

The background image shows an industrial boiler room with various pipes, valves, and machinery. A large cylindrical boiler is the central focus, surrounded by a network of pipes and structural steel. The entire scene is overlaid with a semi-transparent green filter. The text is positioned in the upper right quadrant of the image.

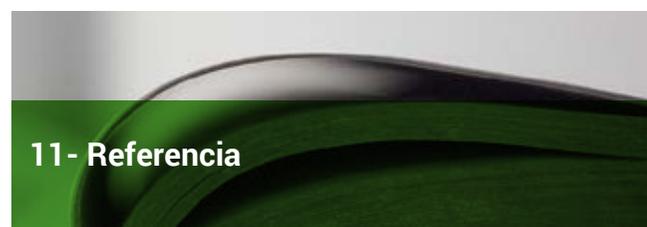
Guía para la Evaluación de Elegibilidad de Financiación de Proyectos de Eficiencia Energética

Tipo de Proyecto

Calderas de Alta Eficiencia



BANCO DE DESARROLLO
DE AMÉRICA LATINA





Glosario

Autoclave: BTU: Unidad Térmica Británica. Unidad para medir el calor, un BTU es la energía requerida para elevar la temperatura de una libra de agua un grado Fahrenheit.

BHP: Boiler Horse Power. Unidad para medir potencia. Se utilizada en la clasificación de la capacidad de una caldera de entregar vapor a un motor de vapor. Un BHP equivale 33.475 BTU/h o 9,8095 kW.

Dióxido de carbono (CO₂): es el principal gas de efecto invernadero, emitido principalmente a través del uso del transporte, la industria, la producción de energía eléctrica, la agricultura y la deforestación.

Eficiencia energética: es la forma de gestionar y limitar el crecimiento del consumo de energía. Un proceso más eficiente puede producir más bienes o servicios con la misma o menor cantidad de energía. Por ejemplo, una bombilla fluorescente compacta (CFL) utiliza menos energía que una bombilla incandescente para producir la misma cantidad de luz.

Eficiencia nominal: es la razón porcentual que sirve para medir la eficiencia productiva de la maquinaria industrial.

Factor de emisión: promedio de un gran número de mediciones de emisiones de contaminantes atmosféricos que son representativas de un tipo de fuentes de emisión, por ejemplo, el factor de emisión del Sistema Interconectado Eléctrico de Colombia es 0,37 kg de CO₂ /kWh (EIA, 2012); esto quiere decir que por cada 100 kWh consumidos se emiten 37 kg de CO₂.

Gases de efecto invernadero (GEI): los gases de efecto invernadero son la principal causa del calentamiento global. La mayoría de estos gases como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), los óxidos nitrosos(NOx), entre otros, son liberados a la atmosfera por la actividad humana.



Glosario

kWh: El kilovatio-hora, equivalente a mil vatios-hora, es una unidad utilizada para medir la energía consumida o utilizada en determinado tiempo. Para el caso de esta guía, se hace la diferenciación entre kWh_e y kWh_t para expresar la energía eléctrica y térmica consumida respectivamente.

Periodo de retorno simple: tiempo que tarda una inversión en pagarse basado en el flujo de caja del proyecto. . Por ejemplo, el período de retorno simple de una inversión de 300 USD con ahorros anuales de 100 USD tiene un periodo de retorno simple de 3 años.

Poder Calorífico: cantidad de energía por unidad de masa o volumen de combustible que se puede desprender al producirse una reacción química de oxidación. Se diferencia en Poder Calorífico Superior (PCS) y Poder Calorífico Inferior (PCI), el primero considera que el agua que se forma en la combustión sale líquida, y en el segundo, se considera que sale como vapor. Teniendo en cuenta que la condición real de la mayoría de equipos de combustión es la segunda, en esta guía se considerará el PCI.

Valor exante: valor medido antes del cambio tecnológico en proyectos de eficiencia energética.

Valor expost: valor medido después del cambio tecnológico en proyectos de eficiencia energética.

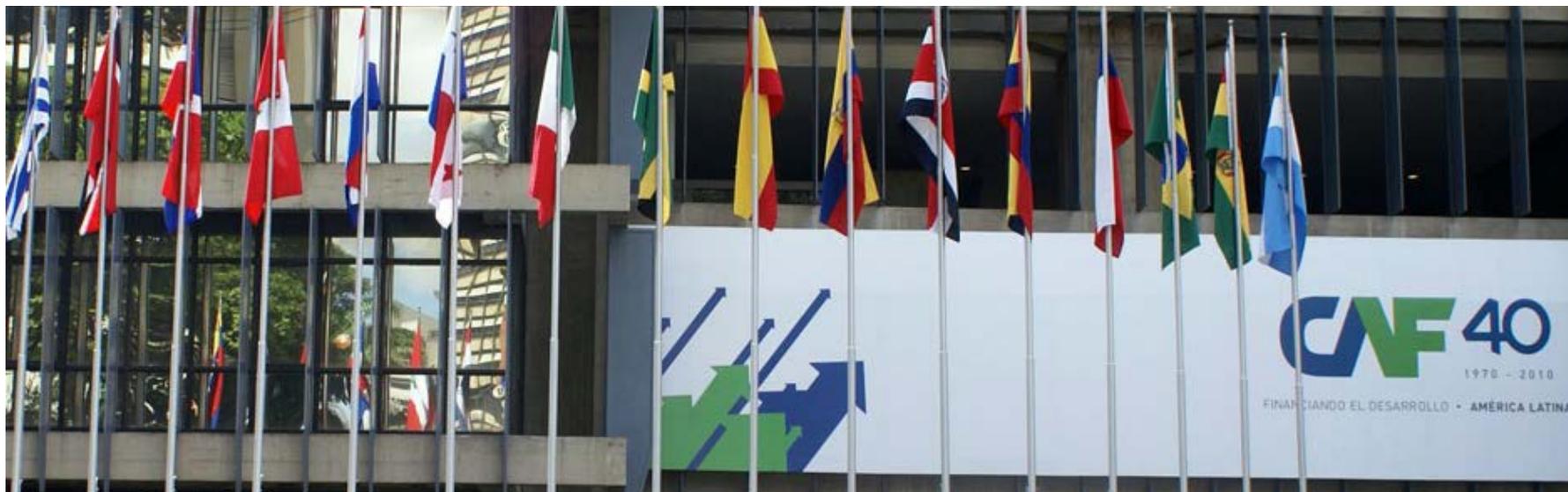
Tabla de conversiones

En la tabla 1 se presentan las unidades utilizadas en este manual que sirven como referencia para las diferentes conversiones de unidades que se encuentran a lo largo del documento.

Tabla 1. Tabla de conversión de unidades.

Potencia	kilowatt (kW)	HP	BTU/h
kilowatt (kW)	1	1.341	3.412,14
HP	0,754	1	2.544.43
BTU/h	0,00293	0,0003928	1

Energía	Kilowatt-hora (kWh)	Jules	GigaJules	PetaJules	BTU
kilowatt-hora (kWh)	1	3.600.000	0,0036	3,6e-9	3.412,14
Jules	0,000000278	1	1e-9	1e-15	0,0009478
GigaJules	277,7	1e+9	1	1e-6	947.817
PetaJules	2,77e+8	1e+15	1e+6	1	9,47e+11



1. Presentación

CAF -banco de desarrollo de América Latina- tiene como misión impulsar el desarrollo sostenible y la integración regional, mediante el financiamiento de proyectos de los sectores público y privado, la provisión de cooperación técnica y otros servicios especializados. Constituido en 1970 y conformado en la actualidad por 19 países 17 de América Latina y el Caribe, junto a España y Portugal y 13 bancos privados, es una de las principales fuentes de financiamiento multilateral y un importante generador de conocimiento para la región.

CAF adelanta el desarrollo del Programa de Eficiencia energética desde la demanda (EE) y Negocios Verdes (NV) con Instituciones Financieras (IF), cuyo objetivo es fomentar una mayor inversión de empresas Latinoamericanas en NV y EE. Para lograrlo contarán con financiamiento de CAF a través de las líneas de crédito que mantiene con IF's, asistencia técnica y fortalecimiento de mercados en NV y de EE.

En este contexto, esta guía, dirigida a las Instituciones Financieras, tiene

como objetivo fortalecer los programas ambientales y sociales de las IF's y mejorar sus capacidades, las de sus clientes y las de sus recursos de outsourcing; para identificar, evaluar y financiar proyectos de EE; asimismo, gestionar los riesgos ambientales y sociales asociados con la financiación este tipo de proyectos.

Incluye aspectos técnicos y de inversión, criterios de elegibilidad de proyectos para ser financiados por las IF's, y los mecanismos de monitoreo, reporte y verificación de los beneficios ambientales generados por las inversiones realizadas.

Esta guía es parte de un conjunto de documentos que comprende los sectores y tecnologías con mayor potencial de fomentar las inversiones en eficiencia energética. En la tabla 2 se presenta el conjunto de documentos elaborados para el Programa de Eficiencia Energética desde la Demanda (EE-D) y Negocios Verdes (NV) con Instituciones Financieras (IF's) de acuerdo con el tipo de proyecto y el sector.

Tabla 2. Manuales por sector y guías por tipo de proyecto

Manuales Por Sector											
Guías Por Tipo De Proyecto		Alimentos y bebidas	Textiles	Cemento	Pulpa y papel	Siderurgia y metal mecánica	Agroindustria	Hoteles y hospitales	Alumbrado público	Grandes superficies	Transporte
	Motores de alta eficiencia	✓	✓	✓	✓	✓	✓				
	Cogeneración de energía	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	
	Sustitución de combustibles	✓	✓	✓	✓		✓	✓			✓
	Iluminación de alta eficiencia	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	
	Calderas y sistemas de vapor	✓	✓		✓		✓	✓			
	Aire acondicionado							✓		✓	
	Refrigeración	✓								✓	
	Calentamiento de agua con energía solar							✓			
	Hornos			✓		✓					
	Aire comprimido	✓	✓	✓	✓	✓					
	Energía solar fotovoltaica							✓	✓	✓	
Automatización de procesos							✓	✓	✓		

Así por ejemplo, se elaboró la guía para el desarrollo de proyectos de calderas de alta eficiencia y sistemas de vapor, que es aplicable a sectores como alimentos y bebidas, textiles y pulpa y papel.



2. Aplicabilidad

Esta guía presenta los aspectos técnicos, financieros y ambientales relacionados con el desarrollo de proyectos de inversión en calderas de alta eficiencia y sistemas de vapor, tanto en proyectos nuevos como para proyectos en operación.

Las principales fuentes de energía a nivel industrial y comercial son la energía eléctrica, utilizada principalmente en motores, y el calor en forma de vapor generado usualmente con calderas.

Las calderas de alta eficiencia son ideales en sitios donde las calderas existentes tienen más de 15 años de operación, sin control de combustión o con un control de combustión antiguo, eficiencias en el rango de 60% a 70%, y altos costos de combustible y mantenimiento.

Los sectores con mayor potencial para el desarrollo de proyectos de inversión en calderas de alta eficiencia y sistemas de vapor son los que se observan en el siguiente cuadro, para los cuales se han desarrollado manuales sobre las oportunidades de eficiencia energética



Para estos sectores también se han desarrollado manuales donde se explican las diferentes oportunidades de eficiencia energética.



3. Introducción

Las calderas de alta eficiencia y los sistemas de vapor tienen importantes aplicaciones en múltiples sectores. En la tabla 3 se presenta un resumen de las aplicaciones en los diferentes sectores industriales y comerciales.

Tabla 3. Aplicación de los sistemas de calderas y vapor en distintos sectores industriales.

Sector	Aplicación	Proceso
Energético.	Generación de energía eléctrica.	Generación de vapor a alta presión y alta temperatura para operar turbinas de vapor.
Agroindustrial.	Generación de calor y cogeneración de energía.	Generación de vapor mediante la utilización de biomasa residual (bagazo, cuesco de palma) para la producción de energía eléctrica y vapor para los procesos.
	Generación de frío.	Generación de vapor para la operación de sistemas de absorción que producen frío para el proceso.
Alimentos y bebidas.	Generación de calor y cogeneración de energía.	Generación de vapor para procesos de calentamiento y cogeneración de energía eléctrica.
Textiles.	Generación de calor y cogeneración de energía.	Generación de vapor para procesos de calentamiento y cogeneración de energía eléctrica.
Pulpa y papel.	Generación de calor y cogeneración de energía.	Generación de vapor para procesos de calentamiento y cogeneración de energía eléctrica.
Hoteles y hospitales.	Generación de vapor y agua caliente.	Generación de vapor para el uso en lavanderías, cocinas y para el calentamiento de agua sanitaria.

Como se puede concluir de la tabla anterior, el rango de aplicaciones de esta tecnología es amplio y el incremento de los costos de los combustibles, la disponibilidad de combustibles residuales como el biogás o la biomasa, la preocupación por la reducción de los costos energéticos y la reducción del impacto ambiental, hacen que las inversiones en estas tecnologías se hayan incrementado de manera importante en los últimos años.



4. Descripción de la tecnología

Las calderas son utilizadas para convertir la energía química de un combustible para aumentar el contenido de energía del agua. El proceso de combustión se realiza en el quemador donde el oxígeno reacciona con el carbono e hidrogeno del combustible para producir la llama y gases de combustión, los cuales son evacuados generalmente a la atmósfera. La llama calienta el agua a la presión de operación de la caldera hasta convertirla en vapor, que luego es transportada mediante tuberías hasta el lugar de uso final.

Las calderas pueden utilizar diferentes tipos de combustibles dentro de los que se encuentra principalmente: gas natural, carbón, diésel y biomasas como bagazo de caña o cuesco de palma.

Cuando se habla de calderas se hace referencia tanto al quemador como a la caldera (recipiente que contiene el agua a evaporar) como tal. Sin embargo, el sistema de generación de vapor está conformado por otros equipos como la bomba de alimentación, el sistema de tratamiento de agua de ali-

mentación y el sistema de control, donde, implementando medidas de eficiencia energética se logra aumentar de manera considerable la eficiencia global de la instalación.

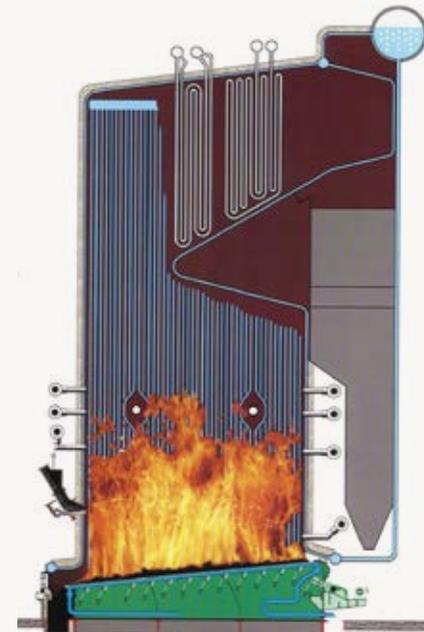
Comúnmente las calderas se dividen en piro-tubulares o acuotubulares. La diferencia radica en si los gases de combustión pasan por los tubos ubicados dentro de la carcasa de la caldera llena de agua a presión (pirotubulares), o si el agua fluye por los tubos dentro de la carcasa de la caldera y los gases de combustión fluyen alrededor de estos tubos (acuotubulares). Las calderas acuotubulares usualmente son utilizadas para aplicaciones de alta presión, principalmente para plantas termoeléctricas, mientras que las calderas piro-tubulares son las de mayor uso en la industria y a nivel comercial.

En las figuras 1 y 2 se pueden observar los esquemas de una caldera piro-tubular y una caldera acuotubular respectivamente.

Figura 1. Esquema de una caldera pirotubular¹



Figura 2. Esquema de una caldera acuotubular.²

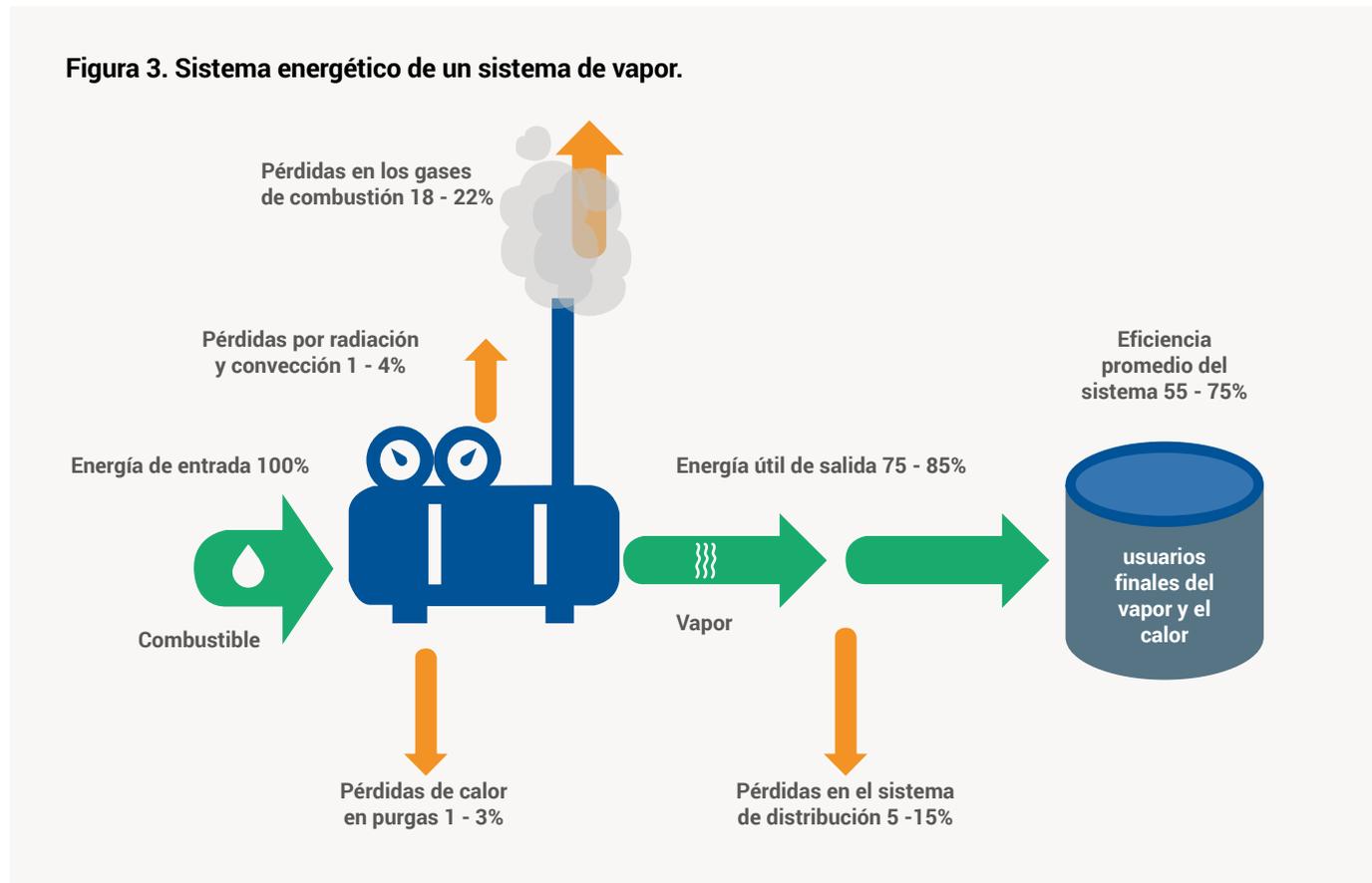


¹ Fuente: www.hovalpartners.com/products-solutions/solutions/industrial-boiler-solutions

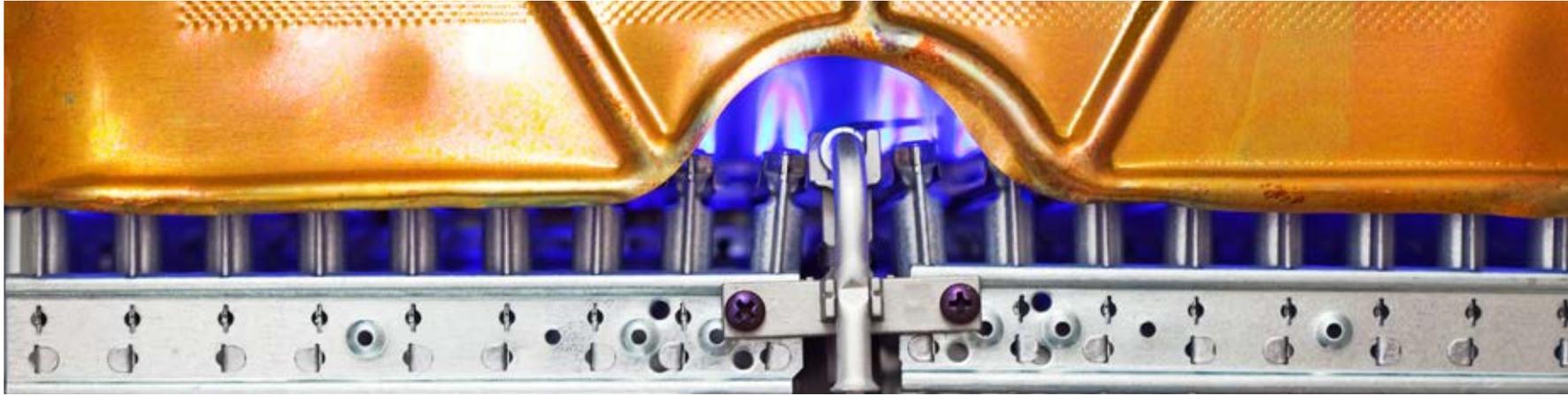
² Fuente: www.boilersarfi.com

Las calderas pirotubulares se utilizan en aplicaciones pequeñas de hasta 1.000 BHP equivalente a una generación de vapor de 34.500 lb/h, mientras que las calderas acuotubulares se usan para aplicaciones industriales donde los requerimientos de vapor pueden alcanzar las 250.000 lb/h como en el caso de una planta termoeléctrica.

El principal costo asociado a una caldera durante su vida útil se debe al consumo de combustible, por lo cual, disminuir el consumo de combustible, equivalente a aumentar la eficiencia del equipo trae consigo grandes ahorros económicos e importantes reducciones de emisiones de contaminantes y GEI. En la figura 3 se muestra el balance de energía típico de una caldera de vapor, la mayor pérdida se encuentra en los gases de combustión y en las purgas.



Como se puede observar en la figura 3, las mayores pérdidas de energía en el sistema de vapor se encuentran en la caldera (flujo de gases) y en el sistema de distribución de vapor, que hacen que la eficiencia promedio del sistema de generación y uso en conjunto llegue a ser tan baja como el 55%.



4.1. Medidas de eficiencia energética.

En promedio, la eficiencia de una caldera antigua está alrededor del 70% al 80% (incluso menos cuando es de biomasa), es decir, de la cantidad de energía disponible en el combustible se convierte en vapor solo esa fracción, lo restante son pérdidas de energía al ambiente. Este valor de eficiencia puede ser menor si la caldera es de baja tecnología o tiene un mantenimiento deficiente.

Al momento de analizar un proyecto de eficiencia energética en un sistema de generación de vapor existen dos posibilidades:

- Realizar medidas de eficiencia energética, que consisten en la implementación de nuevos equipos o sustitución de algunos de ellos, pero no hay sustitución de la caldera como tal.
- La sustitución de la caldera antigua por una de mayor eficiencia.

Otras medidas de eficiencia como el retorno de condensados del proceso, reemplazo de trampas de vapor, aislamiento de redes de distribución, etc., aunque generan ahorros de energía y reducción de emisiones, no afectan de manera directa la eficiencia de la generación del vapor. Estas medidas no son consideradas en esta guía dado que requieren inversiones bajas y son realizadas normalmente por las empresas con sus propios recursos sin recurrir a financiamiento bancario.

Existen diferentes medidas de eficiencia energética que ayudan a disminuir las pérdidas en la caldera, entre las que se encuentran:

4.1.1. Mejoras en la eficiencia de la combustión.

- **Sustitución o actualización del quemador.** Los quemadores más viejos, mal dimensionados o mecánicamente deteriorados, son ineficientes. Las compuertas inoperantes, registradores rotos o las toberas obstruidas, hacen que un buen quemador tenga un pésimo desempeño. Estas ineficiencias producen una combustión incompleta (emisiones de monóxido de carbono elevado (CO) y carbono no quemado), además de la necesidad de usar un alto exceso de aire, aumentando las pérdidas en los gases de combustión. La actualización de quemadores antiguos usualmente resulta difícil dado que es necesario considerar las normas actuales de emisiones y su sistema de control. Teniendo en cuenta lo anterior, es preferible la sustitución completa del quemador por uno de mayor eficiencia, mejor desempeño a diferentes cargas, bajas emisiones y menor exceso de aire para la combustión.
- **Mejoras en la combustión.** Esta medida va desde la calibración por un ingeniero experto en operaciones de calderas que mide la composición de los gases de combustión y realiza la calibración de manera manual del



sistema de combustión del quemador, hasta la implementación de un sistema de control que incluya sensores de temperatura, oxígeno y monóxido de carbono (CO) para ajustar los parámetros de calibración de manera automática. Se estima que por cada 2% de exceso de aire en la combustión, se disminuye un 1% la eficiencia de la caldera debido al incremento innecesario del flujo de gases.

4.1.1. Mejoras en la eficiencia térmica.

- ★ **Economizadores y precalentadores de aire.** Esta medida busca aprovechar el calor residual de los gases de combustión, ya sea para precalentar el aire de combustión o para precalentar el agua de alimentación de la caldera (economizador). Se estima que por cada 50°C que disminuya la temperatura de salida de los gases de combustión, la caldera aumenta 1% la eficiencia. Actualmente, se implementan economizadores de condensación de doble etapa. Este tipo de economizador combina las funciones de un economizador estándar sin condensación (sólo recupera calor) y un economizador de condensación (denominados así porque condensan el agua que está como vapor en los gases de combustión). La primera sección del economizador recupera la energía me-

dante el precalentamiento del agua de alimentación de la caldera, la segunda sección recupera la energía mediante el precalentamiento del agua de reposición a la caldera. Los economizadores de condensación pueden aumentar el ahorro de energía hasta un 10%, dependiendo del diseño y las condiciones de funcionamiento.

- ★ **Recuperadores de calor en purgas:** todas las calderas requieren purgas periódicas para controlar los sólidos disueltos en el agua y evitar el arrastre de agua en la tubería de vapor. En la mayoría de las plantas, las purgas se dirigen a un tanque de enfriamiento rápido y luego se vierten al sistema de aguas residuales. Es posible utilizar la tubería de purga como fuente de calor para precalentar el agua de alimentación en el tanque de desaireación o en el tanque de almacenamiento de agua de condensación. Aproximadamente el 85% de la pérdida en las purgas se puede recuperar con un intercambiador de calor instalado en cualquiera de los tanques, obteniendo así aproximadamente un 1,7% de eficiencia total.

En la tabla 4 se pueden observar las diferentes medidas de eficiencia energética que existen para disminuir las pérdidas indicadas anteriormente.



Tabla 4. Medidas de eficiencia energética en sistemas de calderas.³

Medida	Aplicación	Incremento de eficiencia	Reducción de CO ₂	Costo de inversión aprox.
Reemplazo/actualización del quemador.	Todas las calderas con combustibles diferentes a sólidos.	Hasta 5%.	Hasta 6%.	2,500 USD – 5.100 USD por MMBTU/h.
Mejoras en la combustión:	La implementación de un sistema de control solo aplica para calderas de gran capacidad.	0,5% - 6%.	Hasta 8%.	Desde 3.000 USD (calibración manual) – 1.000.000 USD (sistema de control).
<ul style="list-style-type: none"> • Calibración manual. • Sistema de control. 				
Economizador.	En calderas con capacidades superiores a 25.000 lb/h.	Por cada 40 °C de reducción en los gases de combustión, la eficiencia aumenta en 1%.	Depende del aumento de la eficiencia alcanzado.	2.3 MMUSD para una caldera de 650 MMBTU/h.
Pre calentador de aire.	En calderas con capacidades superiores a 25,000 lb/h.	Una disminución de 300 °F representa un aumento del 6% de la eficiencia.	1% por cada 40 °C disminuido.	200.000 – 250.000 USD por cada 10 MMBTU/h.
Recuperador de calor en purgas.	En calderas de purgas continuas que excedan el 5% de su capacidad de producción de vapor.	Hasta el 7%.	3% de las emisiones de la caldera	50.000 -150.000 USD dependiendo de la capacidad de la caldera

³ Available and Emerging Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emissions from Industrial, Commercial, and Institutional Boilers

4.2. Sustitución de calderas antiguas por caldera de alta eficiencia.

La sustitución por una caldera de alta eficiencia no solo incluye la compra de una nueva caldera sino de todo el sistema completo como quemador y sistema de control. Las nuevas tecnologías en la caldera incluyen:

- **Número de pasos:** representa el número de veces en que los gases de combustión atraviesan la caldera. Una caldera de alta eficiencia cuenta con 4 pasos, lo cual ofrece cuatro oportunidades de transferir calor, logrando un mayor aprovechamiento del combustible, por lo tanto una mayor eficiencia.
- **Compatibilidad entre el quemador y la caldera:** muchos fabricantes de calderas ofrecen estos equipos con su propio quemador, los cuales (caldera/quemador) han sido diseñados como una sola unidad con el fin de garantizar una mayor compatibilidad y funcionamiento.
- **Sistema de control moderno:** con las últimas tecnologías en control es posible garantizar una apropiada mezcla de aire combustible al quemador con el fin de aumentar la eficiencia. Actualmente, muchas calderas vienen equipadas con un sistema de control de combustible denominado posicionamiento paralelo (parallel positioning) que consiste básicamente en dos actuadores separados para el suministro de aire y otro para el combustible, lo que logra una mayor precisión en la relación aire/combustible.
- **Alto turndown:** esto quiere decir que las calderas actuales pueden trabajar en un amplio rango de capacidades, sin verse afectadas de manera considerable su eficiencia, permitiéndole una mayor adaptabilidad a la demanda de vapor.





5. Descripción del proyecto

Aproximadamente el 96% del costo en el ciclo de vida de una caldera corresponde al consumo de energía, solamente el 3% corresponde a la inversión inicial y el 1% al costo de mantenimiento. Esta es la razón por la cual, la adecuada selección inicial y una inversión mayor en una caldera de alta eficiencia, genera ahorros importantes dado la larga vida útil que tiene este tipo de equipos (20 años o más).

Un proyecto de sustitución de calderas consiste en determinar en una planta industrial o en un edificio, cuáles calderas antiguas son susceptibles de ser sustituidas por calderas de alta eficiencia de manera rentable, esto depende de la capacidad de la caldera (en BHP o lb de vapor por hora), el tiempo de operación anual (h/año), el porcentaje de carga (% carga), la antigüedad, las condiciones de mantenimiento y las condiciones del proceso donde se en-

cuentra instalado. En un proyecto nuevo en el que se quiere realizar la inversión en calderas de alta eficiencia, se deben realizar los cálculos suponiendo que en vez de invertir en una caldera de alta eficiencia, se invirtiera en una caldera antigua

5.1. Línea base energética e información del nuevo proyecto.

La línea base energética se determina teniendo en cuenta la capacidad de generación de vapor de la caldera, la carga promedio y las horas de operación de la caldera actual o en caso de ser un proyecto nuevo se toman los datos de operación de una caldera antigua hipotética que funcionaría la misma cantidad de horas al año. El consumo se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Consumo de combustible actual} \left(\frac{\text{unidad}}{\text{año}} \right) = \frac{\text{Capacidad caldera} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) * \text{entalpía vaporización} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{Kg}} \right) * \% \text{ de carga} * \frac{\text{horas}}{\text{año}}}{\text{Poder calorífico combustible} \left(\frac{\text{kg}}{\text{unidad}} \right) * \text{eficiencia caldera actual} (\%)}$$

La entalpía de evaporización depende de la presión y temperatura de operación de la caldera y debe consultarse en las tablas de vapor saturado o vapor sobrecalentado.

5.2. Potencial de ahorro energético y reducción de emisiones de GEI.

El potencial de ahorro de combustible y de reducción de emisiones de GEI de un proyecto de cambio de caldera, se calcula teniendo en cuenta el consumo de combustible actual (línea de base) menos el consumo de combustible con la nueva caldera operando en condiciones similares.

El potencial de ahorro energético y de reducción de emisiones de GEI depende de la capacidad de la caldera, del número de horas de operación, de la variabilidad del proceso, de las condiciones de mantenimiento actuales y de la instalación de otras medidas de eficiencia energética como economizadores o precalentadores de aire, muchos proveedores ofrecen estos equipos desde su fabricación. En general, el potencial de ahorro puede establecerse entre un 10 y 30% del consumo de combustible actual.

Para la evaluación energética, económica y ambiental de un proyecto de sustitución de motores, se requiere como mínimo la información contenida en la tabla 5.

Tabla 5. Información mínima requerida para evaluar un proyecto de sustitución de calderas

Parámetro	Unidad	Fuente/Formula	Parámetro	Unidad	Fuente/Formula
A. Capacidad de caldera.	kg/hora	Información del proceso.	K. Consumo de combustible en caldera de alta eficiencia.	kg/año, m ³ /año, m ³ /año	$(A*B*E*G)/(J*K)$.
B. Porcentaje de carga.	%	Medición en campo.	L. Inversión en caldera alta eficiencia.	USD	Dato de inversión.
C. Presión de operación.	psig	Dato de campo.	M. Precio del combustible.	USD/kg, USD/Gal, USD/m ³	Dato de operación.
D. Temperatura de operación	°C, K	Dato de campo	N. Ahorro de combustible anual.	kg/año, m ³ /año, m ³ /año	I-K.
E. Energía de vaporización.	kJ/kg	Tablas Termodinámicas con dato C y D	O. Ahorro económico	USD/año	Q*P.
F. Eficiencia actual.	%	Medición en campo.	P. Periodo de retorno simple	años	L/O.
G. Horas de operación promedio al año	h/año	Medición en campo.	Q. Factor de emisión.	kg CO ₂ /unidad de combustible.	EIA o IPCC.
H. Poder calorífico del combustible.	kJ/kg, kJ/Gal, kJ/m ³	Información del proveedor.	R. Reducción de emisiones anuales.	kg CO ₂ /año	O*N.
I. Consumo de combustible actual.	kg/año, Gal/año, m ³ /año	$(A*B*E*G)/(F*H)$.			
J. Eficiencia de la caldera de alta eficiencia.	%	Entregada por fabricante.			

El valor de la reducción de emisiones de GEI se calcula teniendo en cuenta las emisiones generadas por la quema de combustibles antes del proyecto, menos las emisiones generadas por el consumo de combustible después del proyecto. Para el cálculo de las emisiones de los combustibles debe tenerse en cuenta su factor de emisión que puede obtenerse a partir de la información del IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático) o de la EIA (Agencia Internacional de Energía).

6. Requerimiento de inversión

Los requerimientos de inversión en calderas y sistemas de vapor de alta eficiencia dependen de factores como: la capacidad de producción de vapor, el tipo de caldera (acuotubular o piro-tubular), el tipo de combustible que usa (carbón, gas, combustibles líquidos, biomasa o biogás), la presión y temperatura del vapor (saturado o sobrecalentado), los sistemas de control de emisiones para cumplir con la regulación ambiental (filtros de tefalón, lavador de gases, precipitador electrostático) y los sistemas de control para mejorar la operación y la eficiencia de la combustión. En la siguiente tabla se resumen los precios indicativos de inversión en calderas incluyendo equipos de control y auxiliares, no se incluyen costos de instalación dado que dependen de las condiciones específicas del sitio donde se desarrolle el proyecto.

Tabla 6. Costos indicativos de inversión en calderas de alta eficiencia.⁴

Tipo de caldera	Características	Inversión aproximada
Calderas operando con gas o combustible líquido y capacidad menor a 100 BHP.	No requieren sistemas de control de emisiones por la limpieza del combustible.	1.000 – 1.500 USD/BHP.
Calderas operando con biogás y capacidad menor a 100 BHP.	No requieren sistema de control de emisiones, pero requieren sistema de limpieza del biogás para eliminar el H ₂ S.	2.000 – 2.500 USD/BHP
Calderas operando con carbón y capacidad mayor a 100 BHP.	Requieren sistema de control de emisiones de partículas y en algunos casos lavador de gases dependiendo del contenido de azufre del combustible.	1.500 – 2.000 USD/BHP.
Calderas operando con biomasa con capacidad menor a 1.000 BHP.	Requieren sistema de control de emisiones de partículas.	2.000 – 2.500 USD/BHP.
Calderas operando con biomasa con capacidad mayor a 1.000 BHP para cogeneración de energía.	Requieren sistema de control de emisiones de partículas.	80.000 – 100.000 USD/ton de vapor/hora. ⁵

⁴Fuente: elaboración propia a partir de información de mercado disponible.

⁵En calderas de gran capacidad de producción de vapor no suele expresarse la capacidad en BHP sino en toneladas de vapor por hora.



7. Análisis de riesgos técnicos, ambientales y sociales

En la siguiente tabla se resumen los potenciales riesgos técnico, ambientales y sociales de un proyecto de cogeneración y su estrategia de mitigación

Tabla 7. Matriz de riesgos técnicos, ambientales, financieros y sociales.

Riesgo	Tipo	Estrategia de mitigación	Riesgo	Tipo	Estrategia de mitigación
 <p>Selección de los equipos de acuerdo con las necesidades y condiciones del proceso.</p>	Técnico	Realizar un análisis técnico detallado de los requerimientos de vapor y calor para las condiciones del proceso en donde se va a instalar el nuevo equipo.			
 <p>Cumplimiento de la normatividad ambiental de emisiones.</p>	Ambiental	Debe asegurarse que los sistemas de control de emisiones permitan el cumplimiento de la normatividad local de acuerdo con el combustible que use la caldera.	 <p>Ahorros generados por el proyecto.</p>	Técnico / Financiero	Realizar un estudio técnico donde se realicen mediciones de campo de consumo de combustible y generación de vapor para determinar la eficiencia actual de la caldera y la línea base del proyecto con la cual se calcularán los ahorros generadores por el proyecto.
 <p>Disposición final de residuos.</p>	Ambiental	En caso que la caldera antigua no pueda ser utilizada como respaldo, se debe entregar las calderas sustituidas a una compañía especializada que certifique su disposición final adecuada.			Realizar la operación y mantenimiento de los equipos de manera adecuada para garantizar que siempre operan con la máxima eficiencia que garantiza los ahorros en el proyecto.



8. Criterios de elegibilidad

Los proyectos de sustitución por calderas de alta eficiencia tienen potenciales de reducción de consumo de combustible entre el 10 y el 30% en condiciones normales de operación, esto depende del estado de la caldera actual al igual que de sus condiciones de operación y mantenimiento. Para los proyectos nuevos en los que se compran calderas de alta eficiencia los ahorros energéticos deben ser medidos con respecto a una línea base hipotética (inversión en una caldera antigua)

Es necesario empezar a considerar la sustitución de la caldera cuando:

- 
> Existen altos costos de mantenimiento: Las calderas antiguas tienen altos costos de mantenimiento por paradas no planeadas, dificultad para encontrar repuestos, problemas generales del quemador, refractario y del hogar de la caldera.
- 
> Mal funcionamiento de la caldera: Las nuevas calderas son diseñadas con mayores especificaciones de calidad que los antiguos diseños. Alta eficiencia garantizada, alto turndown, control de la relación aire/combustible preciso y replicable, sistemas de control programables, cambio automático del combustible, exceso automático de aire ajustable, tecnología ultra baja en emisiones, y la conectividad a los sistemas de automatización de la planta. El resultado es un control automático de la caldera con menores costos de operación y menores emisiones.

- 
> Cambio de combustible: si es necesario cambiar de combustible, es posible que sea una mejor alternativa comprar una nueva caldera con el tipo de combustible requerido que invertir en un nuevo quemador o adquirir una caldera que tenga la capacidad de operar con dos combustibles (gas/líquido, sólido/gas) para mitigar el riesgo del cambio en el precio de los mismos.
- 
> Baja eficiencia: si se observa que la caldera ha aumentado el consumo de combustible y está generando menos vapor, es un indicador de que la caldera está perdiendo eficiencia y que es momento de evaluar su sustitución.

Como criterio general de elegibilidad ambiental del proyecto, se recomienda que la reducción en el consumo de combustible sea como mínimo de un 10% y la reducción de emisiones sea mayor al 10% con respecto a la línea base establecida.

En la estructuración financiera de estos proyectos se debe considerar la posibilidad de otorgar periodos de gracia en caso de que los equipos sean importados, así mismo, el plazo del crédito debería ser mayor o igual al periodo de retorno simple de la inversión.



9. Monitoreo, reporte y verificación del proyecto

El monitoreo de un proyecto de sustitución de calderas o de un proyecto nuevo debe hacerse de manera continua. Se recomienda la instalación de medidores de consumo de combustible y de flujo de vapor, con el fin de hacer seguimiento, monitoreo y control al indicador de kg de vapor/unidad de combustible. Los indicadores que se pueden utilizar para el reporte son los que se presentan en la tabla 8.

Tabla 8. Indicadores de monitoreo del proyecto.

Indicador	Unidad	Valor Exante	Valor Expost
Consumo de combustible de la caldera.	unidad/año.		
Flujo de vapor generado.	kg de vapor /año.		
Eficiencia.	kg de vapor/unidad de combustible.		
Emisiones de GEI.	Ton CO ₂ /año.		

Para el cálculo de las emisiones debe tenerse en cuenta su factor de emisión de acuerdo al combustible utilizado, este puede obtenerse a partir del IPCC o de la EIA o del proveedor del combustible en algunos casos.

El valor de la reducción de emisiones se calcula teniendo en cuenta las emisiones generadas por el consumo de combustible antes y después del proyecto. Si el resultado final es positivo, quiere decir que las emisiones del proyecto son menores que las emisiones que se generaban antes de su ejecución.

10. Caso de estudio

Se quiere evaluar la sustitución de una caldera de vapor saturado de 400 BHP (6.200 kg de vapor/h aprox.) que opera a una presión de 150 psig, la cual lleva instalada en una planta industrial más de 15 años con una eficiencia estimada de 70%, utilizando como combustible gas natural y que opera 5.500 horas al año al 100% de su capacidad. Se quiere realizar la sustitución de la caldera por una con una eficiencia de 85,5% con un costo de inversión de 600.000 USD y con las mismas condiciones de operación. La planta cuenta con gas natural con un precio de 0,5 USD/m³. En la tabla 9 se encuentran los cálculos realizados a partir de esta información con el fin de conocer la reducción de emisiones y de consumo de combustible, y los ahorros financieros.

Tabla 9. Cálculos del caso de estudio.

Parámetro	Unidad	Fuente/Formula	Valor	Parámetro	Unidad	Fuente/Formula	Valor
A. Capacidad de caldera.	kg/hora	Información del proceso.	6.200	J. Eficiencia de la caldera de alta eficiencia.	%	Entregada por fabricante.	85,5%
B. Porcentaje de carga.	%	Medición en campo.	100%	K. Consumo de combustible en caldera de alta eficiencia.	kg/año, m ³ /año	$(A*B*E*G)/(J*H)$.	2.991.228
C. Presión de operación.	psig	Dato de campo.	150	L. Inversión en caldera alta eficiencia.	USD	Dato de inversión.	600.000
D. Temperatura de operación	°C, K	Dato de campo	185	M. Precio del combustible.	USD/kg, USD/Gal, USD/m ³	Dato de operación.	0,5
E. Energía de vaporización.	kJ/kg	Tablas Termodinámicas con dato C y D	2.700	N. Ahorro de combustible anual.	kg/año, m ³ /año	I-K.	662.343
F. Eficiencia actual.	%	Medición en campo.	70%	O. Ahorro económico	USD/año	M*N.	331.172
G. Horas de operación promedio al año	h/año	Medición en campo.	5.500	P. Periodo de retorno simple	años	L/O.	1,81
H. Poder calorífico del combustible.	kJ/kg, kJ/Gal, kJ/m ³	Información del proveedor.	36.000	Q. Factor de emisión.	kg CO ₂ /unidad de combustible.	EIA o IPCC.	1,8
I. Consumo de combustible actual.	kg/año, Gal/año, m ³ /año	$(A*B*E*G)/(F*H)$.	3.653.571	R. Reducción de emisiones anuales.	kg CO ₂ /año	O*N.	1.192.217

Beneficios del proyecto y elegibilidad para ser financiado por líneas verdes:

El proyecto genera ingresos de

5.52 USD

por cada dólar invertido en un periodo de 10 años.

Ahorros económicos del

18.1 %.

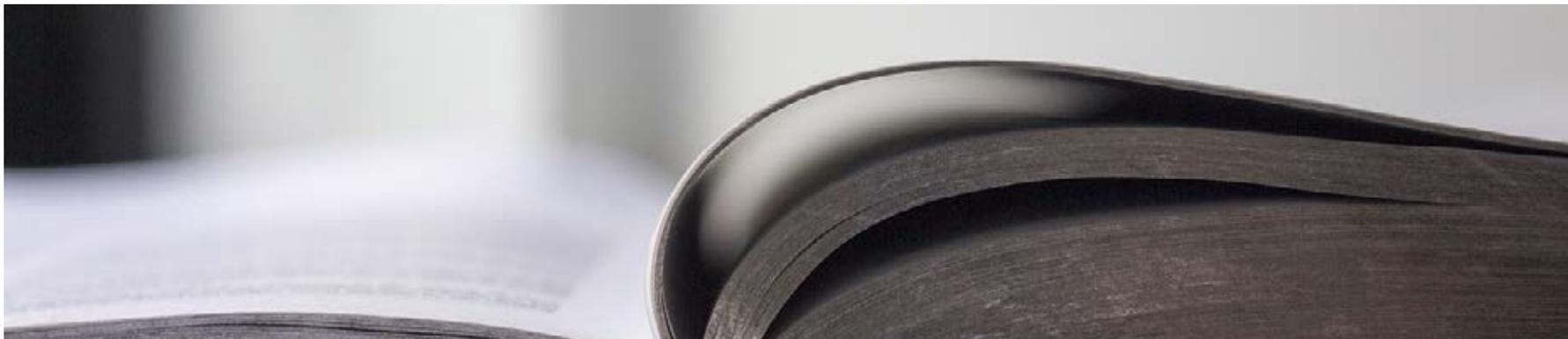
Reducción de emisiones de GEI de

1.192 toneladas de CO₂ anuales que equivalen a dejar de consumir

662.343 m³/año de gas natural

Tiempo de retorno mucho menor a

5 años.



11. Referencias

- Don't Burn Excess Money with Your Boiler/Burner Package. CleaverBrooks.
<http://www.tundrasolutions.ca/files/dont%20burn%20excess%20money%20with%20your%20boiler-burner%20package.pdf>
- Available and emerging technologies for reducing greenhouse gas emissions from industrial, commercial, and institutional boilers. Environmental Protection Agency – EPA. Octubre 2010. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/iciboilers.pdf>
- Boiler efficiency guide. CleaverBrooks. <http://www.cleaver-brooks.com/reference-center/insights/boiler-efficiency-guide.aspx>
- Characterization of the U.S. Industrial/Commercial Boiler Population. Energy and Environmental Analysis. 2005.
https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/distributedenergy/pdfs/characterization_industrial_commercial_boiler_population.pdf
- Evaluating Efficiency and Compliance Options for Large Industrial Boilers in California's Changing Local and State Regulatory Environment. American Council for an Energy-Efficient Economy - ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry. 2009.
http://www.eceee.org/library/conference_proceedings/ACEEE_industry/2009/Panel_6/6.92/paper
- Guide to Low-Emission Boiler and Combustion Equipment Selection. OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY. 2002.
http://energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f15/guide_low_emission.pdf
- Industrial Combustion Boilers. Energy Technology Network. 2010. http://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/I01-ind_boilers-GS-AD-gct.pdf
- Energy Efficiency: Steam, Hot Water and Process Heating Systems. Sustainability Victoria
- Energy Use and Energy Efficiency Improvement Potentials. Lawrence Berkeley National Laboratory.
http://aceee.org/files/proceedings/2001/data/papers/SS01_Panel1_Paper46.pdf

Guía para la Evaluación de Elegibilidad de Financiación de Proyectos de Eficiencia Energética

Editor: CAF

Dirección Corporativa de Ambiente y Cambio Climático (DACC)

Ligia Castro de Doens, directora corporativa

Dirección Sectores Productivo y Financiero Región Norte (VSPF)

Mauricio Salazar, director

Autor:

MGM International

Coordinación y edición general

Camilo Rojas (DACC)

Jaily Gómez (VSPF)

René Gómez García (DACC)

Diseño Gráfico y Diagramación:

Tundra Taller Creativo | tundra.pe

Fotos:

Pixabay.com

Shutterstock
