



FACULTAD DE
INGENIERÍA
UDELAR



IIMPI
INSTITUTO DE INGENIERÍA
MÉCANICA Y PRODUCCIÓN
INDUSTRIAL

Electrificación industrial: generadores de vapor y secaderos a combustibles fósiles

Dr. Ing. Federico Favre | Dr. Ing. Germán Navarrete



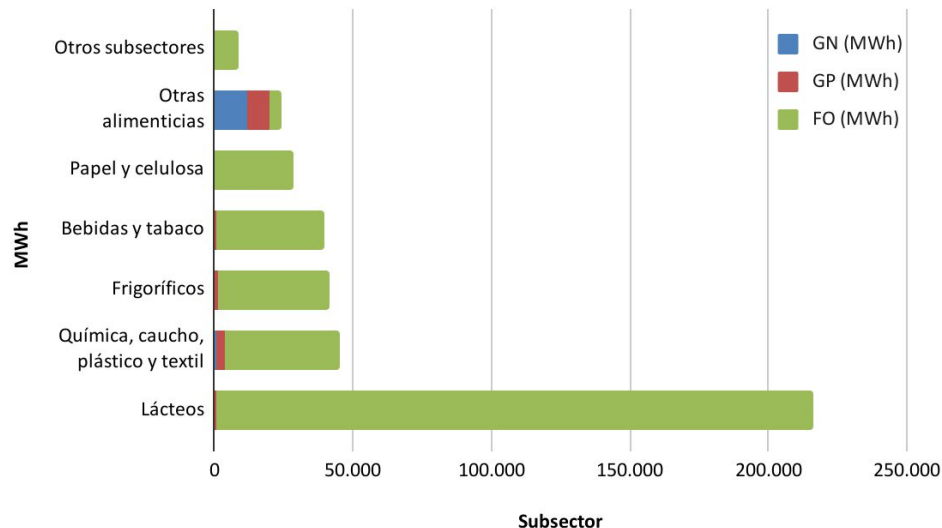
Objetivo y alcance

- Identificar oportunidades de sustitución de combustibles fósiles por electricidad en aplicaciones industriales de calor.
- Enfocar el análisis en dos grupos de uso:
 - generadores de vapor
 - secaderos y otros usos de calentamiento de aire
- Considerar un esquema de operación eléctrica en horas de menor costo, complementado con combustibles fósiles el resto del tiempo.
- Presentar ejemplos de alternativas técnicas de electrificación relevadas para el medio local.

Base del relevamiento: información de BNEU y URSEA, junto con ejemplos de tecnologías comerciales.

Consumo de energía útil de origen fósil por subsector

- Los mayores consumos útiles fósiles se concentran en **lácteos** y **papel y celulosa**
- **Bebidas y tabaco y frigoríficos** también muestran consumos relevantes
- Otras alimenticias presenta una participación más diversificada de GN, GP y FO
- El **fuel oil** concentra la mayor parte del consumo útil fósil total



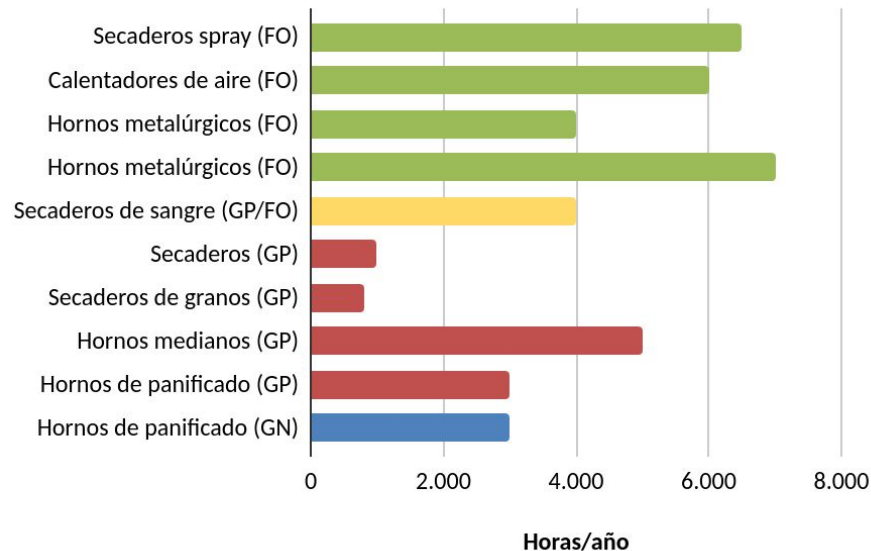
Generadores de vapor a combustibles fósiles

- Predomina **fuel oil**.
- Participación secundaria de **GN** y **GLP**.
- **GO** marginal.
- Predominan **equipos medianos**.
- No alcanza con la potencia instalada
- Importan las **horas efectivas de uso**
- Muchos equipos fósiles operan como respaldo.

Combustible (Tamaño)	PT (barg)	Producción (kg/h)	% Muestras
FO (P)	0,8 – 6,4	100 – 2000	16,2 %
FO (M)	3,9 – 18,1	125 – 37 500	58,1 %
GN (P)	1,0 – 5,5	200 – 1800	2,4 %
GN (M)	3,9 – 13,7	500 – 8000	7,1 %
GLP (P)	2,6 – 7,8	70 – 300	1,9 %
GLP (M)	5,0 – 12,0	160 – 12 000	5,2 %
Comb. Dual (P)	1,0 – 5,9	500 – 5000	1,9 %
Comb. Dual (M)	4,9 – 10,0	200 – 10 000	4,8 %
GO (P)	2,5 – 3,9	600 – 1200	1,0 %
GO (M)	5,9 – 6,1	1000 – 2000	1,4 %

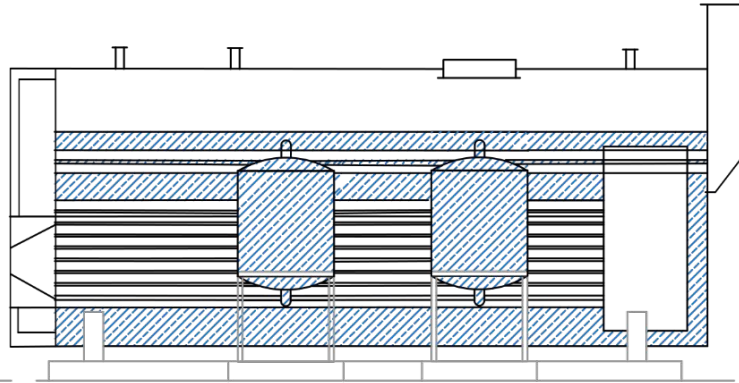
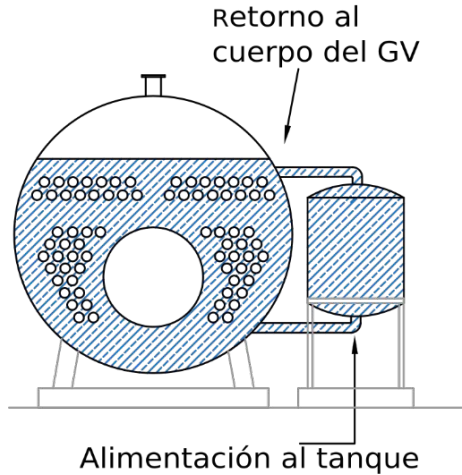
Usos de calor directo de combustibles fósiles

- Se relevaron hornos de panificado, secaderos, hornos metalúrgicos y calentadores de aire.
- El **GP** y el **FO** son los combustibles más frecuentes en estos procesos.
- Las aplicaciones abarcan desde secado a baja temperatura hasta procesos de varios cientos de °C.
- El calentamiento de aire aparece en varios subsectores como un foco de interés para electrificación.

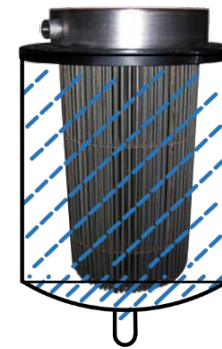


Ejemplos

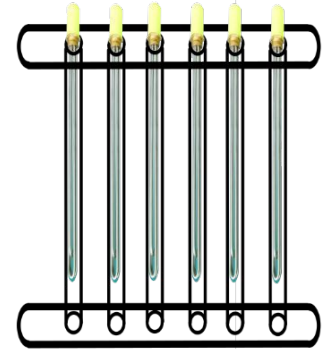
Idea 1 - Adaptación de caldera existente - vapor o agua caliente



Opción resistencia
tipo heat flange en
tanque



Opción resistencia
tipo heat flange en
haz de tubos



Idea 1 - Adaptación de caldera existente - vapor o agua caliente

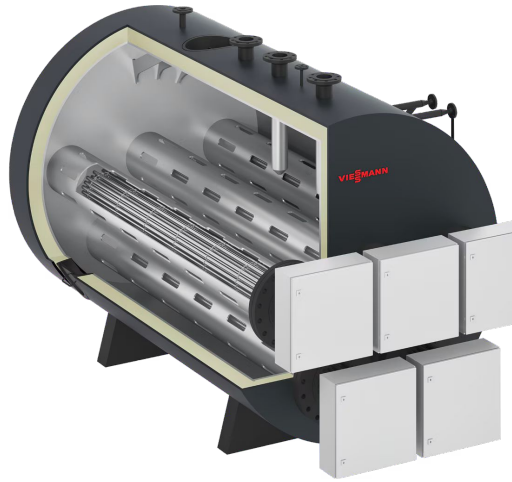
Ventajas

- Tecnología simple, con amplia oferta de resistencias tipo *heat flange*.
- Intervención mínima y reversible sobre el cuerpo a presión.
- Permite acumulación compartida con la caldera existente, evitando pérdidas al alternar fuentes.
- Posibilita una sustitución total o parcial de la fuente original.
- Diseño adaptable al espacio disponible y tratamiento de agua similar al de calderas convencionales.

Desventajas

- En grandes potencias, puede requerir instalaciones eléctricas de costo elevado.
- Debe cumplir la normativa aplicable a modificaciones de cuerpos a presión.
- Es necesario asegurar una circulación interna adecuada, lo que puede requerir rediseños parciales.
- La tensión de suministro de las resistencias *heat flange* está limitada.

Idea 2 – Caldera eléctrica en paralelo - vapor o agua caliente



Categoría	Baja tensión	Media tensión
Tecnología	Resistencias	Electrodos
Rango de potencia típico	~30 kW – 4 MW (modular).	2- 100 MW (60 MW en Alunorte Brazil)
Tensión de suministro	Hasta 600 V	Hasta 24 kV

Idea 2 – Caldera eléctrica en paralelo – vapor o agua caliente

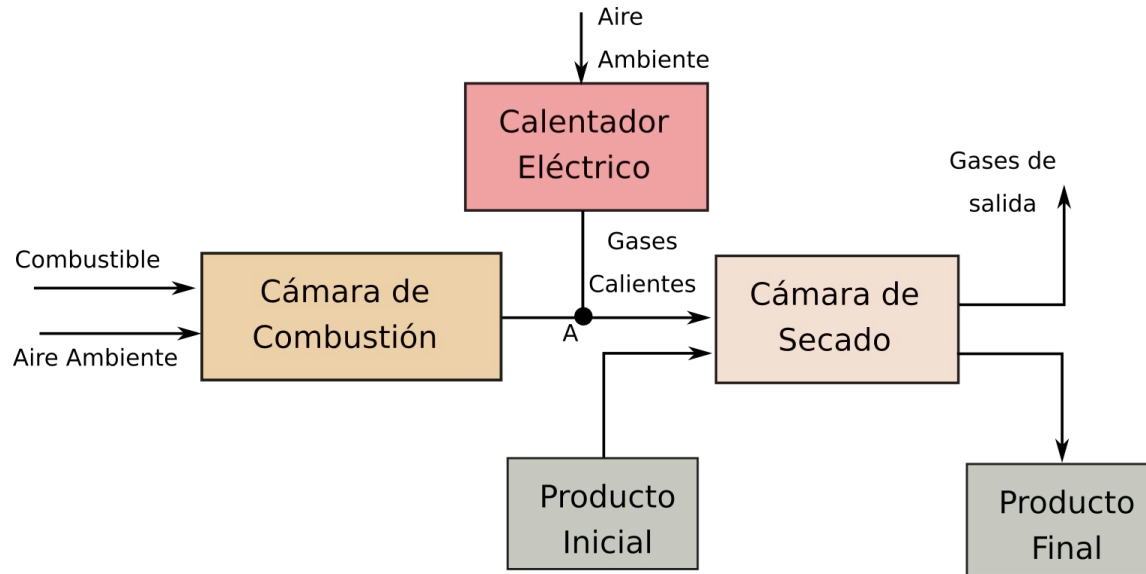
Ventajas

- Tecnología difundida, con amplia oferta comercial a nivel mundial.
- Fabricación y control de potencia sencillos.
- Configuración modular, adaptable a distintas escalas.
- Menor volumen de agua: hasta 5 veces menos que una caldera convencional equivalente.

Desventajas

- La inversión aumenta con la potencia y puede requerir adaptaciones en la instalación eléctrica.
- Requiere mayor espacio al coexistir la caldera fósil y la eléctrica.
- En sistemas de electrodos, se necesita tratamiento de agua para mantener la conductividad.
- No comparte acumulación con la caldera fósil, por lo que puede perderse calor y requerirse tiempo de entrada en régimen.

Idea 3 – Calentamiento de aire con resistencias eléctricas para secado



Idea 3 – Calentamiento de aire con resistencias eléctricas para secado

Ventajas:

- Tecnología con amplia oferta de potencias y tamaños, de integración sencilla.
- Permite alcanzar altas temperaturas de proceso.
- **BT**: mayor disponibilidad comercial, mayor compacidad y modularidad, con ventaja en bajas potencias.
- **MT**: menores corrientes, menores pérdidas y mejor desempeño en potencias elevadas o largas distancias.

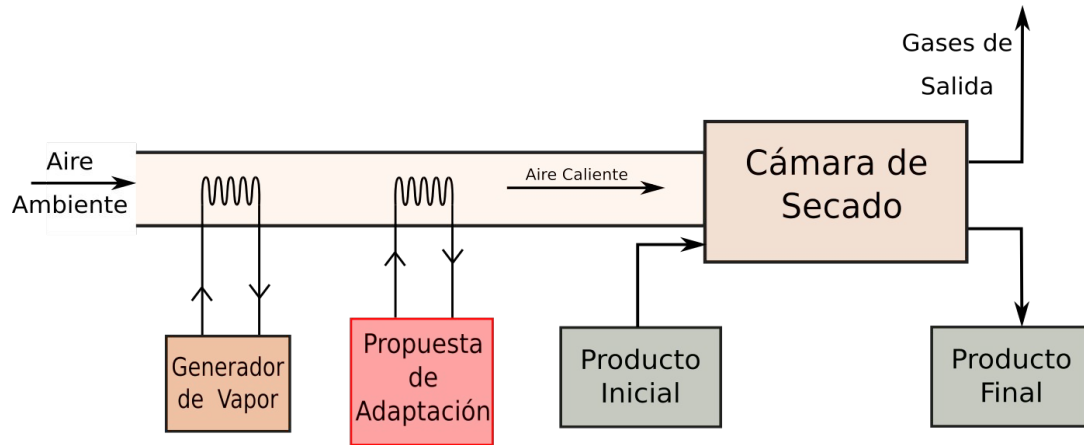
Desventajas

- En **BT**, las corrientes elevadas en potencias altas implican cables de gran sección, mayor caída de tensión y más pérdidas.
- En **MT**, la oferta de equipos es menor y aumenta la complejidad de celdas y protecciones.
- Si las fuentes se instalan en paralelo, al conmutar se pierde la energía acumulada en cada sistema.

Observaciones:

- Evaluar pérdidas térmicas al conmutar la fuente y el posible aprovechamiento de la energía remanente.
- Considerar que el sistema eléctrico operará pocas horas y tendrá largos períodos de inactividad.
- Analizar también una posible configuración en serie.

Idea 4 – Calentamiento eléctrico del fluido térmico



Idea 4 – Calentamiento eléctrico del fluido térmico

Ventajas

- Alta densidad de potencia.
- Modulares, compactos y livianos.
- Respuesta rápida y temperatura uniforme.
- Alta eficiencia ~99%.
- Trabajar en serie, se minimizan las pérdidas al conmutar fuente.

Desventajas

- Temperatura de trabajo limitada por el fluido térmico.
- Añade pérdida de carga (ΔP).
- Requiere mantener la calidad (propiedades) del fluido térmico.

Observaciones:

- Evaluar la inercia térmica del fluido térmico y la posibilidad de mantener su circulación tras la conmutación..
- Cuantificar las pérdidas por efecto aleta del sistema de fluido térmico cuando esté fuera de servicio.

Gracias.