kw/h)	7,64
Tiempo de Curado (min)	4,5
Piezas x Minuto	0,7

Fuente: (Escobar, 2009)

2.7.5 Hornos de paneles infrarrojos

La técnica infrarroja ofrece ventajas importantes para determinados procesos industriales de secado, en los que resulta mucho más efectiva comparada con sistemas de calentamiento por convección. El campo de aplicación se encuentra entre otros, en procesos de curado o cocción de esmaltes, pinturas en polvo y epóxicas; secado de agua, solventes, tintas, adhesivos; calentamiento, termoformado.

La calefacción infrarroja consiste en la transferencia de energía térmica desde una fuente a un material, cuerpo o recubrimiento, por radiación electro-magnética. Esta energía radiante puede ser producida por diversas fuentes, tales como las ultravioleta, de radio frecuencia, o infrarrojas. Puesto que esta energía no requiere de un vehículo de transporte del calor como es el aire en los hornos por convección, los hornos infrarrojos son más efectivos por su rapidez y menor costo operacional.

La energía infrarroja es radiada a través del aire en forma de ondas electro-magnéticas, y tal como la luz es direccional y puede ser enfocada, reflejada y absorbida por un cuerpo cercano. No depende del aire para su transmisión y es convertida en calor principalmente por absorción en la pieza expuesta a la radiación. De hecho el aire absorbe muy poca radiación infrarroja.

No toda la energía infrarroja es absorbida por un material, un cuerpo o una superficie. Parte de ella será reflejada o transmitida. La cantidad de energía que es absorbida, reflejada o transmitida, varía con la longitud de onda de la radiación (que depende de la temperatura de radiación), con el material y con la superficie de este último.

La cantidad de energía radiante emitida por una fuente de calor es proporcional a la temperatura de su superficie y a la emisividad del material, tal como describe la Ley de Stefan Boltzmann. Mientras más alta es la temperatura de la fuente, mayor es la radiación que emite y mayor es su eficiencia.

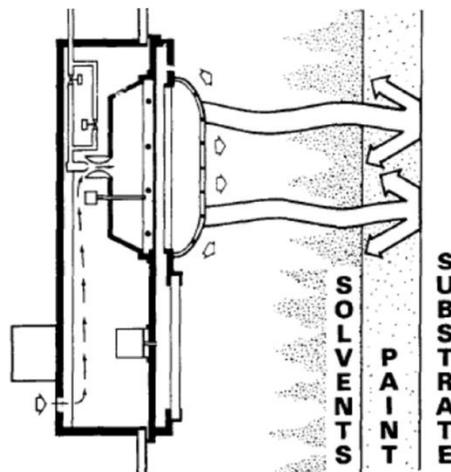
Es por esta razón que el secado o curado de pintura, u otros procesos tales como los que se mencionan al comienzo, encuentran en las técnicas infrarrojas un lugar preferente de tratamiento. Una vez que la energía infrarroja es absorbida por el recubrimiento aumentando su temperatura, este calor es traspasado por conducción al sustrato, por ejemplo aluminio. Dado que los metales tienen una alta conductividad térmica, el calor aportado por la conducción se distribuye rápidamente por toda su estructura interna. De aquí se corrige que lo que pudiera haberse considerado una pérdida de energía, en realidad se convierte en un aporte, no solo porque colabora en el proceso sino porque además permite que aquellos sectores de las piezas, escondidos a la radiación infrarroja, alcancen igualmente la temperatura necesaria.

Esta radiación al interior del horno es generada por paneles infrarrojos catalíticos, los cuales funcionan por medio de la reacción química que existe entre el gas, la membrana

catalizadora y el oxígeno circundante. Esta reacción no produce llama por lo cual, pueden encontrarse al interior del horno sin generar ningún tipo de contaminación.

En el interior del panel infrarrojo se encuentra una resistencia eléctrica encargada de precalentar el panel. Esta resistencia permanece encendida alrededor de 15 minutos. Cuando el panel se encuentra caliente se apaga la resistencia y se da paso por medio de una electroválvula al gas. El gas se calienta al interior del panel y comienza a salir de manera homogénea del mismo, traspasando una membrana cerámica, la cual está impregnada de un catalizador químico. Al salir el gas caliente por la membrana catalizadora y encontrarse el oxígeno al exterior del mismo, se produce la reacción química (sin llama) que da como consecuencia la radiación calorífica.

Figura 64. Panel Infrarrojo- Emisión de calor



Fuente: (Escobar, 2009)

Al emitir la radiación infrarroja, las ondas viajan a la velocidad de la luz hacia la pieza cubierta de pintura electrostática, y su temperatura es directamente proporcional a la longitud de onda. La porción absorbida de la radiación es convertida en energía térmica por los materiales receptores.

Está compuesto por cuatro zonas de calentamiento y un tren de gas principal. Adicionalmente cuenta con dos ventiladores uno de Extracción y otro de Recirculación.

Este equipo no controla temperatura. Controla potencia entregada por los paneles por medio de recetas.

Tabla 53. Especificaciones técnicas horno de curado Infrarrojo

	Horno Infrarrojo
Dimensiones (HxDxW) (mm)	2260 x 5900 x 3210
Ancho Máximo Pieza (mm)	1322
Alto Máximo Pieza (mm)	2610
Temperatura Máximo(°C)	400
Sistema de Apagado	Automático/Manual
Sistema de Encendido	Automático/Manual
Control de Temperatura	Digital
Tipo de Alarma	Luz, Sonido
Potencia (Kw)	185
Consumo de Gas (Kw/h)	180
Consumo de Energía(Kw/h)	5
Tiempo de Curado (min)	6
Piezas x Minuto	2,5

Fuente: (Escobar, 2009)

2.7.6 Fallas frecuentes que afectan la eficiencia energética de Los Hornos de Curado

Cabe señalar que es importante distinguir dos tipos de fallas: de proceso y mecánicas o de control. Las fallas de proceso son generadas por ajuste de parámetros incorrectos o por diseños inadecuados que muchas veces se confunden con fallas mecánicas o de control, es decir, se piensa que algún componente está dañado. Las fallas mecánicas o de control ocurren cuando efectivamente existe algún componente dañado. (Garza, 2011)

2.7.6.1 Horno Eléctrico.

Fallas de Proceso

1. *El horno tarda mucho en llegar a la temperatura de proceso.*

Esta es una falla muy común y regularmente está ligada al diseño del horno. La temperatura que la mayoría de los hornos de este tipo leen es la del aire: si el horno se tarda en calentar el aire, lo más probable es que esté diseñado incorrectamente. Cabe señalar que entre menor sea el tiempo de reacción del horno, el consumo de energía y el costo del horno es mayor, ya que para calentar el aire en menor tiempo se requiere mayor energía y esto aumenta el tamaño de resistencia, conductores y equipo de control.

Lo recomendable es que los hornos se diseñen para alcanzar la temperatura de proceso en un rango de 10 minutos para temperaturas no muy altas de 60-70° C y de 20-30 minutos para temperaturas de 180-250° C, a menos de que su proceso sea de alto volumen y no le permita estos tiempos.

Otra causa por la que el horno se tarda en calentar puede ser resistencias dañadas, fusibles abiertos y/o bajo voltaje.

2. *La pintura no cura totalmente.*

Esta falla puede estar ligada principalmente a las siguientes causas,

- a. Mal distribución del aire dentro del horno. Si el aire no tiene un flujo homogéneo, la temperatura en el horno no es homogénea, por lo que la pintura no cura igual.
- b. Propiedades físicas de las piezas. Algunas propiedades físicas de las piezas tales como: forma, coeficiente de transferencia de calor, distribución de masa, etc., causan que la pieza gane calor más rápido en algunas áreas que en otras; por lo que la pintura puede no llegar a curar en ciertas áreas, esto regularmente se corrige aumentando el tiempo de residencia en el horno.
- c. Temperatura de proceso baja: se aumenta la temperatura de curado hasta donde su pieza y especificaciones de pintura le permitan.

3. *Brillo o tonalidad diferente después del horneado.*

- a. Proceso de flasheo y curado erróneo: se igualan las condiciones de flasheo y curado emitidas por el fabricante de la pintura.
- b. Temperatura muy elevada. Algunas personas aumentan la temperatura de sus hornos por encima de la temperatura recomendada por el fabricante, esto con tal de reducir el tiempo de residencia; esto no es recomendable si su pieza no es homogénea en forma y distribución de masa, ya que al no ser homogénea, gana mayor temperatura en ciertas partes lo que hace que la pintura se quemé cambiando así su tonalidad y brillo.

Fallas Mecánicas o de Control.

1. *Switch de Presión Dañado*

El switch de presión es un dispositivo que verifica que el recirculador esté efectivamente recirculando aire, es un diafragma que por un lado se conecta al lado de baja presión (succión) y por el otro lado, al de alta presión. Cuando se enciende el recirculador, éste impulsa el diafragma contra un resorte y activa unos contactos, los cuales permiten que circule corriente por la resistencia y genere así el calor. El switch de presión puede fallar por las siguientes causas:

- a. Diafragma roto.
- b. Mecanismo de guía y resorte atorado.
- c. Mangueras de conexión rotas, dobladas o destruidas.

d. Ductería de recirculación con fugas.

2. *Cables y terminales quemadas.*

Una falla muy común en hornos eléctricos son las terminales y cables quemados, esto regularmente causado por terminales flojas y/o conexiones mal realizadas. Cuando en una resistencia de 440V y alta corriente existe un falso contacto, se provoca un “chisporroteo” que realmente es un efecto físico llamado plasma en donde se generan muy altas temperaturas que son capaces de fundir cualquier tipo de metal, por esto, se recomienda siempre asegurarse de apretar las conexiones al máximo y de utilizar las terminales adecuadas.

Otra causa de lo anterior, es el usar cables y terminales menores a las permisibles ya que al hacer circular corriente por un área pequeña se genera una resistencia y al circular corriente por esta resistencia se genera calor, que en algunos casos es tan alto que quema los aislamientos y bases plásticas de las terminales.

3. *Resistencias reventadas.*

Esta es otra falla común. Las resistencias suelen hacer corto circuito y esto sólo se debe a que la recirculación de aire no es suficiente para llevarse el calor que la resistencia genera, por lo que el elemento resistivo sube de temperatura hasta que éste se funde y produce un corto circuito. Si esto sucede, se debe evaluar la velocidad de aire a través de su banco de resistencia que debe ser de 500 ft/min. en aplicaciones de baja temperatura 60-70° C y de 1,500 a 2,000 ft/min. en aplicaciones de 160 a 250° C.

2.7.6.2 *Horno de Gas*

Ya que el gas es muy inflamable el horno de gas tiene más sistemas de seguridad. Algunos de ellos son:

- Sistema de Barrido Son temporizadores que efectúan un barrido con aire puro antes de inyectar gas y de generar la chispa de ignición para así evitar una explosión.
- Solenoide de baja y alta presión Estos detectan que la presión de gas sea la adecuada.
- Detector de flama Detecta que efectivamente el gas esté en combustión.

Fallas de Proceso

- 1) Consumo excesivo de gas
Generalmente, se debe a una mala carburación del quemador (relación de aire y combustible errónea) para dicha temperatura de proceso.
- 2) Paredes de horno caliente
Esto se debe a aislamientos de mala calidad o a un mal diseño del horno, independientemente de a qué temperatura se trabaje el horno, la temperatura exterior de éste debe ser tal que se soporte al tacto, no más de 40°C.
- 3) Explosión o conato de incendio por generación interna de VOC.
En algunos casos existen recubrimientos que al curar emiten un alto volumen de VOC y sustancias inflamables, definitivamente, un horno de gas no se puede utilizar en este tipo de procesos.

Fallas Mecánicas o de Control

- 1) El quemador no enciende Se puede deber a:
 - a. Falta de gas (verificar suministro).
 - b. Relación de aire-combustible errónea (carburar correctamente).
 - c. Electrodo de ignición en mal estado o fuera de lugar (ajustar o reemplazar electrodo).
 - d. Aire en las líneas de gas (purgar línea de gas).
 - e. Presión fuera de rango (revisar suministro).
 - f. Detector de flama dañado (reemplazar).
- 2) Cámara de combustión humeando o a muy alta temperatura
Esta falla generalmente se debe a un flujo de aire pobre dentro de la cámara de combustión, por lo que todo el calor generado por la combustión del gas se queda ahí, causando una sobre temperatura, también se puede deber a un quemador mal ajustado.
- 3) Descontrol de temperatura
Es muy difícil controlar la temperatura, ésta sube muy por encima del punto de ajuste y vuelve a bajar y así se mantiene la variación, puede deberse a que se usan termopares muy sensibles que inmediatamente ven el cambio en sólo una porción del aire que se está recirculando y no del total del sistema. Esto se corrige cambiando el tipo de termopar o utilizando un termo pozo.

2.7.6.3 Hornos de Infrarrojos.

Los hornos de infrarrojos funcionan bajo un principio diferente a los convencionales, éstos utilizan la radiación que se refiere a la transmisión de energía por medio de ondas o luz como los rayos infrarrojos. Los hornos de infrarrojos trabajan calentando un elemento a temperaturas muy elevadas, por lo que éste empieza a emitir rayos infrarrojos liberando así energía, la cual es luego absorbida por las partes pintadas.

Existen dos tipos de hornos de infrarrojos: los de onda corta (lámparas de halógeno y cuarzo) y los de onda larga (elemento resistivo). Los dos trabajan bajo el mismo principio, sólo que los hornos de onda corta son más eficientes ya que no requieren de precalentamiento y pueden curar las partes tan pronto entren en el horno.

Fallas de Proceso.

1. Las piezas no curan correctamente o no alcanzan la temperatura deseada.

Esta es una falla muy característica de los hornos de infrarrojos y la mayoría de la gente piensa que hay un problema en el horno, porque al desconocer la tecnología, lo ajustan incorrectamente.

Los hornos infrarrojos normalmente pueden ser controlados de dos formas: una por porcentaje y otra controlando la temperatura del elemento resistivo. Aquí es donde la mayor parte de la gente se confunde y creen que esta temperatura es la que va a alcanzar la pieza que van a curar y no es así, por ejemplo: “Si yo necesito curar una pieza a 150° F, sería un error ajustar mi horno a 150° F, ya que ésta es sólo una temperatura de referencia que controla la temperatura del elemento resistivo y por lo tanto, la cantidad de rayos infrarrojos que éste libera. Lo correcto es hacer una tabla de correlación en donde por medio de pruebas se determine la temperatura a la que se debe ajustar el horno para que la pieza llegue a 150° F”.

La temperatura de ajuste va a depender de muchos factores, tales como tipo de termopar, posición de éste con respecto al elemento resistivo, color de la pieza, etc. Puede ser que el horno o elemento se tenga que ajustar a 450° F para que la pieza llegue a una temperatura de 150° F y esto de ninguna forma significa que el horno esté fallando.

2. Partes quemadas o deformadas por calor.

Esta es otra falla muy común en hornos de IR y normalmente está ligada a dos cosas:

- a. Tiempo de residencia. Debido a que aquí el calentamiento no se efectúa por convección, la parte puede estar ganando temperatura sin importar la temperatura ambiente y a que sigue expuesta a los rayos IR por lo que si se deja la pieza dentro del horno más tiempo, ésta puede correr el riesgo de quemarse o deteriorarse.
- b. Posición de termopares: Si por algún motivo, una pieza golpea un termo y cambia su posición con respecto al emisor o elemento resistivo, éste se puede desbocar emitiendo su máxima potencia en generación de IR, por lo que la pieza está ahora expuesta a una mayor cantidad de energía y su temperatura subirá sin control.

3. *Termografías incorrectas*

La mayor parte de los hornos están zonificados, esto es con el fin de hacer que las piezas ganen mayor calor al principio para que se eleve su temperatura rápidamente y luego sólo se le da energía suficiente para mantener cierta temperatura. La mayoría de la gente ajusta todas las zonas a la misma temperatura lo que es un error muy común, lo correcto es ajustar las primeras zonas a mayor temperatura que las últimas.

Fallas Mecánicas o de Control.

1. *Explosión de contactores*

Esta es una falla muy común en aquellos hornos que usan contactores de mercurio, éste es un metal líquido que se utiliza en dichos contactores como interruptor, al excitarlo con voltaje, se expande y cierra el circuito, actuando como conductor. El problema es que si dicho contactor presenta una fuga interna, el mercurio de una fase, hace contacto con el de otra fase, provocando así, un corto circuito que resulta en una explosión dentro del tablero de control que no es de proporciones alarmantes, pero definitivamente, puede causar un conato de incendio.

2. *Cortos circuitos dentro del horno.*

Esto regularmente ocurre en hornos de onda corta en donde se usan bulbos de cuarzo, en algunas ocasiones las piezas golpean los tubos de cuarzo, quebrándolos y dejando el filamento de tungsteno expuesto como si fuera una línea de voltaje y cuando esto toca tierra, causa un corto circuito. Es por eso que se recomienda que las piezas estén bien sujetas al entrar al horno.

3. *Valores de temperaturas demasiado elevadas.*

Este es otro problema común en los hornos de onda larga y normalmente se debe a que el termopar está haciendo contacto con el elemento resistivo. En este caso se requiere evaluar si el relleno de óxido cerámico está en buen estado, de ser así, sólo se recomienda el termopar, de lo contrario hay que cambiar el panel.

2.8 BIBLIOGRAFÍA

Aguilar, J. (2010). *Hornos Metalurgicos*. Mexico.

Almanza, L. (2008). *Diagnostico del sector siderurgico y metalurgico en Colombia y evaluación de alyternativas tecnologicas para dar cumplimineto de la propuesta tecnica noram de emisiones de fuentes fijas*. Bogotá D.C.: Universidad de la Salle.

ANAFALCO. (s.f.). Recuperado el 11 de 11 de 2014, de <http://www.anafalco.com.co/anafalco-web/?q=node/63>

ANDI. (2013). *Asociación Nacional de Empresarios de Colombia*. Recuperado el 19 de 11 de 2014, de <http://www.andi.com.co/>

Argos. (2013). Recuperado el 01 de Septiembre de 2014, de <http://www.reporteintegradoargos.co/public/pdf/reporte-integrado-argos-sostenibilidad-ambiental.pdf>

ArgosColombia. (2014). Recuperado el 02 de septiembre de 2014, de <http://www.argos.co/colombia/productos/cemento/tipos>

Asometal. (9 de 11 de 2011). *Siderurgia*. Recuperado el 5 de Agosto de 2014, de www.asometal.org/siderurgia

Biblioteca Digital Universidad Javeriana . (s.f.). Recuperado el 11 de 11 de 2014, de <http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ingenieria/tesis146.pdf>

CAEM, CCB. (s.f.). *CORPORACIÓN AMBIENTAL EMPRESARIAL*. Recuperado el 19 de 11 de 2014, de <http://www.caem.org.co//catalogo/docs/Presentaci%C3%B3n%20EELA%20Fase%20%20folleto.pdf>

Carlos, L. (2008). *Evaluación Técnico Económica EMO's Aplicados a los procesos convencionales de producción en una empresa ladrillera*. Bogotá: U. Salle.

Castrillon, R. d. (2013). Mejoramiento de la eficiencia energética en la industria del cemento por proceso húmedo a través de la implementación del sistema de gestión integral de la energía. *Revista Dyna*, 115-123.

Centro Nacional de Producción Más Limpia y Tecnologías Ambientales . (s.f.). Recuperado el 21 de 11 de 2014, de <http://cnpml.org/templates/panalVerde/images/casos/EficienciaEnergeticaCalderasTintorero.pdf>

COLCIENCIAS, BID, Universidad de Pamplona, Universidad del Rosario. (19 de 03 de 2014). Recuperado el 20 de 11 de 2014, de http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_1/recursos/noticias_2014/marzo/31032014/plan_ciencia_tec.pdf

Colciencias, U. (2006). *Sistema de información de eficiencia energética y energías alternativas*. Recuperado el 01 de septiembre de 2014, de <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Procesos/cemento.pdf>

Comision Nacional de Medio Ambiente -Región Metropolitana. (1999). *Guía para el control y prevención de la contaminación industrial - Fabricación de vidrio y productos de vidrio*. Santiago: Comision nacional del medio ambiente.

Construdata. (s.f.). Recuperado el 11 de 11 de 2014, de <http://www.construdata.com/BancoConocimiento/L/ladrillosdiagnostico/ladrillosdiagnostico.asp>

CREARA. (2009). *Calderas eficientes-Eficiencia Energetica*. Recuperado el 5 de mayo de 2013, de www.eficienciaenergetica.com/calderas-eficientes

Díaz, J. (2014). *Indicadores Energéticos y estado actual del mantenimiento en la industria ladrillera de la zona metropolitana de Cúcuta*. Cúcuta: Universidad Nacional Experimental del Tachira.

El Tiempo. (24 de 04 de 2004). Recuperado el 20 de 11 de 2014, de <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-1512955>

eva.fing.edu.uy. (2012). *calsificación de calderas*. Recuperado el 10 de agosto de 2014, de <https://eva.fing.edu.uy/mod/resource>

frd.utn.edu.ar. (2013). *Tecnicatura Superior en Mantenimiento INdustrial*. Recuperado el 20 de agosto de 2014, de www.frd.utn.edu.ar

Gilvonio Alegría, L. R. (2005). *Universidad Nacional Mayor de San Marcos*. Recuperado el 01 de Septiembre de 2014, de http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/cybertesis/1743/1/gilvonio_al.pdf

Gomez, C. (2010). *Modelamiento y Simulación de un horno Túnel Industrial*. Medellín: Universidad de Antioquia.

Gomez, V. (2009). *Fabricación de acero*. Tucumán: U.T.N. facultad regional Tucuman.

Herrero, M. (2009). *Soluciones de Alta Eficiencia en la Climatización - Observatorio*. Recuperado el 10 de mayo de 2013, de www.observatorioferroli.org

IDAE. (2007). *Guía Técnica: Procedimiento de inspección periodica de eficiencia energética para calderas*. Madrid España: IDAE.

IES Valle de Aller. (2011). *Metalurgia general*. Obtenido de blog.eduastur.es/tecnoaller/files/2011/02/principios_de_metalurgia

Instituto Tecnológico Sonora. (2009). *Clasificación de hornos para la fusión de metales*. Sonora: Instituto Tecnologicvo de Sonora Unidad Guayra.

La Llave. (febrero de 2009). *Por cada 1% que aumente la eficiencia de una caldera podemos ahorrar*. Recuperado el 10 de junio de 2013, de leer-mas.com/lallave/news6/info

Leyva, C. (2008). *Evaluación Técnico Económica EMO's aplicados a los procesos convencionales en una empresa ladrillera*. Bogotá D.C.: Universidad de la Salle.

Madias, J. (2011). *El Impacto de las recientes innovaciones en los hornos electricos de arco*. Buenos Alres: Metalon.

mantilla, S. (2011). *Desarrollo de una propuesta de optimización enregética de los hornos colmena de la empresa ladrillos ya cabados S.A.S*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

METAFUSION. (7 de 11 de 2013). *metfusión*. Recuperado el 10 de agosto de 2014, de <http://metfusion.wordpress.com/2013/14/facricación-y-procesamineto-del-acero/>

Meza, J. (s.f.). *Universidad de los Andes*. Recuperado el 21 de 11 de 2014, de http://dspace.uniandes.edu.co/xmlui/bitstream/handle/1992/365/mi_1250.pdf?sequence=1

Ministerio de Minas y Energía. (2014). *SIMCO.GOV.CO*. Recuperado el 20 de 8 de 2014, de <http://www.simco.gov.co/portals/0/Analisis%20Sectorial/Produccion%20I%20Trimestre%202013.pdf>

Nalco de Colombia. (s.f.). Recuperado el 21 de 11 de 2014, de <http://es-la.nalco.com/aboutnalco/colombia.htm>

Pardo Martínez, C. I. (29 de 04 de 2011). *La eficiencia energética en la industria manufacturera Colombiana: una estimación con Análisis Envolvente de Datos-DEA y Datos de Panel*. Recuperado el 19 de 11 de 2014, de http://revistaeconomia.puj.edu.co/html/articulos/Numero_11/PARDO.pdf

Perilla Claro, N. (2013). *Repositorio Universidad de la Salle- ¿COLOMBIA ES COMPETITIVA EN LA INDUSTRIA DEL VIDRIO?* Recuperado el 19 de 11 de 2014, de <http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/11286/1/PerillaClarosNelcy2013.pdf>

Plan de Eficiencia Energetica 2006-2015. (julio de 2006). *Calderas de condensación - Tecnologías eficientes - Climatización*. Recuperado el 15 de mayo de 2013, de www.caib.es/conselleries/industria/dgener

Programa de transformación productiva. (20 de 03 de 2013). Recuperado el 19 de 11 de 2014, de [https://www.ptp.com.co/documentos/2013%2003%2020%20entregable%204%20resumen%20ejecutivo%2020de%20marzo%20de%202013%20\(2\).pdf](https://www.ptp.com.co/documentos/2013%2003%2020%20entregable%204%20resumen%20ejecutivo%2020de%20marzo%20de%202013%20(2).pdf)

Red del conocimiento. (2011). *Metalurgia propiedades -Red del Conocimiento*. Recuperado el 25 de 7 de 2014, de redelconocimiento.org/profiles/blogs/metalurgia-propiedades

RETSscreen International. (2012). *boilers & thermic fluid heaters -RETSscreen International*. Recuperado el 5 de agosto de 2014, de www.retscreen.net/.../Boilers_and_ThermicFluidHeat

Satellite. (1992). *Tecnologías de calefacción de alta eficiencia energética*. Recuperado el 12 de mayo de 2013, de www.madrid.org/cs/Satellite

Scribd. (23 de 10 de 2013). *Metalurgia - Scribd*. Recuperado el agosto de 2014, de es.se

Scribd. (23 de 10 de 2013). *Metalurgia - Scribd*. Recuperado el 5 de 8 de 2014, de es.scribd.com/doc/178531744/metalurgia

SENA. (2003). *Caracterización ocupacional Industria de la arcilla*. Bogota D.C.: Servicio nacional de aprendizaje - SENA.

sic.gov.co. (2 de 12 de 2008). *Resolución 24103 Archivo averiguación preliminar PAz del Rio, Diaco, Aceros Boyacá*. Recuperado el 25 de julio de 2014, de www.sic.gov.co/ /Resolución_24103_Archivo

soliclima. (2012). *Biomasa - Soliclima*. Recuperado el 10 de mayo de 2013, de www.soliclima.es/biomasa

Tecnología de los Materiales. (2008). *Tecnología de los materiales: Metalurgia*. Recuperado el Agosto de 2014, de Tecnología de los materiales: marzo 2008

TecnologíasLimpias, C. I. (s.f.). *Red Interinstitucional de Tecnologías Limpias*. Recuperado el 02 de Septiembre de 2014, de http://www.tecnologiaslimpias.org/html/central/369201/369201_eca.htm

U. Atlantico. (2001). *Ahorro de Enrgía en la Industris Cerámica*. Bogotá D.C.: UPME.

Velez R, J. M. (06 de 2004). *Biblioteca Digital Unal*. Recuperado el 11 de 11 de 2014, de <http://www.bdigital.unal.edu.co/12720/1/70503554.2005.pdf>

WOLF. (28 de noviembre de 2012). *tecnologia de calefaccion de alta eficiencia energetica*. Recuperado el 8 de mayo de 2013, de www.fenercom.com/.../Tecnologias-de-calefaccion-de-alta-eficiencia

Yahoo Respuestas. (4 de 8 de 2009). *Que es la Metalurgia?* Recuperado el 20 de Julio de 2014, de <https://espanol.answers.yahoo.com/>

Armun. (2005). *Pintura Arnum*. Recuperado el 20 de octubre de 2014, de www.finishing.com/Library/pennisi/powder

Escobar, j. F. (2009). *Estudio de factibilidad para renovación de tecnología en hornos de curado de pintura electrostatica en ñla industria de elvadores*. Medellin: Universidad EAFIT.

frlp.utn. (2009). *Metodods de aplicación e instalación de pintura*. Recuperado el octubre de 2014, de www.frlp'.unt.edu.ar/materias/protecmat/aplicacion.pdf

Garza, G. (2011). *Fallas en Hornos de curado. Acabado de pinturas*. Recuperado el 2014, de www.impralatina.com

ISR - University of Coimbra, VSDs for electric motor systems. 2003