

# ASPECTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO BÁSICO DE CALDERAS DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA EN PARRILLA

---

---

Luis E. Díez

Serled Consultores

*Seminario sobre*  
**TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS  
PARA BIOMASA Y RESIDUOS**

Consejo Social de la UPM • Encuentros Empresa-Universidad

27-28 junio 2006

# ASPECTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO

## Introducción

- Aspectos de diseño que influyen de forma más crítica en los resultados operativos, por su decisivo impacto sobre el rendimiento, la capacidad y la disponibilidad:
  - formación de depósitos e incrustaciones sobre la parrilla y las superficies de intercambio
  - tasas de desgaste y rotura de estos elementos (corrosión + erosión)
- Cuando los depósitos son demasiado tenaces e incrustantes los sistemas de limpieza no consiguen eliminarlos adecuadamente y además también pueden producirse depósitos excesivos en partes de la caldera sin sistemas de limpieza. Los depósitos incrustantes y excesivos provocan tres efectos indeseables fundamentales:
  - reducen la tasa de transmisión de calor y hacen aumentar la temperatura de salida de gases, reduciendo el rendimiento de la caldera
  - a partir de cierto punto también reducen de forma significativa el paso libre por el que circulan los gases, lo que finalmente limita el caudal de aire y gases circulante y con ello la capacidad de la caldera
  - son causa de fenómenos de corrosión

# ASPECTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO

## Fenómenos más frecuentes

- Los elevados contenidos de álcalis en las cenizas, en conjunción con otros elementos problemáticos presentes habitualmente en su composición, fundamentalmente cloro y azufre, originan una tendencia a provocar fenómenos de depósitos, incrustaciones, erosión y corrosión en diversas partes de las calderas de biomasa:
  - Formación de costras sobre la parrilla y problemas de extracción de escorias
  - Obstrucción de los agujeros de entrada de aire primario en la parrilla
  - Obstrucción de la entrada de biomasa con depósitos de escoria
  - Grandes depósitos en superficies refractadas y paredes de agua
  - Acumulaciones alrededor de las entradas de aire secundario



# ASPECTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO

## Fenómenos más frecuentes

- ❑ Estrechamiento de los pasos de gases por depósitos
- ❑ Puntos calientes por postcombustión superficial
- ❑ Erosiones de las zonas de transmisión de los conductos de gases
- ❑ Depósitos incrustantes en las zonas de entrada de gases al sobrecalentador
- ❑ Puentes y bloqueos en los haces de convección
- ❑ Corrosión y erosión de los tubos del sobrecalentador



# ASPECTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO

## Medidas paliativas

- Cuando el diseño de la caldera y sus sistemas de limpieza no son apropiados para poder operar con las biomásas especificadas, se recurre habitualmente a diversas soluciones:
    - Eliminación de los componentes más negativos de la biomasa (lavado, eliminación de finos, etc.)
    - Mezcla de las biomásas más desfavorables con otras de más calidad
    - Empleo de las biomásas más desfavorables justo antes de las paradas
    - Mejora de controles de combustión para eliminar picos de temperatura
    - Incremento o mejora de los sopladores de vapor
    - Empleo de sistemas de limpieza en marcha con agua
    - Empleo de aditivos
  - Estas medidas paliativas siempre suponen costes adicionales de combustible, materiales o mano de obra y en muchas ocasiones no permiten alcanzar finalmente unas condiciones operativas satisfactorias.
-

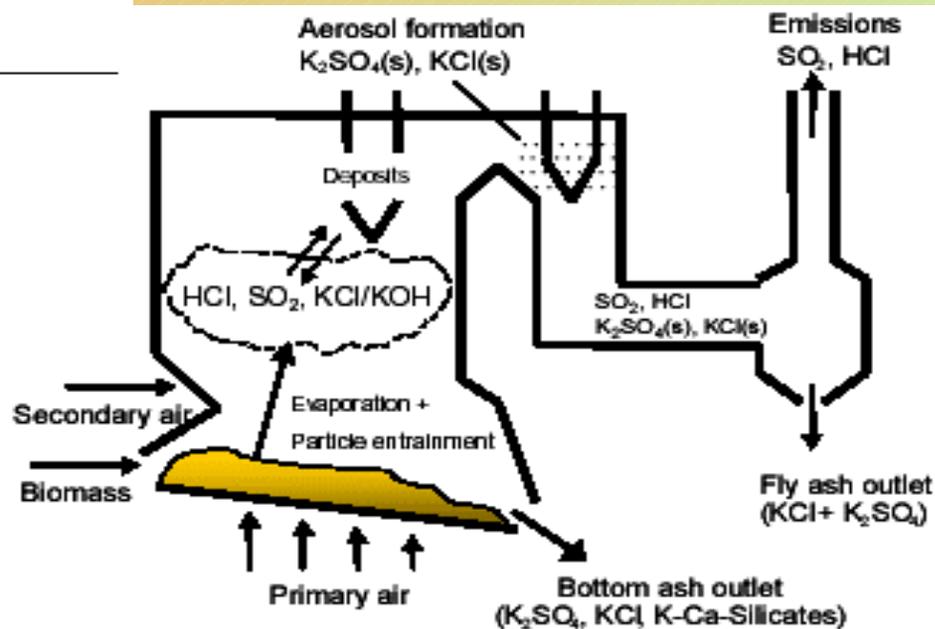
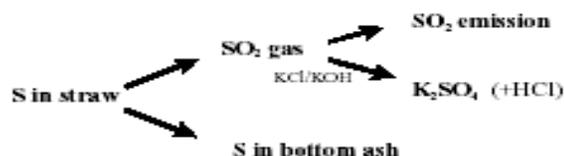
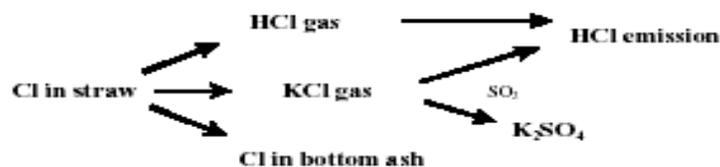
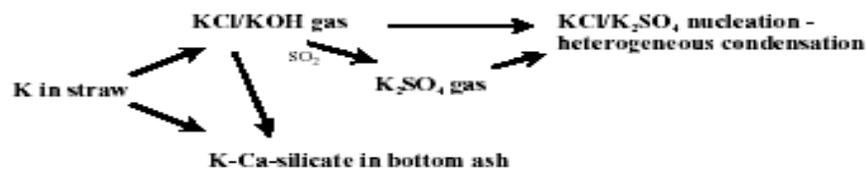
# ASPECTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO

## Causas y desarrollo de estos fenómenos

- Para establecer los criterios básicos de diseño de caldera, en función de los tipos y características de la biomasa a emplear, será preciso tener en cuenta lo que se conoce sobre las causas de estos fenómenos y sus procesos de desarrollo:
  - La tendencia de una biomasa a formar costras sobre la parrilla depende fundamentalmente de la composición química de sus cenizas, en conjunción con las condiciones locales derivadas del proceso de combustión, como el tipo de atmósfera (oxidante o reductora) y la temperatura. Con biomاسas ricas en álcalis es prácticamente imposible evitar la ocurrencia de fenómenos de fusión y sinterización de escorias, por lo que la solución será seleccionar tipos de parrilla que eviten la formación de grandes costras por el movimiento que inducen en el lecho de material en combustión.
  - Los procesos por los que las sustancias que constituyen los depósitos e incrustaciones sobre los refractarios y las superficies de intercambio se forman y se depositan son muy complejos y variados y no han sido todavía totalmente comprendidos, pero se han formulado sus posibles mecanismos físicos y transformaciones químicas conceptuales fundamentales.

# ASPECTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO

## Causas y procesos fenómenos



# ASPECTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO

## Formación de partículas

- Con las altas concentraciones de sustancias alcalinas y el rápido proceso de enfriamiento que sufren los gases, se forman en el flujo de gases nuevas partículas submicrónicas por condensaciones homogéneas de dichas sustancias, seguidas de nucleaciones y aglomeraciones heterogéneas. Adicionalmente, durante el proceso de enfriamiento de los gases, dichas sustancias se condensan y/o reaccionan con las cenizas volantes arrastradas por los gases.
  - Con cualquiera de los mecanismos relevantes que afectan a las sustancias alcalinas presentes en los gases (nucleación, condensación, reacción química) la mayor concentración de estas sustancias tiende a producirse en las partículas más pequeñas presentes en los gases, mientras que los elementos refractarios dominan en las partículas mayores.
-

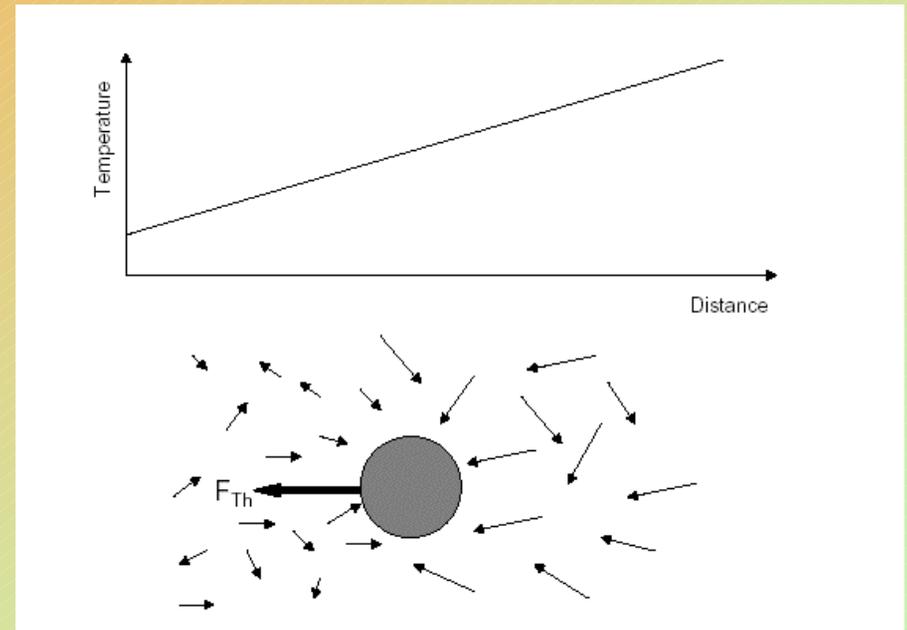
# ASPECTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO

## Alcance de las superficies: difusión

- Las partículas de cenizas volantes y los vapores inorgánicos alcanzan las superficies de intercambio mediante mecanismos muy diversos:

7

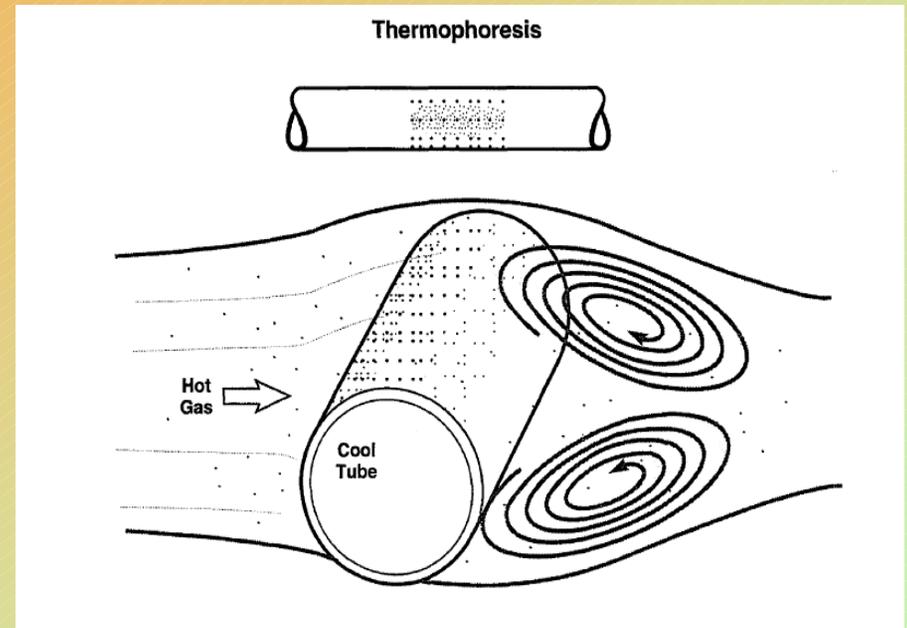
- La difusión es el transporte neto de partículas y moléculas de gas desde una zona de alta concentración a otra de baja, por el movimiento Browniano. La concentración baja en las proximidades de las superficies donde los vapores se condensan y las partículas se depositan. Este mecanismo de transporte es especialmente importante para los vapores, ya que el coeficiente de difusión disminuye con el tamaño.



# ASPECTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO

## Alcance de las superficies: termoforesis

- La termoforesis se produce porque las partículas de los aerosoles experimentan colisiones con las moléculas de gas adyacentes, lo que ejerce una fuerza neta si la partícula se encuentra localizada en un campo de gradientes térmicos. La velocidad termoforética también decrece para las partículas de mayor tamaño, que reducen el gradiente térmico en su vecindad. La velocidad termoforética es máxima cuando las superficies están limpias y la temperatura superficial es más próxima a la del fluido interno, maximizando los gradientes térmicos.

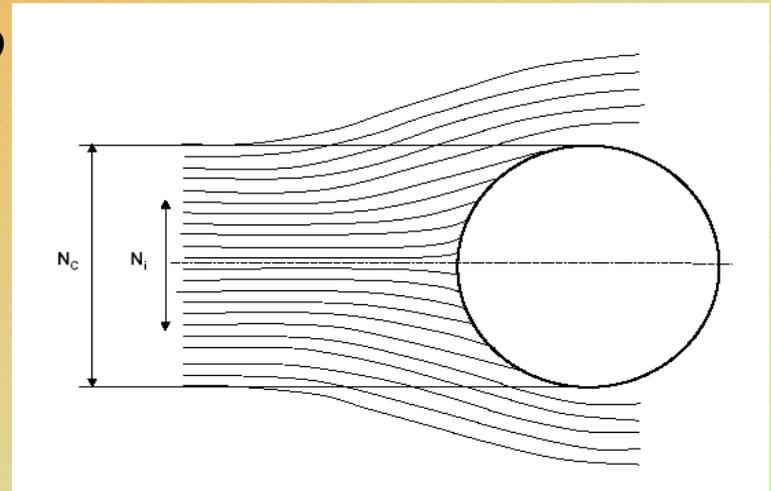


# ASPECTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO

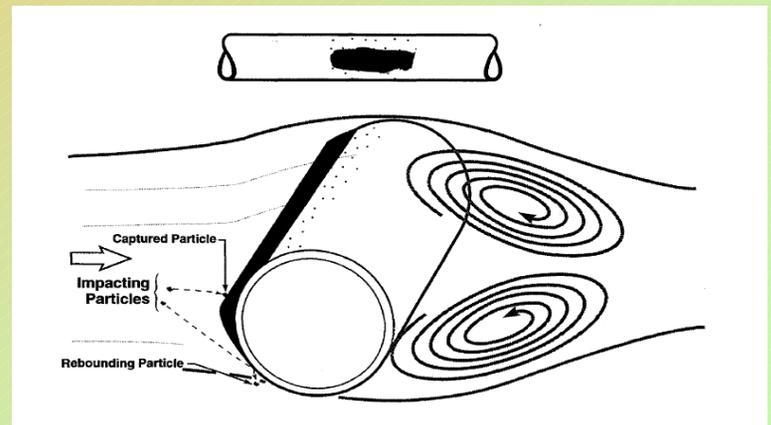
## Alcance de las superficies: impacto

- Los impactos se producen cuando las partículas no son capaces de seguir la corriente del flujo de gases debido a su inercia y chocan con la superficie. También se producen impactos por el movimiento turbulento del flujo de gases. Las partículas más pequeñas, con menos de  $10\text{-}20\ \mu\text{m}$ , no tienen suficiente masa para llegar a impactar debido a su movimiento inercial, pero sí pueden hacerlo proyectadas por las turbulencias. En cambio, las partículas del orden de 50 micras pueden llegar a impactar por inercia hasta en un 50% de los casos, cuando los gases atraviesan una fila de tubos.

9



10

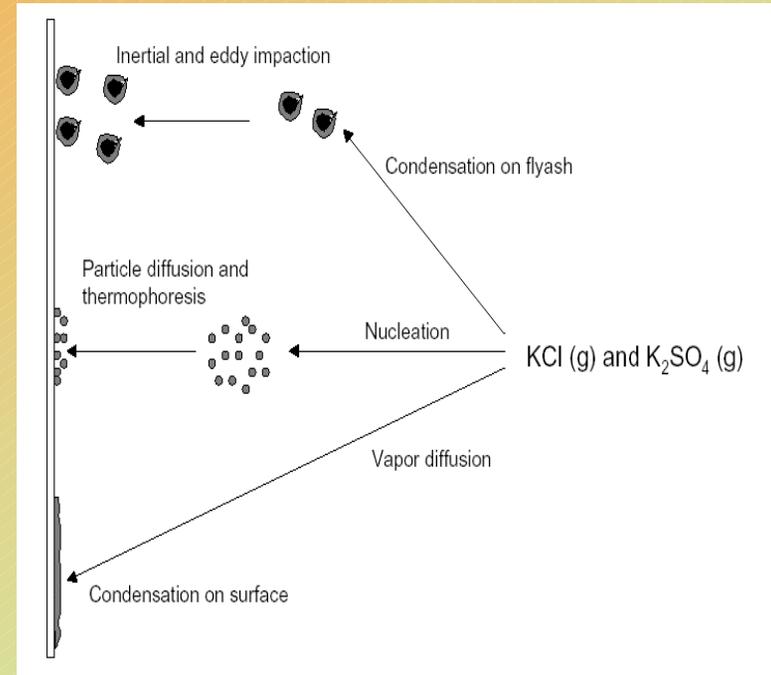


# ASPECTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO

## Depósitos

11

- Los depósitos se producen cuando las partículas o moléculas de vapor que alcanzan las superficies se adhieren a las mismas. Las moléculas de vapor, conducidas por termoforesis y difusión, son capaces de penetrar a través de los poros de la capa preexistente de depósitos de partículas, hasta alcanzar la capa más profunda.

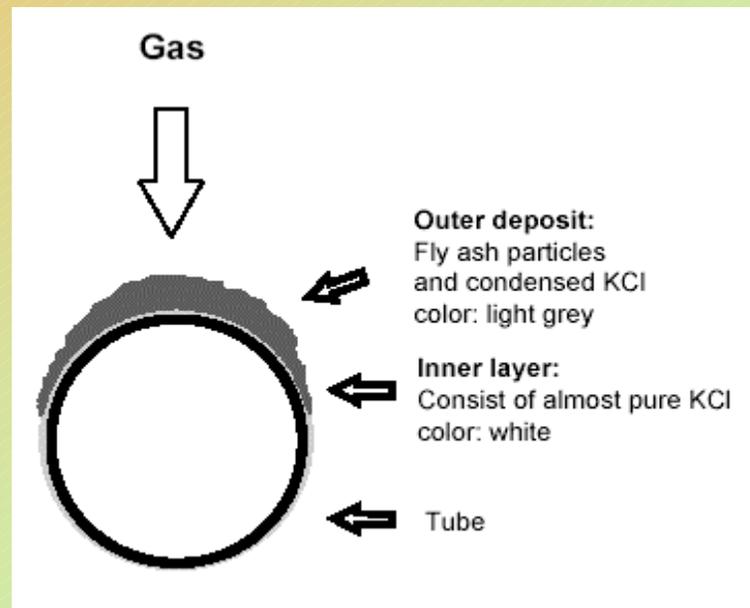


- Los cloruros alcalinos condensan a temperatura variable, desde un máximo de unos  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ , dependiendo de su concentración inicial, hasta unos  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , cuando su concentración ya se reduce a valores del orden de  $5\text{ mg/Nm}^3$ .

# ASPECTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO

## Depósitos: influencia tamaño partículas

- Mientras que las partículas de menos de  $10\ \mu\text{m}$  tienen bastante tendencia a depositarse una vez impactan sobre la capa de depósitos, las de mayor tamaño tienen normalmente suficiente inercia como para rebotar y volver al flujo de gases, salvo cuando la superficie de la capa de depósitos o la propia partícula tienen propiedades adherentes.
- Los depósitos de partículas submicrónicas ricas en álcalis o la condensación de vapores de sustancias alcalinas pueden crear una capa adherente que facilita el depósito de las partículas de más de  $10\ \mu\text{m}$ .



# ASPECTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO

## Depósitos: formación

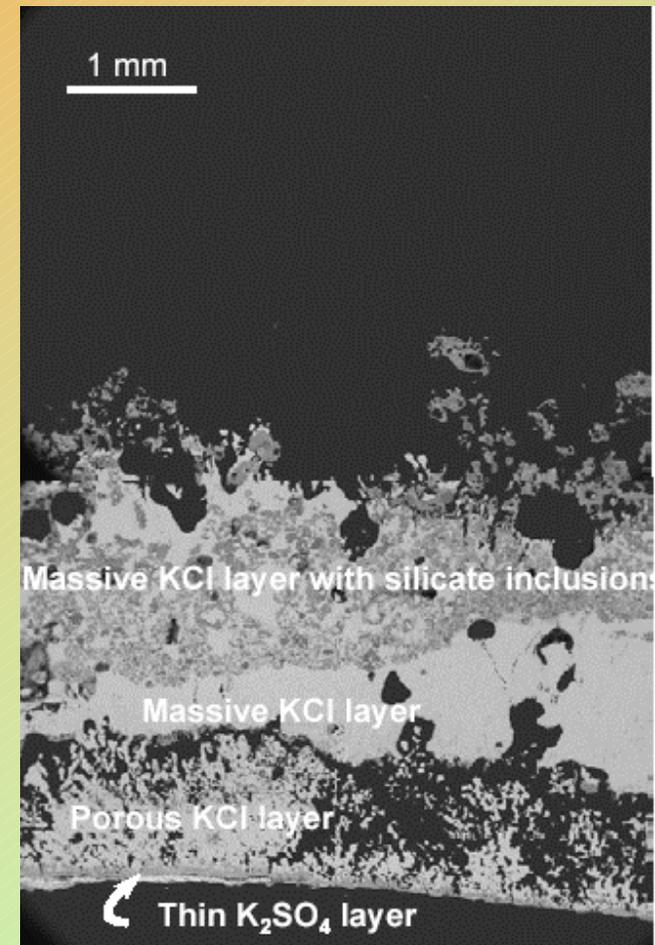
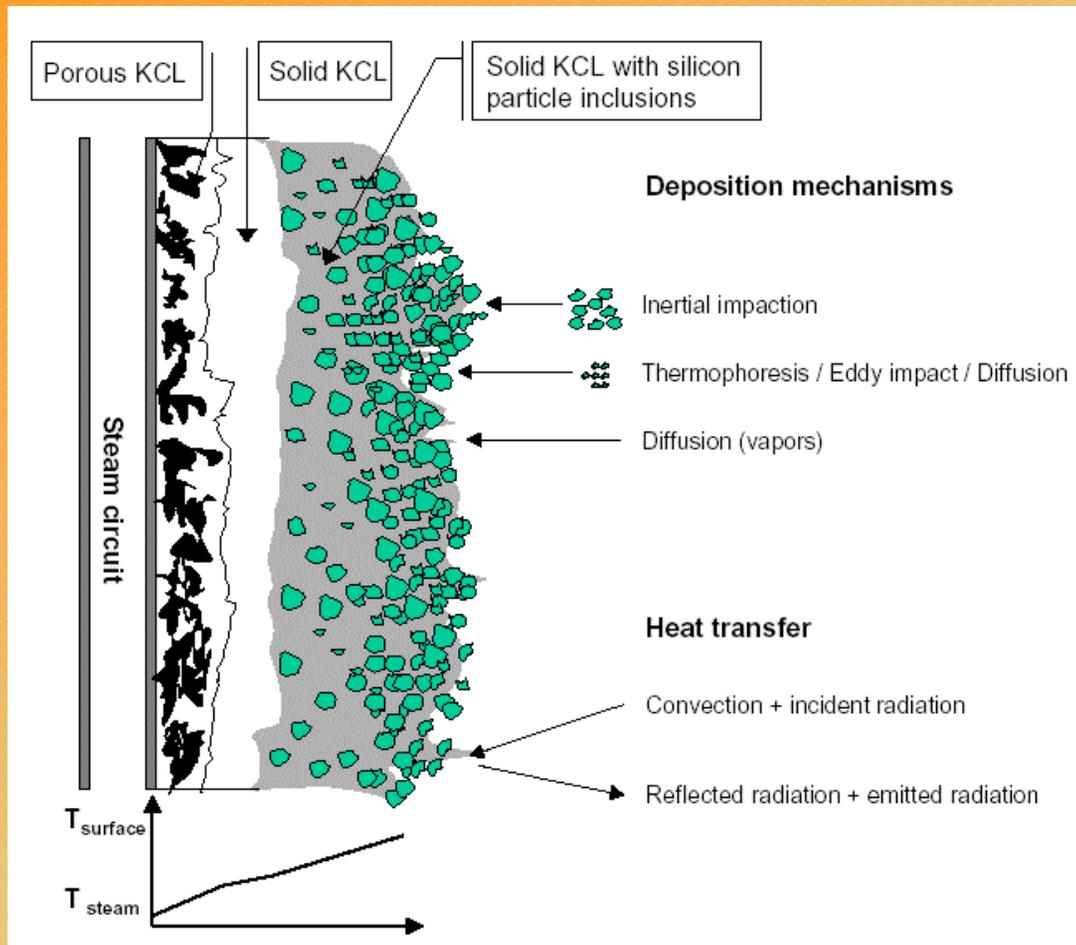
- Si en el inicio de la zona de convección las temperaturas de los gases están por encima de la temperatura de fusión del KCl (770 °C), las condiciones adherentes sobre los tubos se alcanzan muy rápidamente, tanto por la alta tasa de depósito del KCl condensado sobre los tubos, al no haberse solidificado todavía en el seno del flujo de gases, como por el alto nivel térmico alcanzado por la capa más externa del depósito.
- Pero dado que el KCl puede alcanzar porcentajes de fusión sobre los tubos del orden del 10% a temperaturas de unos 620 °C, si la capa exterior de depósitos alcanza este nivel térmico ya se podrían formar depósitos tenaces y se incrementaría el grado de depósito de partículas grandes, iniciándose así el rápido incremento de la tasa de depósitos.

# ASPECTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO

## Depósitos: estructura

13

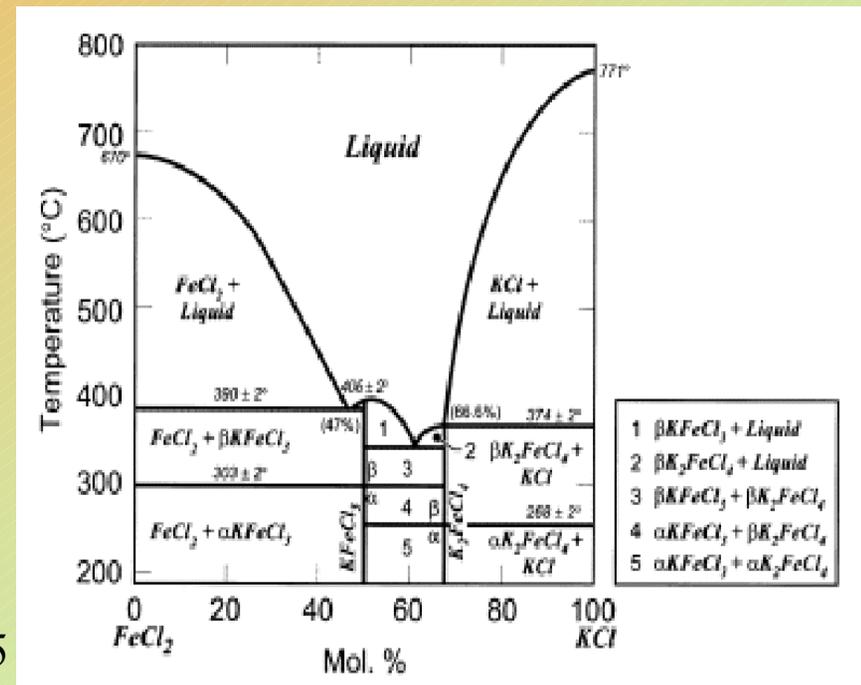
14



# ASPECTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO

## Depósitos: influencia temperatura fluido

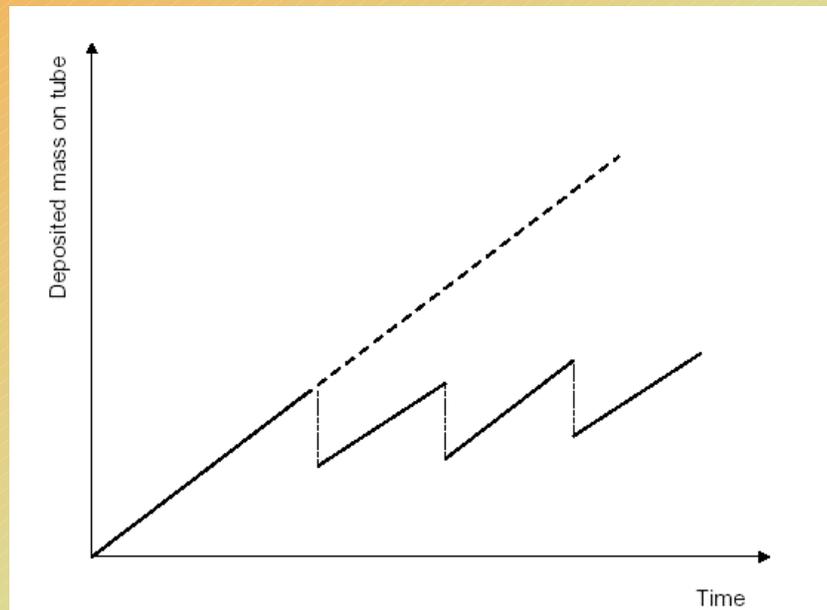
- La temperatura del fluido que circula por los tubos también incide notablemente en la rapidez del proceso, por dos vías diferenciadas:
  - Incide en la temperatura de la capa de depósitos, con lo que las condiciones de plastificación pueden alcanzarse con menores espesores del depósito inicial.
  - Incide en la temperatura del metal de los tubos sobre la que condensan los cloruros y sulfatos alcalinos, favoreciendo las reacciones químicas de éstos con el metal y dando lugar a la formación de eutécticos de muy bajo punto de fusión ( $< 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), que multiplican la corrosión y además pueden generar adherencia con capas de depósitos todavía muy finas y poco calientes, potenciando el incremento inicial de la tasa de depósitos y su tenacidad



# ASPECTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO

## Depósitos: efecto sobre condiciones operativas

- El progresivo crecimiento de las tenaces capas internas, junto con el incremento de la tasa de crecimiento y de la tenacidad de las capas externas conduce en muchas ocasiones al deterioro irreversible de las condiciones operativas de la instalación, obligando a su parada.
- Todo el proceso puede agravarse notablemente cuando partículas todavía incandescentes, con temperaturas muy superiores a las del flujo de gases que las arrastra y con combustible todavía sin consumir, impactan y se depositan sobre las superficies de intercambio.



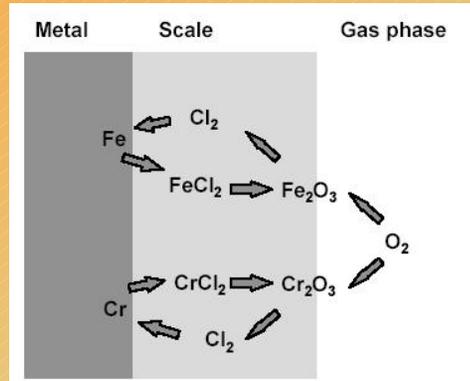
# ASPECTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO

## Corrosión

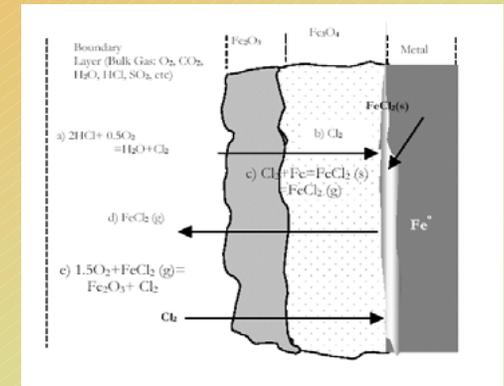
- El cloro se cree que actúa como catalizador en el proceso de corrosión, transportando el hierro lejos de la pared del tubo, impidiendo la formación de una capa protectora de óxido férrico.

- Máxima gravedad en los sobrecalentadores, sobre todo con temperaturas del vapor por encima de 400 °C. También en vaporizadores, si reciben una alta carga de álcalis condensados.

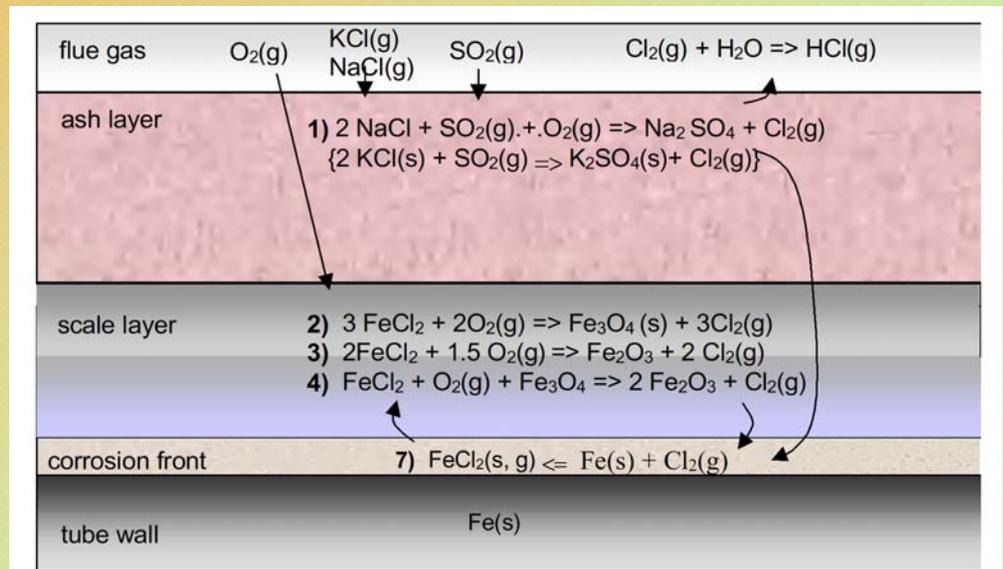
17



18



19



# ASPECTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO

## Erosión

- Los procesos de erosión en sobrecalentadores están generalmente asociados con los problemas de depósitos y corrosión. Entre los más frecuentes pueden citarse:
  - Exceso de velocidad de los gases en ciertas zonas de la sección de paso por obstrucción habitual en otras zonas adyacentes, con desgaste de la pared lateral del tubo.
  - Exceso de limpieza automática con los sopladores en puntos concretos del haz tubular, especialmente cuando se incrementa la frecuencia para tratar de controlar los depósitos, con un proceso cíclico de corrosión-erosión.



# ASPECTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO

## Evaluación riesgo biomasas

- Un primer paso para evaluar el desafío tecnológico que plantean los combustibles biomásicos que pretendan emplearse en una instalación y definir en consecuencia el diseño de caldera más apropiado consiste en caracterizar adecuadamente la biomasa y determinar los parámetros más significativos en relación con su riesgo de provocar depósitos e incrustaciones problemáticas. Los parámetros más significativos a tener en cuenta son:
  - Contenido de potasio sobre cenizas
  - Contenido de óxidos alcalinos por unidad de energía
  - Contenido de cloro sobre seco
  - Contenido de azufre sobre seco

# ASPECTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO

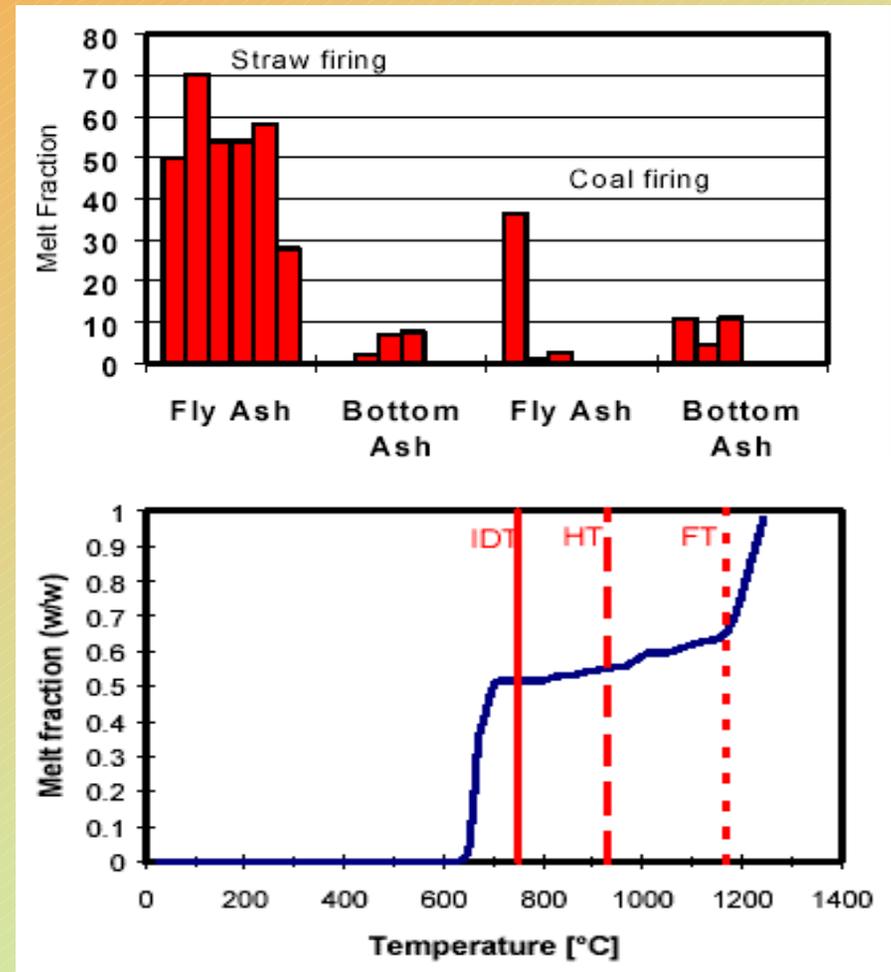
## Valoraciones contenidos elementos críticos

- Las medidas de contenidos de elementos y sustancias deben seguir métodos normalizados apropiados para las biomásas implicadas e incluso emplear más de un método cuando existan dudas razonables sobre la fiabilidad y precisión de los resultados.
- Valoraciones para calderas de biomasa de parrilla sin diseños especiales, con temperaturas de gases típicas a la entrada de la zona de convección del orden de 850 °C :
  - El potasio es el metal alcalino más significativo. Con contenidos del mismo en las cenizas por debajo del 7% este factor no resulta problemático
  - El contenido de óxidos alcalinos ( $K_2O + Na_2O$ ) por unidad de energía tiene en cuenta también el sodio y el porcentaje de cenizas. Por debajo de 0,17 kg/GJ PCS no resulta problemático. Entre 0,17 y 0,34 kg/GJ PCS los riesgos son significativos y por encima de 0,34 inadmisibles.
  - Contenidos de cloro < 0,1% en masa sobre seco no son problemáticos
  - Contenidos de azufre < 0,1% en masa sobre seco no son problemáticos

# ASPECTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO

## Medidas tendencia fusión: conos pirométricos

- Medidas de temperaturas de fusión de cenizas mediante conos pirométricos se consideran de baja utilidad, porque las cenizas de los depósitos son muy diferentes de las generadas en el laboratorio a partir de la biomasa y porque parte de los álcalis se volatilizan durante el proceso de calcinación, incluso si se lleva a cabo a baja temperatura (550 – 600 °C).

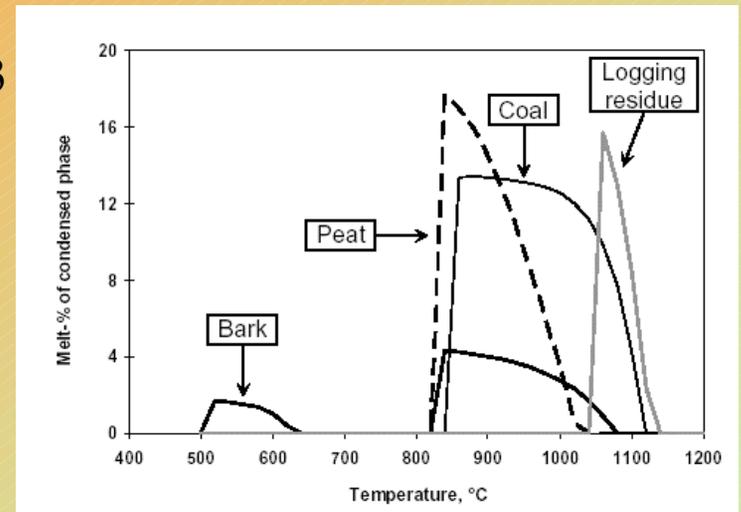


# ASPECTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO

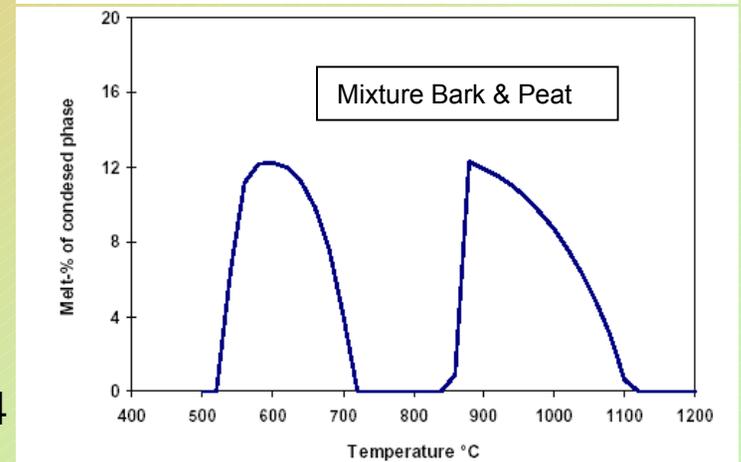
## Medidas tendencia fusión: cálculos equilibrio

- Los cálculos termodinámicos de equilibrio multicomponente y multifase de los compuestos químicos estables que se forman en los gases a partir de la fracción reactiva del combustible ofrecen datos como composición, puntos de fusión y porcentajes de fusión de las cenizas volantes:
  - 15% para que la fusión incremente significativamente la tasa de depósitos.
  - posible incremento del riesgo en caso de mezcla de dos combustibles.

23



24



# ASPECTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO

## Soluciones y medidas

- Cuando las biomásas que se pretenden emplear presentan composiciones que hacen prever una moderada o elevada **tendencia a provocar depósitos y corrosiones** sobre la parrilla, los refractarios y las superficies de intercambio será preciso diseñar la caldera con unas características especiales orientadas a minimizar la severidad de dichos fenómenos:
  1. Seleccionar una **tecnología de parrilla** con buenas características para remover el lecho de ascuas y evitar la formación de costras de escorias, pero que al mismo tiempo no disgrege demasiado las ascuas, para reducir el arrastre de cenizas por los gases de combustión.
  2. Diseñar una **cámara de combustión primaria** amplia, con baja carga térmica específica por unidad de superficie, que trabaje con bajas velocidades de los gases, con objeto de minimizar el arrastre de cenizas hacia la cámara de combustión secundaria y los depósitos sobre las paredes de la cámara, así como evitar la corrosión de las paredes de agua no refractadas.

# ASPECTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO

## Soluciones y medidas

3. Diseñar una **cámara de combustión secundaria** amplia, tanto en sección como en longitud, que trabaje con bajas velocidades de los gases una vez traspasada la zona de estrangulamiento y mezcla con el aire secundario, y que tenga tiempos de residencia elevados antes del cambio de dirección de los gases en la parte superior, para minimizar los impactos de cenizas en las paredes laterales por turbulencias y los inerciales en las paredes del techo del hogar, previniendo la formación de grandes costras.
4. Incorporar **cámaras de radiación a la salida del hogar**, para incrementar el tiempo de residencia de los gases, potenciar la separación inercial de partículas y bajar la temperatura de los gases a la entrada de la zona de convección. Esta medida es esencial. Permite que condense la mayor parte del KCl en el seno del flujo de gases en lugar de sobre los tubos, así como reducir la temperatura superficial del metal y la temperatura máxima de la capa de depósitos. La temperatura requerida para evitar problemas operativos depende de varios factores, entre ellos del nivel de elementos problemáticos en la biomasa, pero en general es recomendable bajar hasta niveles térmicos que aseguren un bajo contenido residual de álcalis en los gases, de acuerdo con las curvas de saturación de estas sustancias.

# ASPECTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO

## Soluciones y medidas

5. Situar el **primer haz de convección** con flujo de gases hacia abajo, para mejorar su facilidad de limpieza.
6. Diseñar los **haces sobrecalentadores** de forma que los tubos con mayor nivel térmico interno no queden a la entrada de la zona de convección, para limitar la temperatura máxima del metal.
7. Limitar la **temperatura del vapor principal**, para limitar aún más la temperatura máxima del metal. Una temperatura del vapor principal de unos 400 – 450 °C, con temperaturas exteriores de metal de unos 425 - 475 °C, es una adecuada salvaguarda para la mayor parte de las biomásas problemáticas, ya que a partir de 500 °C de temperatura superficial no se forman capas de óxidos protectoras.
8. Instalar un **sistema de control de la combustión** apropiado, que permita regular con bastante precisión el proceso y las temperaturas en el hogar.
9. Diseñar los **sistemas de soplado** con vapor para una operación frecuente y con una buena distribución del vapor sobre los haces. Prever la posibilidad de tener que incorporar sopladores en el hogar para eliminar los depósitos antes de que formen grandes costras

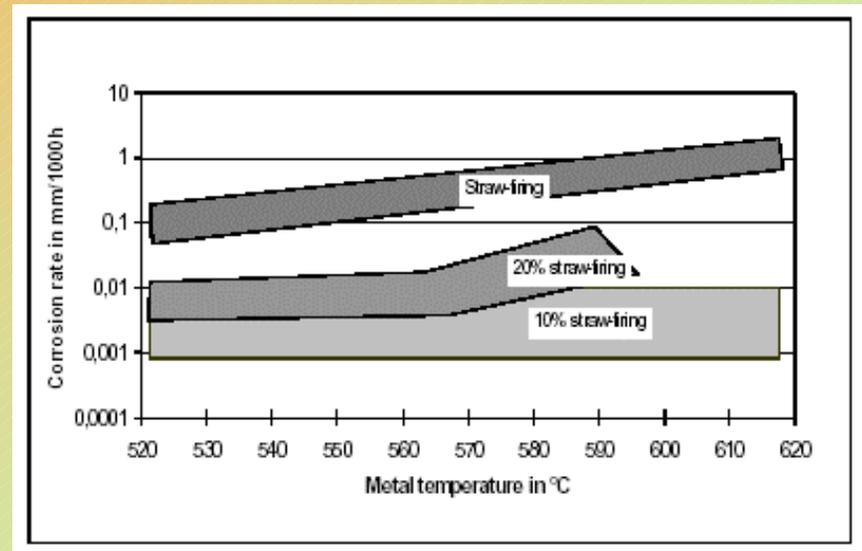
# ASPECTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO

## Soluciones y medidas

10. Si se pretende incrementar la **temperatura del vapor principal** para mejorar el rendimiento del ciclo de vapor asociado a la caldera, hasta valores del orden de 500 °C, será preciso incrementar asimismo correspondientemente la temperatura de los gases a la zona de convección y recurrir a una adecuada combinación de medidas adicionales para evitar problemas operativos excesivos por dicha causa:

- ❑ Sobrecalentadores con **tubos verticales colgantes**, de amplio paso
- ❑ Sistemas de **limpieza por golpeteo**.
- ❑ Sobrecalentadores con **tubos de acero inoxidable austenítico** resistentes a la corrosión (Tipo 347)

No obstante no podrá evitarse una progresiva corrosión de los tubos con temperaturas superficiales del metal por encima de los 500 °C, lo que obligará a sustituciones periódicas de los mismos



# ASPECTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO

## Fuentes figuras

- 1: T.R. Miles, US DOE National Laboratories & others, Alkali deposits found in biomass boilers, 1996
- 2: Vattenfall, Corrosion and Fouling– problems which can be solved, 2000
- 3: Fuente desconocida
- 4: CHEC Research Centre, Alkali metals in biomass-fired systems, 1999
- 5: B. Sander, Emissions, corrosion and alkali chemistry in straw-fired combined heat and power plants, 2000
- 6: CHEC Research Centre, Release to the gas phase of Cl, K and S in Biomass fired grate boilers, 2003
- 7: Søren Knudsen Kær, Institute of Energy Technology, Aalborg University, DK, Ph.D. thesis, 2001
- 8: Søren Knudsen Kær, Institute of Energy Technology, Aalborg University, DK, Ph.D. thesis, 2001
- 9: Fuente desconocida
- 10: T.R. Miles, US DOE National Laboratories & others, Alkali deposits found in biomass boilers, 1996
- 11: Fuente desconocida
- 12: CHEC Research Centre, Alkali metals in biomass-fired systems, 1999
- 13: Søren Knudsen Kær, Institute of Energy Technology, Aalborg University, DK, Ph.D. thesis, 2001
- 14: Søren Knudsen Kær, Institute of Energy Technology, Aalborg University, DK, Ph.D. thesis, 2001
- 15: Dionel O. Albina, Theory and experience on corrosion of Waterwall and superheater tubes of waste-to-energy facilities, Columbia University, 2005
- 16: Søren Knudsen Kær, Institute of Energy Technology, Aalborg University, DK, Ph.D. thesis, 2001
- 17: CHEC Research Centre, Biomass and Corrosion, 1999
- 18: Dionel O. Albina, Theory and experience on corrosion of Waterwall and superheater tubes of waste-to-energy facilities, Columbia University, 2005
- 19: R. Riedl, J. Dahl, I. Obernberger, M. Narodoslawsky, Corrosion in fire tube boilers of biomass combustion plants, 1999.
- 20: Toma propia
- 21: CHEC Research Centre, Ash Melting Characterisation Using STA, 1999
- 22: CHEC Research Centre, Ash Melting Characterisation Using STA, 1999
- 23: Fuente desconocida
- 24: Fuente desconocida
- 25: B. Sander, Emissions, corrosion and alkali chemistry in straw-fired combined heat and power plants, 2000